

Sekundära emissioner från betonggolv med limmade golvmaterial

- effekter av alkalisk hydrolys och deponerade
nedbrytningsprodukter

ANDERS SJÖBERG

Institutionen för Byggnadsmaterial
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2001

Sekundära emissioner från betonggolv med limmade golvbeläggningar
- effekter av alkalisk hydrolys och deponerade nedbrytningsprodukter
ANDERS SJÖBERG

© ANDERS SJÖBERG, 2001.

Publication P-01:4
ISSN 1104-893X
Institutionen för Byggnadsmaterial
Chalmers Tekniska Högskola
412 96 Göteborg
Sverige
Tel.: +46 (0)31 772 1000

Omslag:

Illustrationen är en karikatyr av källan till sekundära emissioner. Ett fuktskadat golv med limmad golvbeläggning och deponerade nedbrytningsprodukter. Tecknad av Bo Olsson.

Reporoservice, Chalmers
Göteborg, Sverige 2001

Sekundära emissioner från belagda betonggol
- effekter av alkalisk nedbrytning och deponerade nedbrytningsprodukter

ANDERS SJÖBERG
Institutionen för Byggnadsmaterial
Chalmers Tekniska Högskola

Sammanfattning

Det är tidigare visat att förekomsten av VOC sänker kvaliteten hos inomhusluften. Flera indikationer antyder också att vissa organiska ämnen i inomhusluften (OCIA, organic compounds in indoor air) kan orsaka sjuka hus-problem (SBS, sick building syndrome). I denna avhandling undersöks och beskrivs en av de mest betydelsefulla källorna till förhöjda koncentrationer av VOC i inomhusluften i det nordiska byggnadsbeståndet. Källan, fuktskadade grund- och golvkonstruktioner, har ofta utpekats i samband med SBS utredningar och åtgärdats med gott resultat.

Genom att studera ca 100 provkroppar i olika försök och utvärdera mätningar som bland annat innefattar loggning av relativ fuktighet (RH, relative humidity) i konstruktionen och närmare 300 emissionsprovtagningar har kemisk nedbrytning av golvljmet fastställts som källa till sekundära emissioner. I avhandlingen sammanfattats orsakssammanhanget i en modell som baseras på förståelse av fysikaliska transportförlopp och reaktioner samt materialegenskaper som kan mätas icke-accelererat.

Med hjälp av utvärdering av mätresultat och genom parameterstudie i modellen har de avgörande parametrarna för nedbrytning av golvljmet och för avgivning av sekundära emissioner till inomhusluften identifierats och kvantifierats. Avgörande för nedbrytning av golvljmet är bland annat betongens fuktighet, dess pH-värde samt limningsmetoden. Avgörande för avgivningshastigheten av sekundära emissioner till inomhusluften är bland annat hastigheten hos nedbrytningen, genomgångsmotståndet hos mattan för nedbrytningsprodukter och lagringskapaciteten hos betong för nedbrytningsprodukter.

Lagringskapaciteten hos betong för nedbrytningsprodukter är en avgörande faktor för golvet framtida emission eftersom upp till hälften av nedbrytningsprodukterna kan transporteras ned och lagras i betongen. Deponerade nedbrytningsprodukter (OCIC, organic compounds in concrete) kan, om förhållandena ändras, avgå till inomhusluften under lång tid. Det därför viktigt att t.ex. vid en renoveringsåtgärd omsorgsfullt beakta totala mängden och penetreringsdjupet av OCIC.

Nyckelord: Betong, byggnadsmaterial, fukt, golvbeläggningar, golvljmet, IAQ, nedbrytningsprodukter, OCIC, sekundära emissioner, VOC

Secondary emissions from concrete floors with bonded flooring materials
- effects of alkaline hydrolysis and stored decomposition products

ANDERS SJÖBERG
Department of Building Materials
Chalmers University of Technology

Abstract

It has been demonstrated before that the presence of VOC lowers the quality of indoor air. There are also several indications that certain organic compounds in indoor air (OCIA) can give rise to sick building syndrome (SBS). This thesis investigates and describes one of the most important sources of elevated concentrations of VOC in indoor air in the Nordic building stock. This source, foundation and floor constructions damaged by moisture, has often been identified in conjunction with SBS investigations and has been given remedial treatment with good results.

By studying ca 100 test specimens in different experiments and evaluating measurements which included monitoring relative humidity (RH) in the construction, as well as almost 300 samples of emissions, chemical decomposition of flooring adhesive has been established as the source of secondary emission products. In this thesis, the causative relationship is summarised in a model which is based on an understanding of the physical transport processes and reactions, as well as material properties which can be measured by non-accelerated methods.

By evaluating the results of measurements and through parametric studies in the model, the critical parameters for decomposition of the adhesive and secondary emission to indoor air have been identified and quantified. The moisture content of concrete, its pH value and the method of bonding are some of the factors that govern decomposition of the adhesive. The rate of secondary emission to indoor air is governed, inter alia, by the rate of decomposition, the resistance of the flooring to the flow of decomposition products, and the storage capacity of the concrete for decomposition products.

The storage capacity of concrete for decomposition products is a critical factor for future emissions from the floor, since up to one half of the decomposition products can be transported downwards and stored in the concrete. The organic compounds stored in the concrete (OCIC) can, if conditions change, be emitted to the indoor air over a long period. It is therefore important, for instance during a renovation project, to make a careful note of the total quantity and penetration depth of OCIC in concrete.

Keywords: Adhesive, building materials, concrete, decomposition products, floorings, IAQ, moisture, OCIC, secondary emission, VOC.

Förord

Denna rapport är en direkt översättning av Anders Sjöbergs doktorsavhandling ”Secondary emissions from concrete floors with bonded flooring materials”. Det är ovanligt att en doktorsavhandling ges ut på två språk. Inom det aktuella området bedöms det dock finnas ett behov av en svensk översättning.

Avhandlingen utgör slutrapporten för tredje etappen i projektet ”Beständighet och livslängd hos golvmaterial på betong – påverkan från underlaget”. Projektet har finansierats av BFR (Byggnadsforskningsrådet) och SBUF (Svenska Byggnadsbranschens Utvecklingsfond).

Arbetet har utförts vid Institutionen för byggnadsmaterial, Chalmers tekniska högskola med professor Lars-Olof Nilsson som huvudhandledare. Helene Wengholt Johnsson, NCC-Teknik, Göteborg, har varit biträdande handledare samt även stått för entreprenörsaspekter omkring frågeställningarna i arbetet.

Först och främst vill jag tacka mina handledare för det stöd och de värdefulla råd jag fått under arbetets gång. Jag vill också tacka mina arbetskamrater på Institutionen för byggnadsmaterial och alla andra som tagit sig tid att hjälpa mig och förklara saker jag inte kunnat, ingen nämnd ingen glömd.

Jag vill rikta ett särskilt varmt tack till Tekn. Dr. Olle Ramnäs, Kemisk Miljövetenskap, Chalmers. Olle har varit till ovärderlig hjälp dels som en läromästare när det gäller mätning av VOC men även som en mentor vid övriga frågeställningar inom kemiområdet.

Slutligen vill jag tacka Anders Kumlin på AK-konsult Indoor Air AB, alla andra byggdoktorer samt övriga skadeutredare som hjälpt mig att förstå relevansen hos olika frågeställningar. Utan de långa diskussioner vi fört hade jag troligen förlorat mig i akademiska detaljer med ringa betydelse för verksamheten utanför högskolans väggar.

På grund av arbetets omfattning har jag försökt att författa rapporten med ett visdomsord i åtanke, vilket jag har fått av en mycket klok man här på Chalmers:

*So tell me quick and tell me true
- or else I have no time for you!*

*Not how this study came to be
- but what its news can do for me.*

*And if it is not meant for me
- please tell me fast so I may flee!*

Göteborg, oktober 2001

Tekn.Dr Anders Sjöberg

1	INLEDNING	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Tidigare studier.....	2
1.3	Syfte.....	9
1.4	Avgränsning	9
1.5	Hypotes	10
1.6	Disposition.....	11
2	MATERIAL & MÄTMETODER	14
2.1	Material	14
2.1.1	Betong	15
2.1.2	Avjämningsmassor.....	19
2.1.3	Golvlim.....	21
2.1.4	Mattor.....	25
2.1.5	pH-lösningar	28
2.2	Provkroppar.....	29
2.2.1	PF1 (plattan)	29
2.2.2	PF2 (koppen).....	30
2.2.3	PF3 (skålen).....	30
2.2.4	PF4 (hinken)	31
2.3	Mätmetoder.....	32
2.3.1	Fuktfördelning i betong.....	33
2.3.2	Kolväten i betong	36
2.3.3	Emission från ytan.....	41
3	EXPERIMENT DÄR MATTA OCH LIM KOMBINERATS	43
3.1	Provkropp.....	43
3.2	Mätmetod och mätresultat	45
3.3	Utvärdering av resultat	46
3.3.1	Beskrivning av generellt emissionsförlopp	46
3.3.2	Uppmätt emissionsförlopp	47
3.3.3	Massbalans av OH ⁻ samt nedbrytningsprodukter	49
3.3.4	Limmängdens betydelse	51
3.3.5	Massbalans vid olika limmängd – 5, 10 samt 15 g	53
3.3.6	Kritiskt pH för nedbrytning av lim.....	55
3.3.7	Betydelsen av materialval	57
4	MÄTNINGAR AV NEDBRYTNINGSPRODUKTERNAS TRANSPORTEGENSKAPER I MATERIAL	59
4.1	Motståndet R _q hos mattan	59
4.1.1	Provkropp	59
4.1.2	Provtagning	60
4.1.3	Resultat	60
4.1.4	Utvärdering.....	61
4.2	Diffusionskoefficient d _{OC} för butanol i betong	62
4.2.1	Provkropp	62
4.2.2	Mätning	62
4.2.3	Resultat	63
4.2.4	Utvärdering av δ _{OC} för butanol	64
4.2.5	Teoretisk utvärdering av δ _{OC} för etylhexanol.....	65

4.3	Bestämning av effektiv diffusionskoefficient D_{eff}	66
4.3.1	Provkropp.....	66
4.3.2	Provtagning	66
4.3.3	Resultat.....	68
4.3.4	Utvärdering av D_{eff}	68
4.4	Fältnätningar av effektiv diffusionskoefficient D_{eff}	71
4.4.1	Objekt 1 - ungefär 1 år gammal emissionskada	72
4.4.2	Objekt 2 – ungefär 3,5 år gammal emissionskada.....	73
4.4.3	Objekt 3 – ungefär 6 år gammal emissionskada.....	74
4.4.4	Objekt 4 – ungefär 10 år gammal emissionskada.....	75
5	STUDIES AV LIMFUKTENS BETYDELSE	76
5.1	Mätning av RH i betongytan	76
5.1.1	Provkropp.....	76
5.1.2	Fuktmätning	76
5.1.3	Resultat.....	77
5.1.4	Utvärdering	80
5.2	Avdunstning av Limfukt	81
5.2.1	Provkropp.....	82
5.2.2	Vägning.....	82
5.2.3	Resultat.....	82
5.2.4	Utvärdering	83
5.3	Inverkan av limningsmetod och limsort	84
5.3.1	Provkropp.....	84
5.3.2	Fukt- och Emissionsmätning.....	85
5.3.3	Resultat.....	85
5.3.4	Utvärdering	87
5.4	Inverkan av avjämningsmassa	90
5.4.1	Provkropp.....	90
5.4.2	Fukt- och Emissionsmätning.....	91
5.4.3	Resultat.....	91
5.4.4	Utvärdering	93
5.5	Inverkan av torktid av betongytan innan limning	95
5.5.1	Provkropp.....	95
5.5.2	Fukt- och Emissionsmätning.....	95
5.5.3	Resultat.....	96
5.5.4	Utvärdering	97
5.6	Diskussion och konklusion om fuktfördelning, limfukt och förhöjd EF	99
6	KVALITATIV MODELL	101
6.1	Allmänt	101
6.2	Betong med högt vct, ungefär 0,7	102
6.3	Byggfuktfri betong	104
6.4	Byggfuktfri betong med avjämningsmassa	106
7	KVANTITATIV MODELL	108
7.1	Producerad mängd OC i reaktionen	108
7.2	Koncentration OC i betong	111
7.3	Transport av OC i betong	114

7.4	Transport av OC genom matta	119
7.5	Fuktfixering i betong	120
7.6	Fukttransport i betong	122
7.7	Limfukt	124
7.8	Fukttransport genom matta.....	124
7.9	Numerisk lösning	125
8	KVANTIFIERING AV PARAMETRAR I MODELLEN,.....	126
8.1	Evaluering av lagringskapacitet för butanol i betong	126
8.1.1	Teoretisk evaluering.....	126
8.1.2	Evaluering ur mätdata	127
8.1.3	Utvärdering av evaluering.....	128
8.2	Evaluering av q_R för butanol från försök.....	131
8.2.1	Mängd OC som emitterat från provet genom mattan.....	131
8.2.2	Mängd OC lagrat i betongen.....	133
8.2.3	Mängd OC producerad vid reaktionen.....	134
8.2.4	Massbalans	136
8.3	Diskussion.....	137
9	JÄMFÖRELSE MELLAN MÄTRESULTAT OCH BERÄKNINGAR MED MODELLEN	138
9.1	Materialdata till beräkningarna	138
9.1.1	Materialdata för transport och fixering av fukt	138
9.1.2	Materialdata för transport, bildning samt fixering av butanol	141
9.2	Insugning av limfukt.....	142
9.2.1	Beräkning av försök 1, 300g limfukt per m ² på betong C1, vct 0,32	142
9.2.2	Beräkning av försök 2, 90g limfukt per m ² på betong C3, vct 0,42..	143
9.2.3	Beräkning av försök 3, 230g limfukt per m ² på betong C4, vct 0,66	145
9.2.4	Diskussion, insugning av limfukt.....	146
9.3	Jämförelse med tidigare mätningar	147
9.3.1	Fuktförlopp	147
9.3.2	Emission från ytan.....	148
9.3.3	OCIC	150
9.3.4	Diskussion, tidigare mätningar.....	150
9.4	Jämförelse med nya mätningar	152
9.4.1	PVC-matta	152
9.4.2	Linoleummatta	153
9.4.3	Löslagd matta	155
9.4.4	Diskussion.....	155
10	PARAMETERSTUDIE MED MODELLEN	157
10.1	Högsta möjliga fukttillstånd i ytan.....	157
10.1.1	Diskussion, högsta fukttillstånd	159
10.2	Emission av butanol från ytan.....	160
10.2.1	Inverkan av $q_{R,max}$	160
10.2.2	Inverkan av RH vid golvkonstruktioner med PVC-matta	161
10.2.3	Inverkan av RH vid golvkonstruktioner med Linoleummatta	163
10.2.4	Diskussion, emission från ytan.....	164
10.3	Transport och fixering av butanol i betong.....	165
10.3.1	Inverkan av olika bindningsantagande	165

10.3.2	Inverkan av RH vid PVC-matta	167
10.3.3	Inverkan av RH vid Linoleummatta.....	168
10.3.4	Diskussion, transport och fixering av OCIC	170
10.4	Kvarvarande OCIC efter vädring	170
10.4.1	Diskussion, kvarvarande OCIC efter vädring	173
11	DISKUSSION OCH KONKLUSION.....	174
11.1	Måluppfyllelse.....	174
11.2	Hypotesen.....	174
11.3	Beräkningsmodellen.....	175
11.4	Bindningsantagandet.....	176
11.5	Maximal bildad mängd OC	176
11.6	Emission av VOC från ytan.....	177
11.7	Deponerad OCIC i betongen.....	177
11.8	Praktisk tillämpning av koncentrationer i betongen	178
11.9	Konklusion	181
12	FORTSATT FORSKNING OCH UTVECKLING.....	182
13	REFERENSER.....	184

BILAGA 1	OSÄKERHET VID RH-MÄTNING MED ELEKTRISKA INSTRUMENT
BILAGA 2	OSÄKERHET VID MÄTNING AV KOLVÄTEN
BILAGA 3	MÄTTNAGSÅNGHALT FÖR NÅGRA OC
BILAGA 4	RESULTAT FRÅN SAMTLIGA BERÄKNINGAR

Förklaringar

Förkortningar

AT	Limningsteknik vid mattläggning (applying technique)
DT	Torktid för betongytan innan matta limmas (drying time)
FLEC	Field and Laboratory Emission Cell
IAQ	Inomhusluftens kvalitet (Indoor Air Quality)
OC	Kolväteföreningar (organic compound)
OCIA	Kolväteföreningar i inomhusluften (OC in Indoor Air)
OCIC	Deponerade nedbrytningsprodukter (OC In Concrete)
OT	Öppenhållandetid vid limning (“open time”)
SBS	Sjuka hus-sjukan (Sick Building Syndrome)
VOC	Flyktiga kolväten (Volatile Organic Compound)

Symbols & units

c_0	$\text{kg/m}^3_{\text{air}}$	bakgrundskoncentration av OC
c_1	$\text{kg/m}^3_{\text{air}}$	koncentration av OC (låg)
c_2	$\text{kg/m}^3_{\text{air}}$	koncentration av OC (hög)
c_{air}	$\text{kg/m}^3_{\text{air}}$	koncentration av OC i luft
c_s	$\text{kg/m}^3_{\text{air}}$	koncentration av OC i ytan
c_{sat}	$\text{kg/m}^3_{\text{air}}$	koncentration av OC vid mättnad
c_w	$\text{kg/m}^3_{\text{water}}$	koncentration av OC i vatten
CEM	$\text{kg/m}^3_{\text{concrete}}$	cementinnehåll
C_{bound}	$\text{kg/m}^3_{\text{mtrl}}$	total mängd av bundet OC per volym material
C_c	$\text{kg/m}^3_{\text{mtrl}}$	mängd OC bundet till cellväggar per volym material
C_m	$\text{kg/m}^3_{\text{mtrl}}$	mängd OC bundet i matrisen per volym material
C_{air}	$\text{kg/m}^3_{\text{mtrl}}$	mängd OC i luftporer per volym material
C_s	$\text{kg/m}^3_{\text{mtrl}}$	mängd OC i ytan per volym material
C_{tot}	$\text{kg/m}^3_{\text{mtrl}}$	total mängd OC per volym material
C_w	$\text{kg/m}^3_{\text{mtrl}}$	mängd OC löst i porvätskan per volym material
d_{OC}	m^2/s	diffusionskoefficient för OC i gasfas
d_v	m^2/s	diffusionskoefficient för vatten i ångfas
d	m	tjocklek hos betongplatta
D_{eff}	m^2/s	effektiv diffusionskoefficient för OC
D_w	m^2/s	diffusionskoefficient för total vattentransport
D'_w	m^2/s	diffusionskoefficient för vattentransport i vätskefas
EF	$\mu\text{g}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$	emissionsfaktor
g_s	$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$	fukttransport (kapillärsugning), porvätsketryck som drivande potential
g_v	$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$	fukttransport, ångtryck som drivande potential
g_w	$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$	total fukttransport
G	kg/m^2	upptagen / avgiven mängd fukt
k_p	kg/m	vätskepermeabilitet

M	g/mol	molvikt
p	$\text{m}^3_{\text{pore}}/\text{m}^3_{\text{mtrl}}$	porositet
p_a	$\text{m}^3_{\text{air}}/\text{m}^3_{\text{mtrl}}$	tillgänglig porositet
P_w	Pa	porvattentryck
Q	kg/m^2	upptagen / avgiven / producerad mängd OC
q_{air}	$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$	OC-flöde genom diffusion i gasfas
q_m	$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$	OC-flöde genom migration i matrisen
q_{mw}	$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$	OC-flöde genom att OC löst i vatten transporteras med masstransport av vattnet
q_R	$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$	producerad mängd OC per tid och yta
q_{tot}	$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$	totalt flöde av OC
q_w	$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$	OC-flöde genom diffusion av OC i vatten
R_{fc}	s/m	genomgångsmotstånd mot OC hos matta (floor covering)
RH	%	relativ fuktighet (relative humidity)
RH_{act}	%	aktuell relativ fuktighet
RH_{crit}	%	kritisk relativ fuktighet
S	$\text{kg}/\text{m}^3_{\text{water}}$	löslighet (av OC) i vatten
t	s	tid
t_1	s	första tiden
t_2	s	andra tiden
v	$\text{kg}/\text{m}^3_{\text{air}}$	ånghalt (vapour content)
v_{sat}	$\text{kg}/\text{m}^3_{\text{air}}$	mättnadsånghalt
V_a	m^3	tillgänglig porvolym
V_{mtrl}	m^3	materialets totala porvolym
V_p	m^3	porvolym
w	$\text{kg}/\text{m}^3_{\text{mtrl}}$	fukthalt
w_{ad}	$\text{kg}/\text{m}^3_{\text{mtrl}}$	fukthalt i vått lim
w_n	$\text{kg}/\text{m}^3_{\text{mtrl}}$	kemiskt bundet vatten
w_{max}	$\text{kg}/\text{m}^3_{\text{mtrl}}$	maximal fukthalt
w/c	–	vatten-cementtal, vct (water cement ratio)
x	m	längd / tjocklek
Z_{fc}	s/m	genomgångsmotstånd mot vattenånga hos matta
Z_{ad}	s/m	genomgångsmotstånd mot vattenånga hos en limfilm
$?_w$	kg/m^3	densitet hos vatten
$?$	Ns/m^2	dynamisk viskositet

1 Inledning

1.1 Bakgrund

På senare tid har begreppet ”sjuka-hus-sjukan” kommit till användning allt oftare. Det handlar om människor som inte mår bra när de befinner sig i vissa lokaler. Symptomen kan vara huvudvärk, torra slemhinnor och trötthet. Det är svårt att ge en medicinsk förklaring till besvären men det ligger nära till hands att tro att det är något hos byggnaden som påverkar dessa människor.

Den medicinska forskningen har än så länge inte kunnat peka på några enskilda faktorer i inomhusmiljön eller hos byggnaden som orsakar denna ohälsa. Mycket tyder ändå på att det finns vissa organiska ämnen i inomhus luften som kan påverka dessa människor på ett sätt vi inte förstår, Andersson *et al* (1997). Internationellt förkortas dessa ämnen OCIA (Organic Compounds in Indoor Air). Idag är det omöjligt att avgöra vilka ämnen eller vilken kombination av ämnen som orsakar ohälsa i våra byggnader. Istället tillämpas ofta försiktighetsprincipen. Det innebär att koncentrationen av OCIA samt källorna till dem minimeras. På så sätt finns det färre ämnen och lägre halt av dessa ämnen som människorna i byggnaden exponeras för.

Denna studie belyser en av källorna till OCIA. Källan som studerats är sekundära emissioner av flyktiga organiska ämnen (VOC, Volatile Organic Compounds) från kombinationer av limmade mattor av PVC eller linoleum på undergolv av betong. Denna konstruktion orsakar ibland sensoriska problem som exempelvis avvikande lukt. Men det kan också förekomma rent tekniska problem som minskad limverkan och bubblor på mattan. Vi vet inte med säkerhet om människor mår dåligt av de VOC som emitteras från dessa konstruktioner men mycket tyder på att det förekommer hälsoproblem i byggnader med sekundär emission från golven. Men vi vet åtminstone att VOC kan sänka IAQ, d.v.s. kvaliteten på inomhusluften, Salthammer (1999).

Definitionen av primära och sekundära emissioner ges av Salthammer et al (2000):

Primary emission product: The physical release of compounds which are present in a new product.

Secondary emission product: Compound produced by a chemical reaction in the material or in the indoor environment.

På svenska blir det ungefär följande

Primära emissionsprodukter: Fysisk frigjorda ämnen som finns representerade i en nytillverkad produkt.

Sekundära emissionsprodukter: Ämnen som bildats av en kemisk reaktion i materialet eller i inomhusmiljön.

1.2 Tidigare studier

Flera nordiska studier har tidigare gjorts för att beskriva emissionen från golv-kombinationer med limmad PVC-matta på betong. I Wengholt Johnsson (1995) görs en sammanställning av de viktiga studierna på området före 1995.

Fram till den tiden hade undersökningarna i stort inriktat sig på att mäta emissioner från ytan. Det var främst mätningar av egenemissioner från golvbeläggningar som var intressant. Några studier hade dock inriktat sig på att mäta emissionen från hela golvsystem med eller utan ett mellanskikt. Dessa mellanskikt består av en fukt- eller alkalispärr eller en avjämningsmassa mellan betongen och den limmade mattan.

Sammanställningen i denna rapport tar därför bara med de viktigaste undersökningar och rapporter som publicerats under tidsperioden 1995 – 2000 och behandlar alkalisk hydrolys av golvmaterial. Förutom rapporter som sammanställs har det gjorts ett antal mindre projekt och examensarbeten. Dessa är huvudsakligen utförda av de tekniska högskolorna i Sverige.

Några av studierna som beskrivs nedan går in på bakomliggande orsaker medan andra utvidgar kombinationerna att innehålla fler komponenter, såsom avjämningsmassa och olika typer av mattor. I sammanställningen av tidigare studier finns också rapporter där det aktuella kunskapsläget, vid respektive publicering, sammanställts och utvärderats.

Kemisk emission från golvsystem – effekt av olika betongkvalitet och fuktbelastning

Wengholt Johnsson (1995) studerade emissionen från 19 olika provkroppar. Provkropparna bestod av materialkombinationer av ”normal” husbyggnadsbetong ($v_{ct}=0,66$) eller byggfuktfri betong ($v_{ct}=0,42$) som göts i rostfria skålar med 200 mm diameter. Betongen fick torka till olika fuktnivåer innan matta limmades på provkropparna. Några provkroppar innehöll ett skikt avjämningsmassa mellan betong och matta.

Studien visade att hög emission av butanol och 2-etylhexanol uppstod då matta limmades på normal betong med 95% RH (relativ fuktighet) på karakteristiskt djup, det vill säga på det djupet som har en fuktnivå som motsvarar nivån hela betong får då fukten utjämnats efter mattan limmats. Hög emission uppstod också då matta limmades på byggfuktfri betong med 85 % RH på karakteristiskt djup. Emissionen var låg eller ej detekterbar då matta limmats på provkroppar av byggfuktfri betong som belagts med avjämningsmassa samt på provkroppar av normal husbyggnadsbetong med RH mindre eller lika med 91 % RH.

I studien undersöktes också egenemission (kolväten inklusive formaldehyd) från betong med olika tillsatsämnen och avjämningsmassor med och utan tillsatsämnen. Egenemissionen från betongerna var låg. Avjämningsmassa med melaminbaserat tillsatsmedel emitterade höga halter kolväten inklusive formaldehyd, en till några veckor efter gjutning. Avjämningsmassa utan tillsatsmedel emitterade också höga halter kolväten förutom formaldehyd.

I några golvsystem utfördes även en analys av alkalihalten i betong och avjämningsmassa. Mätningarna visade förhöjd halt i betongens yta. Halten av kaliumoxid var flera gånger högre de översta 2 mm i betongens yta samt 2 mm i betongen precis under avjämningsmassan. Halten i avjämningsmassan var lägre än basnivån i betongen.

Kemisk emission från golvlim på betong – effekt av olika fukt- och alkalispärrar

Fritsche (1996) studerade emissionen från 11 olika provkroppar. Provkropparna bestod av lim och eventuellt spärrskikt på normal husbyggnadsbetong ($v_{ct}=0,66$) eller byggfuktfri betong ($v_{ct}=0,42$) som göts i rostfria skålar med 200 mm diameter. Ingen matta applicerades för att korta tiden från limning till mätning. Spärrskikten bestod av olika sorters avjämningsmassa samt mineraliska och organiska ”alkalispärrar”. Vid mätningen användes aktivt kol som adsorbent istället för TENAX TA som är vanligast vid den här typen av mätningar. Jämförande mätningar visade dock god överensstämmelse mellan dessa adsorbenter.

Studien visade att emissionen var lägre från de provkroppar där spärrskikt använts. Emissionen från provkroppen med lim på byggfuktfri betong var lägre än från den med normal husbyggnadsbetong. Mätningar av egenemissionen från limmet direkt ur burken visade att limmet även i onedbrutet tillstånd avger butanol och etylhexanol. Dessa kolväten förekommer vanligtvis som nedbrytningsprodukter vid alkalisk hydrolys av golvbeläggningar.

Golvmaterial på olika typer av fuktiga betonggolv – översikt och kommentarer till undersökningar med inriktning på kemisk nedbrytning och emission

Gustafsson (1996) presenterade och sammanställde fem svenska laboriestudier där provkropparna som gemensam faktor bestått av betong som belagts med olika kombinationer med avjämningsmassa, vattendispergerat lim och PVC-matta. I samtliga fall hade normal husbyggnadsbetong och byggfuktfri betong gjutits i skålar av rostfritt stål. PVC-matta har limmats på betongen efter att den torkat till olika fuktnivåer.

Gustafsson (1996) beskriver att samtliga fem studier visar att:

- Golvbeläggning på fuktiga underlag, framförallt betong, medför risk för kemisk nedbrytning av limskikt och matta.
- Hög RH i underlaget ökar generellt risken för förhöjd samt förändrad emission.
- Underlag av lågalkalisk avjämningsmassa ger generellt lägre emission från golvkonstruktionen är motsvarande prover med enbart betong. Denna skillnad är tydligast vid höga fuktnivåer
- Emissionen utgörs huvudsakligen av nedbrytningsprodukter från golvlimmet.

Gustafsson (1996) skriver att resultaten från studierna visar också att limmets sammansättning har betydelse för vilka ämnen som emitteras. De höga emissionsnivåer som har uppmätts i några av studierna kan delvis förklaras av limningsteknik och mängd påfört lim.

Kemisk emission från golvsystem av limmad PVC-matta på självtorkande betong

– inverkan av limningsteknik, torkförlopp samt cement-, lim- och mattyper

Fritsche *et al* (1997) studerade emissionen från 10 olika provkroppar, som bestod av PVC-matta, vattendispergerat lim och byggfuktfri betong ($v_{ct}=0,42$). Torktiden, den tid som betongytan var exponerad mot luft innan limning, varierades. Mattan limmades med olika limningsmetoder samt med olika torktid. Det gjordes även försök där betongen baserades på anläggningscement med låg alkalihalt.

Studien visade att emissionen blev störst vid så kallad våtlimning, då mattan trycks fast omedelbart efter att limmet spridits på betongen. Lågst emission uppkom då mattan häftlimmades, det vill säga att mattan lades ner i det våta limmet och togs genast upp igen. Limmet fick sedan torka så länge att bara klibb kvarstod innan mattan slutligen trycktes fast på betongen. Provkropparna med lång torktid och lågalkaliskt cement gav också låga emissioner.

Studiens slutsats är att följande alternativ rekommendationer för att minska risken för hög kemisk emission kan ges:

- Löslägg mattan för att slippa fukttillskottet från limmet.
- Avjämna byggfuktfri betong med avjämningsmassa, kombinerat med ett betongunderlag som är tillräckligt uttorkat. I en avjämningsmassa baserad på aluminatcement är alkalihalten låg och det finns en fuktkapacitet så att limfukten kan fördelas.
- Använd lång väntetid vid limning för att minska fukttillskottet från limmet. Jämfört med de två första alternativen är detta en osäkrare metod.

Betong för sunda golv

– fuktdimensionering, materialval och produktion

Svenska Betongföreningen (1997) kan ses som en sammanställning av kunskapsläget år 1996-97. Rapportens huvudtext behandlar problemet med kombinationen ytmaterial och fukt i betonggolv. Där ges inledande begreppsbestämning och praktiska råd vid val av betongkvalitet och vid val av ytmaterial. Ett avsnitt i rapporten handlar även om produkttekniska egenskaper. I appendix behandlas frågor som Inomhusmiljö och emissioner. Där beskrivs exempelvis kemiska ämnen i inomhusluften och betongens inverkan i kombination med andra material. Vidare behandlas konstruktionsaspekter, fuktdimensionering, fukt- och emissionsmätning samt referensobjekt.

Betong i byggnader

– en värdering av konsekvenser för inneklima og helse

Blom (1998) studerade emissionen från 152 provkroppar. Provkropparna bestod av matta, lim, olika spärnskikt samt sju olika betongkvaliteter. I studien användes två olika PVC-mattor och fyra olika lim varav ett försökslim med låga emissionsvärden. Limmet fick namnet CascoProff Solid då det senare under 1998 lanserades på marknaden. Som spärnskikt användes fyra olika avjämningsmassor och två fuktspärrar. Fuktspärrarna var baserade på vattenglas respektive epoxi. Betongkvaliteterna hade olika v_{ct} och olika mängder av tillsatsmedel. V_{ct}

varierade från 0,74 (normal husbyggnadsbetong) till $v_{ct}=0,39$ (byggfuktfri betong).

Studien hävdade att de lim som används kommersiellt kan ge lukt i rumsluften första halvåret och att det som emitteras från systemet i hög grad är butanol, 2-etylhexanol och 2-(2-butoxi)etanol. Dessa kolväten kommer från nedbrytning av limmet. Temperaturhöjning i golvet från till exempel värmekablar bidrar till ökad nedbrytning av limmet. Rapporten visade också på att emissionen minskas genom att använda;

- Nya, lågemitterande limtyper
- Avjämningsmassa utan tillsatser

Långtidseffekter av alkalisk nedbrytning i golv

Alexandersson (1998) studerade emissionen 2 – 3 år efter limning från 20 olika provkroppar. I Alexandersson (1996) presenteras första mätningen av provkropparna som skedde efter ungefär ett halvt år. Provkropparna bestod av PVC-, polyolefin- samt linoleummatta, vattendispergerat lim, avjämningsmassa och betong.

I undersökningen studerades fyra PVC-mattor, en polyolefinmatta och två linoleummattor. Dessa sex mattor kombinerades med sju vattendispergerade lim och två betongkvaliteter (v_{ct} 0,5 samt 0,7).

Undersökningen visade att:

- Avjämningsmassa förhindrade nedbrytningen av golvmaterial i samtliga fall. Det innebar att golvsystem med avjämningsmassa hade genomgående låg emission.
- Emissionen var låg från golvsystem med linoleummatta och polyolefin.
- Valet av material påverkade emissionens storlek. Genom att exempelvis använda ett annat lim i en för övrigt lika golvkonstruktion mångdubblades emissionen.
- Butanol och 2-etylhexanol har olika tidsförlopp. Vid mätningar efter ett halvt år dominerades emissionen av butanol medan 2-etylhexanol dominerade vid mätningar efter två år.

Transportprocesser och reaktioner i belagda betonggolv. – olika faktorerers inverkan på emissionen från golvkonstruktioner

Sjöberg (1998a) studerade fyra väsentliga parametrar för emission från golvkonstruktioner. Parametrarna var ytfukt, alkalifördelning, organic compounds in concrete (OCIC) samt emission av OC från ytan. Rapporten beskriver en kvalitativ modell som bygger på fysikalisk förståelse av transportprocesser och reaktioner. Den kvalitativa modellen redovisas även i kapitel 6 i föreliggande rapport.

Kapitel 2, 3, 5, 6 i föreliggande rapport är mer eller mindre direkt hämtade ur Sjöberg (1998). Förutom dessa delar innehåller Sjöberg (1998) mätningar av alkalifördelning och karbonatisering, samt en något mer omfattande diskussion av resultaten från mätningarna.

Golvmaterial på Betongunderlag – Fältmätningar av torktider och emissioner i kv. Gädrået, Umeå.

Wengholt Johnsson (1998) redogör för ett fältprojekt där fukt- och emissionsmätningar använts för att utvärdera funktionen hos olika golvkonstruktioner. Mätningarna omfattade torkförlopp i betongplatta på mark samt mellanbjälklag av betong samt emissioner från golven när huset var relativt nytt och drygt två år efter mattläggning.

De golvkonstruktioner som ingick i studien bestod av traditionell respektive snabbtorkande betong. Hälften av bjälklagen försågs med en lågalkalisk avjämningsmassa och golvbeläggningen var antingen PVC-matta limmad med konventionellt lim eller polyolefinmatta limmad med lim fritt från lösningsmedel.

Undersökningen visade att:

- Betongbjälklag med lågalkalisk avjämningsmassa gav lägst emission oavsett betongsort.
- Nedbrytningen påbörjas snabbt efter mattläggning, men avtar med tiden.
- Det var främst butanol och 2-etylhexanol som emitterades.
- Lägst emissioner uppmättes generellt två år efter mattläggning.
- Efter två år hade även fukten i betongen till stor del torkat ut.

Alkalitetsmätning av golvavjämningsmassa utsatt för påskjutande alkalitet

Björk et al (1999) studerade avjämningsmassans alkalibuffrande förmåga. Provkropparna som användes var 56 × 36 cm stora lådor av styv härdplast som fylldes med 20 cm husbyggnadsbetong ($v_{ct}=0,55$). Efter att betongen konditionerats till 95 %, 90 % respektive 80 % RH göts 10 mm avjämningsmassa av tre olika sorter på ytan. PVC-matta limrades med ett vattendispergerat lim efter 1 vecka. Mätning av alkaliteten skedde på tre olika nivåer i avjämningsmassan samt i betongen 1, 6 samt 12 månader efter mattläggning. Jämförande provserier på avjämningsmassa som gjutits i petriskålar utfördes som referens. Provtagningen skedde på två olika sätt, porpressning av bitar samt uttagning av kax från borrhål. Analysen gjordes med pH elektrod samt med titrering av saltsyra mot indikator metylorange som har omslagsområde omkring pH = 3. Mätning av natrium och kaliumjoner utfördes med flamjonisationsspektroskopi.

Studien visade att :

- De studerade avjämningsmassorna inte tillåter alkalisk fukt att transporteras från betongen till området under mattan på 12 månader.
- Betongens RH på karakteristiskt djup vid läggning av avjämningsmassa har ingen avgörande betydelse för alkalivandring.
- Karbonatisering innan mattläggning sänker alkaliteten i avjämningsmassan
- Enkel eller dubbelsidig uttorkning påverkar inte alkalivandringen från betong till avjämningsmassan nämnvärt
- Titrering med metylorange som indikator är ingen bra metod att mäta alkalitet i utpressat porvatten från avjämningsmassa då den inte detekterar karbonatiseringen korrekt.

Alkalisk nedbrytning av golvkomponenter

Björk et al (1999) har brutit ned 20 vanliga komponenter i golvmatta och golvlim. Komponenterna som undersöktes var exempelvis mjukgörare i PVC, fem olika polymerdispersioner, primer, klubbgivare, PVC-polymer och förtjockare. Komponenterna lades direkt på en alkalisk bädd av en blandning av aluminiumoxid och natriumhydroxid i ett provrör. Bädnen bestod av aluminiumoxid och hade preparerats med natriumhydroxid så att pH-värdet blev antingen 11 eller 13. Fuktigheten i bädnen hölls konstant genom att små behållare med saltlösningar placerats i provrören. Fuktnivåerna i provrören var 75, 95 eller 100 % RH. Sammanlagt analyserades 120 kombinationer.

Analysen av kolväten i luften i provröret skedde efter ungefär 5 månader för provrören med 75 och 100 % RH. På grund av funktionsproblem med analysutrustningen skedde analysen av provrören med 95 % RH efter ungefär 10 månader. Provtagnings- och analysmetoden provades ut på några av proven för provtagning med SPME (solid phase microextraction) och efterföljande analys med GC-MS. Provtagningen med SPME var för arbetskrävande så metoden ändrades. Provtagningen utfördes på alla prover med automatisk headspace-injektor och efterföljande analys med GC-MS.

Undersökningen visade att:

- Fukt och alkaliniteterna påverkar nedbrytningen av vissa ingående komponenter. Bland annat polymerdispersioner i lim och några mjukgörare i PVC-matta.
- Delkomponenterna uppvisar kraftigt varierande motståndskraft mot fukt/alkalisk nedbrytning. Stora variationen bland produktgrupperna.
- För flera av komponenterna medförde en ökning av alkaliteten en kraftigt ökning av nedbrytningsprodukter trots att den relativa fuktigheten hölls på en i sammanhanget låg nivå. Detta skedde bland annat för en polymerdispersion samt för några mjukgörare, dock inte alla.

Fukt- & emissionsförhållanden vid limning av PVC- och linoleummatta på betong.

Sjöberg & Wengholt Johnsson (1999) studerar mängden limfukt samt insugning och avdunstning vid limning. Detta redovisas även i kapitel 5.2 i föreliggande rapport.

Dessutom görs emissionsmätningar på ytan av 21 provkroppar. Dessa har torkats olika tid och sedan limmats på olika sätt. Detta redovisas även i kapitel 5.5 i föreliggande rapport.

Branschstandard:

Mätning av emissionsegenskaper hos sammansatta golvkonstruktioner.

GBR (1999) har givit ut en standard för svensk golvbransch som möjliggör testning av emissionsegenskaper hos sammansatta golvkonstruktioner.

När en enskild produkts egenskaper skall testas byggs produkten in i en golvkonstruktion där övriga komponenter är väl definierade, så kallade

referensprodukter. Parallellt tillverkas en referenskropp enbart bestående av referenskomponenter. Testkroppen och referenskroppen tillverkas och hanteras så identiskt som möjligt.

Emissionen från ytan mäts på båda provkropparna 26 veckor efter limning av mattan. Resultatet uttrycks som kvoten mellan TVOC-emissionen hos testkonstruktionen och referenskonstruktionen. Resultatet speglar såväl testkonstruktionens egenemission som sekundära emissioner orsakade av till exempel alkalisk nedbrytning.

1.3 Syfte

Syftet med denna studie har varit att öka kunskapen om samverkan inom golv-materialkombinationer där betong ingår. Att betong valdes beror på att den skapar en aggressiv miljö som påverkar beständigheten hos många andra material.

Om möjligt, skulle en modell skapas som kunde förutse förkortad livslängd i golvmaterialkonstruktioner. Utifrån modellen skulle sedan en metodik att undvika förkortad livslängd av (polymera)material i kombination med betong tas fram. Med förkortad livslängd menas att funktionen, redan efter kort tid, inte längre kan upprätthållas.

Modellen skulle bygga på fysikalisk förståelse av förlopp i golvkombinationen. Den skulle vara en livslängdsmodell för att förutse funktionen hos materialkombinationer under hela dess livslängd. Modellen skulle baseras på materialegenskaper som kunde mätas hos nya material.

Metoder för att icke accelererat mäta dessa egenskaper skulle också utvecklas i projektet.

Modellen skulle också kunna användas till ta fram kunskap för att hindra eller begränsa emissionen av VOC till inomhusluft, från byggnaden, på lång och kort sikt.

1.4 Avgränsning

Studien begränsas till att behandla ett urval av nordiska golvmaterialkombinationer och effekter som uppkommer genom påverkan av golvbeläggningarna underifrån. Golvbeläggningarnas livslängd studeras, inte livslängden hos kompletta golvsystem.

Det är främsta koncentrationer av olika ämnen i konstruktionen samt massbalansen i samband med transportprocesser och kemiska reaktioner som studeras.

Projektet begränsas till att behandla ett begränsat urval av vanligt förekommande golvmaterial på undergolv av några vanliga betongtyper. Som golvbeläggning har olika typer av PVC-matta samt linoleummatta använts. Dessa mattor är löslagda eller limmade på underlaget. Ett begränsat urval av vattenbaserade dispersionslim har använts. I några fall har även ett mellanskikt av avjämningsmassa lagts mellan mattan och betongen.

Vid analysen av sekundära emissionsprodukter har endast två av dem studerats. Dessa två är goda indikatorer på att nedbrytning av akrylatsampolymeren i limmet.

- Den ena VOC är en butylalkohol. Det heter 1-butanol eller n-butanol men för enkelhetens skull kallas det butanol eller BuOH i rapporten.
- Den andra är en etylhexylalkohol. Det heter 2-etylhexylalkohol eller 2-etyl-1-hexanol men kallas etylhexanol eller EtHx i rapporten.

1.5 Hypotes

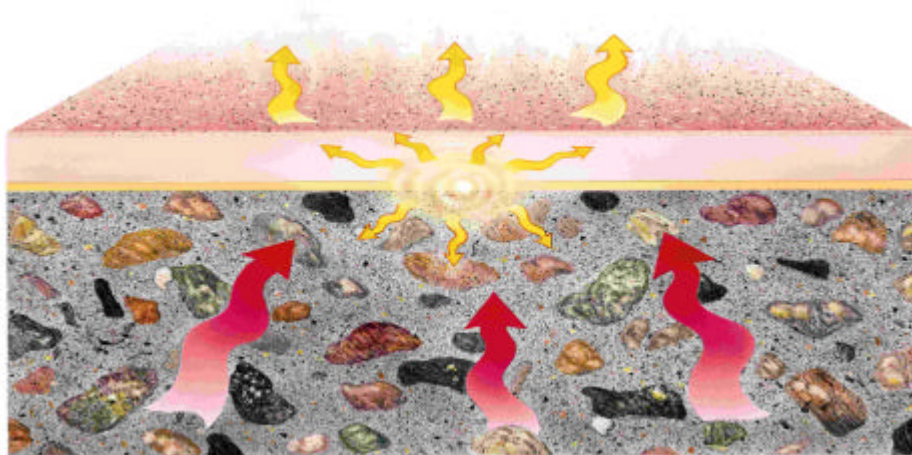
Hypotesen som använts för att förklara samverkan i golvkonstruktionen bygger på mer eller mindre accepterade teorier om material samt erfarenheter från tidigare projekt.

Modellen bygger på att vissa betydelsefulla ämnen i materialen migrerar på grund av koncentrationsskillnader. Dessa ämnen kan flytta på sig inom materialet och ofta också mellan de olika materialen. Vattenånga och OC kan till och med lämna materialsystemet genom att avdunsta från ytan.

Vissa ämnen i undergolvet kan enligt hypotesen påverka golvbeläggningen. Exempel på sådana ämnen är hydroxidjonerna (OH^-) i figur 1.1. Dessa ämnen kan under vissa förhållanden röra på sig och migrera uppåt i undergolvet. Bland annat krävs att den relativa fuktigheten (RH) i materialet överskrider ett kritiskt värde för att detta ska ske eftersom transporten förutsätts ske i vattenfas. Förutsättningarna för migrationen varierar i tiden.

Mängden av ämnet som migrerar uppåt beror av transportegenskaperna för detta ämne i undergolvs materialet och av de gradienter som uppstår i undergolvet samt tätheten hos golvmaterialen. Ett mellanläggsmaterial som exempelvis en avjämningsmassa eller en alkalispärr kan hindra eller möjliggöra fortsatt vandring av ämnet beroende på detta materials transportegenskaper.

I golvmaterialets underkant kan ämnet reagera med någon komponent i limmet eller golvbeläggningen. Ämnet förbrukas då, vilket skapar en fortsatt gradient som möjliggör fortsatt migration underifrån. Reaktionen förändrar golvmaterialiet och ger kolväten som i sin tur migrerar vidare upp genom golvmaterialiet och påverkar egenskaperna. En del kolväten kan nå överytan, förflyktigas och emittera till omgivande luft. Andra delar av kolvätena kan migrera ner i betongen och bli kvar där under lång tid.



Figur 1.1 Vissa ämnen i betongen (OH^-) reagerar med golvbeläggningen under speciella betingelser. Reaktionsprodukterna, Organic Compounds (OC) kan dels migrera genom ytbeläggningen och nå ytan där de avdunstar eller migrera ner i betongen där de blir kvar för lång tid.

1.6 Disposition

Kapitel 1, Inledning

Här ges en introduktion till forskningsområdet samt en sammanfattning av studier och sammanställningar som gjorts inom området.

Studiens syfte och avgränsningar beskrivs. Vidare diskuteras hypotesen bakom studien. Den förklaras som en första kvalitativ modell av samverkan i material. Senare i kapitel 6 och 7 utvecklas modellen.

Kapitel 2, Material & Mätmetoder

Här beskrivs de material som valts till studien. Fyra till sju material har valts från varje ingående materialgrupp. Dessa grupper är betong, avjämningsmassa, golvlím samt matta. De sex olika provformer som har använts i studien beskrivs också.

Därefter beskrivs de instrument och mätmetoder som använts i studien. Undersökningarna i studien bygger på mätningar av tre parametrar; ytfukt, koncentrationen av deponerade nedbrytningsprodukter, så kallade OCIC (organic compounds in concrete), och emissionsfaktorn EF från materialytor.

Kapitel 3, Experiment där matta och lim kombinerats

I kapitlet beskrivs ett flerkatorförsök av matta, lim och alkalisk lösning. Undersökningen syftar till att klarlägga de samband som styr alkalisk hydrolys av golvlím. Bland annat studeras limmängdens betydelse, kritiskt RH (RH_{krit}) för limmet samt generella emissionsförlopp.

Undersökningen är tidigare beskriven i Sjöberg (1998a). Resultat från den undersökningen presenteras och diskuteras.

Kapitel 4, Mätningar av nedbrytningsprodukternas transportegenskaper i material

I det här kapitlet beskrivs undersökningar av transport av butanol och etylhexanol i betong samt genom mattor. Försöken görs dels med olika typer av koppförsök och dels genom att mäta och utvärdera inträngningsprofiler av butanol och etylhexanol i betong.

Mattornas motstånd mot transport av OC mäts liksom diffusionskoefficient för OC i betongen. Resultat från undersökningen presenteras och diskuteras.

Kapitel 5, Studier av limfuktens betydelse.

Här beskrivs undersökningar av inverkan av limfukt. Först beskrivs försök där insugning och avdunstning av limfukt studerats. Sedan beskrivs försök där variationer av emissionen från golvsystem studerats. Inverkan av limfukten har på olika sätt varierats i dessa golvsystem.

Undersökningen är tidigare beskriven i Sjöberg (1998a). Resultat från den undersökningen presenteras och diskuteras.

Kapitel 6, Kvalitativ modell

I det här kapitlet beskrivs en kvalitativ modell av samverkan mellan materialen. I modellen ingår fukt i betong, alkali, reaktionsprodukter, VOC uppåt samt OCIC nedåt. De viktigaste egenskaperna hos materialen belyses och diskuteras.

Förloppet hos de olika transportprocesserna i systemet samt reaktionerna mellan ämnen i materialen beskrivs för tre typfall av limmad PVC-matta på underlag av:

- normal husbyggnadsbetong
- byggfuktfri betong
- byggfuktfri i betong med avjämningsmassa

Kapitel 7, Kvantitativ modell

Sambanden som redovisas i den kvalitativa modellen utvecklas och beskrivs matematiskt. Vedertagna förklaringsmodeller för fixering och transport av fukt ges en plats i den kvantitativa modellen.

Begrepp, samband och ekvationer som ligger till grund för fixering, transport och emission av OC introduceras och förklaras. Detta är i många bitar mycket likt motsvarande förklaringsmodeller för fukt.

Kapitel 8, Kvantifiering av parametrar i modellen,

I kapitlet kvantifieras några av de parametrar som redovisats i kapitel 7, som inte tidigare uppmätts. Kvantifieringen bygger på mätningar i studien och görs av parametrar vars värden inte återfunnits i litteraturen. Dessa parametrar är:

- lagringskapacitet av butanol i betong
- maximal bildningshastighet för butanol

Kapitel 9, Jämförelse mellan mätresultat och beräkningar med modellen

Här redovisas jämförelser mellan beräkningar med modellen och uppmätta resultat. Först görs jämförelser med uppmätt höjning av fuktnivån i betongen i samband med limning av matta. Därefter görs jämförelser med uppmätt OCIC i betongen och sist med emission av VOC från ytan i ett flertal olika fall.

Kapitel 10, Parameterstudie med modellen

I det här kapitlet används modellen för att studera effekten av olika parametrar. Till att börja med görs en analys av maximalt acceptabel fuktnivå i ytan efter limning av ett antal fall.

Sedan studeras beräknad emission från ytan samt mängd OCIC vid olika maximal bildningshastighet, bindningskapacitet samt fuktillstånd vid mattläggning och typ av matta.

Kapitel 11, Diskussion och konklusioner

Övergripande diskussion om området förs i detta kapitel. Konklusioner görs utifrån studien.

Kapitel 12, Fortsatt forskning och utveckling

Förslag till fortsatta insatsområden för forskning ges i detta kapitel.

2 Material & Mätmetoder

2.1 Material

Eftersom syftet med studien var att studera samverkan mellan material har stor vikt lagts vid att välja ut ett fåtal intressanta material att studera. Tre till sju material har valts från varje av de ingående materialgrupperna betong, avjämningsmassa, golvljm samt matta. Materialen till studien har valts för att de har intressanta egenskaper som skiljer sig från övriga material i materialgruppen.

Fyra olika betongblandningar har avvänts. Dessa har valts så att de består av i stort sett samma delmaterial men med olika sammansättning så att de härdade betongerna får olika egenskaper.

Sju avjämningsmassor har ingått i studien. Två av dem var gipsbaserade och fem var aluminatcementbaserade. Två av de cementbaserade avjämningsmassorna var så kallade snabbhärdande avjämningsmassor.

Fyra golvljm med olika sammansättning studerades. Alla var vattenbaserade dispersionsljm.

Fyra olika typer av mattor ingick i studien. De olika typerna var homogen PVC-matta, skiktad PVC-matta, PVC-matta för lösläggning samt linoleummatta.

Produktnamnen anges på de material som ingick i studien för att läsaren själv skall ha möjlighet att värdera materialegenskaper som inte är nämnda i rapporten. Dessa namn har lämnats eftersom studien inte jämför enskilda material utan ser till materialkombinationen.

De olika materialen beskrivs mer i detalj i följande avsnitt.

2.1.1 Betong

Material

Det som huvudsakligen skilde de fyra betongblandningarna åt var vattencementtalet (vct), det vill säga cementhalten, och tillsatsmaterial samt tillsatsmedel, se tabell 2.1. I några av blandningarna tillsattes exempelvis silikastoft (amorf SiO₂).

Tabell 2.1 Betongrecept alla material angivna i (kg/m³).

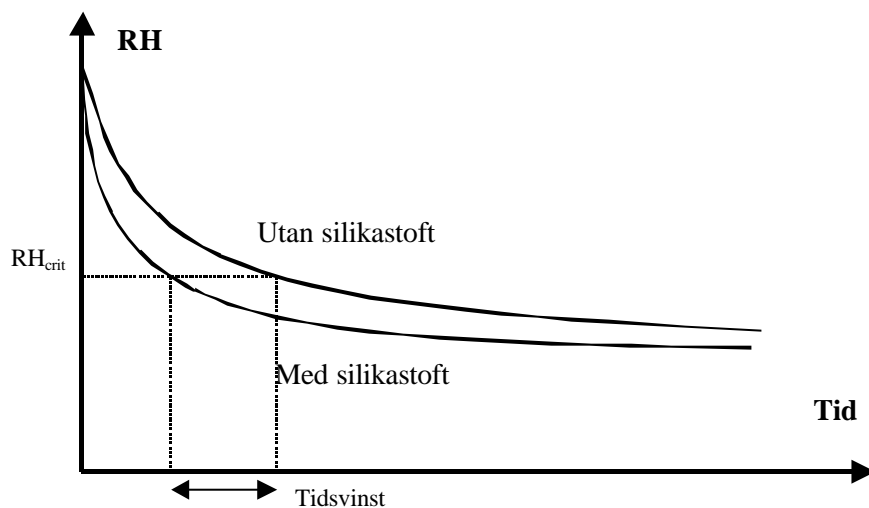
Benämning	C1	C2	C3	C4
vct	0,315	0,39	0,42	0,66
Cement	462	425	380	290
Vatten	146	166	160	191
Sand (0 - 8 mm)	813	783	916	980
Makadam (8-12 mm)	39	805	924	899
Makadam (12-16 mm)	761	–	–	–
Filler Baskarp no 7	81	–	–	–
Silikastoft (torr)	–	21	21	–
Luftporbildare Cementa 16L	0,05	–	–	–
Flytmedel Mighty^a	–	8	–	–
Flytmedel Cementa 92M	5,00	3,76	3,76	–

De tre betongsorterna som valdes till studien innehåller alla stdP cement (standard Portland) från Skövde men i olika proportioner. I ett försök ersattes stdP med anläggningscement från Degerhamn för att reducera alkalihalten. Genom att variera blandningsförhållandet mellan vatten och cement, det så kallade vattencementtalet (vct) erhöles betonger med skilda egenskaper. Exempelvis är betong med lågt vct mer alkaliskt än betong med högt förutsatt att de är baserade på samma cementsort. De med lågt vct är också tätare mot exempelvis fukt än de med högt vct. Det beror på att de har ett finare porsystem. Enkelt kan det förklaras men att där det finns blandningsvattnen från början blir det porer när vattnet ”försvinner”. Betong med lågt vct har något mindre mängd blandningsvattnen men mycket mer cement. Därför får de ett litet och finare porsystem. Detta får som konsekvens att fukttransporten sker med olika hastigheter i betong med olika vct.

Betong med lågt vct kallas byggfuktfri eller självtorkande betong i husbyggnads-sammanhang. Denna nomenklatur har valts för att sådan betong inte innehåller någon skadlig byggfukt som måste torkas bort. Nästan allt vatten som tillsätts vid blandning av sådan betong går åt vid hydratisering (härdning). Det som blir kvar är hårt fysikaliskt bundet i porsystemet. Vilket blandningsförhållande mellan cement och vatten (vct) som ger dessa egenskaper beror på cementsorten. Exempelvis behövs ett lägre vct, mer cement i förhållande till vatten, för Degerhamn anläggningscement än för stdP cement. Detta beror på cementets kemiska uppbyggnad men också på malningsgraden. Anläggningscement är malt i ”grövre” fraktioner än stdP cement. Atlassi *et al.* (1995) visade att vid stdP

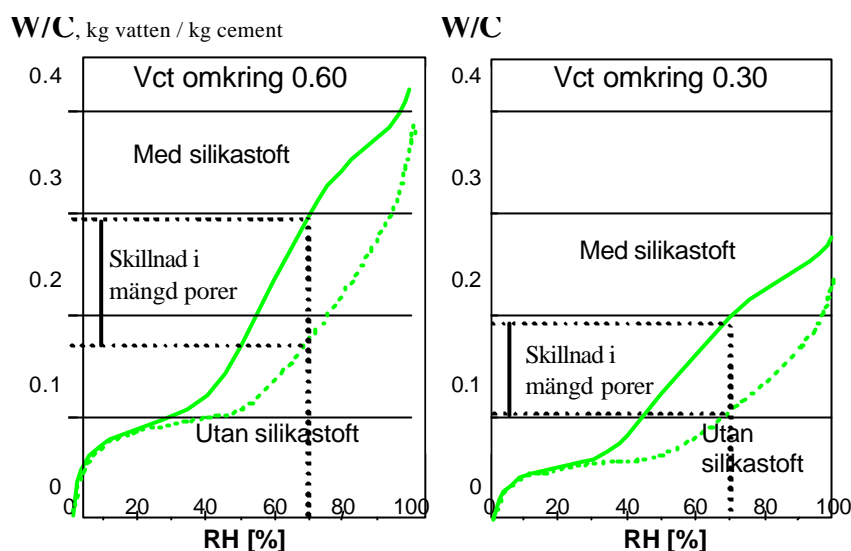
cement låg gränsen kring vct 0,40 om man ville komma ner till 85 % RH i betongen på 28 dygn medan man var tvungen att använda vct 0.25 för att nå samma resultat med anläggningcement.

Silikastoft används bland annat för att öka självuttorkningen, figur 2.1. Silikastoftet är mindre i storlek än cement vilket påverkar porstrukturen i den härdade betongen så att den blir finare och tätare på grund av färre och mindre kapillärporer. Eftersom större delen av fukttransporten i betongen sker i kapillärporerna ger detta en lägre fukttransport vid i övrigt lika förhållanden. Sorptionsisotermen i figur 2.2 visar hur storleksfördelningen av betongporer förändras med silikastoft. Det finns ett samband mellan relativ fuktighet och porstorlek, som i korthet säger att bara porer med liten diameter är fyllda vid lågt RH medan stora porer fylls först vid högt RH.



Figur 2.1 Inverkan av silika på betongens självuttorkning. Principiell figur

Figur 2.2 skall läsas så att för ett visst RH (till exempel 70 %) kan betong med silikastoft innehålla mer fukt än betong utan silikastoft. Detta beror på att betong med silika har större andel av de porer med en diameter som kan fyllas vid den fuktnivån.



Figur 2.2 Inverkan av silika på sorptionskurva (fuktisoterm). Principiell figur av Atlassi (1995).

Blandning

Vid betongtillverkningen torrblandades först sand, cement och eventuell silika någon minut. Sedan tillsattes makadamen, hälften av vattnet och tillsatsmedlen. Slutligen tillsattes resten av vattnet och betongen blandades ungefär fyra minuter. Tillsatsmedlen blandades med lite av vattnet innan de hälldes i betongblandaren.

Blandningen av betongen gjordes i en 20 liters tvångsblandare av typen Tecnotest T650 som kunde varvtalsregleras steglöst mellan ungefär 60 – 150 rpm. Den kunde liknas vid en degblandare för storhushåll. Delmaterialen vägdes upp med hjälp av en våg av märket Mettler PM34 som hade två mätområden, ett lågt som gick till 4000g där upplösningen var 0,1g och mätosäkerheten cirka $\pm 0,2$ g samt ett högt mätområde som gick till 32000 g där upplösningen var 1 g och mätosäkerheten cirka $\pm 0,6$ g.

Gjutning

Tillvägagångssättet vid gjutning av betong var densamma för alla typer av provkroppar som användes i studien. Först fylldes provformen delvis och betongen kompakterades genom att ställa formen på ett vibreringsbord. Sedan fylldes formen nästan full och vibrerades igen. Därefter fylldes formen helt, vibrerades och ytan avjämnades med en stålspackel. Formarna täcktes med byggplast och eventuella mätörer som monterats i formen tätades med gummikorkar mot den omgivande luften. Ingen märkbar vattenseparation uppstod.

Vid sista vibreringen av hinkarna uppstod små ”kratrar” ovanför de grundaste rören. Kratrarna fylldes genom att lite betong utan grovballast lades på och avjämnades med en slev.

Efter gjutningen härdades provkropparna i klimatstabilt rum övertäckta med tätslutande plast. Under denna period skedde en självtorkning av betong med lågt vct. Plasten avlägsnades en tid innan limningen och betongen fick torka. Denna torkperiod mellan plasten togs bort till limningen av mattan skedde kallas i rapporten för DT (drying time).

I några undersökningar vändes PF2 (skålen), som beskrivs i kapitel 2.2, upp och ner mot en stålplåt efter att de fyllts helt. Sista vibreringen skedde därmed upp och ner. De förvarades upp och ner mot stålplåten i ett dygn innan de vändes. Syftet var att få en jämn yta som mattan senare kunde limmas på. Förfarandet gav en ”spegelblank” yta som inte liknar den skrovliga gjutyta som erhålls vid gjutning i verkligheten. Ytan blev fylld med pasta och endast enstaka porer uppstod.

Metoden att jämna till ytan förändrades till senare undersökningar med PF3 (skålen) och till undersökningarna där PF4 (hinken), kapitel 2.2, användes. Istället för att vända dem upp och ner så avjämnades ytan en gång till några timmar efter gjutningen. Metoden gav en yta som mer liknade den som erhålls vid gjutning i verkligheten. Detta förfaringssätt krävde stor vana och skicklighet för att skapa en yta på provkroppen som var tillräckligt jämn för FLEC-mätningar efter det att en matta limmats.

Dagen efter gjutning togs byggplasten bort och de formar som hade varit upp och ner vändes. Ytan täcktes med ett diffusionstätt material för att hindra för tidig uttorkning. Skålarna täcktes med två lager aluminiumfolie i undersökning d1. På resterande provkroppar användes polyolefinfilm (gladpack) istället, ändringen gjordes för att förhindra risken för alkaliska aluminiumreaktioner. Provkroppen förvarades i ett klimatstabilt rum under härdningsprocessen och efterföljande försök. Rummet hade temperaturen +20°C och 50 % relativ fuktighet.

2.1.2 Avjämningsmassor

Material

Avjämningsmassor används för att avjämna betongbjälklag då betongytans jämnhet inte uppfyller kraven för golvbeläggning. Avjämningsmassor är av typen självnivellerande spackel. Tidigare användes namnet ”flytspackel” men den benämningen frångicks och recepturen förändrades eftersom tillsatsmedlen gav upphov till en rad uppmärksammade skadefall.

Avjämningsmassor består av ett bindemedel, fyllmedel och tillsatsmedel. Bindemedlet är vanligtvis cement- eller gipsbaserat. Fyllmedel är exempelvis torkad sand eller krossad dolomit. Exempel på tillsatsmedel kan vara flytmedel och olika polymerer.

I studien användes sju olika avjämningsmassor. Fem hade aluminatcement som bindemedel och de övriga två var gipsbaserade. Av de fem cementbaserade var två snabbhärdande. Avjämningsmassorna finns sammanställda i tabell 2.2 och 2.3.

Tabell 2.2 Avjämningsmassor S1 – S4. Uppgifter enligt tillverkare.

Benämning	S1	S2	S3	S4
Namn	ABS 147	Universal	Ventonit	ABS 154
Leverantör	Optiroc	Stråbruken	Optiroc	Optiroc
Typ	Normal	Normal	Normal	Snabb
Bindemedel	Aluminat-cement	Aluminat-cement	Aluminat-cement	Aluminat-cement
pH	11	–	–	11
Läggningsskikt [mm]	2-30	5-30	2-30	2-30
Gångbar [timmar]	1-3	2-6	6-8	–
Mattläggning [dygn]	7-21	7-42	7-21	0,5-1

Tabell 2.3 Avjämningsmassor S5 – S7. Uppgifter enligt tillverkare.

Benämning	S5	S6	S7
Namn	Snabb	AE 20	Soluflex
Leverantör	Stråbruken	Knauf D.	Strängbtg.
Typ	Snabb	Gips	Gips
Bindemedel	Aluminat-cement	Anhydrit	Syntetisk anhydrit
Ungefärligt pH	–	–	Lågalkaliskt
Skiktjocklek [mm]	2-30	–	> 20
Gångbar [timmar]	1-2	21-24	24
Mattläggning [dygn]	0,7	21-49	14*

* vid 25 mm tjocklek och optimal uttorkning.

Gjutning

Avjämningsmassorna levererades torra, det vill säga att de var färdigblandade med undantag av vatten som tillsattes vid gjutningen. Uppvägning av torrt material och vatten samt blandning gjordes med samma utrustning som användes vid blandning av betong, kapitel 2.1.1.

Blandning och gjutning av avjämningsmassor gjordes i stort sett likadant för alla sorter. Skillnaderna låg i vattenmängd och blandningstider samt skiktjocklek där tillverkarna gav olika anvisningar. Först vägdes det torra materialet upp och torrblendades i någon minut. Därefter tömdes ungefär hälften av vattnet i och blandades i ytterligare några minuter. Resterande vatten tömdes långsamt i blandningen och alltsammans blandades ytterligare några minuter enligt tillverkarens anvisningar.

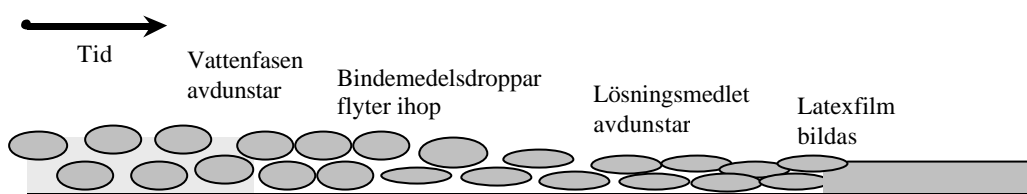
Innan gjutning applicerades primer på provkroppen. Provkropparna fick sedan ”torka” en tid innan avjämningsmassan blandades och tömdes på provkroppen. Allt skedde enligt respektive materialtillverkarens anvisningar.

Provkropparna placerades efter färdigställandet omedelbart i ett klimatstabil rum. De förvarades där under härdningsprocessen och efterföljande försök. Rummet hade temperaturen +20°C och 50 % relativ fuktighet.

2.1.3 Golvlім

Material

Dagens nordiska golvlім innehåller inte lösningsmedel i traditionell mening. Istället är bindemedlet löst i högkokande lösningsmedel (mjukgörare). Små droppar av denna lösning är finfördelade (dispergerade) i en vätskefas. Denna typ av lim benämns ofta vattenbaserat dispersionslim. När limmet torkar avgår först vätskefasen, sedan flyter bindemedelsdropparna samman och till sist avdunstar lösningsmedlet, se figur 2.3. Avdunstning av lösningsmedlet utgör limmets egenemission, det kallas också primär emission.



Figur 2.3 *Principiell bild på torkningsförloppet hos ett vattendispergerat "akrylatlim" (latex). Bilden baseras på Björk (1996).*

Alkaliska fuktiga miljöer riskerar att hydrolysera lim med bindemedel som baseras på akrylatsampolymerer av 2-etylhexylakrylat och butylakrylat. Vid hydrolysen bildas alkoholerna etylhexanol och butanol. Denna typ av emission kallas i rapporten för sekundär emission.

Alla lim som användes i studien var vattenbaserade dispersionslim. Fyra olika sorter användes, Bona Futurum, Casco Proff, Bona våtrumslім, samt Evonor 2001, se tabell 2.4. Limmen införskaffades genom golvgrossist. Burkarna förvarades i en mörk och sval lokal.

Tabell 2.4 *Limsorter som använts i studien. Uppgifter enligt tillverkare.*

Benämning	A1	A2	A3	A4
Namn	Futurum	Casco Proff	Våtrumslім	Evonor 2001
Tillverkare	Bona	Casco	Bona	Bostik
Lösningmedel	Vatten	Vatten	Vatten	Vatten
Sampolymerer	Akrylat, Acetat	Akrylat, Acetat	Acetat	Akrylat
pH	8,5	7,8	6,5-7,5	7-8
Desitet [kg/m ³]	1250	1300	1400	1270
Torrhalt [%]	68	70	67	—

Med % avses vikts-% av cementvikten.

Bona Futurum (L1) är ett vattenbaserat dispersionslim som lämpar sig väl för limning av homogena vinylmattor med eller utan baksida av glasfiber eller mineralull och för textila mattor med eller utan baksida av skum enligt tillverkaren. Limmets sammansättning redovisas i tabell 2.5.

Tabell 2.5 Bona Futurum (A1).

Ämne	CASnr [©]	Halt %	Farosymbol	Riskfraser ^a
Akrylsampolymer		–		
Etylvinylacetat-sampolymer		–		
Esterharts		5-10		
Klorometylisothiazolinon	26172-55-4	<15 ppm	Xi	43
♥	Chemical Abstracts Services Registry Number			
♠	Internationell hälso- och miljöklassificering			

Casco Proff 3448 (A2) kan användas till många typer av golv och väggmaterial och kan även användas på sugande underlag såsom exempelvis betong enligt tillverkaren. Limmets sammansättning redovisas i tabell 2.6.

Tabell 2.7 CascoProff (A2).

Ämne	CASnr	Halt %	Farosymbol	Riskfraser
Acrylsampolymer		10-30		
Butyldiglykolacetat	124-17-4	1-5	V	R-321
Inert fyllmedel		>30		
Tallharts		5-10		
Vatten	7732-18-5	10-30		
Vinylacetatsampolymer		10-30		

Bona Våtrumslim (A3) baseras inte på 2-etylhexylakrylat. Därför var det inte troligt att det avgav etylhexanol vid hydrolys. Limmets sammansättning redovisas i tabell 2.7.

Tabell 2.7 Bona Våtrumslim (A3).

Ämne	CASnr	Halt %	Farosymbol	Riskfraser
Etenvinylacetatcopolymer		–		
Polyvinylacetatdispersion		–		
Metyl-1H-besimidazol-2-yl-karbamat	10605-21-8	<,02		
Klorometylisothiazolinon	26172-55-4	<15 ppm	Xi	43

Evonor 2001 (A4) har höga egenemissioner då det användes i början av arbetet. Tillverkaren ändrade recepturen men det uteslöts ur senare delar av det här arbetet. Limmets sammansättning redovisas i tabell 2.8.

Tabell 2.8 Evonor 2001 (A4).

Ämne	CASnr	Halt %	Farosymbol	Riskfraser
Akryl-dispersjon		–		
Fortykningsmiddel		–		
Dolomitt		–		
Harpiks		–		
Stabilisator		–		
Di-n-butylphtalat	84-74-2	1-5		
N-paraffin	64771-72-8	1-5		

Limningsmetoder

Tre olika limningsmetoder användes i studien, enkel våtlimning, häftlimning och kontaktlimning. I de flesta försöken användes enkel våtlimning, det vill säga att limmet applicerades på ena ytan och väntetiden var så kort att limmet fortfarande vätte vid beröring då mattan trycktes fast. Vid ett försök studerades effekten av olika limningsmetoder. Metoderna sammanfattas i tabell 2.9. Limningsmetoderna beskrivs närmare i Fritsche *et al* (1997).

Vid limningen applicerades limmet på betongen med en pensel för att få jämn spridning och kunna kontrollera limmängden. Först östes en tillräckligt stor mängd lim över i en plastmugg. Plastmuggen inklusive lim och pensel vägdes med en våg, Mettler PM 480 som har en noggrannhet på 0.001g. Sedan ströks den exakta mängden lim ut på betongen. Vikten av det pålagda limmet registrerades genom att väga mugg inklusive lim och pensel och beräkna viktminskningen.

Tabell 2.9 Sammanställning av limningsmetoder enligt Schrewelius (1997).

Limnings- teknik Benämning	Enkellimning		Dubbellimning*	
	Våtlimning AT1	Häftlimning AT2	Våtlimning AT3	Kontaktlimning AT4
Väntetid	0 - 15min	från 45 min	0 min	ca 30 min
Konsistens vid montering	Limmet väter	Tejpliknande	Limmet väter	Tejpliknande
Anmärkning	Hög slut- hållfasthet	Vid icke sugande mtrl.	Hög slut- hållfasthet	Omedelbar hög hållfasthet

* Mattan nedlägges i vått lim, dras isär och får torka under väntetiden innan slutlig montering.

Med enkellimning menas att limmet sprids ut på ena ytan medan det sprids på båda ytorna vid dubbellimning. Gränsen mellan våtlimning och häftlimning är ”flytande”, och ibland kan väntetider som är längre än för våtlimning men kortare än för häftlimning användas. Dessa fall kallas “sen våtlimning” eller “tidig häftlimning”. Gränsen är varierande och beror av bland annat temperatur och luftfuktighet. Generellt gäller att vid sen våtlimning väter fortfarande limmet, denna övervätning försvinner då det övergår till tidig häftlimning.

2.1.4 Mattor

Mattor består av bindemedel, fyllmedel, eventuellt bärare och ofta tillsatsmedel. Vanligtvis används naturliga eller processframställda polymerer som bindemedel. Till de naturliga polymererna hör exempelvis linoleum. Processframställda polymerer är det vi kallar plaster, exempelvis PVC (polyvinylklorid) och Polyolefin. Fyllmedel tillsätts för att dryga ut materialet samt i viss mån ge mattan önskade egenskaper. Fyllmedel är exempelvis trä eller stenmjöl. Tillsatsmedel är mjukgörare, stabilisatorer, processhjälpmedel och dylikt. De estetiska egenskaperna förändras genom att blanda i pigment eller inkludera ett tryckt skikt i mattan.

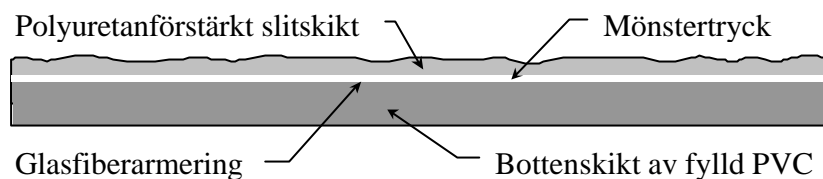
Fyra olika typer av mattor ingick i studien. Typerna var homogen PVC-matta (Smaragd Aqua), skiktad PVC-matta (Novilon Scandinavia), Linoleummatta (Marmoleum Real) samt PVC-matta för lösläggning (Tarkett Stabil). Mattorna finns sammanställda i tabell 2.10.

Tabell 2.10 Mattsorter: Uppgifter enligt tillverkare.

Benämning	F1	F2	F3	F4
Namn	Smaragd Aqua	Novilon Scandinavia	Marmoleum Real	Stabil
Tillverkare	Forbo-Forshaga	Forbo-Forshaga	Forbo-Forshaga	Tarkett
Bindemedel	PVC	PVC	Linolja och harts	PVC
Mjukgörare	DOP	DOP, BBP, DIOA	–	DOP, BBP
Fyllmedel	Dolomit	–	Trämjöl, kalkstensmjöl	Aluminiumsilikat
Baksida	PVC	PVC-skum	Juteväv	Polyester
Tjocklek (mm)	2,0	2,4	2,0	3,0
Vikt (kg/m²)	2,8	1,75	2,2	2,3
Ångmotst. (s/m)	2,0·10 ⁶	0,5·10 ⁶	0,3·10 ⁶	–

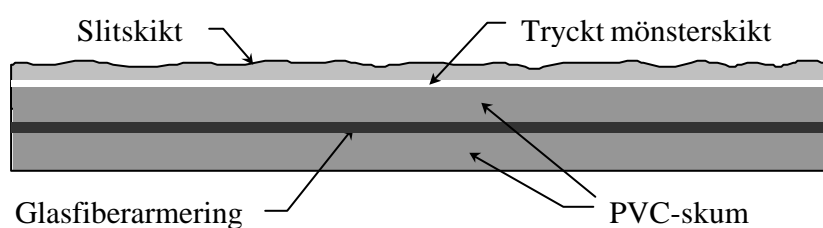
Mattorna införskaffades genom en golvgrossist eller direkt från tillverkaren. Uppskattningsvis var ingen matta äldre än 1 år och ingen matta hade utsatts för UV ljus eller för (städ) kemikalier.

F1, homogen PVC-matta (Smaragd Aqua), figur 2.4. Aqua smaragd var en 1,5 mm tjock PVC-matta avsedd att användas i våtutrymmen. Mattan var uppbyggd av ett slitskikt av transparent polyuretanförstärkt PVC och ett bottenskikt av fylld PVC. Smaragd Aqua innehöll cirka 54 vikt-% PVC, 19 vikt-% mjukgörare dioktylfталat (DOP) samt cirka 23 vikt-% fyllmedel, dolomit. Stabilisatorer, pigment och övriga komponenter utgjorde tillsammans mindre än 5 vikt-%.



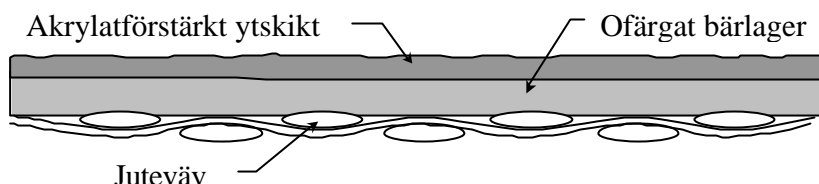
Figur 2.4 Uppbyggnad av homogen PVC-matta.

F2, skiktad PVC-matta (Novilon Scandinavia). Novilon Scandinavia var 2,4 mm tjock och uppbyggd i fler skikt enligt figur 2.5. Ytan bestod av genomskinlig polyuretanförstärkt, mjukgjord PVC. Baksidan bestod av ett mineralfiberarmerat PVC-skum. Novilon Scandinavia innehöll cirka 53 vikt-% PVC, 27 vikt-% mjukgörare av typerna butylbensylftalat (BBP), dioktylfталat (DOP) samt dioktyladipat (DIOA). Det fanns inget fyllmedel i mattan men däremot cirka 15 vikt-% bärare (lateximpregnerad mineralfiber, nonwoven). Stabilisatorer, pigment och övriga tillsatser utgjorde tillsammans mindre än 6 vikt-%.



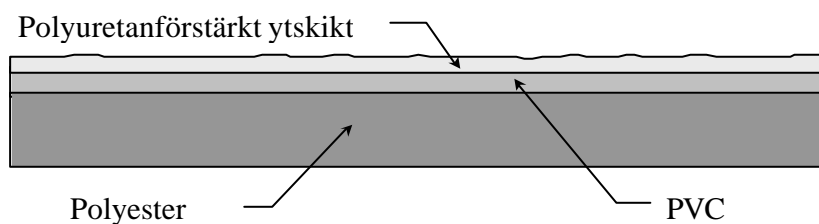
Figur 2.5 Uppbyggnad av skiktad PVC-matta.

F3, linoleummatta (Marmoleum Real), figur 2.6. Marmoleum Real var 2,0 mm tjock och bestod till cirka 28 vikt-% av bindemedlen oxiderad och polymeriserad blandning av naturliga vegetabiliska torkade oljor och harts. Som fyllmedel användes trämjöl (29 vikt-%) och kalkstensmjöl (26 vikt-%). Bäraren av juteväv utgjorde cirka 10 vikt-%. Färgpigment och övriga komponenter utgjorde mindre än 7 vikt-%.



Figur 2.6 Uppbyggnad av Linoleummatta.

F4, PVC-matta för lösläggning (Tarkett Stabil). Tarkett Stabil var 3,0 mm tjock och uppbyggd i skikt enligt figur 2.7. Ytan bestod av ett polyuretanförstärkt slitskikt. Baksidan bestod av pressade polyesterfiber. Novilon Scandinavia innehöll cirka 54 vikt-% PVC, 17 vikt-% mjukgörare av typen dioktylfthalat (DOP) samt 9 vikt-% av typen butylbensylftalat (BBP). Mattan innehöll 5,2 vikt-% aluminiumsilikat som fyllmedel. Glasfiberbärare och ytskikt utgjorde cirka 5,4 vikt-%. Stabilisatorer, pigment och övriga komponenter utgjorde tillsammans mindre än 10 vikt-%.



Figur 2.7 Uppbyggnad av PVC-matta för lösläggning.

2.1.5 pH-lösningar

Med hjälp av pH-lösningar kunde golvbeläggningarna exponeras mot bestämd alkalisk miljö i PF1 (plattan). De lösningar som användes i studien har bestämda pH-värden som ligger i nivå med pH i cementbaserade material.

I studien användes tre olika lösningar, se tabell 2.11. Två var pH-lösningar av märket Titrisol. De hade pH 11 för att efterlikna lågalkalisk avjämningsmassa samt pH 13 för att efterlikna betong. P1 (pH 11) hade stor buffertkapacitet och höll ett stabilt pH-värde även om viss påverkan (alkalisk hydrolysis) skedde. P2 (pH 13) hade inte den buffertförmågan utan pH-nivån sjönk i lösningen varefter hydroxidjoner förbrukades av reaktionen.

Den tredje lösningen (P3) hade ungefär samma pH värde som P2. P3 blandades i laboratoriet till skillnad från de andra två som köptes färdigblandade. Receptet på P3 var från början framtaget för att motsvara vätskan som erhöles vid porpressning av betong. Betongen som pressades var baserad på standardcement från Degerhamn med vct 0,5. Det har inte varit möjligt att finna någon referens till den ursprungliga analysen av vätskan eller porpressningen.

Tabell 2.11 pH-lösningar med bestämt pH-värde. Sammansättning och "fabrikat" av vätskorna..

Benämning	P1	P2	P3
pH	11	13	13,05♥
Typ	Titrisol	Titrisol	Betong
NaOH [M]	$91 \cdot 10^{-3}$	$100 \cdot 10^{-3}$	$28 \cdot 10^{-3}$
KCl [M]	$48 \cdot 10^{-3}$	$50 \cdot 10^{-3}$	
H ₃ BO ₃ [M]	$94 \cdot 10^{-3}$		
KOH [M]			$83 \cdot 10^{-3}$
CaSO ₄ 2H ₂ O [M]			$40 \cdot 10^{-6}$

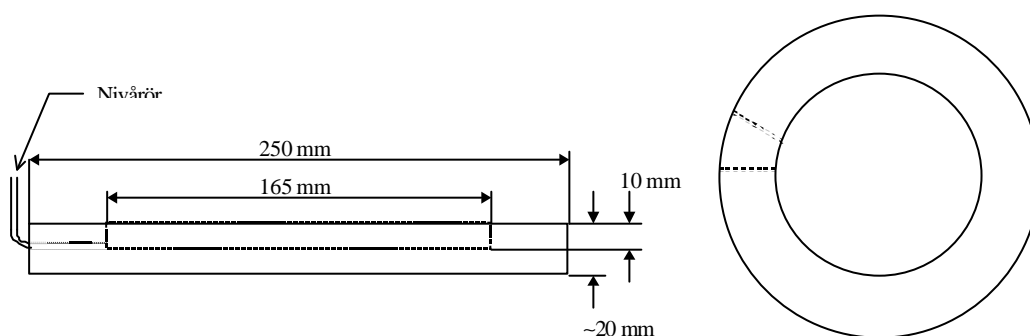
♥ efterliknar betongens pH-värde

2.2 Provkroppar

Provkropparna i studien gjordes i huvudsak så enkla som möjligt men ändå representativa för de konstruktioner som förekommer i verkligheten, dels för att många av mätningarna var av karaktären pilotstudier och dels för att invecklade provkroppar är svåra att efterlikna om försöken skall upprepas med exempelvis andra material. Provformarna heter i rapporten PF1 – 4 men beskrivs oftast med sitt ”arbetsnamn” som de fick under laboriearbetet.

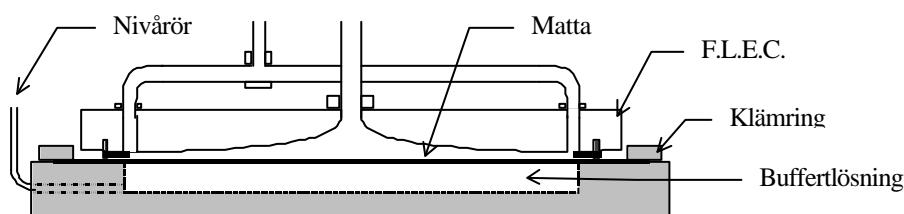
2.2.1 PF1 (plattan)

Plattan tillverkades av en cirkulär skiva av rostfritt-syrafast stål (SS2333, \varnothing 250 mm, t 20 mm). I mitten av plattan svarvades en fördjupning ut (\varnothing 165 mm, d 10 mm), se figur 2.8. Två hål borrades genom skålens sida. Hålen gängades och det ena försågs med ett nivåör medan det andra förslöts med en skruv. Dessa hål används vid påfyllning av pH-lösning under provberedningen.



Figur 2.8 Principskiss på PF5 (plattan), avpassad att användas med FLEC.

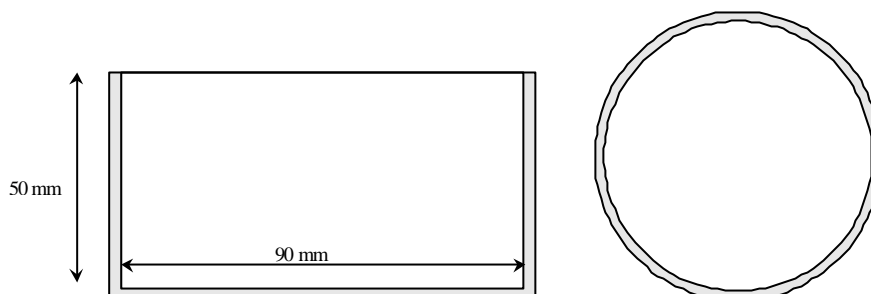
Golvbeläggningen som skulle provas klämdes fast ovanpå plattan med en fastskruvad klämring, se Figur 2.9. Fördjupningen fylldes med pH-lösning genom hålen i sidan och vätskenivån kontrollerades med nivåöret.



Figur 2.9 Utrustning för nedbrytning av matta, FLEC och nykonstruerad underdel (PF5)

2.2.2 PF2 (koppen)

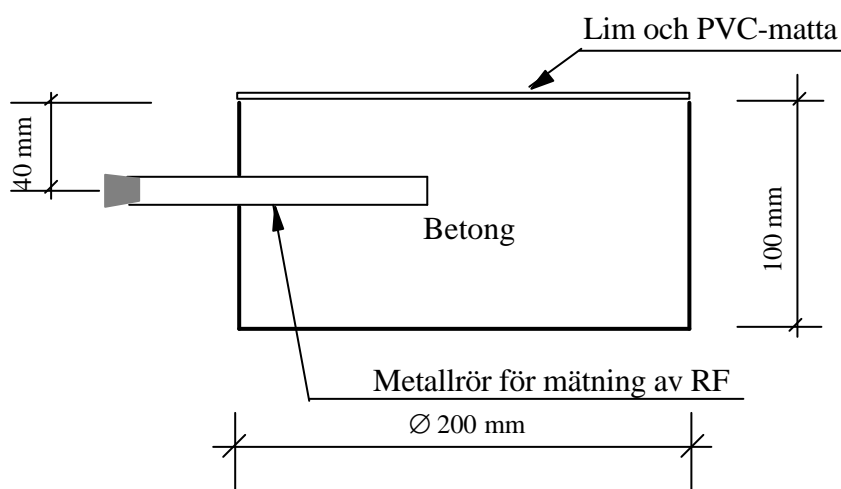
Som provform vid koppförsök användes en kristallasation dish med rak kant, utan pip. Koppen var tillverkad av duranglas med invändig höjd 50 mm och invändig diameter cirka 90 mm, se figur 2.10.



Figur 2.10 Principskiss på PF2 (koppen).

2.2.3 PF3 (skålen)

Gjutformen var en cirkulär ”skål” av rostfritt stål. Skålen pressades i ett stycke och säkerställde därmed ensidig uttorkning, figur 2.11. Formarnas diameter var 200 mm och höjden 100 mm. 40 mm från skålens överkant monterades ett horisontellt rör, av rostfritt stål, för RH-mätningar. Röret hade invändig diameter 17 mm för att passa till RH-proberna. Före gjutningen tätades hålet i röret inne i formen med en diffusionsöppen tejp och den andra ändan tätades med en gummikork. Nivån 40 mm från överkant valdes med tanke på anvisningen för RH-mätningar enligt RBK (1999). Fuktnivån på 40 % av betongplattans tjocklek vid ensidig uttorkning motsvarade ungefär den fuktnivå som erhöles när fukten omfördelats efter mattläggning.



Figur 2.11 Genomskärning av PF6 (skålen)

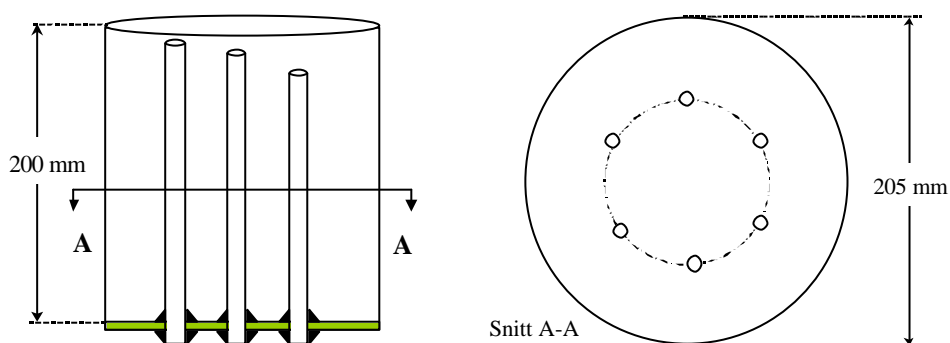
Rostfritt stål har inga egenemissioner men kan i vissa sammanhang fungera som en sänka, åtminstone enligt Afshari (2000). OC (organic compounds) skulle

kunna adsorberas på stålets yta och stanna kvar, men den effekten ansågs försumbar i studien.

2.2.4 PF4 (hinken)

Gjutformen var en cylindrisk behållare med helgjuten botten (hink) av polyeten. Behållarens diameter var 205 mm, höjden 200 mm och den rymde ca 6,6 liter. Hinkens botten förstärktes utvändigt med en 5 mm tjock platta av PVC-plast för att staga upp mätrören som monterades upp genom botten, se figur 2.12. På grund av sitt ursprung fick denna gjutform för betong arbetsnamnet "hinken".

Mätrören i vilka RH-prober placerades under mätningen tillverkades av PVC-rör ("elrör") med invändig diameter som passar till RH-proberna. Rören monterades så att öppningarna inne i formen hamnade på olika nivåer. Den första hinken som användes hade sex olika nivåer; 2, 7, 11, 19, 39 samt 79 mm, räknat från färdig betongyta. Övriga hinkar hade fyra nivåer, 2, 7, 15 samt 30 mm.



Figur 2.12 Principskiss på gjutform PF1 (hinken).

För att betongen inte skulle rinna in i rören vid gjutningen tätades rörmynningarna inne i formen med diffusionsöppen tejp.

2.3 Mätmetoder

I studien mättes ett antal storheter i olika situationer. Mätmetoderna som användes var väl beprövade. I några fall utvecklades mätmetoderna ytterligare för att kunna mäta en storhet eller egenskap på ett sätt som tidigare inte gjorts. Utvecklingen eller avsteget från den ursprungliga metoden var aldrig så stor att kvaliteten hos resultaten riskerats. Bedömningen gjordes genom att använda sunt förnuft och tillfråga experter samt att uppmärksamma rimligheten i resultaten.

- Mätning av RH-nivåer i betongen skedde med hjälp av RH-prober som antingen var instuckna i ingjutna mätrör eller instuckna i provrör där provbitar lagts.

I början av detta projekt undersöktes vilka mätmetoder som var lämpliga att använda för att mäta avgivningen av kolväten från byggnadsmaterial. De mätmetoder som valdes var uppbyggda i två steg. Först sker provtagning där kolväten fångas upp och anrikas på en adsorbent och därefter följer analys med gaskromatografisk teknik.

- Provtagningen av kolväten skedde på två olika sätt, dels med hjälp av ett modifierat headspace förfarande för de kolväten som migrerat ner i betongen och dels med FLEC (Field and Laboratory Emission Cell) för avgivning från ytor. Som adsorbent valdes TENAX TA.
- Den efterföljande analysen skedde med GC (gaskromatografisk teknik) och FID (flamjonisationsdetektor), ibland användes MS (masspektrometer) istället för FID.

Mätmetoderna beskrivs i detalj i följande avsnitt.

2.3.1 Fuktfördelning i betong

Mätinstrument

Fukt i material kan beskrivas på olika sätt. Ett vanligt sätt är att ange fuktnivån som RH (relativ fuktighet). Med RH menas kvoten mellan ånghalten i luft som står i jämvikt med materialet och luftens maximala ånginnehåll. Mätning av RH i betongen skedde med hjälp av RH-prober som antingen var instuckna i mäthål eller i provrör där provbitar lagts.

Vid mätning av fuktnivåer i betongproverna användes två olika utrustningar. Dessa utrustningar bestod av kapacitiva RH-prober med tillhörande instrument för datalagring och presentation av mätvärden. Sensorn i dessa prober bestod av en tunn polymerfilm vars kapacitans ändrades när RH i den omgivande luften förändrades. De två utrustningarna, deras mätosäkerheter med mera beskrivs ytterligare nedan.

1. För mätning av enstaka värden användes huvudsakligen RH-prob HMP 36 och handinstrument HMI 31 tillverkade av Vaisala OY i Finland. Mätinstrumenten kalibrerades vid flera tillfällen under mätperioden med hjälp av mättade saltlösningar i enlighet med ASTM (1985). Tillverkaren uppger mätosäkerheten för proben till ± 2 % RH i området 0 – 90 % RH samt ± 3 % RH i området 90 – 100 % RH och $\pm 0,3$ °C i området -40 – +60 °C. De uppger ingen osäkerhet för handinstrumentet.

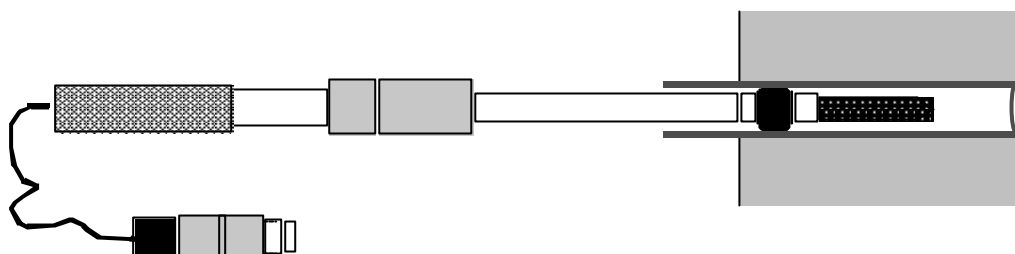
2. I de fall relativ fuktighet loggats över en längre tidsperiod användes RH-prob HMP 44 från Vaisala OY tillsammans med datasamlingslogger Mitec AT40. Mätinstrumenten kalibrerades i samband med mätningarna mot mättade saltlösningar i enlighet med ASTM (1985). Tillverkaren uppger mätosäkerheten för proben till ± 2 % RH i området 0 – 90 % RH samt ± 3 % RH i området 90 – 100 % RH. Datasamlingsloggerns totala onoggrannhet anges vara $0,20$ % ± 2 mV av FS (full skale). Loggern var inkopplad så att 1 V motsvarar ungefär 1 % RH, mätområdet var -3 – 120 V.

Mätmetod

Vid mätning av fukt i betongen användes tre olika metoder. Mätmetoderna är väletablerade sedan länge och har successivt utvecklats på Institutionen för byggnadsmaterial, Chalmers, varför ingen speciell referens ges.

1. Den första metoden användes för att mäta enstaka RH-värden i provkroppar med ingjutna mätrör. I dessa provkroppar var mätrör fastmonterade i behållarens sida, se figur 2.13. Rören tätades med en diffusionsöppen tejp mot betongen och med en gummikork mot den omgivande luften. Vid jämvikt var RH i luften i röret densamma som RH i betongen. Vid mättillfället togs gummiproppen bort och RH-proben placerades i mätröret. RH-proben tätades mot den omgivande luften med en expandering av gummi. När RH-proben monterades ändrades förhållandena i röret eftersom luft pressas ut när proben förs in. Mätinstrumentet lästes av när RH-proben var i jämvikt med betongens RH. Mättiden var ungefär

24 timmar eller i vissa fall längre. De erhållna värdena omvandlades sedan enligt kalibreringskurvorna till RH. Prob HMP 36 och handinstrument HMI 31 från Vaisala OY i Finland användes till denna metod.

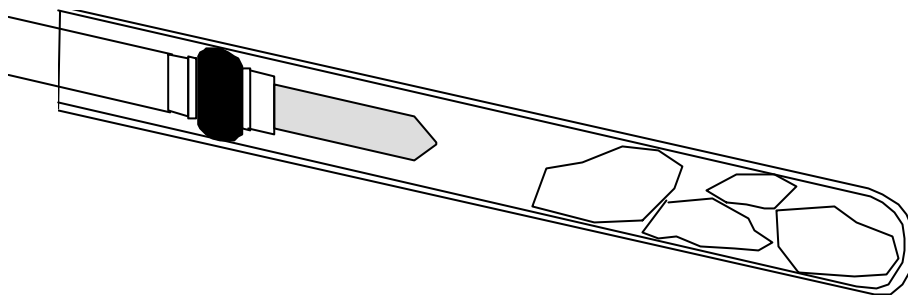


Figur 2.13 Principiellt utseende på RH-prob instucken i mätrör.

2. Den andra metoden var en vidareutveckling som byggde på den första. Skillnaden var att RH-proben satt kvar i mätröret under en längre tid och avläsningar gjordes kontinuerligt hela mätperioden. Genom att låta proben sitta kvar i mätröret minskades effekter som gav bidrag till totala mätosäkerheten. Exempelvis minskades betydelsen av probens fuktkapacitet. Det åtgår cirka 4 mg fukt för att fukta upp proben så den kommer i jämvikt vid en normal fuktmätning. Enligt Sjöberg (1998b,c) ger detta ett fel på cirka 2 % RH som halveras var femte dygn. Borrhållet blev också mer temperaturstabil, vilket var gynnsamt, när proben satt kvar.

Mätrören var monterade i behållarens botten och tätade med en diffusionsöppen tejp mot betongen och med en gummikork mot den omgivande luften. När mätningen började avlägsnades gummikorkarna och RH-proberna placerades i mätrören där de fick sitta kvar under några veckor då värden lästes av kontinuerligt. De avlästa värdena justerades med kalibreringskurvor. I inledande försök användes prob HMP 36 och handinstrument HMI 31 men i de flesta mätningarna användes prob HMP44 samt datasamlingslogger Mitec AT40.

3. Den tredje metoden användes för att mäta RH på urtagna provbitar som lades i provrör. I denna metod togs provbitar ur betongen på flera nivåer så att en fuktprofil kunde bestämmas. Provkroppen sönderdelades med slägga och huggmejsel och provbitar från respektive nivå valdes ut snabbt och placerades i provrör som tätades med gummikork. Det var viktigt att sönderdelningen och placeringen av betongbitar i provrör gick snabbt så fukt inte avgick från proverna. Nästa dag placerades RH-prober i provrören, figur 2.14. Mätinstrumentet lästes av när RH-proben var i jämvikt med betongens RH. Mättiden var ungefär 24 timmar eller i vissa fall längre. De erhållna värdena omvandlades sedan enligt kalibreringskurvorna till RH. Prob HMP 36 och handinstrument HMI 31 användes till denna metod.



Figur 2.14 Urtaga betongbitar och RH-prob i ett provrör.

Mätosäkerhet

Mätosäkerheten för de tre metoderna som beskrivs i kapitel 2.3.1 är uppskattad utifrån egna mätningar och uppgifter som finns i litteraturen.

Beräkningar av osäkerheten finns redovisade i bilaga 1, som bygger på värden från Sjöberg (1998b,c). Standardiserad mätosäkerhet vid mätning med elektriska RH-instrument låg mellan $\pm 1,7$ och $\pm 3,2$ % RH, se tabell 2.12.

Tabell 2.12 Standardiserad mätosäkerhet vid mätning med elektriska RH-instrument.

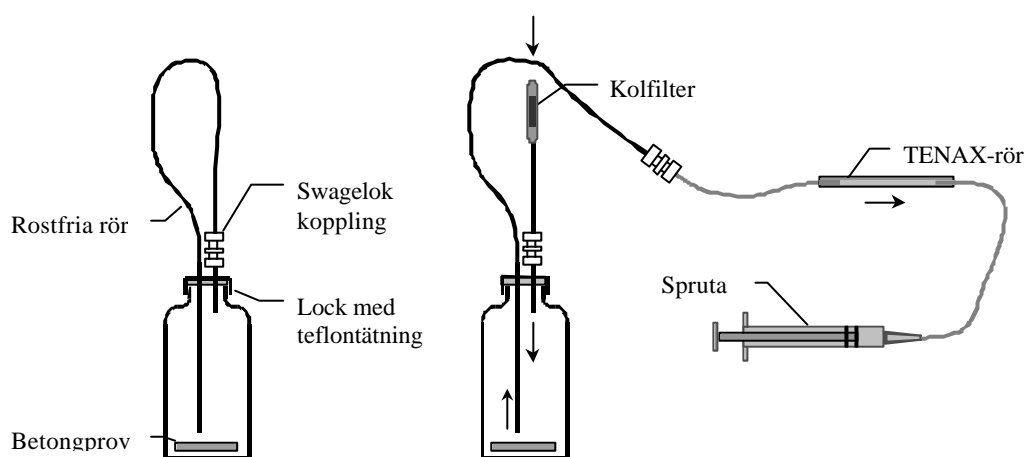
vct	Metod 1	Metod 2	Metod 3
0,4	$\pm 3,2$	$\pm 1,7$	$\pm 2,0$
0,7	$\pm 2,8$	$\pm 1,6$	$\pm 2,0$

2.3.2 Kolväten i betong

Provtagningsutrustning

Mätning av kolväten (OCIC) i betong skedde i två steg. Första steget var provtagning med så kallad headspaceteknik där kolväten (OC) fångades upp och anrikades på en adsorbent. Därefter följde analys med gaskromatografisk teknik (GC-FID).

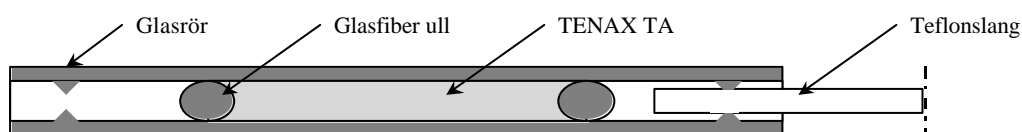
Headspace tekniken innebar först en provberedningen där provet delades ned i centimeterstora fraktioner med samma utrustning och teknik som vid urtagning av prover till fuktmetning i provrör, kapitel 2.3.1. Sedan lades bitarna i en 250 ml stor glasflaska med vid hals ($\text{\O}_{\text{inv}} = 30 \text{ mm}$), se figur 2.15. Flaskans lock hade en invändig packning av teflon för att inga OC skulle avges eller tas upp av locket. I locket fanns rörgenomgångar av rostfritt stål. Detta möjliggjorde kontrollerat utbyte av luft i flaskan i samband med provtagningarna. Provtagningen skedde då kolvätena i betongen kommit i jämvikt med luften i flaska.



Figur 2.15 Flaskan vid konditionering respektive provtagning.

Vid provtagningen användes en plastspruta med volymen 20 ml för att suga rätt luftmängd genom TENAX-röret.

Som adsorbent vid provtagning för analys av kolväten användes fyllda glasrör (TENAX-rör), se figur 2.16. Rörens längd var cirka 155 mm och innerdiameter 3,2 mm. I röret fanns cirka 0,15 g TENAX TA mesh 20 - 35 mellan två tussar av glasfiberull. Rören hade en "hoptryckning" i varje ände så att en teflonslang ($\text{\O}_{\text{utv}} = 1.8 \text{ mm}$) som trädde in i röret slöt tätt mot glaset.



Figur 2.16 TENAX-rör, glasrör med 0,15g TENAX-TA.

Provtagningsmetod

Metoden som användes vid mätning av flyktiga kolväten i betong var en anpassad headspace-teknik. Headspace innebär att luft som står i jämvikt med provet i en sluten volym analyseras.

Betongkärnor till försöken borrades ur provkropparna med en kärnborr som gav en kärna med 25 mm diametern. Kärnor ”skivades” och lades genast i flaskor som förslöts och märktes. I de första proven skivades kärnorna med abrasiv vattenskarving. Utrustningen för detta fanns på Institutionen för produktionsteknik, Chalmers. Vattenstrålen gav en fin snittyta men vissa kolväten riskerades att spolats bort närmast snittet. I de senare proven spräcktes kärnan med huggmejsel. Detta gav inte samma möjlighet att bestämma provbitarnas storlek eftersom snittytan inte var förutsägbar. Metoden med huggmejsel var snabbare och mindre kostsam än metoden med vattenskarving.

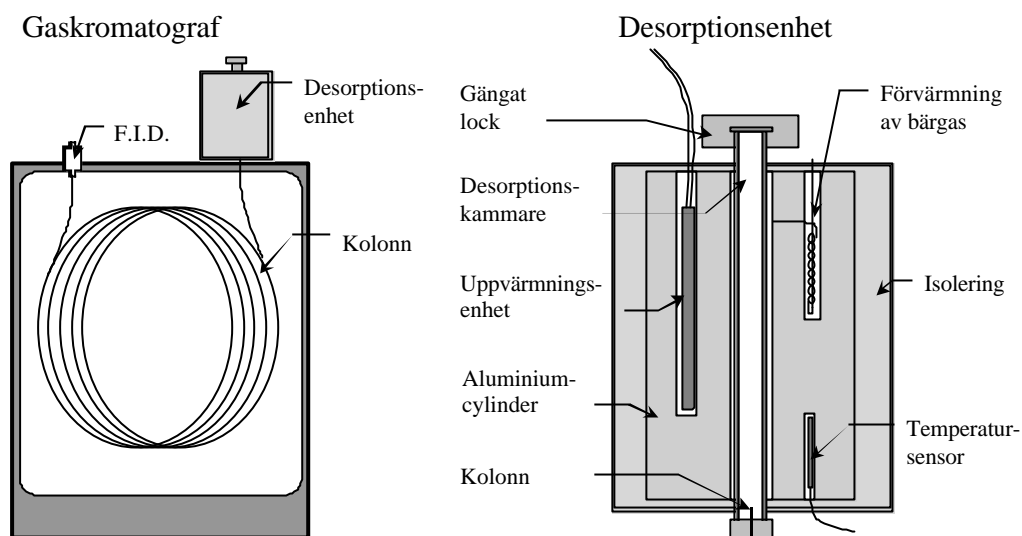
Flaskorna med betongskivorna konditionerades på olika sätt. Bland annat varierades konditioneringstid och konditioneringstemperatur.

Vid provtagningen skruvades ett slangfäste till TENAX-röret fast på flaskans swagelok-koppling, figur 2.15. På röret som suger in luft i flaskan under provtagningen fästes ett kolrör för att rena luften och därmed förhindra att kolväten i rumsluften inte gav utslag i senare analyser. En 20 ml-plastspruta användes till att suga en bestämd luftmängd genom TENAX-röret. Mängden luft som sögs genom TENAX-röret varierades, men var i huvudsak 10 ml. De olika rören och sprutan var huvudsakligen sammanbundna med teflonslang. Kopplingarna utgjordes dock av swagelok eller silikonslang.

Analysutrustning

Analys av kolväten som adsorberats på TENAX-rör gjordes med GC (gaskromatograf) av fabrikat Varian 3350. För kvantifiering av koncentrationen var GC:n utrustad med FID (flamjonisationsdetektor). För att identifiera topparna i kromatogrammen användes MS (masspektrometer).

GC:n på Institutionen för byggnadsmaterial, Chalmers, hade modifierats så att termisk desorption av kolväten i TENAX-rör kunde ske. Utrustningen modifierades i samarbete med Dr. Olle Ramnäs på Institutionen för kemisk miljövetenskap, Chalmers. Desorptionskammaren som tillverkades av rostfritt stål var omsluten av en isolerad aluminiumcylinder för att få god temperaturstabilitet, se figur 2.17. I aluminiumcylindern skedde även förvärmning av bärgasen. Temperaturen i aluminiumcylindern reglerades med hjälp av en inmonterad uppvärmningsenhet som styrdes av GC:n.



Figur 2.17 Principskiss av GC-FID med detaljbild av egen konstruerad injektorenhet för termisk desorption av TENAX-rör.

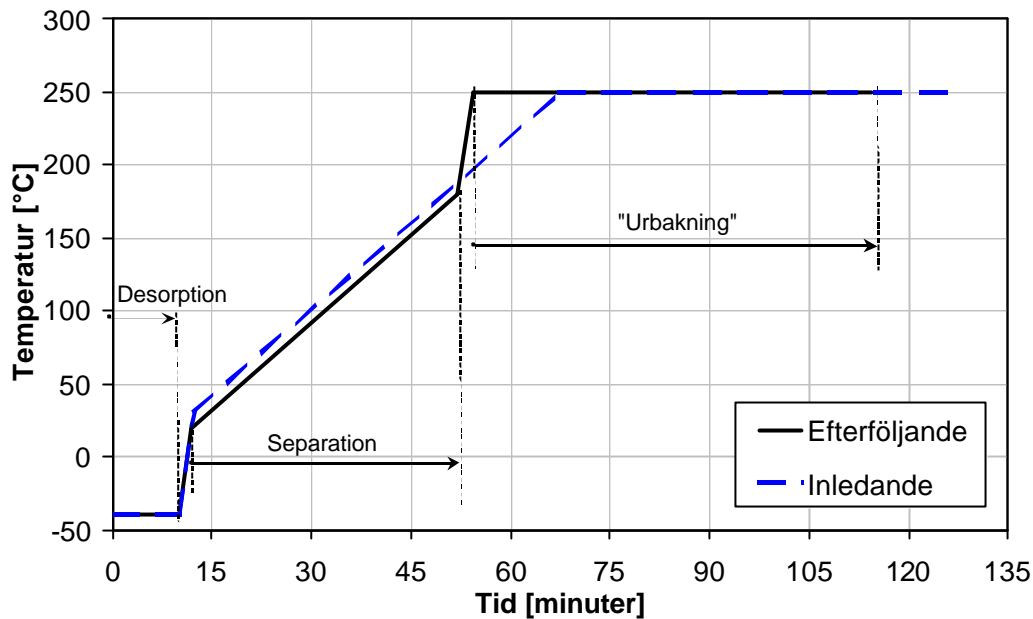
GC:n var utrustad med en 60 meter lång polär kolonn med 0,25 micron fas. Kolonnens temperaturgränser var från -60 °C till 325/350 °C.

Vätgas (H_2) användes både som bärgas och som bränslegas till flamjonisationsdetektorn.

Analysmetod

Metoden som användes för analys av OC som anrikats på adsorbentör byggde på gaskromatografisk teknik. Desorptionen av adsorbenten skedde termiskt och detektionen av kolväten skedde med hjälp av flamjonisation och i vissa fall med masspektroskopi.

Vid den termiska desorptionen frigjordes adsorberade VOC från adsorbenten och fördes med bärgasen in på kolonnens stationära fas. Under desorptionsfasen som varade cirka tio minuter hölls kolonnen nerkyld så att VOC kondenserades och anrikades i början av kolonnen. Efter desorptionsfasen höjdes temperaturen på kolonnen enligt ett fastställt schema, figur 2.18. När temperaturen i kolonnen höjdes börjar VOC vandra genom kolonnen. VOC separeras under vandringen på grund av att de hålls kvar olika hårt i kolonnens stationära fas. Det ligger en konstant spänning över lågan i FID:en. När kolvätena passerar som organiska kol-väte-radikaler leds strömmen lättare och resulterar i en högre strömstyrka. Den relativa strömstyrkan plottas mot tiden i ett kromatogram.

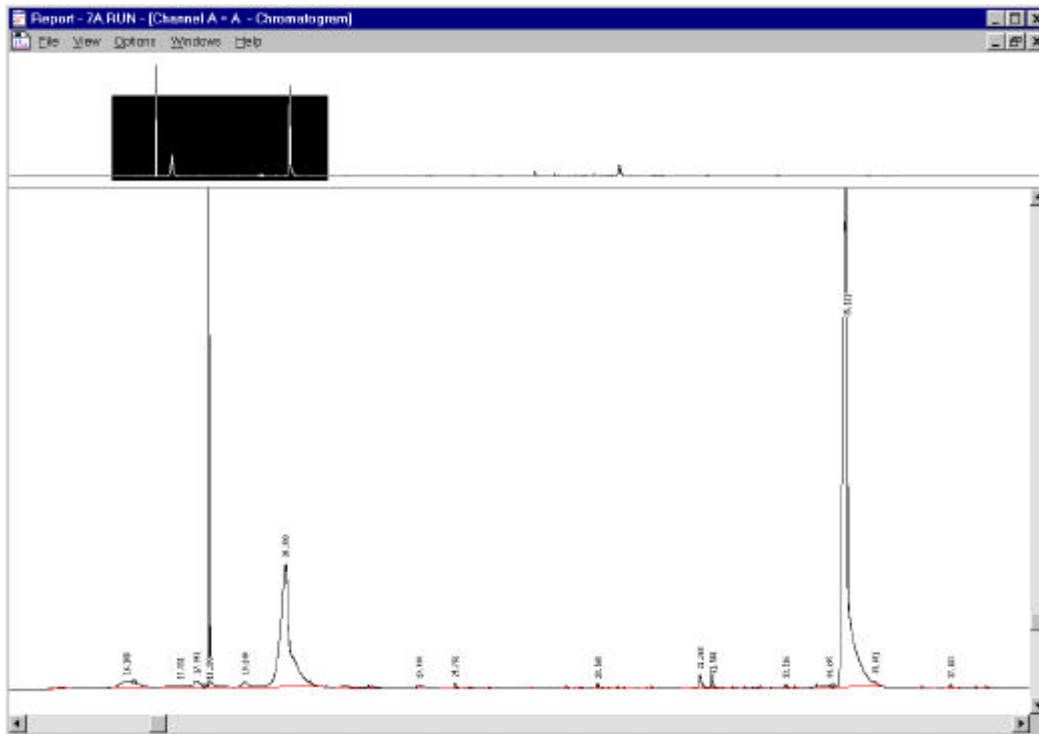


Figur 2.18 Temperaturprogram för kolonnen under analys.

Temperaturen i desorptionsugnen hölls konstant 230°C under hela analysen och trycket på bärgasen (H₂) var konstant cirka 15 Psi. Bärgasen förde in de desorberade VOC på kolonnen under desorptionsfasen. En halvautomatisk kryoutrustning användes för att hålla kolonnen nedkyld till -40°C med hjälp flytande kväve (N₂) under desorptionsfasen. Desorptionsfasen varade tio minuter. Temperaturen på kolonnen höjdes sedan enligt ett fast program där den första höjningen (-gradienten) var +30°C/minut till temperaturen nått +20°C. När temperaturen nått +20°C började separationsfasen. Under separationsfasen höjdes temperaturen +4°C/minut till temperaturen nått +180°C. Slutligen ökades temperaturgradienten igen till +30°C/minut till +250°C där temperaturen hölls konstant i 60 min så kolonnen bakades ur, det vill säga att alla "eftersläpande kolväten" fick tid att komma ut, se figur 2.18.

Några av de tidiga analyserna gjordes med ett annorlunda temperaturprogram. Efter att temperaturprogrammet ändrats gick det bättre att skilja de mest lättflyktiga kolvätena åt. I det ursprungliga temperaturprogrammet hölls temperaturen vid -40°C i tio minuter sedan ökade den med +30°C/minut till 30°C. Därefter ökade temperaturen med +4°C/minut till den nådde +250°C där temperaturen hölls konstant i 60 minuter.

Resultatet från flamjonisationsdetektorn presenterades i form av ett diagram, så kallat kromatogram med retentionstiden på den liggande axeln och relativt utslag hos FID på den stående. Varje topp i kromatogrammet motsvarar ett ämne med en specifik retentionstid. Med kännedom om provtagningsvolymen för det analyserade TENAX-röret och den integrerade ytan under "topparna" i kromatogrammet kunde koncentrationen totalt eller för enskilda kolväten beräknas. Haltberäkningar utförs med hjälp av provtagningsvolymen för respektive rör och halten kolväten anges som toluenekvivalenter. Exempel på ett kromatogram visas i figur 2.19.



Figur 2.19 Kromatogram där den första (trekantiga) toppen, vid ungefär 20 minuter, är butanol och den andra (största) toppen, efter ungefär 35 minuter, är etylhexanol.

Metoden finns även kortfattat beskriven i Wengholt Johnsson (1995)

TENAX-rör i de första mätserierna analyserades med GC-FID av Dr. Olle Ramnäs på Institutionen för kemisk miljövetenskap, Chalmers. Huvuddelen av analyserna har dock utförts på Institutionen för byggnadsmaterial, Chalmers. Metoden och utrustningen var i stort likadana. Skillnaderna var små och påverkar inte analysresultatet

Några analyser utfördes med GC-MS för att identifiera enskilda VOC. Dessa analyser skedde i huvudsak av Dr. Olle Ramnäs på Institutionen för kemisk miljövetenskap, Chalmers.

Mätosäkerhet

Standardiserad mätosäkerhet vid mätning av OCIC i betong kunde inte bestämmas exakt i denna begränsade studie. Totala mätosäkerheten i metoden bedömdes dock vara ungefär lika stor som vid provtagning av VOC med FLEC, se bilaga 3.

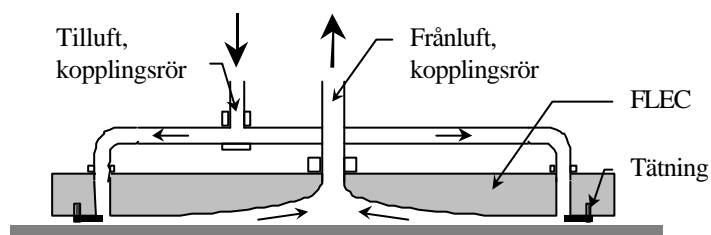
Totala standardiserad mätosäkerhet för metoden bedömdes vara $< \pm 20 \%$.

2.3.3 Emission från ytan

Provtagningsutrustning

Mätning av emission av VOC från materialytor skedde i två steg. Först gjordes provtagning med hjälp av en speciell mätkammare där VOC fångades upp, sögs ut och anrikades på en adsorbent. Därefter följde analys med GC-FID (gaskromatografisk teknik).

Mätkammaren som används i arbetet 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 2.20. Ren luft (<0,1 ppm kolväten) från gastub fuktas och trycks in i genom en springa i kanten på mätcellen. Luften strömmar över materialytan och ut genom ett rör i centrum. Ett delflöde av luften passerar sedan genom ett TENAX-rör och kolvätena adsorberas i det. Mätcellen och dess kapacitet beskrivs i Wolkoff *et al* (1991) och Nordtest (1995). Mätcellens aktiva område har en yta på 0,0177 m² och volymen 35·10⁻⁶ m³.



Figur 2.20 Principbild på genomskärning av FLEC

Luften som trycktes in i mätcellen renades först genom kolrör och fuktades sedan till 50 % RH genom att ett delflöde leddes genom en gastvättflaska. Anordningen för fuktning av luften beskrivs detaljerat av Wengholt Johnsson (1995). Till FLEC:ens utflöde anslöts ett TENAX-rör och en luftpump av märket SKC PCXR8.

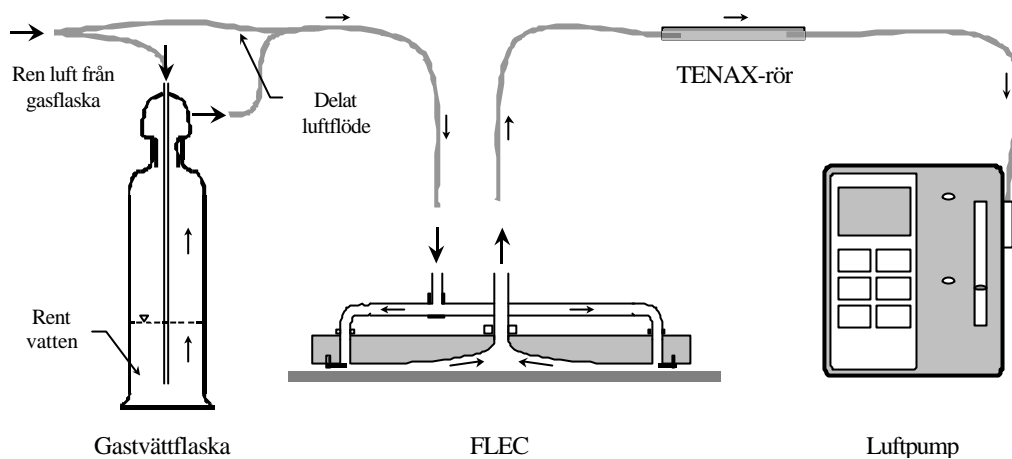
Luftpumpen gav konstant flöde under en bestämd tid. Mätosäkerhet i flöde bedömdes vara ± 4 %. Mätosäkerhet i tidtagning uppgavs vara ± 0,05 % i produktbladet.

Provtagningsmetod

Proverna konditionerades i 24 timmar innan provtagning. Provtagningar i början av studien skedde dock efter endast 4 timmars konditionering. Under konditioneringen låg FLEC:en på materialytan med konstant luftflöde på 100 ml/min.

Vid provtagningen monterades ett TENAX-rör till FLEC:ens frånluft med en teflonslang, se figur 2.21. Slangen som har betydligt mindre diameter än

frånluftsröret stacks in i detta. Pumpen kopplades till TENAX-röret och pumpade 25 ml/min i fyra minuter. Tillvägagångssätt vid provtagning beskrivs också av Wengholt Johnsson (1995).



Figur 2.21 Uppställning vid provtagning med FLEC. Ren luft från en gastub fuktas och leds in i FLEC. 100 ml luft sugs genom ett TENAX-rör för senare analys i GC-FID.

Utrustningen för analys av TENAX-rör var en GC (gaskromatograf) med FID (flamjonisationsdetektor). Utrustningen och analysmetoden beskrivs i kapitel 2.3.2.

Mätosäkerhet

Standardiserad mätosäkerhet vid mätning av emission från provkropparna kunde inte bestämmas exakt i denna begränsade studie. En uppskattning av den totala mätosäkerheten i metoden görs dock i bilaga 2.

Totala standardiserad mätosäkerhet för metoden bedömdes vara $< \pm 20 \%$.

3 Experiment där matta och lim kombinerats

Detta kapitel beskriver ett flerfaktorförsök som påbörjades tidigt i doktorandarbetet. I början var försöket bara tänkt att visa om det var mattan eller limmet som gav upphov till nedbrytningsprodukter. Det första försöket bestod därför endast av två prov, ett med matta och lim samt ett utan lim (bara matta). Utifrån resultatet från det försöket skapades nya hypoteser och teorier. Två månader efter det första försöket startades åtta nya prov och ytterligare två månader senare sex till. Studien ligger till grund för det fortsatta arbetet och förståelsen för området som redovisas i den kvalitativa modellen i kapitel 6.

3.1 Provkropp

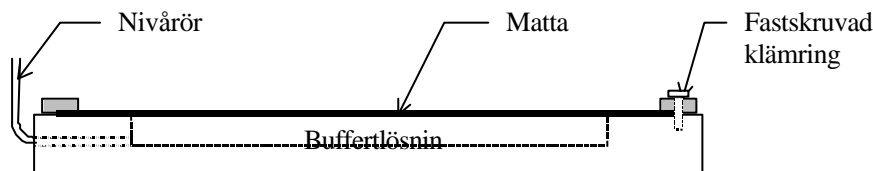
I undersökning exponerades olika mattor och lim mot alkaliska lösningar med pH 11 och 13. Syftet var att studera samverkan mellan lim och golvbeläggning utan att behöva använda fuktig betong som underlag. Genom att betongen ersattes med en alkalisk lösning kunde egenskaper som alkalibeständigheten hos mattan studeras. Efter att provkropparna färdigställts och konditionerats mättes emmissionerna vid flera tillfällen genom provtagning med FLEC och TENAX-rör och efterföljande analys med GC-FID. Försökssammanställningen anges i tabell 3.1 som de avvikelser som gjorts från referenssystemet. Referenssystemet är uppbyggt på provkroppen "plattan" (P1) med en homogen PVC-matta (F1), 10 g vattenbaserat dispersionslim (A1) samt pH-lösning (P3) med pH ungefär 13.

Tabell 3.1 Sammanställning av de viktigaste skillnaderna hos provkropparna i undersökningen. "Grunduppsättningen" (2a&b) är: matta M1 – 10g lim L1 – VT 15 min – vätska, P3, pH cirka 13.

försök	Speciellt för provkroppen i försöket			
	Start 1996	Lösning	Matta	Lim
d1.00	22/4	ingen vätska	stål	A1
d1.01	22/4	ingen vätska	F1	A1
d1.02	28/10	ingen vätska	F2 (skiktad PVC)	A1
d1.03	28/10	ingen vätska	F3 (linoleum)	A1
d1.1a	22/4	P3	F1	inget lim
d1.1b	28/6	P3	F1	inget lim
d1.2a	22/4	P3, ref.prov	F1	A1
d1.2b	28/6	P3, ref.prov	F1	A1
d1.3a	28/6	P3	F1	A1, lim på väv
d1.3b	28/6	P3	F1	A1, lim på väv
d1.4a	28/6	P3	F1	A3 (Våtrumslim)
d1.4b	28/6	P3	F1	A3 (Våtrumslim)
d1.5	28/6	P1, pH 11	F1	A1

d1.6	28/6	P2, pH 13	F1	A1
d1.7a	28/10	P3	F1	A1 (5 g)
d1.7b	28/10	P3	F1	A1 (10 g)
d1.7c	28/10	P3	F1	A1 (15 g)
d1.8a	28/10	P3	F3 (linoleum)	A1
d1.8b	28/10	P3	F3 (linoleum)	A2 (Casco Proff)
d1.9	28/10	P3	F2 (skiktad PVC)	A1

Mattor av tre olika typer skars till och små hål för skruvar till klämringen stansades ut. Därefter ströks lim på baksidan av mattan. Några försök gjordes dock utan lim, se tabell 3.1. I försök d1.3a och b ströks limmet på en glasfiberväv. Vid limning av försök d1.2 – d1.6 användes tandad limspredare som gav ungefär 10 gram lim på den limmade ytan, limskiktet jämnades ut med pensel innan mattan fästes på provkroppen. I försök d1.7a – d1.9 vägdes limmet och ströks på med pensel enligt metoden i kapitel 2.1.3. Väntetiden vid limningen var ungefär 15 minuter innan mattan klämdes fast på provkroppen, se figur 3.1. När mattan skruvats fast på plattan, med klämringen fylldes alkalisk lösning på genom hålen i sidan. Dessa hål tätades sedan med skruvar.

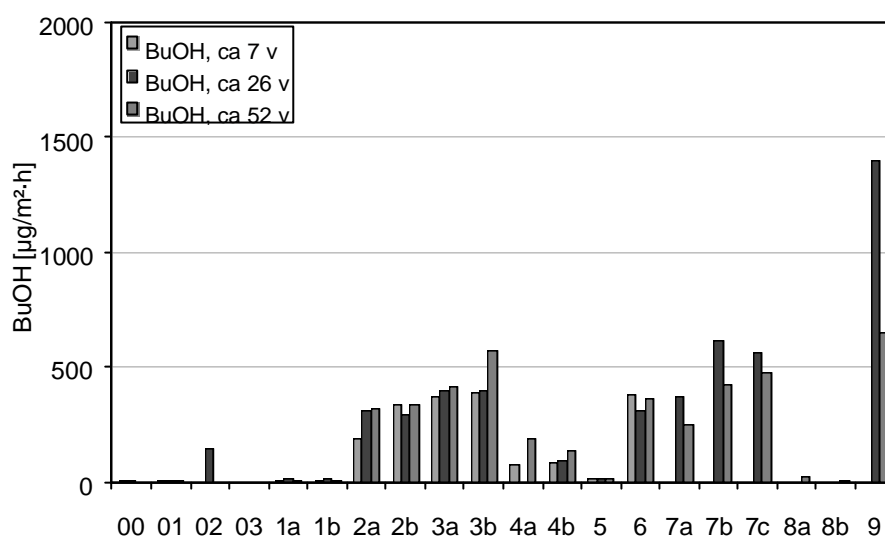


Figur 3.1 Provkroppen som används till undersökningen.

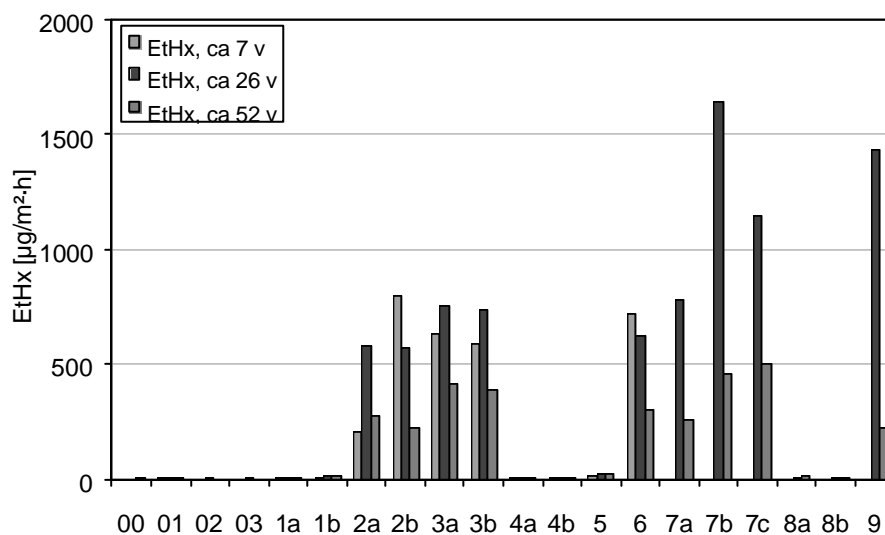
3.2 Mätmetod och mätresultat

Efter ungefär fyra veckor gjordes de första emissionsmätningarna på proverna. Mätningarna skedde med lite olika intervall för de olika proverna. På några av proverna skedde första mätningen ungefär 32 veckor efter limningen. Provtagningen skedde enligt metoden i kapitel 2.3.3 med FLEC och TENAX-rör. Efterföljande analys på TENAX-röret gjordes med GC-FID.

Resultaten i form av emissionsfaktorn EF från mattan redovisas i figur 3.2 och 3.3.



Figur 3.2 Jämförelse mellan emissionen av butanol från 20 system av matta och lim som exponerats mot alkaliska lösningar.



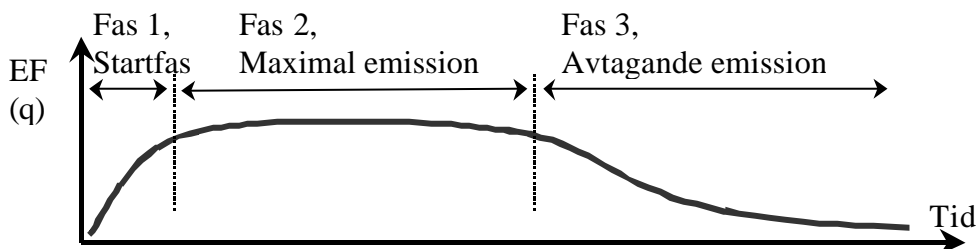
Figur 3.3 Jämförelse mellan emissionen av etylhexanol från 20 system av matta och lim som exponerats mot alkaliska lösningar.

3.3 Utvärdering av resultat

3.3.1 Beskrivning av generellt emissionsförlopp

Generellt för alla prover som studerats i denna undersökning är att deras emissionsförlopp kan beskrivas på liknande sätt. Förloppet går grovt att dela in i tre faser enligt figur 3.4. Faserna kan variera i utsträckning och ibland har någon fas varit så kort att den "fattats". Denna variation kan orsakas av exempelvis nedbrytningens omfattning, mattans täthet och underlagets beskaffenhet. Faserna karakteriseras av:

1. Under en inledande startfas ökar emissionen från ytan med tiden. Det kan bero på att nedbrytningsprodukterna som bildats behöver en viss tid att tränga genom mattan. Tiden som det tar kan bero på nedbrytningens intensitet och mattans täthet.
2. Under fas två är emissionen ungefär lika stor hela tiden. Storleken kan bero på nedbrytningens intensitet och mattans täthet. Fasens längd kan bero på nedbrytningens omfattning och underlagets beskaffenhet. Förhållandena i underlaget är antagligen avgörande för hur länge nedbrytningen fortgår.
3. Under fas tre avtar emissionen från ytan. Detta kan bero på att nedbrytningen har minskat eller slutat. Det som emitterar från ytan är antagligen kvarvarande kolväten från den tidigare nedbrytningen. Fasens längd kan bero på mattans täthet samt underlagets beskaffenhet.



Figur 3.4 Emissionsförloppets tre faser vid alkalisk nedbrytning av lim i golvkonstruktioner.

3.3.2 Uppmätt emissionsförlopp

Emissionsförloppet hos prov d1.2a följdes genom FLEC-mätningar med täta intervall. Syftet med de täta mätningarna var att beskriva förloppet och studera hur emissionen ökade för att så småningom eventuellt avta och sluta helt.

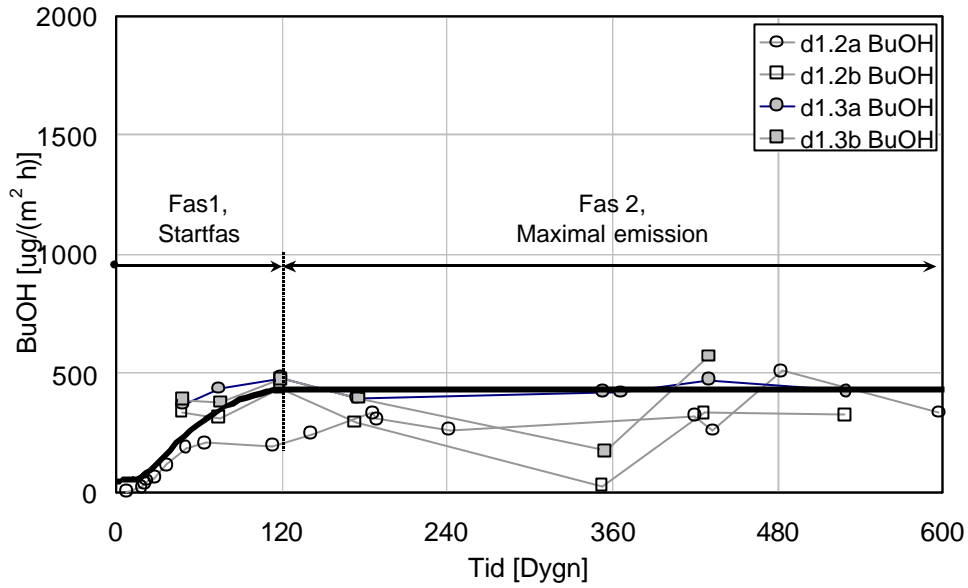
Genom att lägga in resultaten från referensproverna d1.2a och b tillsammans med resultaten från proverna d1.3a och b kan en medellinje för emissionsförloppet uppskattas, se figur 3.5 och 3.6.

Proverna d1.3a och b hade limmet på väv, skilt från mattan. Denna skillnad från referensprovet har inte resulterat i någon märkbar skillnad i mätresultat. Detta indikerar att limmet bryts ner likadant i samtliga fyra prover, antagligen utan någon betydelsefull samverkan med mattan. Dock skall sägas att limmet löses upp till viss del av lösningen och grumlar denna. Det är troligt att lim som lösts i den alkaliska lösningen kan ha kommit i kontakt med mattan.

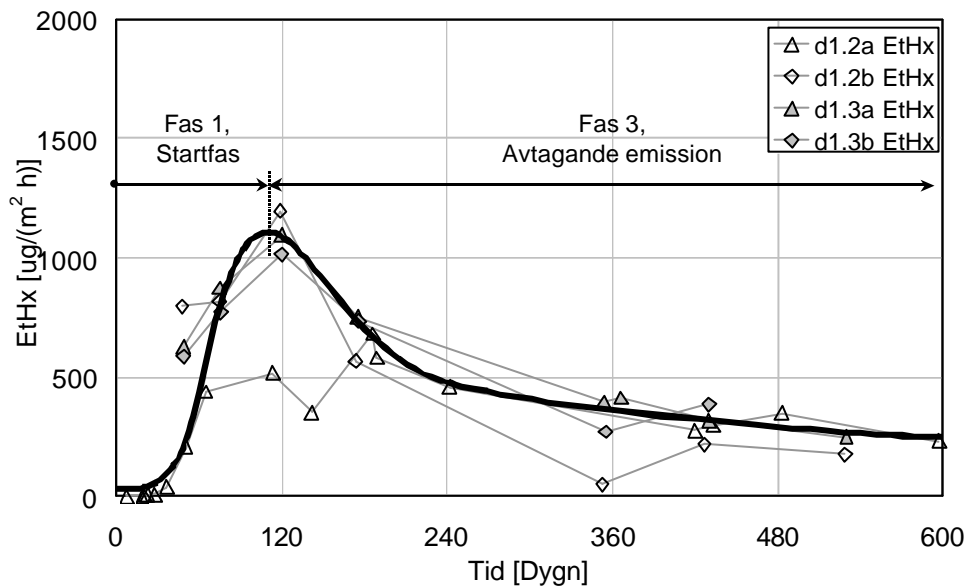
Genom att lägga in en trendlinje i figurerna 3.5 och 3.6 kan olika faserna från identifieras, se även figur 3.4. Det har dock endast gått att identifiera två faser i varje figur.

Enligt trendlinjen i figur 3.5 har fas två för butanol inte slutat efter drygt 1,5 år. En teori bygger på att butanol är mycket vattenlösligt. Kraftig nedbrytning av lim kan ha ägt rum och butanol som bildats har lösts i den alkaliska lösningen. På grund av att butanol kan avgå från vätskefasen upprätthölls en konstant koncentrationsskillnad över mattan och därmed ett konstant flöde (emission).

Enligt trendlinjen i figur 3.6 finns inte fas två för etylhexanol. En tänkbar förklaring bygger på att etylhexanol har liten vattenlöslighet. En kraftig nedbrytning av lim kan ha ägt rum och eftersom endast en liten mängd etylhexanol kunde lösas i vätskan blev följden en hög koncentration i gasfas under mattan. Koncentrationen under matta avtar monotont varefter etylhexanol avgår. Denna minskande koncentrationsskillnad över mattan medför att flödet (emissionen) minskar.



Figur 3.5 Medellinje för butanol då ungefär 10 gram lim exponeras mot alkalisk lösning under homogen PVC-matta. Medellinjen är framtagen genom sammanvägning av fyra mätseriers trendlinjer.



Figur 3.6 Medellinje för etylhexanol då ungefär 10 gram lim exponeras mot alkalisk lösning under homogen PVC-matta. Medellinjen är framtagen genom sammanvägning av fyra mätseriers trendlinjer.

3.3.3 Massbalans av OH⁻ samt nedbrytningsprodukter

Med hjälp av en massbalans kan mängden förbrukade och skapade ämnen uppskattas. Genom att beräkna de avgörande komponenterna i systemet fås en rimlighetsbedömning.

Sampolymeren i limmet är den avgörande komponenterna som förbrukas. Emissioner från provkroppen och eventuella nedbrytningsprodukter lösta i lösningen är de som bildats.

Massbalansen för försök d1.2 samt d1.3 sammanfattas i tabell 3.2. Kolumnen ”tillverkade kolväten” säger i korthet att limmet räcker enligt antagande i nedanstående text till att producera cirka 1,65 g nedbrytningsprodukter

Kolumnen ”förbrukade kolväten” säger i korthet att 0,24 g har emitterat från provet. Resterande kolväten som producerats av reaktionen kan vara lösta i den alkaliska lösningen upp till 16,71 g.

Tabell 3.2 Massbalans för avgörande komponenter i försök d1.2 & d1.3 [g]. Volymen pH-lösning är 0,214 liter och ytan med lim är 0,0214 m².

ämne	”Tillverkade” kolväten (+) Limmängd	”Förbrukade” kolväten (-)	
		Löst i vatten	Yta i figur
BuOH	0,8	16,5	0,11
EtHx	0,8	0,21	0,13
Totalt	Ca 1,65	16,71	0,24

Limmängd

Leverantören av limmet som använts i försöken anger i produktinformationen att det består till 10 – 30 % av sampolymerer. Vid telefonsamtal preciserar en kemist att akrylatdispersionen är en 55%-ig vattenlösning och utgör cirka 30%-vikt av limmet. Detta innebär att cirka 16,5 %-vikt av limmet utgörs av sampolymerer som kan hydrolyseras.

Ett rimligt antagande är att akrylatsampolymeren består av 50% butylakrylat samt 50% 2-etyhexakrylat. Eventuellt kan det ibland förekomma någon annan akrylat också, men låt oss för enkelhetens skull bortes från det. Antag att all sampolymer kan spjälkas till butanol och etylhexanol utan att det blir några rester kvar. Detta är kanske osannolikt men det ger maximal mängd nedbrytningsprodukter. Resonemanget innebär att maximalt skulle 10 g lim brytas ned till cirka 0,8 g butanol samt 0,8 g etylhexanol.

Löst i vätska

Det finns inget porsystem som kolvätena kan vandra ner i men väl en vätska de kan lösa sig i. Butanol löses 77 g/l vatten och etylhexanol 1 g/l vatten enligt CRC (2000). Eftersom det ryms ungefär 214 gram vatten i fördjupningen på plattan så kan 16,5 g butanol samt 0,21 g etylhexanol lösas i detta.

Total mängd emitterat kolväte genom matta

Den totala mängden kolväten som emitterat genom mattan kan beräknas genom att integrera avgivningen över tiden. Metoden visas noggrant i kapitel 8.2.

I fallet med butanol blir integralen som motsvarar ytan under medellinjen i figur 3.5 lika med 5,3 [g/m²]. Multiplicerat med plattans yta ($21 \cdot 10^{-3}$ m²) blir totala mängden emitterat butanol 0,11 g.

I fallet med etylhexanol blir integralen som motsvarar ytan under medellinjen i figur 3.6 lika med 6,3 [g/m²]. Multiplicerat med plattans yta ($21 \cdot 10^{-3}$ m²) blir totala mängden emitterat etylhexanol 0,13 g.

Massbalans

Enligt antagandena har det bildats cirka 0,8 g butanol och 0,11 g har emitterat genom ytan. Kvarvarande 0,69 g kan finnas löst i mattan samt i pH-lösningen.

Det bildades även cirka 0,8 g etylhexanol enligt antagandena. 0,13 har emitterat genom ytan och 0,02 g kan ha löst sig i pH-lösningen men vart har resterande 0,65 g tagit vägen?

Kanske bildades de aldrig. Anledningen kan vara att 2-etylhexakrylaten inte bryts ned fullständigt eller att antagandet om fördelningen mellan sampolymererna inte stämmer.

3.3.4 Limmängdens betydelse

Jämförelsen som görs här syftar till att visa limmets betydelse för emissionen från provkropparna. Emissionen har mätts från sju försök där samma lim, matta och alkalisk lösning använts. I försök 7a, b och c saknas mätning vid 7 veckor.

I de tre första försöken som visas i figur 3.7 och 3.8 har olika mängder av lim använts i för övrigt likadana provkroppar. Mängderna är 5, 10 och 15 g i försök d1.7a, b respektive c. Mätningarna visar att det är minst emission från försöket med minst lim men ungefär lika stor emission från de andra två försöken.

Ser man till hela mätserien för butanol som presenteras i figur 3.9 är det tydligt att emissionen är större från försöket med 15 g lim än det med 10 g. Hela mätserien för emission av etylhexanol presenteras i figur 3.10 och där visas att de båda försöken har ungefär samma emissionsförlopp.

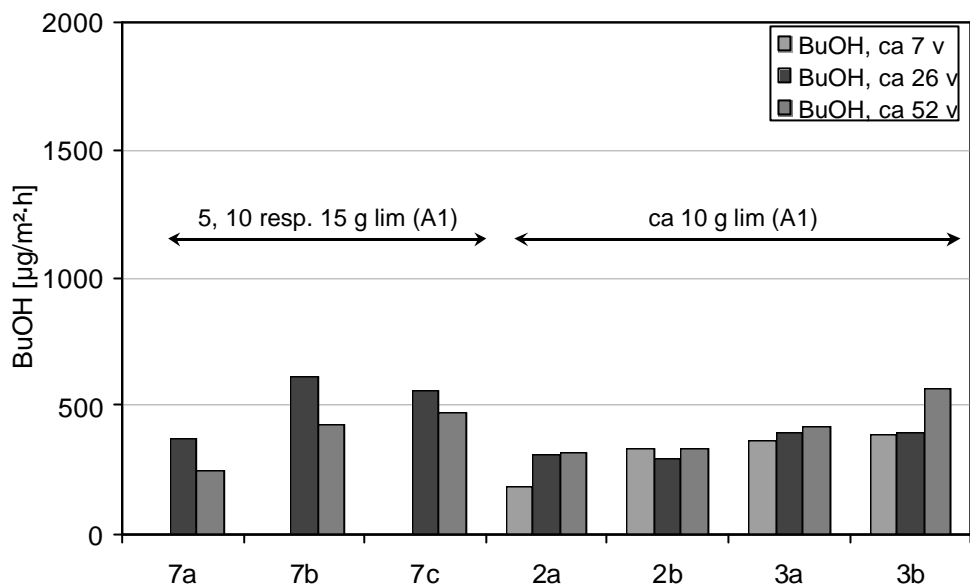
I försök d1.2a och 2b har ungefär 10 gram lim använts. Dessa är försökets referensprover. I försök d1.3a och 3b har ungefär 10 gram lim lagts på en flätad glasfiberväv, under mattan. Detta förfarande hade ingen inverkan på emissionen.

Ser man till hela mätserien kan man från resultaten för butanol i figur 3.7 tolka att emissionen har samma storlek och förlopp från alla fyra försöken. Samma sak gäller även för etylhexanol. Emission av hela mätserien för etylhexanol presenteras i figur 3.8. Variationerna hos resultaten i figurerna kan bero på mätosäkerheter och slumpmässiga variationer snarare än systematiska effekter av den studerade parametern.

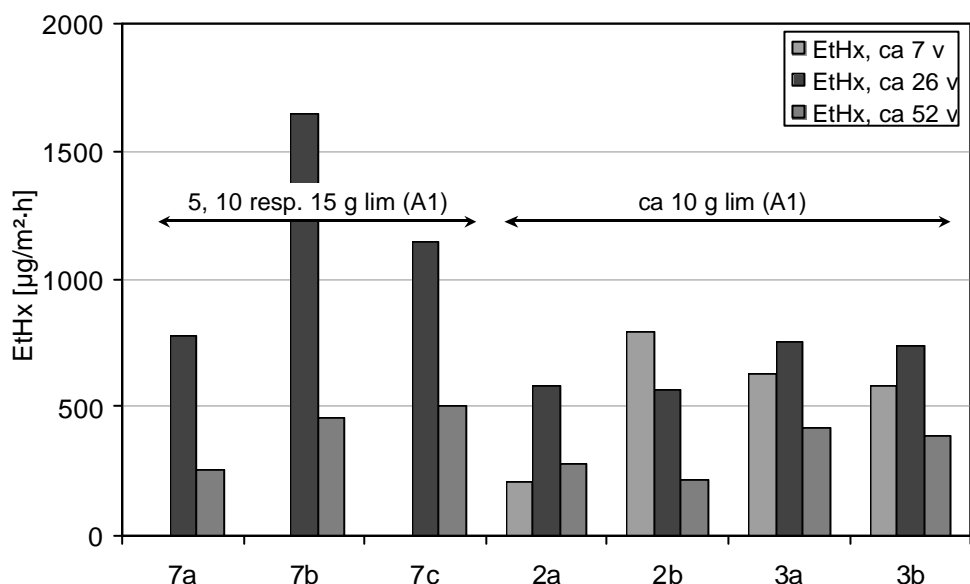
Då några andra plattor med samma lim och matta demonterades observerades det att limmet löst sig i pH-lösningen. Ett lager av limmet satt dock fortfarande kvar på mattans baksida. pH-lösningen hade ändrat konsistens och var mjölkaktig och vit istället för klar och genomskinlig som den var från början.

Möjliga slutsatser som kan dras av denna jämförelse är

- Mängden påfört lim påverkar emissionen vid riklig alkalisk nedbrytning för den aktuella materialkombinationen.
- Emissionen är lika stor oberoende av om limmet har direktkontakt eller inte med mattan vid alkalisk nedbrytning.



Figur 3.7 Jämförelse av emissionen av butanol då limmängd och sättet att applicera limmet varierar. d1.7a, 7b och 7c är tillverkade med 5, 10 respektive 15 g lim på matta. d1.2a och 2b har ungefär 10 g lim på mattan, d1.3a och 3b har ungefär 10 g lim på en vävd glasfiberduk som under mattan. Samtliga kombinationer av lim och matta exponeras för alkalisk lösning med pH 13.



Figur 3.8 Jämförelse av emissionen av butanol då limmängd och sättet att applicera limmet varierar. d1.7a, 7b och 7c är tillverkade med 5, 10 respektive 15 g lim på matta. d1.2a och 2b har ungefär 10 g lim på mattan, d1.3a och 3b har ungefär 10 g lim på en vävd glasfiberduk som under mattan. Samtliga kombinationer av lim och matta exponeras för alkalisk lösning med pH 13.

3.3.5 Massbalans vid olika limmängd – 5, 10 samt 15 g

En jämförelse görs här mellan tre försök med olika limmängd men i övrigt lika förhållande. Jämförelsen görs genom att sätta upp en massbalans av viktiga komponenter i dessa tre försök, d1.7a, b och c.

I tabell 3.3 visas massbalansen för sampolymeren som troligen är avgörande för emission från systemet. Startvärdena innan någon nedbrytning skett är följande;

Sampolymeren som finns tillgänglig för nedbrytningen beräknas på samma sätt som i kapitel 3.3.3. Antag att 16 % av limmet är akrylatsampolymer. Vid 5 g limmängd kan ($5 \cdot 0,16 =$) 0,8 g kolväten bildas vid fullständig nedbrytning. Analogt blir motsvarande mängd vid 10 och 15 g lim lika med 1,6 respektive 2,4 g.

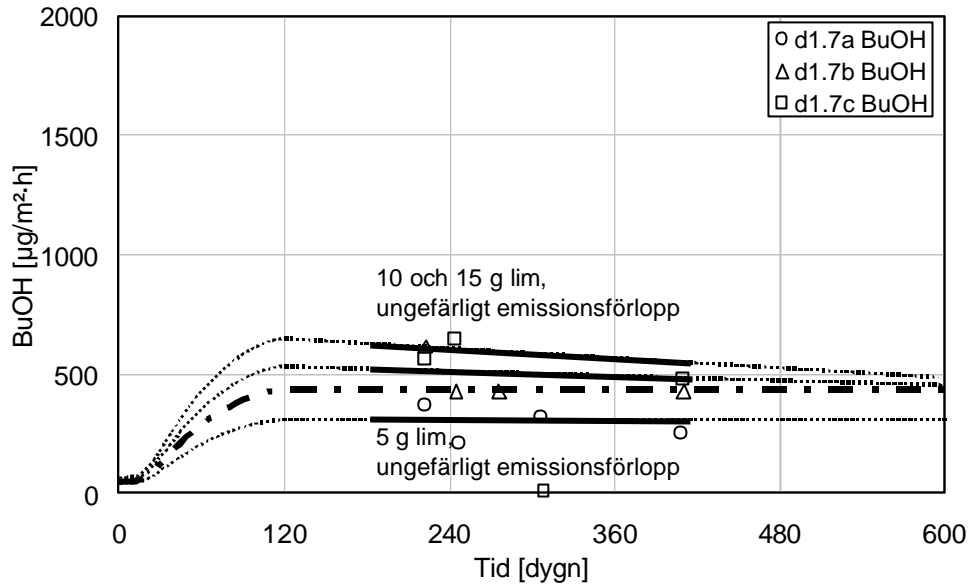
Tabell 3.3 Protokoll för kolväten i försök d1.7a, b och c. Mängderna [g] baserar sig på ytan $0,0214 \text{ m}^2$ samt $0,214$ liter vätska.

	d1.7a Polymer $\cdot 10^{-3}$ [g]	d1.7c Polymer $\cdot 10^{-3}$ [g]	d1.7c Polymer $\cdot 10^{-3}$ [g]
Start	800	1600	2400
Yta _{BuOH}	-79	-121	-143
Yta _{EtHx}	-125	-214	-214
”saknas”	596	1265	2043

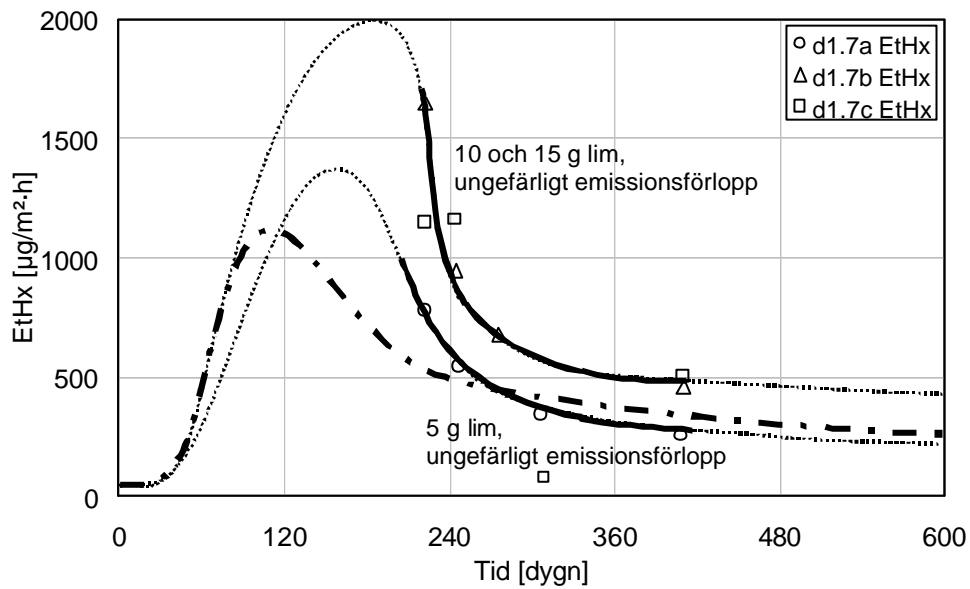
Emitterade kolväten från ytan beräknas på det sätt som diskuterats tidigare i kapitel 3.3.3. Eftersom det inte finns mätvärden för fas 1 och att de värden som finns bara är under ett halvt år görs en uppskattning av emissionsförloppet. Uppskattningen bygger dels på de mätvärden som gjorts i försöken men också på utseendet av medellinjen som bestämdes för emissionsförloppet hos fyra andra försök tidigare i detta kapitel.

De punkt-streckande linjerna i figur 3.9 och 3.10 är medellinje för undersökningen. Den heldragna linjen är emissionsförloppet under den period mätningar utförts och den prickade linjen är en uppskattning av emissionsförloppet med hänsyn till medellinjens form.

Massbalansen blev inte komplett. Det ”saknas” en mängd polymerer i tabellen. Detta kan förklaras med att de inte brutits ned eller så finns nedbrytningsprodukterna lösta i vätskan. Eftersom emissionen inte slutat finns det fortfarande en betydande koncentration av kolväten under mattan och i mattan.



Figur 3.9 Möjliga emissionsförlopp av butanol då 5, 10 respektive 15 g lim exponeras mot alkalisk lösning under homogen PVC-matta.



Figur 3.10 Möjliga emissionsförlopp av etylhexanol då 5, 10 respektive 15 g lim exponeras mot alkalisk lösning under homogen PVC-matta.

3.3.6 Kritiskt pH för nedbrytning av lim

Jämförelsen som görs här syftar till att visa om det är limmet som bryts ned samt om det kritiska pH-värdet ligger mellan 11 och 13. Jämförelsen görs mellan emissionen från sju försök som har delats in i två grupper, de med låg emission samt de med hög emission.

Staplarna till vänster i figur 3.11 och 3.12 har låg emission, de visar ingen eller små tecken på nedbrytning. Det första försöket d1.01 är mätt på en homogen PVC-matta. Mattan ligger löst på en stålplåt och har ej blivit utsatt för kemikalier eller solljus. Försök d1.1a och 1b är parallellprov som består av samma typ av matta som exponeras mot pH-lösning med pH 13 utan lim. Försök d1.5 består av samma typ av matta samt ett vattenbaserat dispersionslim som exponeras mot pH-lösning med pH 11. Emissionen från alla dessa försök är låg under hela mätperioden vilket kan förklaras med att ingen nedbrytning skett.

Staplar till höger i figurerna uppvisar stor emission från provkroppen till följd av kraftig nedbrytning av limmet. Försök d1.6 består av samma matta och lim som i d1.5 fast de har blivit exponerade mot Titrisol lösning med pH 13. Försök d1.2a och 2b är parallellprov som består av samma typ av matta och lim men exponerade mot alkalisk lösning med pH ungefär 13.

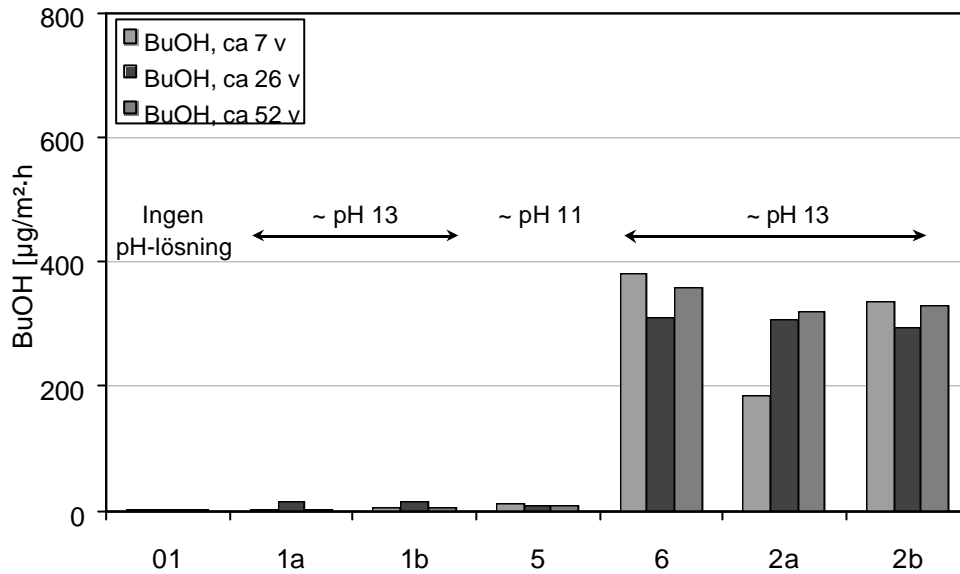
En jämförelse mellan emissionen från dubbelprovet d1.1a och b med dubbelprovet d1.2a och b visar att det inte verkar ske någon nedbrytning i försöket om provkroppen inte innehåller något lim. Betänk också att limmet består till cirka 16 % av en sampolymer som kan brytas ned till butanol och etylhexanol. Utifrån dessa resultat kan man dra slutsatsen att det är limmet som bryts ned.

Genom att jämföra försök 5 med dubbelprov d1.2a och 2b visar det sig att den alkaliska lösningens sammansättning spelar mindre roll. Det verkar inte vara avgörande vilka motjoner till OH^- som finns i vätskan utan enbart dess pH-nivån.

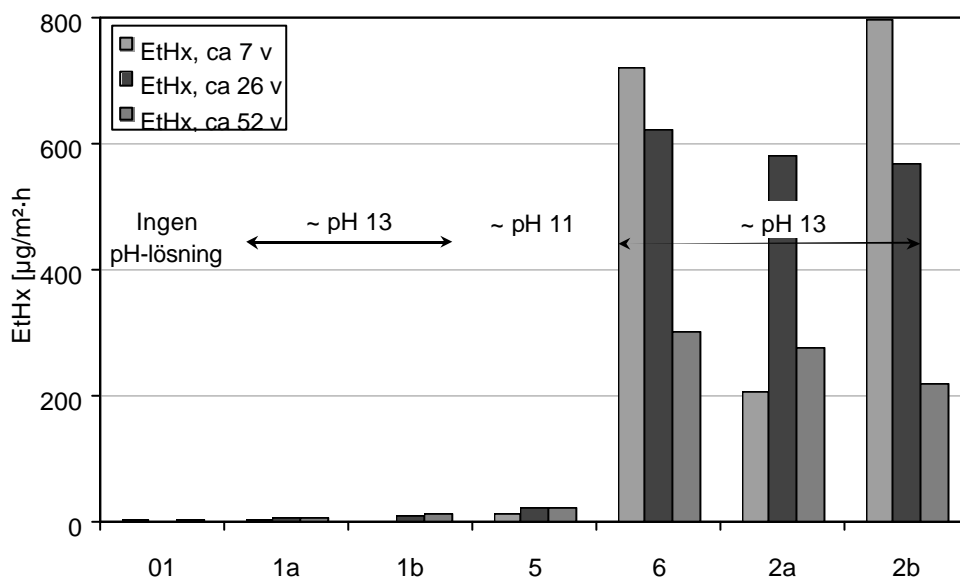
Ovanstående påstående, att pH-nivån är viktigast för nedbrytningen, kan bekräftas av att jämföra försök d1.5 med d1.6. Skillnaden mellan provkropparna i dessa försök är endast pH-lösningens pH-värde. Vid pH 11 (d1.5) är emissionen låg medan vid pH 13 (d1.6) är den hög. Det kan alltså finnas ett kritiskt pH-värde för nedbrytningen som ligger någonstans mellan 11 och 13. Detta verkar rimligt om man betänker att pH-skalan är logaritmisk så att koncentrationen OH^- är 100 gånger högre vid pH 13 än vid 11.

Möjliga slutsatser som kan dras av denna jämförelse är

- Limmet bryts ned, inte mattan, i denna materialkombination.
- Kritiskt pH kan ligga mellan 11 och 13.
- System där någon avgörande komponent såsom (sampolymeren i) limmet eller hydroxidjonerna tagits bort ger låg emission.



Figur 3.11 Emission av butanol från golvsystem med olika pH. Matta på plåt (01), matta utan lim på pH 13 (1a och b), matta med lim på pH 11 (5), matta med lim på pH 13 (6) samt matta med lim på ungefär pH 13 (2a och b).



Figur 3.12 Emission av etylhexanol från golvsystem med olika pH. Matta på plåt (01), matta utan lim på pH 13 (1a och b), matta med lim på pH 11 (5), matta med lim på pH 13 (6) samt matta med lim på ungefär pH 13 (2a och b).

3.3.7 Betydelsen av materialval

Jämförelsen som görs här visar på materialvalets betydelse för emissionen från provkropparna. Emissionen har mätts från sju försök där tre lim och tre mattor kombinerats på olika sätt. I försök 8a och b samt 9 saknas mätning vid 7 veckor.

I de fyra första försöken som visas i figur 3.13 och 3.14 har samma lim använts tillsammans med olika mattor. Kombinationen av matta och lim har exponerats mot alkalisk lösning med ungefär pH-värde 13. I första försöket (8a) användes en linoleummatta. I försök d1.2a och 2b som är dubbelprover och referens i denna undersökning användes en homogen PVC-matta. I försök d1.9 användes en skiktad PVC-matta.

Emissionsmätningarna visar på stora skillnader i emission av både butanol och etylhexanol från dessa försök. Provkropparna i försöken har behandlats på samma sätt. De består av samma lim som exponerats mot samma pH-lösning så rimligtvis borde lika stor nedbrytning ske av limmet i alla fyra försöken. En förklaring kan vara att mattorna har olika täthet mot nedbrytningsprodukter.

Linoleummattans skenbara täthet mot kolväten i förhållande till PVC-mattorna kan bero på att kolvätena kanske "löser sig" i PVC-mattan och därmed transporteras på ett sätt som inte är möjligt i linoleummattan.

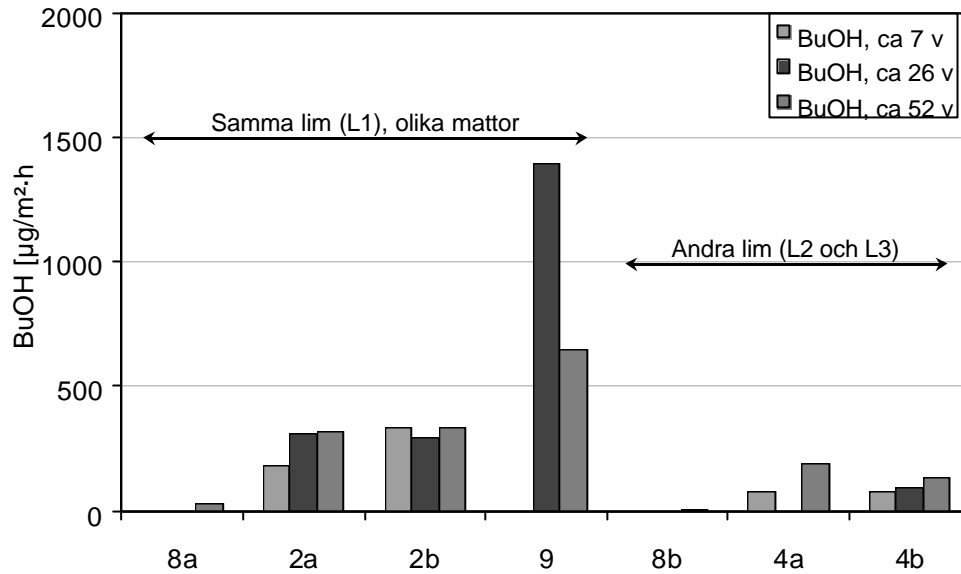
Försök d1.2a har något lägre emission än d1.2b fast de är dubbelprover där alla material är lika. Skillnaderna beror antagligen på osäkerheten i metoden. Genom att jämföra skillnader hos mätresultaten i figur 3.5 och 3.6 kan osäkerheten i mätningarna uppskattas.

Försök d1.8b är linoleummatta med annat lim med liknande bindemedel som referenslimmet. Även denna materialkombination får låg emission precis som d1.8a där linoleummatta också användes.

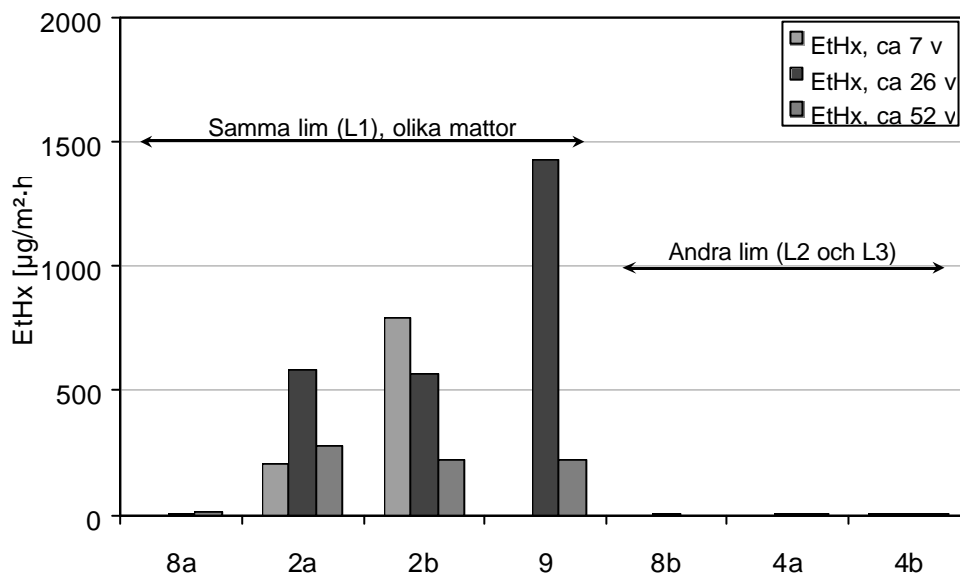
Försök d1.4a och 4b är dubbelprover där ett lim där bindemedlet inte baseras på 2-etylhexakrylat använts tillsammans med homogen PVC-matta. Eftersom limmet saknar den akrylatsampolymer som är upphov till etylhexanol kan detta kolväte inte bildas vid nedbrytningen. Endast små emissioner mäts i försöken. Emissionen av etylhexanol är i storleksordning med mattans egenemission.

Möjliga slutsatsen av denna jämförelse är

- Val av lim påverkar emissionen vid alkalisk nedbrytning därför att mängden nedbrytningsprodukter blir olika.
- Val av matta påverkar emissionen vid alkalisk nedbrytning därför att olika mattor är olika täta mot nedbrytningsprodukter.
- Materialkombinationer med linoleummatta ger små emissioner vid alkalisk nedbrytning av limmet, därför att linoleummattan är "skenbart" tätare mot limmets nedbrytningsprodukter.



Figur 3.13 Emissionen av butanol beror på hur tre olika lim och tre mattor kombineras enligt undersökningen. Stapel 8a är linoleummatta samt lim, 2a och 2b är homogen PVC-matta och samma lim, 9 är skiktad PVC-matta och samma lim. 8b är linoleummatta med annat lim och 4a samt 4b är homogen PVC-matta med annat lim.



Figur 3.14 Emissionen av etylhexanol beror på hur tre olika lim och tre mattor kombineras enligt undersökningen. Stapel 8a är linoleummatta samt lim, 2a och 2b är homogen PVC-matta och samma lim, 9 är skiktad PVC-matta och samma lim. 8b är linoleummatta med annat lim och 4a samt 4b är homogen PVC-matta med annat lim.

4 Mätningar av nedbrytningsprodukternas transportegenskaper i material

OC som bildas under mattan vid alkalisk hydrolys av golvlim kan migrera in i omkringliggande material. Dels kan de vandra upp genom mattan och avges till rumsluften och dels kan de vandra ner i betongen och lagras under lång tid.

I detta kapitel studeras transport av butanol och etylhexanol i betong samt genom mattor.

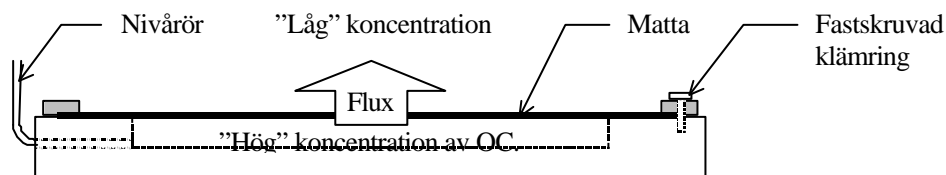
4.1 Motståndet R_{fl} hos mattan

I denna undersökning uppmättes genomgångsmotståndet för butanol och etylhexanol genom två mattor. Försöket kan liknas vid ett koppförsök där undersidan av mattan exponerades mot en känd koncentrationer av butanol och etylhexanol. Flödet genom mattorna mättes med hjälp av FLEC (Field and Laboratory Emission Cell) och mattornas genomgångsmotstånd för butanol och etylhexanol utvärderas.

Undersökningen är gjord i två omgångar. Först studerades endast PVC-mattor i fyra olika försök. Något år senare startades åtta nya försök, fyra med nytillverkad PVC-matta av samma sort för att verifiera tidigare resultat och fyra med linoleummatta.

4.1.1 Provkropp

Mattorna skars till och klämdes fast på plattan, som beskrivs i kapitel 2.2.1. Därefter fylldes utrymmet för pH-lösningen med butanol respektive etylhexanol genom hålet för nivåörret, se figur 4.1. En provkropp med butanol (nr2) och en med etylhexanol (nr8) fylldes helt så att vätskan låg i kontakt med mattan. De andra provkropparna med respektive vätska fylldes ungefär till hälften så att det bildades en luftspalt mellan vätskan och mattan. Luften i spalten antog mättnadskoncentration.



Figur 4.1 Provkroppen där en matta kan spännas fast över ett utrymme med pH-lösning. Flödet av kolväten genom mattan mäts med FLEC.

4.1.2 Provtagning

På de första proven 1, 2, 7 och 8 gjordes den första emissionsmätningen efter ungefär 24 veckor. Mätningarna skedde sedan med ungefär tio veckors mellanrum i cirka ett år. Provtagningen skedde med FLEC och TENAX-rör. Efterföljande analys av TENAX-röret gjordes med GC-FID, allt enligt metoden i kapitel 2.3.3.

Emissionsmätningarna på de övriga åtta proverna skedde med en månads mellanrum i ungefär ett halvår.

4.1.3 Resultat

Resultaten från mätningarna hade stora variationer. I tabell 4.1 respektive 4.2 redovisas en uppskattning av resultaten för butanol och etylhexanol. Dom redovisas både som emissionsfaktor EF [$\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$] och flöde q [$\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$]. EF är det vanligaste sättet att redovisa resultat från mätningar med FLEC medan q bygger på SI enheter och torde vara ett mer korrekt sätt att beskriva mätresultatet.

Mätmetoden behöver utvecklas för att ge ett säkrare resultat. Det kan vara bättre att mäta flödet genom att väga viktminskningen istället för att använda FLEC.

*Tabell 4.1 Flöde av butanol genom PVC- och linoleummatta vid maximal ångtryckskillnad. 1–4 är identiska med skillnad av *. 5-6 är identiska. Flödet är mätt med FLEC.*

Försök	EF _{BuOH} [$\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$]	q _{BuOH} [$\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$]	R _{fl} - PVC $\cdot 10^3$ [s/m]	R _{fl} - linoleum $\cdot 10^3$ [s/m]
1	13 000	$3,6\cdot 10^{-9}$	4 800	–
2*	16 000	$4,5\cdot 10^{-9}$	3 800	–
3	15 000	$4,3\cdot 10^{-9}$	4 000	–
4	22 000	$6,2\cdot 10^{-9}$	2 700	–
5	19 000	$5,3\cdot 10^{-9}$	–	3 200
6	24 000	$6,5\cdot 10^{-9}$	–	2 600

* Exponering av OC i vätskefas mot mattans undersida, övriga med mättad gasfas.

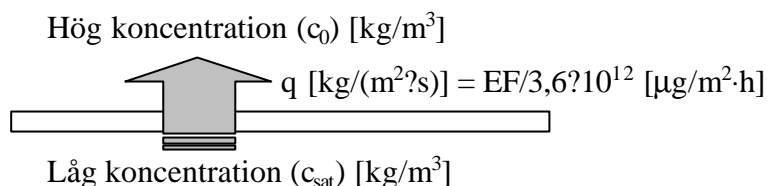
*Tabell 4.2 Flöde av etylhexanol genom PVC- och linoleummatta vid maximal ångtryckskillnad. 7–10 är identiska med skillnad av *. 11-12 är identiska. Flödet är mätt med FLEC.*

Försök	EF _{EtHx} [$\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$]	q _{EtHx} [$\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$]	R _{fl} - PVC $\cdot 10^3$ [s/m]	R _{fl} - linoleum $\cdot 10^3$ [s/m]
7	10 000	$2,8\cdot 10^{-9}$	250	–
8*	7 000	$1,9\cdot 10^{-9}$	360	–
9	5 000	$1,5\cdot 10^{-9}$	480	–
10	4 000	$1,1\cdot 10^{-9}$	630	–
11	27 000	$7,5\cdot 10^{-9}$	–	90
12	29 000	$7,9\cdot 10^{-9}$	–	90

* Exponering av OC i vätskefas mot mattans undersida, övriga med mättad gasfas.

4.1.4 Utvärdering

Den drivande kraften i transporten antas vara att koncentrationsskillnaden strävar efter att jämna ut sig. Förenklad beräkning av OC-flödet kan göras om man antar att det bara finns ett motstånd utan lagringskapacitet mellan två olika koncentrationer. Flödet bestäms då dels av skillnaden i koncentration men också av genomgångsmotståndet i mattan, se figur 4.2. q är flödet uttryckt i SI-enheter eller som emissionsfaktorn (EF) från mattan. EF är den vanligaste storheten vid mätningar med FLEC.



Figur 4.3 Flödet q strävar efter att jämna ut koncentrationsskillnader på ömse sidor av mattan. Mattans lagringskapaciteten är försummad.

Resultaten från mätningarna i undersökningen kan användas för att utvärdera motståndet i mattan för transport av OC. Beräkningen bygger på Ficks första lag som noggrant beskrivs i kapitel 7.

Ekvationen för Ficks första lag kan skrivas om för att bättre passa fallet med mätnadskoncentration under matta i ett ventilerat rum, enligt ekvation 7.42 i kapitel 7. I jämförelse med mätnadskoncentrationen, vid 20°C, som råder under mattan (c_{sat}) är koncentrationen i rummet (c_0) försumbart. Ekvationen får formen:

$$q_{air} = \frac{(c_{sat} - c_0)}{R_{fc}} \quad [kg/(m^2 \cdot s)] \quad (4.1)$$

Enligt bilaga 3 är mätnadsånghalten (c_{sat}) för butanol $17 \cdot 10^{-3}$ [kg/m³] vid rumstemperatur (20 °C) och motsvarande värde för etylhexanol $0,7 \cdot 10^{-3}$ [kg/m³]. Vid beräkning av genomgångsmotståndet (R_{fl}) för mattan används den förenklade ekvationen 4.1. I tabell 4.3 redovisas parametrarna och resultatet från undersökningen samt det beräknade genomgångsmotståndet enligt ekvationen 4.1 ovan för butanol och etylhexanol genom matta.

Tabell 4.3 Sammanställning av mätresultat, beräkningsparametrar och beräknade medelvärden av genomgångsmotstånd för butanol och etylhexanol genom matta PVC- och linoleummatta.

Enhet	Butanol		Etylhexanol		
	PVC	Linoleum	PVC	Linoleum	
EF	µg/(m ² ·h)	16 700	21 200	6 600	27 800
q	10 ⁻⁹ kg/(m ² ·s)	3,56	5,89	1,83	7,72
c_m	10 ⁻³ kg/m ³	17	17	0,7	0,7
R_{fl}	10 ³ s/m	3 700	2 900	380	90

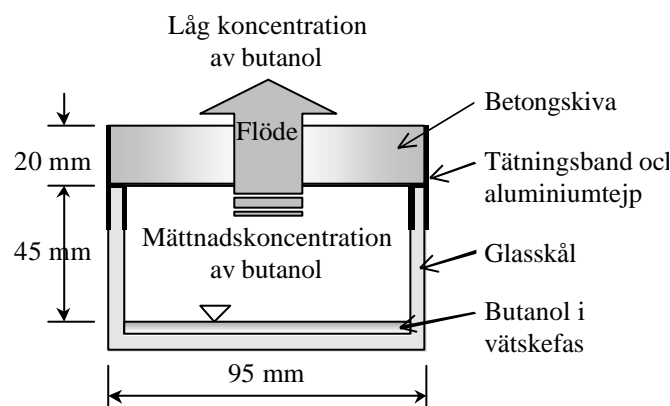
4.2 Diffusionskoefficient d_{OC} för butanol i betong

I denna undersökning studerades transporten av butanol genom betong, med hjälp av koppmetoden. Syftet var att utvärdera diffusionskoefficienten d_{OC} för butanol i gasfas i torr betong.

4.2.1 Provkropp

Koppen PF2 om användes i denna undersökning beskrivs i kapitel 2.2.2. Ovanpå koppen fästes en rund betongskiva som kapats ur en cylinder, som i sin tur borrats med kärnborr ur en större betongkub. Betongen som användes till studien var en normal husbyggnadsbetong (C4) som beskrivs i kapitel 2.1.1 Innan borringen konditionerades kuben i labbmiljö. Betongskivan hade diametern 95 mm och tjockleken 20 mm.

I glasskålen fylldes butanol så att det täckte botten med ca 5 mm, se figur 4.3. Betongskivan fästes noggrant på skålen med butylband av fabrikatet "Platon". Utanpå tätningsmassan lades omsorgsfullt ett lager med aluminiumtejp, som är helt diffusionstätt.



Figur 4.3 Principskiss av koppförsök. Koppen innehållande Butanol var under försöket placerad i klimatrum med 20°C och 65%RH.

Fyra koppar med butanol iordningställdes för studien. Dessa koppar var under hela mätningen placerade i ett klimatrum med konstant temperatur 20°C och fuktighet 65% RH.

4.2.2 Mätning

Flödet genom betongskivan mättes genom att bestämma viktförlusten vid upprepade vägningar av provkroppen. Vägningarna av kopporna utfördes i klimatrummet med ungefär en veckas mellanrum i början av mätserien och cirka två veckors mellanrum i slutet av mätserien. Vågen som användes var av märket Mettler PM 4000 och hade upplösning på 0.01g. Vågens reproducerbarhet är $\pm 0,01$ g i mätområdet.

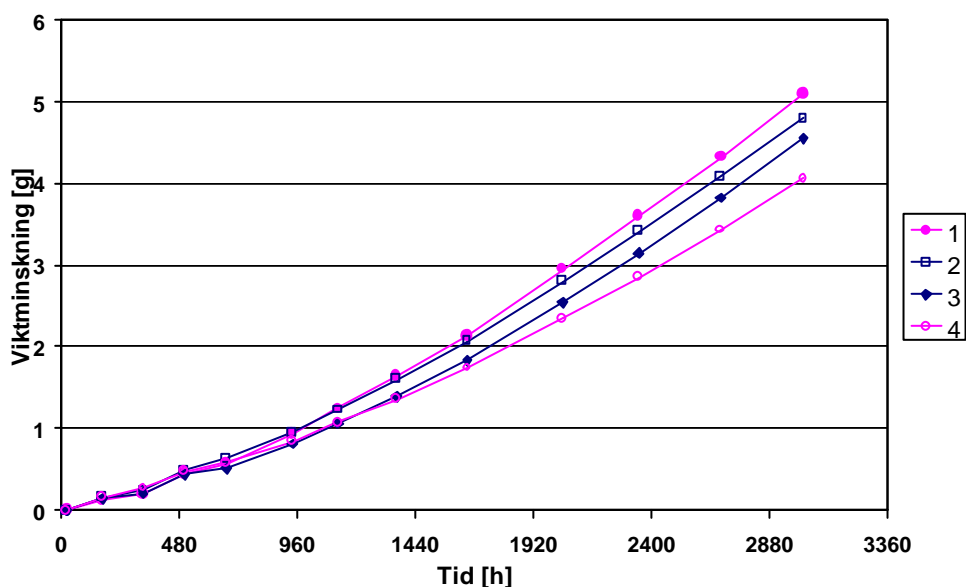
4.2.3 Resultat

Resultaten i form av viktninskning hos kopparna redovisas i tabell 4.4 samt i figur 4.4.

Tabell 4.4 Resultatsammanställning, viktförlust på grund av avgång av butanol vid koppförsök med 20 mm tjock betongskiva.

Tid [timmar]	Viktninskning [g]			
	1	2	3	4
21	0,00	0,00	0,00	0,00
167	0,14	0,16	0,16	0,12
332	0,21	0,27	0,25	0,20
499	0,44	0,48	0,49	0,44
671	0,51	0,58	0,63	0,57
940	0,81	0,84	0,95	0,93
1125	1,06	1,07	1,23	1,24
1363	1,39	1,36	1,60	1,64
1651	1,83	1,74	2,07	2,14
2039	2,54	2,35	2,80	2,95
2349	3,14	2,85	3,41	3,60
2685	3,82	3,43	4,08	4,32
3021	4,55	4,06	4,80	5,10

Viktförlusten per tidsenhet, som utgörs av lutningen hos kurvorna i figur 4.4, ökar lite med tiden. Det är normalt att det dröjer det mycket länge innan flödet blir stationärt. I försöket har stationärt flöde inte riktigt uppnåtts.



Figur 4.4 Viktninskning hos kopp med butanol på grund av diffusion genom 2 cm tjock betongskiva. Konstant klimat 20°C, 65 %RH.

4.2.4 Utvärdering av δ_{OC} för butanol

Diffusionskoefficienten d_{OC} utvärderades från de två sista mätresultaten, med 336 timmars mellanrum. Vanligtvis används regressionslinje vid utvärdering av en mätserie, men i detta fall ger de två sista mätpunkterna det bästa resultatet, eftersom stationärt flöde troligen inte erhållits ännu. Utvärderingen sker med ekvation 4.2.

$$q_{air} = d_{OC} \cdot \frac{\Delta c_{air}}{\Delta x} \quad \left[\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}) \right] \quad (4.2)$$

Flödet q_{air} fås ur viktminskningen mellan de två sista mätningarna som redovisas i tabell 4.4. Δx är betongskivans tjocklek, Δc_{air} är koncentrationsskillnaden av butanol i ångfas i skålen och rummet. Luften i skålen antas vara mättad med butanol och koncentrationen av butanol i rumsluften antas vara lika med noll.

Enligt bilaga 3 är mättnadskoncentrationen av butanol för rumstemperatur 20°C lika med $17 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3$.

Förutsättningarna och resultaten för de fyra kopporna som ingick i undersökningen finns sammanställda i tabell 4.5.

Tabell 4.5 Sammanställning av mätresultat, beräkningsparametrar och beräknad diffusionskoefficient d_{OC} för butanol i torr betong.

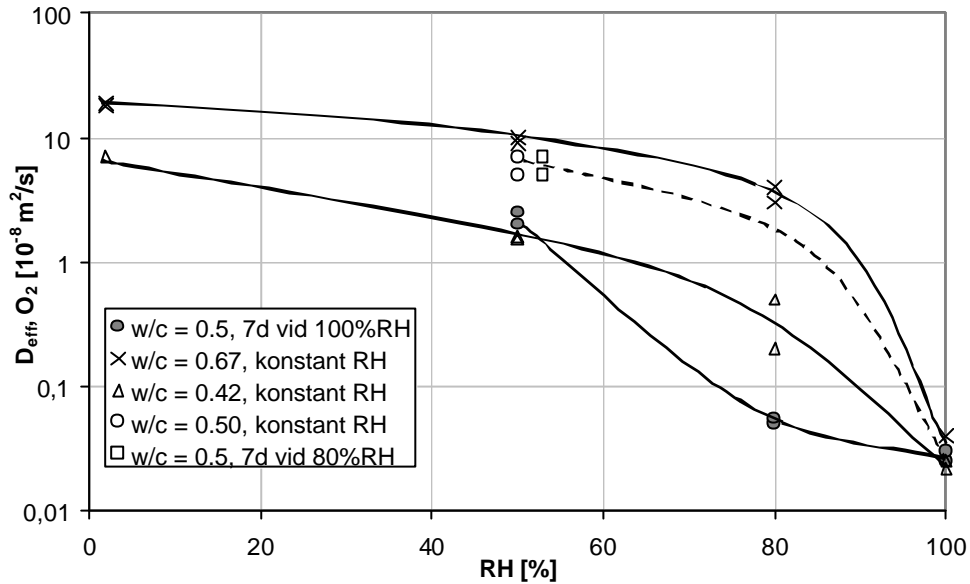
Benämning		Prov			
Storhet	Enhet	1	2	3	4
Δ vikt	[g]	0,73	0,63	0,72	0,78
Δ tid	[timmar]	336			
Δ x	[10^{-3} m]	20			
yta	[10^{-3} m ²]	7,09			
q_m	[10^{-9} kg/m ² /s]	85,2	73,5	84,0	91,0
c_{sat}	[10^{-3} kg/m ³]	17			
d_{OC}	[10^{-9} m ² /s]	94,6	81,6	93,3	101,1

Enligt försöket blir medelvärdet av d_{OC} lika med $92,7 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$. Spridningen hos resultaten visar på att försöket har en standardiserad osäkerhet på $\pm 8,1 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$, det vill säga $\pm 8,7\%$.

Värdena för butanol kan vara rimliga då studier av Meinighaus (2000a) visar att diffusionskoefficienten för octane är cirka $100 \cdot 10^{-9}$ och för etyl acetat cirka $50 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ i "solid betong".

Det är mycket troligt att diffusionskoefficienten är starkt fuktberoende. Betongskivan var vid försöket mycket torrare än vad som är normalt i ett betonggolvs där det förekommer eller har förekommit alkalisk nedbrytning. Fuktnivån i klimatrummet förvarades i var 65%RH. Det är till och med troligt att betongskivan delvis var ännu torrare eftersom alkoholen som användes i kopporna är hygroskopisk. Det skulle i så fall kunna innebära att kopporna har adsorberat fukt och den egentliga viktminskningen av butanol är större än uppmätt.

Tidigare studier av Tutti (1982) visar hur syrets (O_2) diffusionskoefficient förändras vid olika fuktnivåer i betong. Den minskar tre tiopotenser från ett värde på ungefär $2 \cdot 10^{-8}$ [m^2/s] vid något enstaka %RH till $0,02 \cdot 10^{-8}$ [m^2/s] vid ca 100%RH, figur 4.5. Det är troligt att samma fenomen kan uppträda i betong för varje VOC med liknande egenskaper som O_2 .



Figur 4.5 Diffusionskoefficient för syre, O_2 , som funktion av fuktnivån i betongen; värden från Tuutti (1982).

4.2.5 Teoretisk utvärdering av δ_{OC} för etylhexanol

Enligt Nilsson & Luping (1992) kan man jämföra olika gasers diffusionskoefficient. Skillnaden i diffusionskoefficient för olika gaser kan beräknas utifrån deras molekylstorlek. Enligt teorin om gasernas kinetik är diffusionen i material inverterat proportionell mot kvadratroten av gasens molekylvikt, M .

För den aktuella betongen, vid aktuellt RH, fås då d_{OC} för etylhexanol enligt tabell 4.6.

Tabell 4.6 Förutsättningar och resultat i undersökningen av d .

Sort	Enhet	Prov	
		BuOH	EtHx
M	[g/mol]	74	130
Uppmätt d , vid ca 65%RH	[m^2/s]	$92,7 \cdot 10^{-9}$	–
Beräknat d (ur BuOH)	[m^2/s]		$69,9 \cdot 10^{-9}$

4.3 Bestämning av effektiv diffusionskoefficient D_{eff}

I denna undersökning gjordes mätningar av mängden butanol och etylhexanol som trängt in i en gammal provkropp, som varit utsatt för alkalisk hydrolys. Syftet med undersökningen var att utvärdera den effektiva diffusionskoefficienten D_{eff} som är ett mått på ämnets skenbara diffusionsförmåga i ett material.

4.3.1 Provkropp

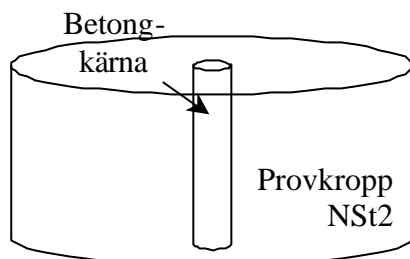
Denna undersökning gjordes för att studera inträngningen av OC i betong då limmet hydrolyserats. Provkroppen som har använts till undersökningen göts i samband med en tidigare studie som beskrivs i Wengholt Johnsson (1995). Provkroppen betecknades NSt2 i den ursprungliga studien. Denna provkropp valdes på grund av att den i ursprungliga studien uppvisade stora emissioner.

Provkroppen är identisk med de som har använts i denna studie och beskrivs som PF3 ”skålen” i kapitel 2.2.3. Betongen var en normal husbyggnadsbetong och beskrivs som material C4 i kapitel 2.1.1. Limmet som använts var vattenbaserat dispersionslim, det beskrivs som lim A4 i kapitel 2.1.3. Limningsmetoden var AT1, våtlimning med endast någon minuts väntetid. Mattan var en homogen PVC-matta, som beskrivs som F1 i kapitel 2.1.4. Gjutning och limning i Wengholt Johnsson (1995) följer metoderna som beskrivs i kapitel 2 utan några väsentliga avsteg.

4.3.2 Provtagning

Mätning av OC i betong skedde i två steg med efterföljande analys. Första steget var att ta ut prover ur betongen på olika djup och konditionera dem i en provbehållare. I andra steget skedde provtagning i provbehållaren med så kallad headspaceteknik där OC fångades upp och anrikades på en adsorbent. Därefter följde analys med gaskromatografisk teknik (GC-FID).

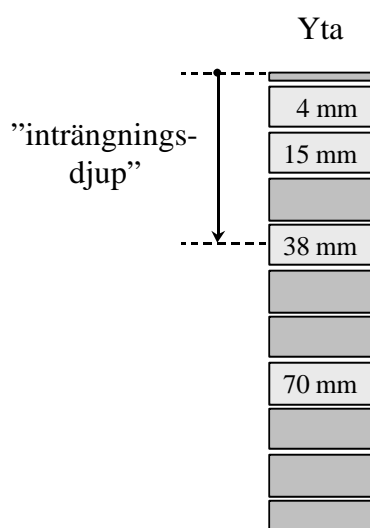
Ur provkroppen borrades en kärna med 25 mm diameter, se figur 4.6. Borrningen gjordes utan kylvatten för att hindra OC i kärnans yta att spolats bort. Direkt efter det att kärnan tagits ur provkroppen lindades den in i aluminiumfolie för att hindra emission av OC. Kärnan delades sedan i olika nivåer med abrasiv vattenskärning och lades i flaskor med specialkonstruerat lock som beskrivs i kapitel 2.3.2.



Figur 4.6 *Betongkärnan som analyserades i denna undersökning var hämtade ur provkropp NSt2 från undersökningen i Wengholt Johnsson (1995).*

Vid senare studier har kärnan spräckts till "skivor" med hjälp av hammare och huggmejsel. Detta ger inte samma möjlighet att bestämma provbitarnas storlek eftersom snittytan inte blir förutsebar. Metodförändringen anses ändå vara till det bättre eftersom den är snabbare och mindre kostsam än metoden med vattenskärning.

Medeldjupet från ytan för kärnans bitarna redovisas i figur 4.7.



Figur 4.7 *Kärnorna skivades upp i skikt med abrasiv vattenskärning; medeldjupet för respektive bit anges.*

Provtagningsmetoden och utrustningen som användes för att mäta koncentrationen bygger på Headspaceteknik och med anrikning på TENAX-rör. Efterföljande analys gjordes med GC-FID, se kapitel 2.3.2.

4.3.3 Resultat

Resultaten i form av fri koncentration av butanol och etylhexanol per m³ luft redovisas i tabell 4.7.

Tabell 4.7 Resultatsammanställning av koncentrationen fri OC på olika djup i betongen.

Djup [10 ⁻³ m]	Butanol [kg/m ³ _{air}]	Etylhexanol [kg/m ³ _{air}]
0	43,80·10 ⁻⁶ ♦	30,95·10 ⁻⁶ ♦
4	38,48·10 ⁻⁶	23,70·10 ⁻⁶
15	24,97·10 ⁻⁶	8,31·10 ⁻⁶
38	7,03·10 ⁻⁶	0,19·10 ⁻⁶
70	0	0,12·10 ⁻⁶

♦ enligt utvärdering av D_{eff} genom kurvpassning till felfunktionslösningen till Ficks 2a lag

4.3.4 Utvärdering av D_{eff}

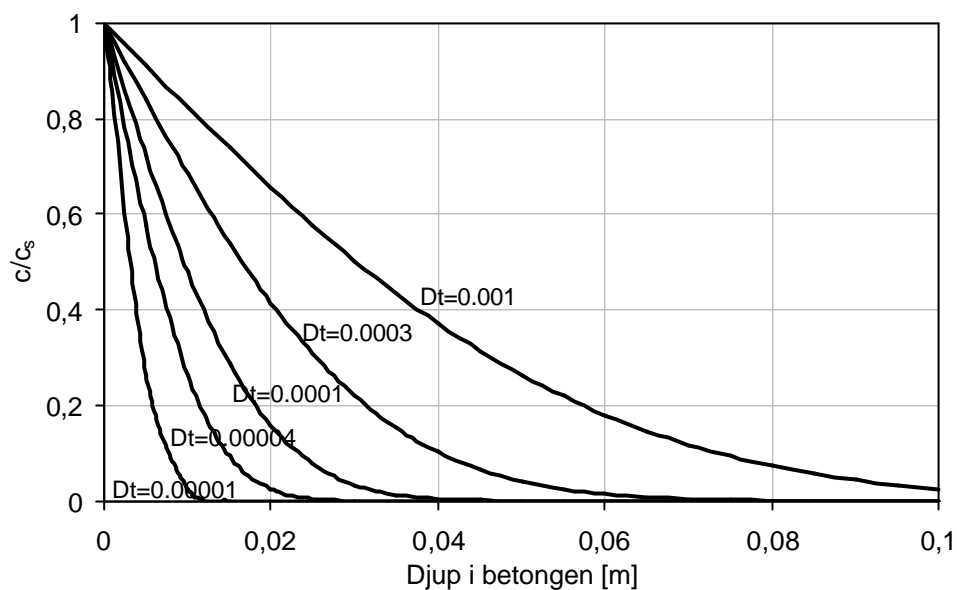
Resultaten från undersökningen av OC i betongen under mattan visar att OC från nedbrytning av limmet trängt in djupt i betongen. Butanol och etylhexanol har enligt undersökningen trängt in till olika djup. Enligt Crank (1975) kan den effektiva diffusionskoefficient D_{eff} utvärderas med hjälp av Ficks 2a lag. Grunden för en sådan utvärdering är att man känner inträngningsprofilen, för ett specifikt ämne, som har uppstått vid en stegändring i ett halvoändligt medium.

Med förenklingen att ytkoncentrationen c_{su} stegvis ändrats i provkroppen från begynnelsevärdet 0 till ett konstant värde, som sedan varat under hela perioden uppfylls stegändringen i grundkraven. I och med att koncentrationen är mycket låg i botten av provkroppen, 100 mm från ytan, kan djupet betraktas som oändlig i detta avseende.

Ficks 2a lag kan då lösas enligt med ekvation 4.3 enligt Crank (1975), detta är det så kallade komplementet till "felfunktionen".

$$c(x, t) = c_s \cdot \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{D_{\text{eff}} \cdot t}} \right) \right] \quad \left[\text{kg/m}^3_{\text{air}} \right] \quad (4.3)$$

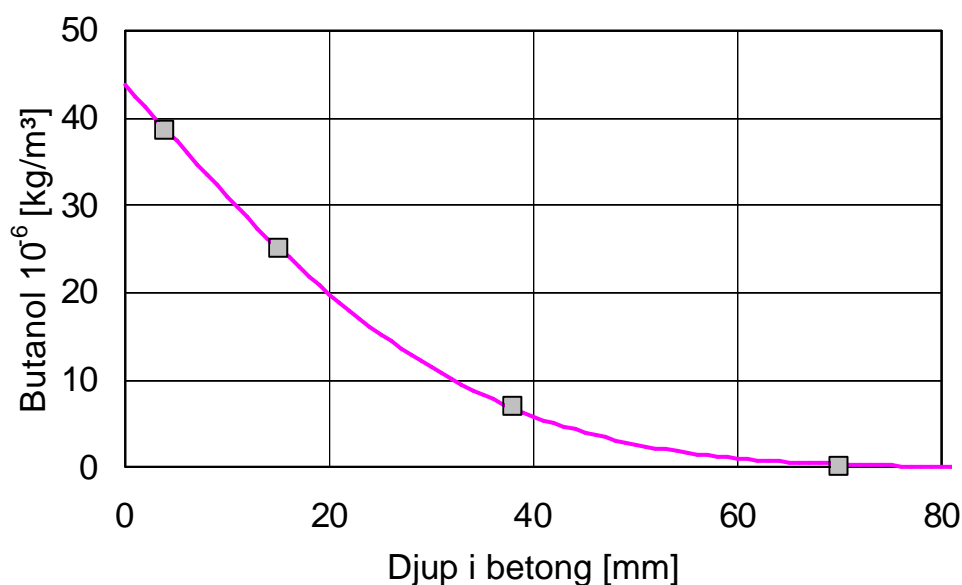
I figur 4.8 har komplementet till felfunktionen beräknats för ett antal olika kombinationer av D_{eff}·t där t är tiden som ytkoncentrationen har varit hög, efter stegändringen.



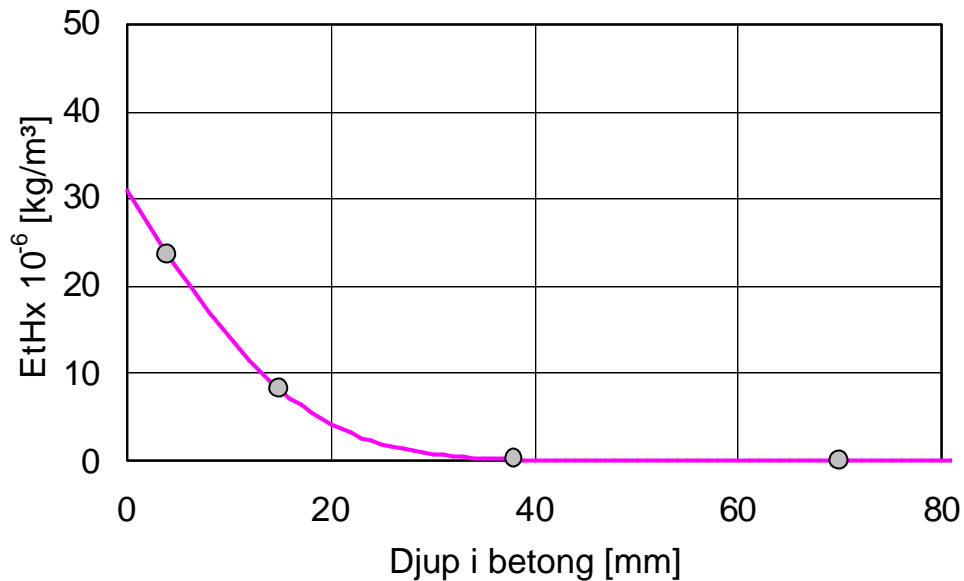
Figur 4.8 Lösning till Ficks 2a lag med komplementet till felfunktionen. Siffrorna vid kurvorna anger det kombinerade värdet på $D_{eff}t$, se ekvation 4.3.

I provkropp Nst2 som undersökts i detta försök har hög ytkoncentration av OC förelegat i ungefär 2 år. Genom att passa mätresultaten i tabell 4.7 mot kurvorna i figur 4.8 kan värden för c_{su} och D_{eff} utvärderas.

I figur 4.9 visas den bästa passningen till mätvärdena för butanol. Passningen har gjorts med minsta kvadratmetoden för skillnader i koncentration på de olika mätdjupen. Passningen för resultatet av etylhexanol redovisas i figur 4.10.



Figur 4.9 Fördelningen av Butanol i betong från försök c1.2 samt bästa passningen av errorfunktion med minsta kvadratmetoden. $c_{su} = 43,9 \times 10^{-6} \text{ kg/m}^3$ samt $D_{eff} = 5,80 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$.



Figur 4.10 Fördelningen av etylhexanol i betong från försök c1.2 samt bästa passningen av errorfunktion med minsta kvadratmetoden.
 $c_{su} = 30,9 \cdot 10^{-6} \text{ kg/m}^3$ samt $D_{\text{eff}} = 1,48 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$.

Ytkoncentrationen (c_{su}) har varit högre för butanol än för etylhexanol, $43,8 \cdot 10^{-6}$ respektive $30,9 \cdot 10^{-6} \text{ kg/m}^3$. Det i kombination med att butanol har det största inträngningsdjupet gör att D_{eff} skiljer sig för de olika nedbrytningsprodukterna. Den effektiva diffusionskoefficienten D_{eff} är $5,80 \cdot 10^{-12} \text{ [m}^2/\text{s]}$ för butanol och $1,48 \cdot 10^{-12}$ för etylhexanol.

Om antagandet med stegändringen inte stämmer kan ytkoncentrationen (c_{su}) som beräknats betraktas som ett effektivt medelvärde. Provkroppen var ungefär två år gammal då kärnan borrades ut. Koncentrationen under mattan kan ha ändrats under dessa två år. Betongen kan ha torkat ut genom mattan så att reaktionen och därmed produktionen av OC avtagit.

Diffusionskoefficienten (D_{eff}) som utvärderats kan också vara ett medelvärde för varierande fuktförhållanden. Hastigheten hos transporten av OC ner i betongen har troligtvis påverkats av omlagringen och uttorkningen av fukt i betongen.

4.4 Fältmätningar av effektiv diffusionskoefficient D_{eff}

För att verifiera laboratoriemätningarna av OC som trängt in i betongen gjordes fyra fältmätningar. Provtagning med TENAX-rör och analys GC-FID har gjorts med samma teknik som i laboratoriemätningarna. Objekten som valdes hade alla limmad PVC-matta på betong och uppvisade tecken på alkalisk hydrolys av limmet.

Provtagningen har skett av erfarna utredningstekniker från två utredningskonsulter i Stockholm.

Provtagningen i objekt 3 är utförd av utredningsingenjör Aime Must på BARAB och analysen utfördes av Tekn. Dr. Jan Kristiansson på Chemik Lab AB. Tillvägagångssättet vid konditioneringen skilde sig från det som användes på Chalmers. Vid konditioneringen av headspacen användes förhöjd temperatur och RH. Maximal koncentrationen under mattan vid rumstemperatur har inte kunnat utvärderats. För övrigt bedöms inte skillnaden ha påverkat resultaten.

Provtagningarna i de övriga tre objekten utfördes av olika medarbetare på AK-konsult Indoor Air AB. Den efterföljande konditioneringen av provbitarna i "flaskan" och analys av TENAX-rör i GC-FID skedde på institutionen för byggnadsmaterial, Chalmers Tekniska Högskola.

Analysresultaten, i form av inträngningsprofiler för butanol respektive etylhexanol, från de fyra objekten redovisas i figurerna 4.11 – 4.18. De värden som inte är "fyllda" i figurerna 4.12, 4.14, 4.17 samt 4.18 har bedömts som orimliga. Det kan bero på felaktig hantering eller läckage under provtagningen eller efter följande konditioneringen och analys. Antagligen är mätresultaten felaktiga; därför har de inte tagits med i utvärderingen av c_{su} och D_{eff} .

Resultatet av undersökningarna sammanställs i tabell 4.8.

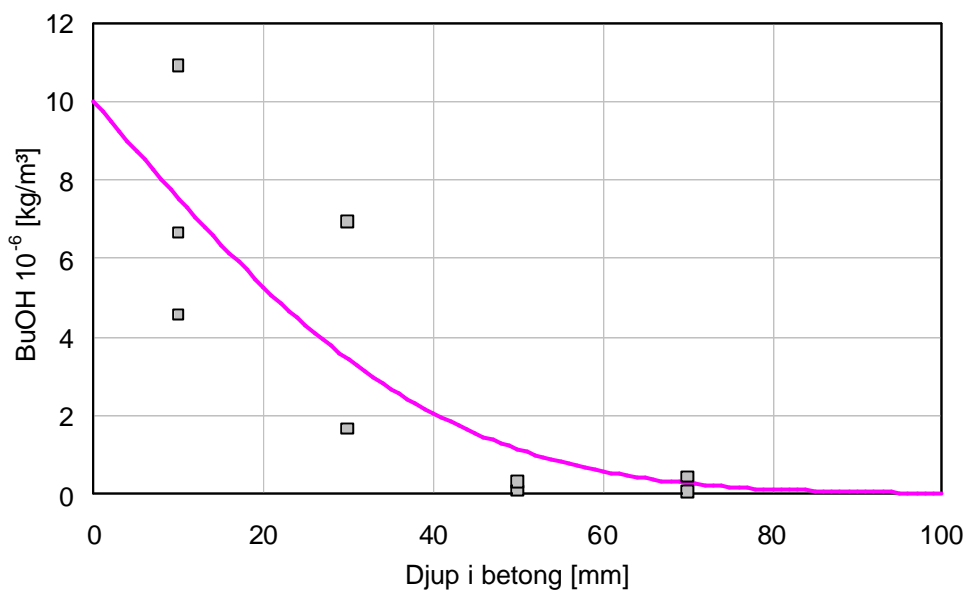
Tabell 4.8 Sammanställning av koncentration OC under mattan c_{su} samt effektiv diffusionskoefficienten D_{eff} som uppmätts på skadade golv i fält samt från provkropp i kapitel 4.3. Vct ungefär 0,7 i samtliga prov utom 1 där vct är ungefär 0,5.

Objekt	Ålder på skadan [år]	Butanol		Etylhexanol	
		c_s [10^{-6} kg/m ³]	D_{eff} [10^{-12} m ² /s]	c_s [10^{-6} kg/m ³]	D_{eff} [10^{-12} m ² /s]
1*	1	10,0	16	5,8	19
2	3,5	49	4,1	3,3	3,6
3	6	–	4,9	–	6,1
4	10	2	5,2	0,9	8,4
Lab	2	43,9	5,8	30,9	1,5

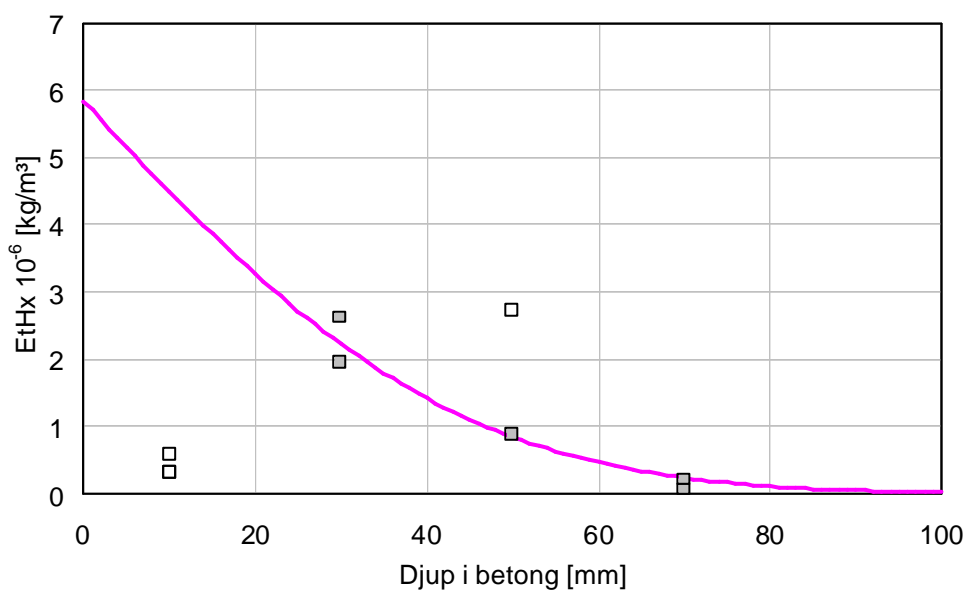
* betong med vct=0,5

Notera att det är stor skillnad mellan c_s för butanol och etylhexanol i objekt 2 medan den är liten i övriga objekt. Det finns inte tillräckligt med uppgifter om objekten för att förklara skillnaderna hos mätresultaten. Troligen är faktorer såsom fuktnivå, mattornas täthet samt betongkvaliteten viktiga.

4.4.1 Objekt 1 - ungefär 1 år gammal emissionskada

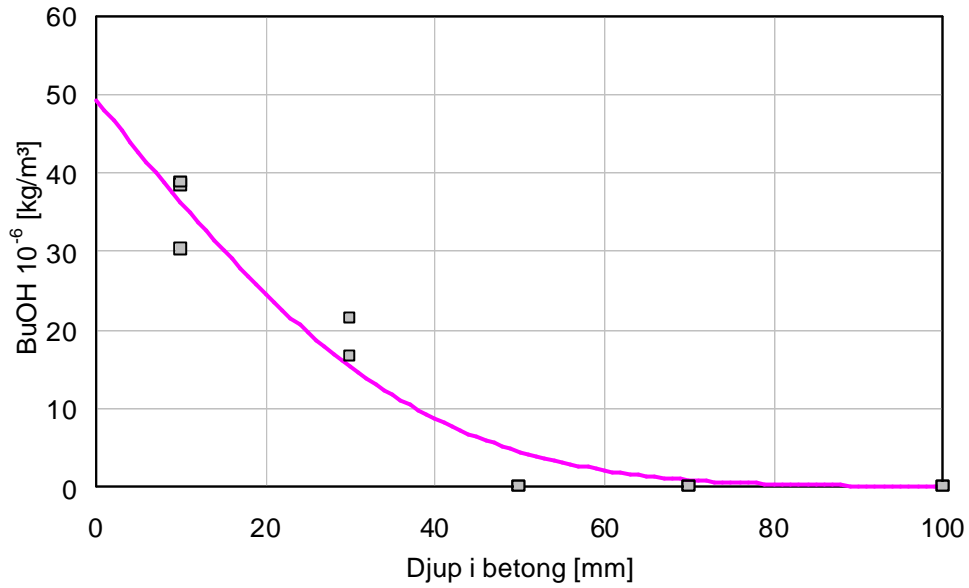


Figur 4.11 Fördelningen av butanol i betong från fältmätning i ungefär 1 år gammal skada. Linjen är bästa passningen av errorfunction med minsta kvadratmetoden. $C_s = 10,0 \times 10^{-3} \text{ g/m}^3$, $D = 16 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$.

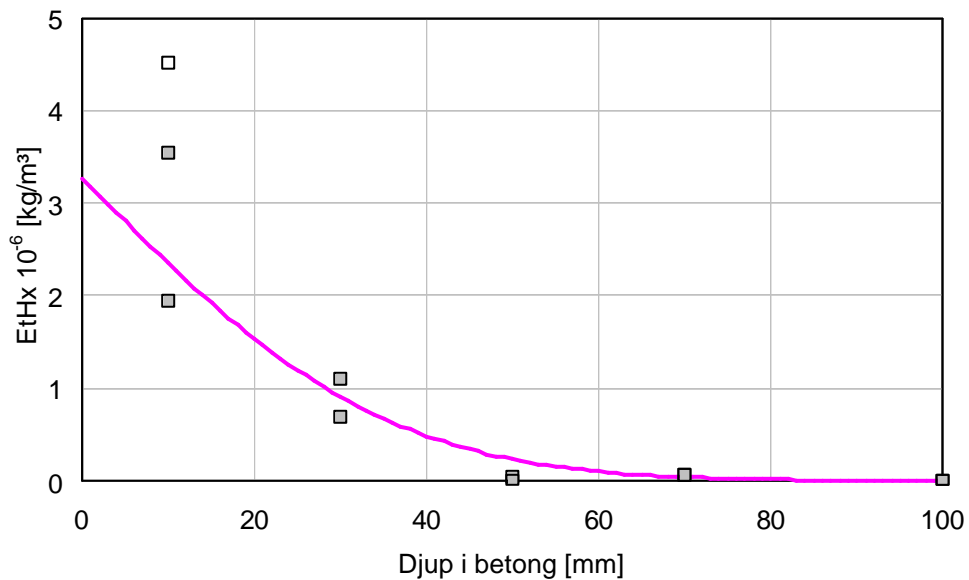


Figur 4.12 Fördelningen av etylhexanol i betong från fältmätning i ungefär 1 år gammal skada. Linjen är bästa passningen av errorfunction med minsta kvadratmetoden. $C_s = 5,8 \times 10^{-3} \text{ g/m}^3$, $D = 19 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$.

4.4.2 Objekt 2 – ungefär 3,5 år gammal emissionskada

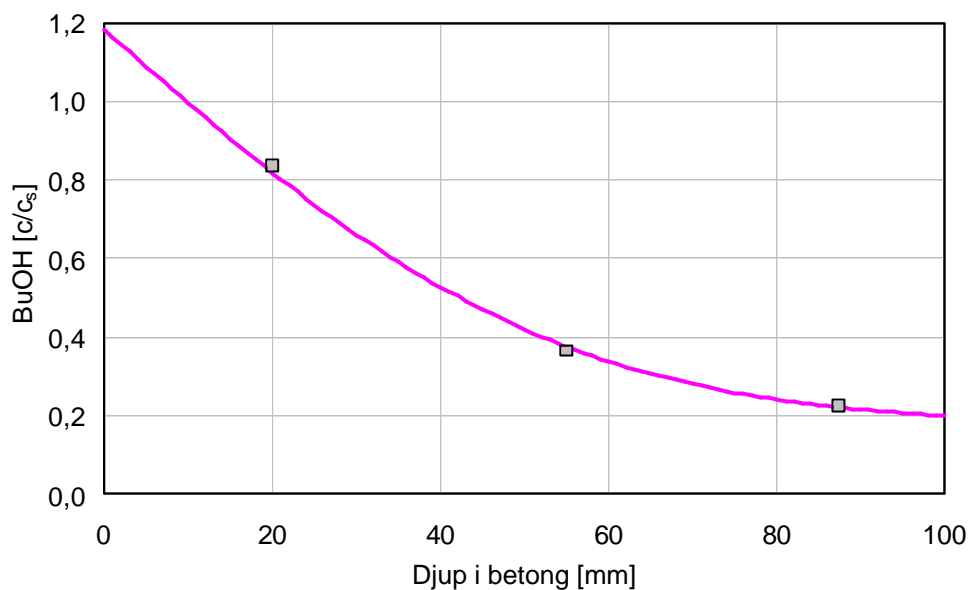


Figur 4.13 Fördelningen av butanol i betong från fältmätning i ungefär 3,5 år gammal skada. Linjen är bästa passningen av errorfunction med minsta kvadratmetoden. $C_s = 49 \times 10^{-3} \text{ g/m}^3$, $D = 4,1 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$.

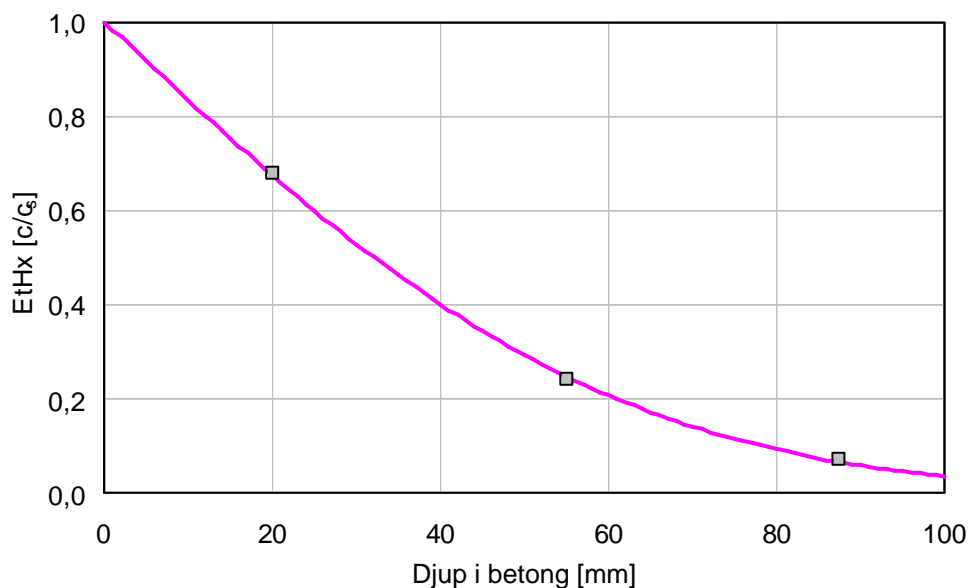


Figur 4.14 Fördelningen av etylhexanol i betong från fältmätning i ungefär 3,5 år gammal skada. Linjen är bästa passningen av errorfunction med minsta kvadratmetoden. $C_s = 3,3 \times 10^{-3} \text{ g/m}^3$, $D = 3,6 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$.

4.4.3 Objekt 3 – ungefär 6 år gammal emissionskada

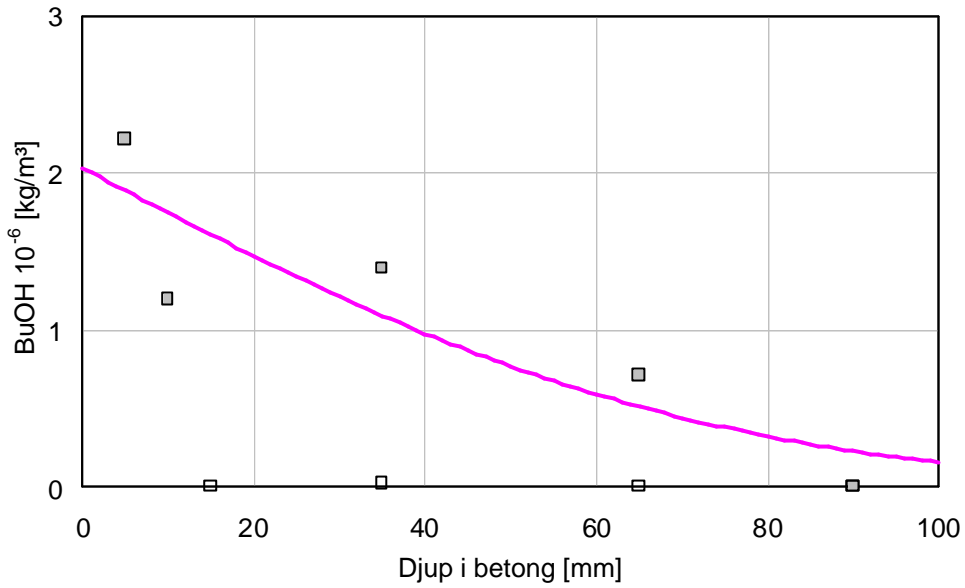


Figur 4.15 Fördelningen av butanol i betong från fältmätning i ungefär 6 år gammal skada. Linjen är bästa passningen av errorfunction med minsta kvadratmetoden. $D = 4,86 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$. Samt bakgrund på 0,2.

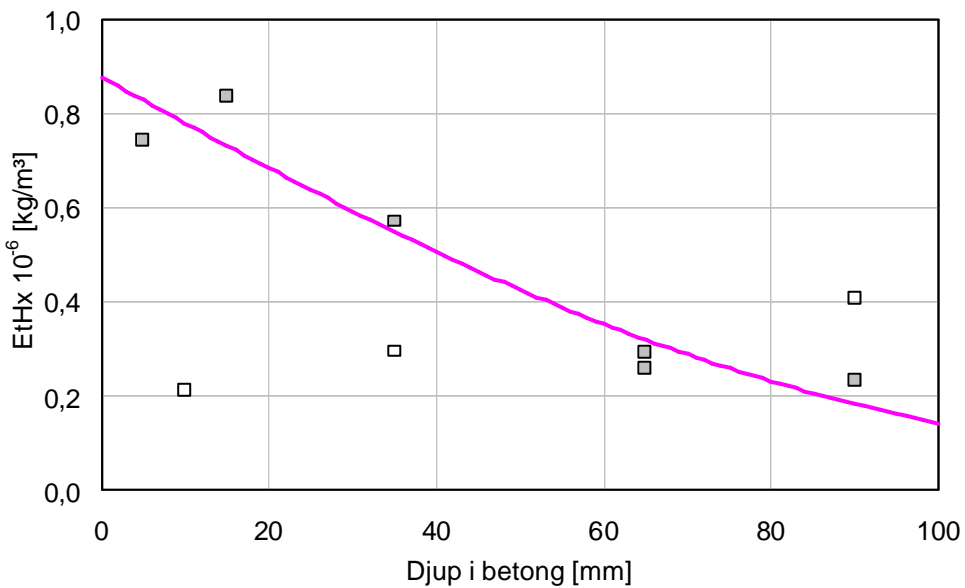


Figur 4.16 Fördelningen av etylhexanol i betong fältmätning i ungefär 6 år gammal skada. Linjen är bästa passningen av errorfunction med minsta kvadratmetoden. $D = 6,13 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$.

4.4.4 Objekt 4 – ungefär 10 år gammal emissionskada



Figur 4.17 Fördelningen av butanol i betong från fältmätning i ungefär 10 år gammal skada. Linjen är bästa passningen av errorfunction med minsta kvadratmetoden. $C_s = 2 \times 10^{-3} \text{ g/m}^3$ samt $D = 5,2 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$.



Figur 4.18 Fördelningen av etylhexanol i betong fältmätning i ungefär 10 år gammal skada. Linjen är bästa passningen av errorfunction med minsta kvadratmetoden. $C_s = 0,9 \times 10^{-3} \text{ g/m}^3$ samt $D = 8,4 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$.

5 Studies av limfuktens betydelse

Vid limning av täta golvbeläggningar direkt på betonggolv kan alkalisk hydrolysis av limmet ske. Fuktnivån i betongen har inverkan på den processen. I detta kapitel beskrivs fem undersökningar av fuktillståndet i betongen samt fuktillståndens inverkan på emissionsfaktorn EF.

Först beskrivs en undersökning av insugning av fukt från lim i betongytan. Sedan en undersökning av avdunstad mängd limfukt vid olika limningsmetoder. Slutligen tre olika undersökningar av emissionen från provkroppar där olika parametrar förknippade med limfukt och annan ytfukt varierats.

5.1 Mätning av RH i betongytan

Mätmetoden som använts för att mäta limfukten i studien beskrivs i ursprungligen i Sjöberg (1997). Den är en vidareutveckling på en metod som ursprungligen användes för att studera fuktillstånd i ytskikt hos betong vid applicering av avjämningsmassor, Nilsson (1984).

5.1.1 Provkropp

Provkroppen, materialen och tillvägagångssättet vid tillverkningen beskrivs i kapitel 2. Provkroppen som användes var PF4 "hinken", i den gjöts tre olika betongsorter C1, C3 och C4 och matta M1 limmades med lim A2. Linningsmetoden som användes var AT1 med endast någon minuts väntetid.

5.1.2 Fuktmätning

Något dygn innan limningen skedde monterades RH-proberna i provkroppens mätrör. Gummiproppen avlägsnades och RH-proben placerades i mätröret där den tätades mot den omgivande luft med en expanderring av gummi. När RH-proben monterades ändrades förhållandena i röret eftersom luft pressas ut när proben förs in. När mätvärdena stabiliserat sig efter att proberna kommit i jämvikt på respektive djup, limmades mattan på betongen.

Mätningarna i försök 2 skedde genom manuella avläsningar med metod 1 i kapitel 2.3.1. I de övriga försöken loggades temperatur och RH var 5e minut enligt metod 2. De erhållna värdena omvandlades sedan till RH med hjälp av individuella kalibreringskurvor för varje mätprob.

5.1.3 Resultat

Resultaten från de tre mätserierna presenteras som RH vid 20°C. Dessa mätningar är gjorda vid 20°C så korrigering har inte behövt göras. En eventuell korrigering av RH som är uppmätt vid annan temperatur än 20°C kan göras enligt Nilsson (1987).

Försök 1, applicering av 300 g/m² limfukt på betong B1

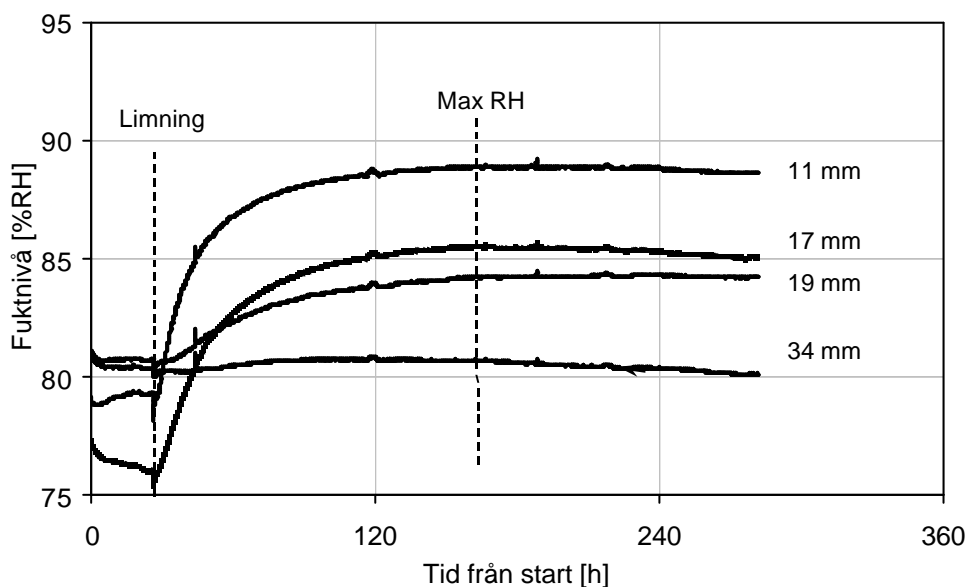
Vid limning av mattan på betongen B1 påfördes 33 gram lim på provkroppen. Detta motsvarar cirka 300 gram limfukt per m² betongyta. Normalt brukar en liter lim räcka till 5 m² golvyta vilket medför 80 gram limfukt per m².

Till mätningen användes RH-prob HMP 44 och datainsamlingslogger. Efter givarna monterats loggades temperatur och RH automatiskt var 5:e minut. Detta beskrivs ingående som metod 2 i kapitel 2.3.1

Värdena för hela mätförloppet för RH presenteras i figur 5.1.

Värdena från temperaturmätningen visar på stabil temperatur 20°C under mätperioden. Resultaten redovisas noggrant i Sjöberg (1998a).

Mätroren för de fyra RH-givarna som användes var placerade på 11, 17, 19 och 34 mm djup i denna provkropp.



Figur 5.1 Fuktförändring på olika djup efter limning av PVC-matta på betong C1 med vct 0,32. Påförd limfukt är cirka 300 g/m².

Försök 2, applicering av 90 g/m² limfukt på betong C3

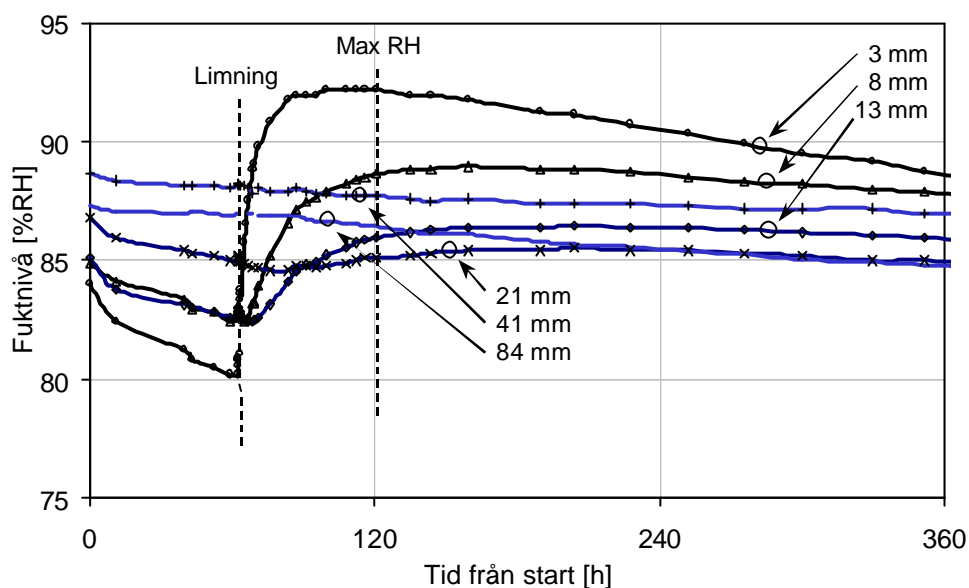
Vid limning av mattan på betongen C3 påfördes 10 gram lim på provkroppen. Detta motsvarar cirka 90 gram limfukt per m² betongyta.

Till mätningen användes RH-prob HMP 36 och handinstrument HMI 31. Efter givarna monterats avlästes mätvärdena manuellt flera gånger varje dygn. Detta beskrivs ingående som metod 2 i kapitel 2.3.1

Värdena för hela mätförloppet för RH presenteras i figur 5.2.

Värdena från temperaturmätningen visar på stabil temperatur 20°C under mätperioden. Resultaten redovisas noggrant i Sjöberg (1998a).

Mätroren för de sex RH-givarna som användes var placerade på 3, 8, 13, 21, 41 och 84 mm djup i denna provkropp.



Figur 5.2 Fuktförändring på olika djup efter limning av PVC-matta på betong C3 med vct 0,42. Påförd limfukt är cirka 90 g/m².

Försök 3, applicering av 230 g/m² limfukt på betong C4

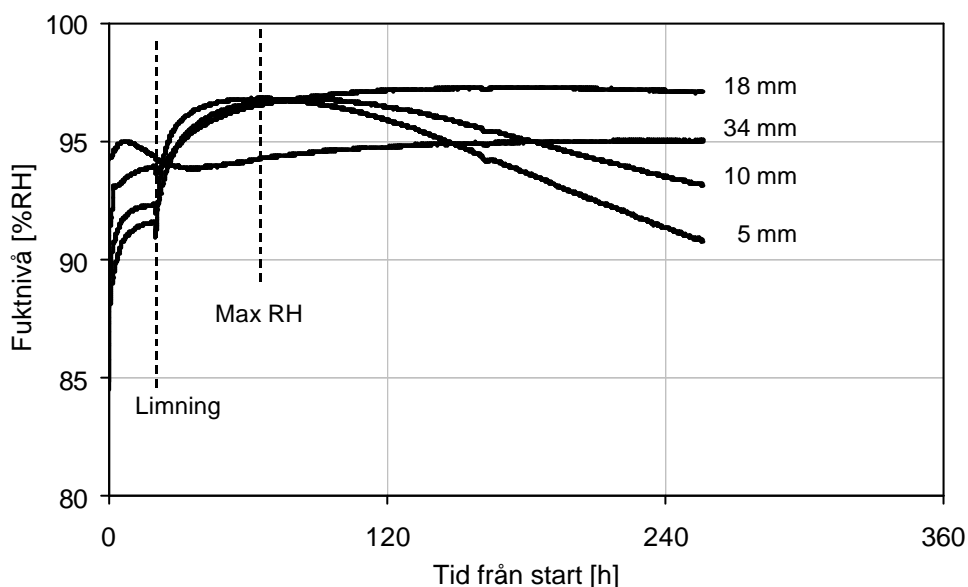
Vid limning av mattan på betongen med C4 påfördes 25 gram lim på provkroppen. Detta motsvarar cirka 230 gram limfukt per m² betongyta.

Till mätningen användes RH-prob HMP 44 och datainsamlingslogger. Efter givarna monterats loggades temperatur och RH automatiskt var 5:e minut. Detta beskrivs ingående som metod 2 i kapitel 2.3.1

Värdena för hela mätförloppet för RH presenteras i figur 5.3.

Värdena från temperaturmätningen visar på stabil temperatur 20°C under mätperioden. Resultaten redovisas noggrant i Sjöberg (1998a).

Mätrören för de fyra RH-givarna som användes var placerade på 5, 10, 18 och 34 mm djup i denna provkropp.



Figur 5.3 *Fuktförändring på olika djup efter limning av PVC-matta på betong C4 med vct 0,66 Påförd limfukt är cirka 230 g/m².*

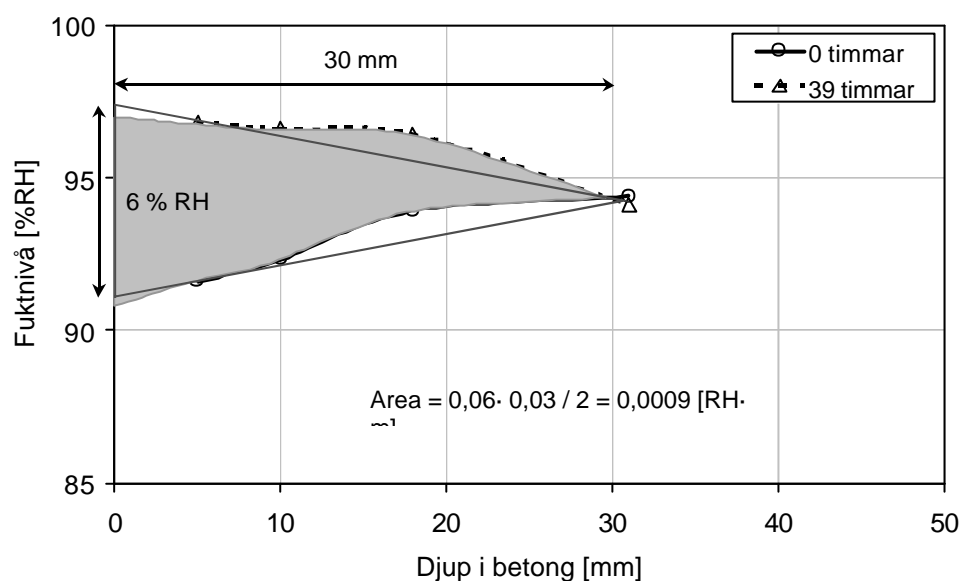
5.1.4 Utvärdering

Vid utvärderingen av RH-mätningarna har den totala inträngda fuktmängden beräknats och jämförts med den applicerade mängden.

Mängden limfukt som trängt in i betongen kan bestämmas genom beräkningar som baseras på höjning av fuktnivån. Genom att integrera RH-höjningen av fuktnivån över inträngningsdjupet och multiplicera med fuktkapaciteten kan inträngd fuktmängd bestämmas, ekvation 5.1. Metoden visas noggrant i Sjöberg (1998a).

$$\Delta W_{tot} = \frac{\partial w}{\partial f} \cdot \int_0^L \Delta RH \cdot dx \quad \left[\text{kg}/\text{m}^3_{\text{mtrl}} \right] \quad (5.1)$$

Totala ökningen av fukttinnehållet i betongen är lika med betongens fuktkapaciteten multiplicerat med en integral. Integralen är detsamma som summan av förändring i RH på varje djup. Enkelt uttryckt är integralen lika med ytan mellan de olika RH-profilerna på det sätt som visas i figur 5.4.



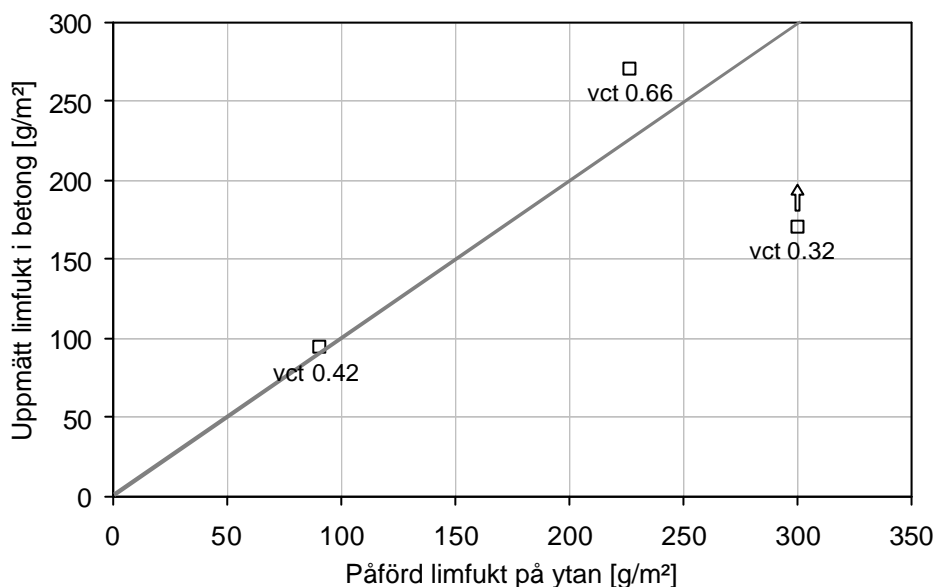
Figur 5.4 Beräkning av ytans storlek för försök med vct 0,66 för att bestämma totala fuktmängden som trängt in i betongen.

I tabell 5.1 sammanställs de fuktmängder som tillförts betongen i undersökningen. Sammanställningen innehåller också total inträngd fuktmängd (w_{tot}) för samtliga försök enligt beräkningssättet med ytor i figur 5.4.

Tabell 5.1 Tillförd limfukt och total uppmätt inträngd fukt (w_{tot}).

Prov vct	Limfukt [10^{-3} kg/m ²]	Yta [10^{-3} RH·m]	RH- nivå [%]	dw/dRH [kg/m ²]	w_{tot} [10^{-3} kg/m ²]
0,32	300	0,47	80-95	>360	>170
0,42	91	0,26	80-95	360	94
0,66	230	0,90	92-97	300	270

Enligt sammanställningen i tabell 5.1 har en del av limfukten inte återfunnits som uppmätt total inträngd fuktmängd (w_{tot}), se även figur 5.5. Anledningen till att det ”fattas” fukt i provet med C1 (vct 0,32) kan vara att en för liten fuktkapacitet har använts i utvärderingen eller så kan det bero på att uppskattningen av ytan i diagrammet underskattar fukttinnehållet i betongen utanför den yttersta mätpunkten. Eventuellt kan en stor del av fukten fortfarande finnas kvar i limmet.



Figur 5.5 Överensstämmelse mellan påförd och uppmätt limfukt i försöket.

5.2 Avdunstning av Limfukt

Vid limning av golvmaterial är öppethållandetiden (OT, open time)), även kallad väntetid, en viktig parameter. Med det menas den tid limmet får ”torka” från det stryks ut på underlaget till det att mattan läggs på. Under väntetiden har fukten i limmet möjlighet att avgå till rumsluften. Om underlaget är vattensugande kommer även viss del av limfukten att omfördelas in i det.

I denna undersökning uppmättes och utvärderades viktnedskningen till följd av vattenavgång från en limfilm under en timmas tid. Undersökningen publicerades ursprungligen i Sjöberg & Wengholt Johnson (1999).

5.2.1 Provkropp

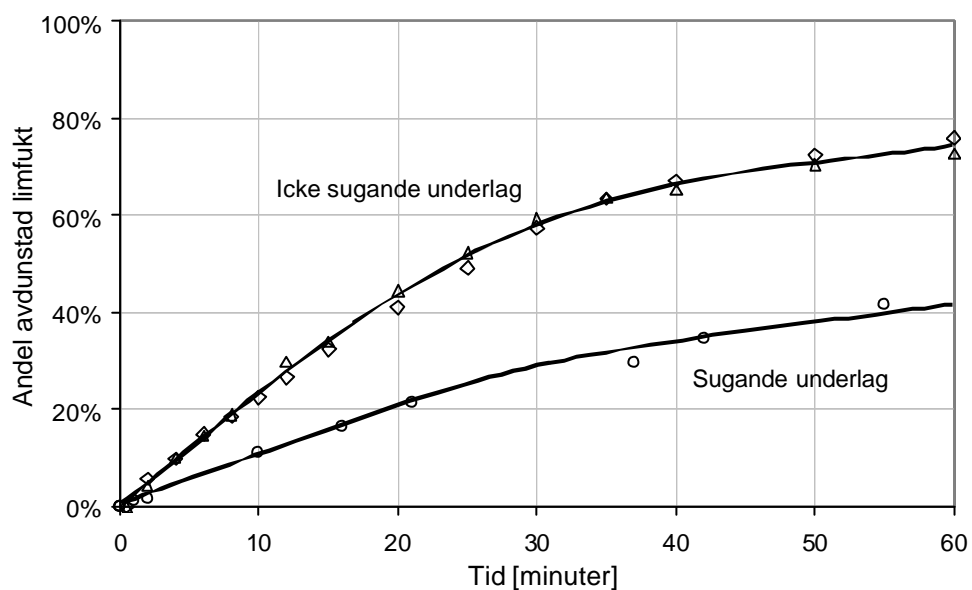
Provkropparna i undersökningen bestod i två försök av en stålplåt, för att representera ett icke sugande underlag, och i två försök av en gipsskiva, för att representera ett sugande underlag. Undersökningen utfördes i en laboratorielokal med ungefär 20 °C och 50 %RH

5.2.2 Vägning

Skivan lades på en våg och vikten noterades. Därefter påfördes ungefär 30 gram lim jämt fördelat (cirka 5 m²/l) på skivan. Den nya vikten av skiva och lim noterades. Därefter avlästes med täta intervall under en timmes tid.

5.2.3 Resultat

Resultatet i form av andel avdunstad limfukt under en timmes väntetid redovisas i figur 5.6. Vid 100% avdunstad limfukt har allt vatten i limmet, det vill säga ungefär 30% av totala limvikten, avgått.



Figur 5.6 Andel av limfukten som avdunstar under den första timmen vid olika typer av underlag. Sjöberg & Wengholt Johnsson (1999)

5.2.4 Utvärdering

Kvarvarande mängd fukt i limmet som kan sugas in i underlaget kan beräknas ur figur 5.6. I tabell 5.2 redovisas kvarvarande mängd fukt vid olika väntetider VT för limning på ett sugande underlag. Ursprungligt fukttinnehåll [kg/m^3] kan beräknas från tillverkarnas uppgifter om densitet och torrhalt i limmet.

I tabell 5.3 redovisas motsvarande beräkningar på kvarvarande mängd fukt för ett icke sugande underlag.

Tabell 5.2 Sugande underlag. Kvarvarande mängd limfukt vid limmängd 5 [m^2/l] (4 [m^2/l] inom parentes) vid olika väntetider, i minuter [min]. Ursprunglig vattenmängd [kg/m^3] kan beräknas som densitet \times (1-torrhalt [%]).

OT tid [h]	%	Kvarvarande fuktmängd [$10^{-3} \text{ kg}/\text{m}^2$]				
		300	350	400	450	500
0	100	60 (75)	70 (88)	80 (100)	90 (113)	100 (125)
2	98	59 (73)	68 (86)	78 (98)	88 (110)	98 (125)
5	94	57 (71)	66 (83)	75 (94)	85 (107)	94 (118)
10	89	53 (67)	62 (78)	71 (89)	80 (101)	89 (111)
15	84	50 (63)	59 (74)	67 (84)	76 (95)	84 (105)
30	72	43 (54)	51 (64)	58 (72)	65 (82)	72 (90)
45	64	39 (48)	45 (56)	51 (64)	58 (73)	64 (80)
60	59	35 (44)	41 (52)	47 (59)	53 (66)	59 (73)
120	46	28 (34)	32 (40)	37 (46)	41 (52)	46 (57)

Tabell 5.3 Icke sugande underlag. Kvarvarande mängd limfukt vid limmängd 5 [m^2/l] (4 [m^2/l] inom parentes) vid olika väntetider, i minuter [min]. Ursprunglig vattenmängd [kg/m^3] kan beräknas som densitet \times (1-torrhalt [%]).

OT Tid [h]	%	Kvarvarande fuktmängd [$10^{-3} \text{ kg}/\text{m}^2$]				
		300	350	400	450	500
0	100	60 (75)	70 (88)	80 (100)	90 (113)	100 (125)
2	95	57 (71)	66 (84)	76 (95)	85 (107)	95 (119)
5	88	53 (66)	61 (77)	70 (88)	79 (99)	88 (109)
10	77	46 (58)	54 (68)	62 (77)	70 (87)	77 (97)
15	67	40 (50)	47 (59)	53 (67)	60 (75)	67 (83)
30	42	25 (31)	29 (37)	33 (42)	37 (47)	42 (52)
45	31	19 (23)	22 (27)	25 (31)	28 (35)	31 (39)
60	26	15 (19)	18 (23)	21 (26)	23 (29)	26 (32)
120	18	11 (14)	13 (16)	15 (18)	16 (21)	18 (23)

5.3 Inverkan av limningsmetod och limsort

Denna undersökning, som ursprungligen publicerats i Fritsche et al (1997), syftade till att närmare klargöra hur emissionen från golvmaterial på underlag av självtorkande betong påverkas av olika omständigheter. Dessa omständigheter är exempelvis limningsmetod, limtyp, cementtyp och torkförlopp.

5.3.1 Provkropp

Nio provkroppar PF3 göts med betong C3 enligt beskrivningen i kapitel 2.1.1. Provkropparna vändes upp och ner inför den avslutande vibreringen vid gjutningen. Nästa dag vändes formarna tillbaka och de rostfria plåtarna avlägsnades från ytorna. Ytan täcktes istället med två lager aluminiumfolie för att hindra för tidig uttorkning av ytan. Ett av proverna täcktes däremot inte med folie, utan fick torka direkt. Provkropparna förvarades i klimatstabil rum (+20 °C, 50 % RH) till mattläggning. Aluminiumfolien avlägsnades 28 dygn efter gjutning och två dygn senare limmades mattan. I de flesta fallen användes en homogen PVC-matta och ett vattenbaserat dispersionslim, se tabell 5.4 för komplett försökssammanställning.

I försök d2.01 och d2.02 löslades mattor på betong. Mattorna var av olika typ och fabrikat och hölls på plats med en stålring

Försök d2.1 och d2.2 tillverkades med samma material, väntetid och limningsmetod som i Wengholt Johnsson (1995). Väntetiden vid limning var cirka 15 minuter innan mattan trycktes fast mot betongytan. I försök d2.3 användes ett "lösningssmedelsfritt" lim. Limningsmetoden varierades i försök d2.4 – 6, försök d2.4 enkellimmades genom att limmet applicerades på mattan istället för på betongen. Försök d2.5 limmades med kontaktlimning, vilket innebär att mattan lades direkt i vått lim, togs sedan direkt upp för att åter igen tryckas fast på ytan när limmet på matta och betong torkat till "klibb" kvarstår. Mattan i försök d2.6 våtlimmades, det vill säga att den lades direkt i vått lim utan någon väntetid.

Betongytan hos provet i försök d2.7 täcktes inte med aluminiumfolie utan betongen fick torka direkt. I försök d2.8 avlägsnades aluminiumfolien 14 dygn efter gjutning. Mattan limmades i dessa försök på samma sätt som i referensprovet, 30 respektive 16 dygn efter torkstart. Den enda skillnaden mellan d2.1 och d2.2 (referenserna) och försök d2.9 var att det senare försöket använde sig av anläggningscement istället för standardcement. Detta gjordes för undersöka effekten av lägre alkalihalt i betongen.

5.3.2 Fukt- och Emissionsmätning

Fukttillståndet mättes i provkropparna flera gånger under härdningen. Vid limningen var fuktnivån ungefär 84 % RH för alla provkroppar utom d2.9 som hade en fuktnivå på 94 % RH, se tabell 5.5 och figur 5.7. Fuktnivån mättes även en vecka efter limning och vid ytteligare ett tillfälle ungefär 20 veckor senare. RH-mätningarna gjordes med RH-prober som stacks in i mätrör på provkroppen på 4 cm djup ett dygn innan avläsning. Metoden beskrivs i kapitel 2.3.1.

Mätningar av emissionen från provkropparna gjordes vid två tillfällen. Det första var ungefär 7 veckor efter mattläggning och det andra ungefär 26 veckor efter mattläggning. Provtagningen skedde enligt metoden i kapitel 2.3.3 med FLEC och TENAX-rör. Den efterföljande analysen på TENAX-röret gjordes med GC-FID som fanns på Institutionen för Kemisk Miljövetenskap, Chalmers Tekniska Högskola.

5.3.3 Resultat

Resultatet i form av emissionsfaktor EF vid 7 och 26 veckor efter mattlimning presenteras i tabell 5.4. Resultatet från samtliga RH-mätningar i undersökningen redovisas i tabell 5.5 samt i figur 5.7.

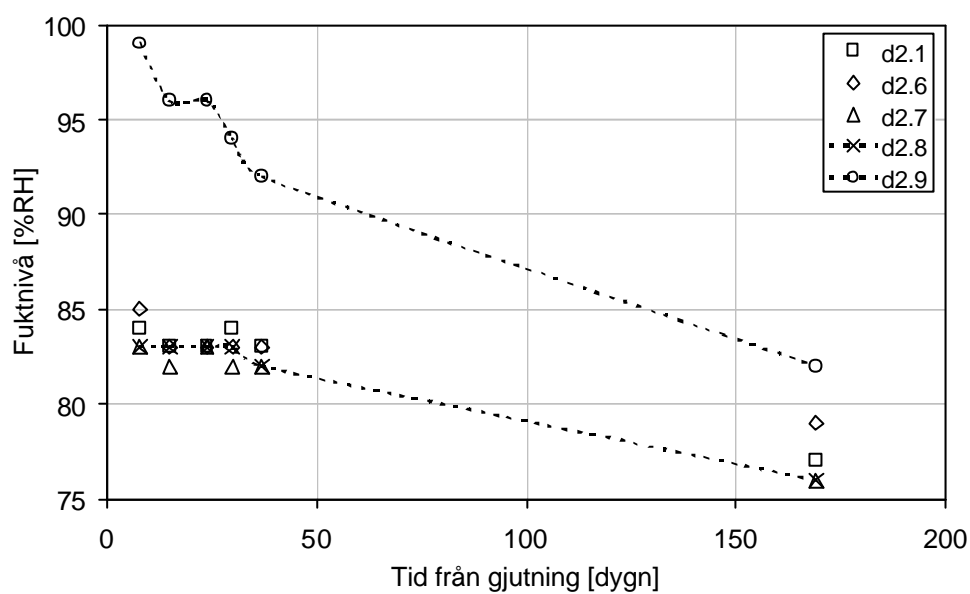
Tabell 5.4 *Försökssammanställning och resultat för undersökning d2.*

Försök	.01	.02	.1	.2	.3	.4	.5	.6	.7	.8	.9
AT	–	–	1	1	1	1 [♥]	4	1 [♠]	1	1	1
VT	–	–	15	15	15	15	60	0	15	15	15
Matta	F1	F1	F1	F1	F1	F1	F1	F1	F1	F1	F1
Lim	–	–	A4	A4	A1	A4	A4	A4	A4	A4	A4
Betong	C3	C3	C3	C3	C3	C3	C3	C3	C3 [♣]	C3 [♣]	C3 [♣]
Namn	VIa	VIb	I	Ie	II	IIIa	IIIb	IIIc	IVa	IVb	V
B 7w	< 2	4	17	203	395	371	7	1941	12	23	26
B 26w	< 2	< 2	8	32	20	55	24	280	9	16	21
E 7w	< 2	9	28	5	134	83	18	326	38	39	16
E 26w	7	5	15	44	100	72	19	315	4	19	32
♥	Limning på mattan				♦	2 respektive 4 v torkning					
♠	Våtlimning				♣	Anläggningscement					

Tabell 5.5 *RH i provkropparna på 40% av höjden vid olika tider efter gjutning, undersökning d2.*

Försök	8 dygn	15 dygn	24 dygn	30 dygn*	37 dygn	169 dygn
d2.1	84	83	83	84	83	77
d2.2	–	–	–	–	–	–
d2.3	–	–	–	–	–	–
d2.4	–	–	–	–	–	–
d2.5	–	–	–	–	–	–
d2.6	85	83	83	83	83	79
d2.7	83	82	83	82	82	76
d2.8	83	83	83	83	82	76
d2.9	99	96	96	94	92	82

* limning av PVC-matta



Figur 5.7 *RH i provkropparna på 40% av höjden vid olika tider efter gjutning, undersökning d2.*

5.3.4 Utvärdering

Inverkan av torkning av betongytan samt cementsort

Vid en jämförelse av EF från provkropparna som fått torka under 2 respektive 4 veckor (d2.7 resp d2.8) och referensproven (d2.1 och d2.2) kan ingen större skillnad ses, förutom ett enstaka värde för butanol vid 7 veckor från försök d2.2. Det värdet kan vara en felmätning eftersom dubbelprovet d2.1 inte har lika höga värden. Inte heller en annan cementsort med lägre alkaliinnehåll förändrade emissionen nämnvärt (d2.9).

Den uteblivna skillnaden kan förklaras med att fuktnivån vid limningen var för låg, ungefär 84 % RH för alla provkroppar utom d2.9 som hade en fuktnivå på 94 % RH enligt tabell 4.28. Den snabba uttorkningen kan bero på självtorkning hos betongen. Att kraftigt förhöjda emissioner inte uppmättes från d2.9 trots den höga fuktnivån kan förklaras med att det var ett annat cement i den betongen eller att fukten läckte ut mellan mattan och stålformen innan den omlagrats och orsakat alkalisk hydrolys av golvlimmet.

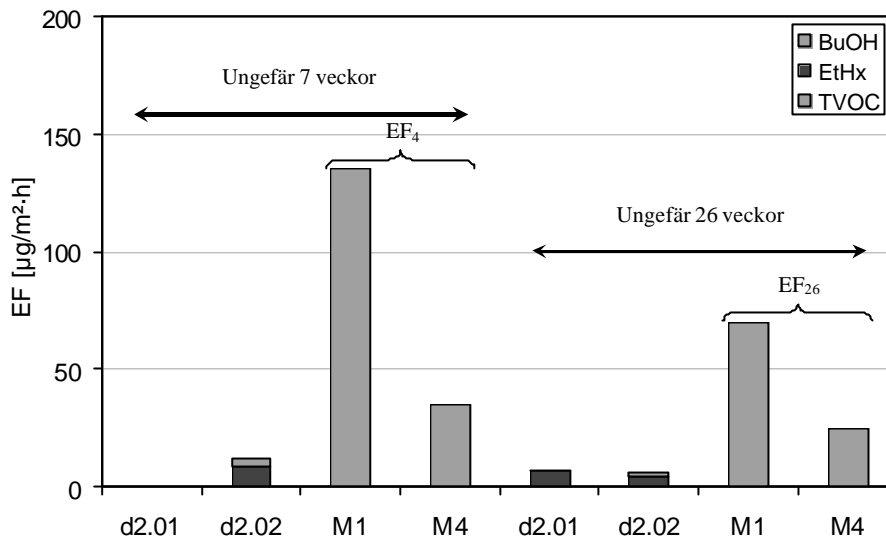
Emissioner vid lösläggning

Jämförelsen som görs här visar på att de löslagda mattorna inte påverkats av betongen. Två olika typer av PVC-mattor har löslagts och värdena för EF har jämförts med deras egenemissioner i figur 5.8.

Mattan i försök d2.01 är en homogen PVC-matta (M1) avsedd för limning. Uppmätta EF visar att den emitterar endast en liten del av det som uppges som egenemission, se figur 5.8.

Mattan i försök d2.02 är en skiktad PVC-matta (M4) med baksida av pressade polyesterfiber, avsedd för lösläggning. Polyesterfibrerna på baksidan av mattan påminner om filt. Emissionsmätningar visar att även denna matta endast emitterar en liten del av det som uppges som egenemission.

Eftersom EF från de löslagda mattorna är låg, till och med mycket lägre än tillverkarnas värden på egenemissioner, kan det antas att det inte skett någon nedbrytning av mattan. Att EF är låg i undersökningen kan bero på att tillverkarna mäter egenemissionen 4 respektive 26 veckor efter tillverkning. Mattorna som använts i försöken har varit äldre och egenemissionen kan ha avklingat trots att de varit inpackade i flera lager aluminiumfolie sedan tillverkningen.



Figur 5.8 Emissioner från löslagda mattor efter 7 respektive 26 veckor och tillverkarnas angivna värden på egenemissioner, EF_4 och EF_{26} . är egenemissioner från mattan vid 4 respektive 26 veckor efter tillverkning. d2.01 är matta M1 och d2.02 är matta M4.

Inverkan av limningsmetod och limsort

Jämförelsen som görs här visar på betydelsen av limningsmetoden för emissionen från det färdiga golvsystemet, samt vilken betydelse valet av limsort har. Jämförelsen görs mellan EF från sju av försöken som ingick i undersökningen.

Staplarna till vänster i figur 5.9 och 5.10 visar på stor EF från provkropparna. Mattan våtlimades på provkroppen i försök d2.6 vilket kan vara förklaringen till den stora EF. Endast en liten del limfukt hann att avgå enligt figur 5.6 innan mattan lades på.

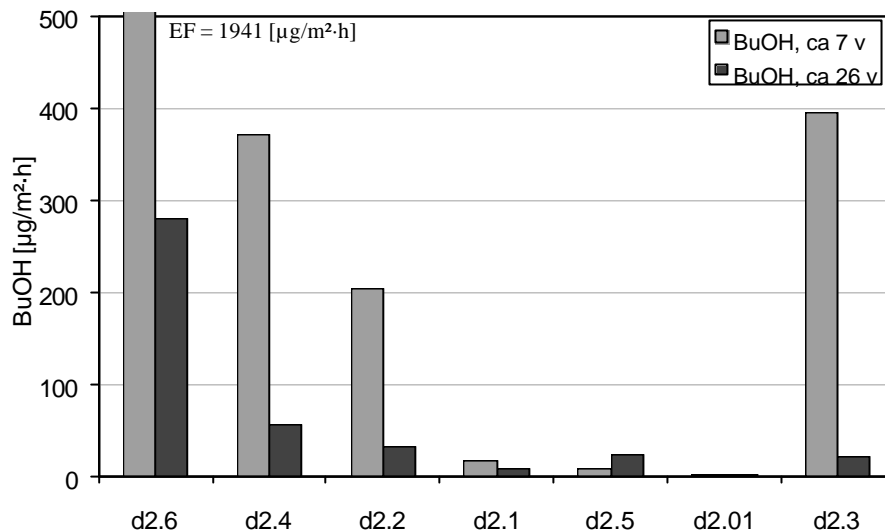
I nästa försök (d2.4) applicerades limmet på mattan och väntetiden var ungefär 15 min. Emissionen var högre än referenserna (nedan) även i detta försök. Det kan bero på att limfukten inte har möjlighet att sugas in och omfördelas i betongen under väntetiden. Enligt figur 5.6 har dock ungefär 35% av limfukten avgått efter 15 minuter på ett icke sugande underlag och bara hälften så mycket på ett sugande.

Dubbelproverna i försök d2.2 och d2.1 kan anses som referenser i denna undersökning. Det har skett en nedbrytning även i dessa prover om man jämför med den löslagda mattan. Möjligen kan det höga värdet på butanol vid första mätningen av d2.2 vara ett måtfel.

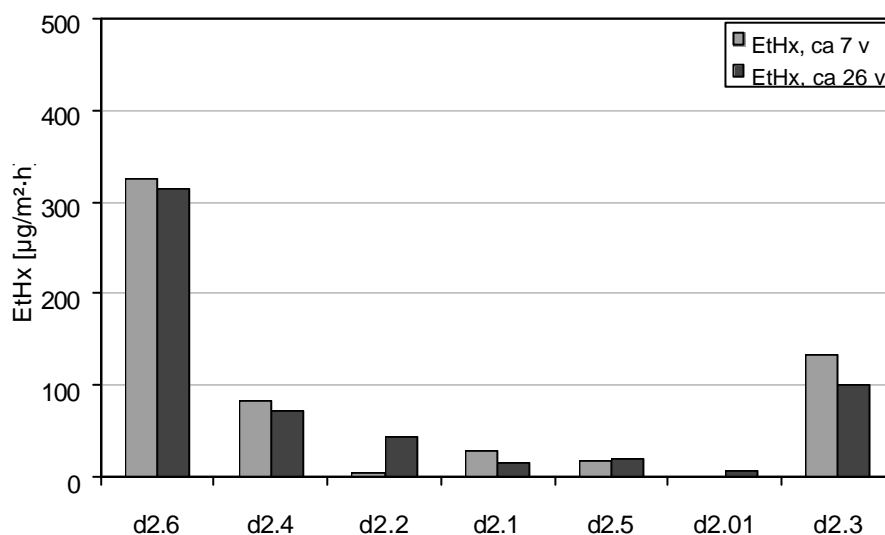
I försök d2.5 häftlimmades mattan på det sätt som beskrivs i kapitel 2.1.3. Emissionen är låg från dessa provkroppar. Enligt figur 5.6 kan 40% av limfukten ha avgått innan mattan trycktes fast.

Den löslagda mattan i försök d2.1 hade låga egenemissioner.

Staplarna i högra kanten av figur 5.9 och 5.10 kommer från ett försök med ett annat lim (L1) som baseras på i stort sett samma polymerer som referenslimmet (L4). Förhållandena var i övrigt samma som i referensen d2.2 och d2.1 men EF var högre. Skillnaden visar att tillsynes lika material kan ge olika EF.



Figur 5.9 Jämförelse mellan emission av etylhexanol från golvsystem limmade med olika metoder. Våtlimning (d2.6), limning på matta (d2.4), limning på betong (d2.2 och d2.1), häftlimning (d2.5) samt lösläggning (d2.01.). Slutligen var d2.3 limmad på betong med annat lim (L1).



Figur 5.10 Jämförelse mellan emission av etylhexanol från golvsystem limmade med olika metoder. Våtlimning (d2.6), limning på matta (d2.4), limning på betong (d2.2 och d2.1), häftlimning (d2.5) samt lösläggning (d2.01.). Slutligen var d2.3 limmad på betong med annat lim (L1).

5.4 Inverkan av avjämningsmassa

Denna undersökning jämförde emissionen när PVC-mattor limmades på provkroppar med sju olika sorters avjämningsmassa. Tidigare undersökningar av Wengholt Johnsson (1995) visade att avjämningsmassa hade en gynnsam effekt vid limning av PVC-mattor på byggfuktfri betong.

5.4.1 Provkropp

Åtta provkroppar PF3 ”skålen” göts med betong C3 enligt beskrivningen i kapitel 2.1.1. Provkropparna fylldes så att avståndet mellan betongytan och kanten överensstämde med tjockleken på spackellagret som skulle gjutas senare. Provkroppen till försök d3.0 som saknade avjämningsmassa vändes upp och ner på en stålplåt och vibrerades. Nästa dag vändes den rätt och täcktes med plast. De övriga provkropparna täckes med tätslutande plast direkt efter gjutningen. Provkropparna förvarades i klimatstabil rum fram till mätning av emissionen.

Pågjutning med avjämningsmassor skedde efter sju dygns härdning under tätslutande plastfilm för samtliga prov utom d3.3 och det utan avjämningsmassa (d3.0). RH hade vid det tillfället sjunkit under 90 % , se tabell 5.7 samt figur 5.11 och 5.12. 90 % RH ansågs vara högsta rekommenderade fuktnivån vid pågjutning enligt leverantörerna av avjämningsmassa. Avjämningsmassorna levererades färdigblandade med undantag av vatten som tillsattes vid gjutningen. Efter att vattnet tillsatts blandades avjämningsmassorna i en tvångsblandare och göts enligt kapitel 2.1.2. Avjämningsmassan på provkropp d3.3 göts vid ett separat tillfälle.

De sju avjämningsmassorna som studerades var av tre olika typer. De tre första (d3.1 – d3.3) var normala avjämningsmassor baserade på aluminatcement, se kapitel 2.1.2. Två stycken (d3.4, d3.5) var snabbhärdande avjämningsmassor baserade på aluminatcement och de två sista (d3.6, d3.7) var gipsbaserade avjämningsmassor. Försökssammanställningen och resultat har sammanställts i tabell 5.6. Försöket och resultaten beskrivs också i Koniczny (1997).

Mattlimningen skedde ett dygn efter pågjutning av snabbhärdande avjämningsmassor. Vid pågjutning med normalhärdande avjämningsmassor skedde mattlimningen efter 7 dygn och för de gipsbaserade avjämningsmassorna efter 14 dygn. Detta var de kortaste torktiden som rekommenderades för respektive avjämningsmassa. Alla provkroppar våtlimmades på samma sätt med tio minuters väntetid innan mattan trycktes fast. PVC-matta och lim var samma för alla provkropparna. Limningsmetoden beskrivs i kapitel 2.1.3.

5.4.2 Fukt- och Emissionsmätning

Fukttillståndet mättes i provkropparna flera gånger under härdningen. Den första mätningen skedde i samband med gjutning av avjämningsmassor, cirka 1 vecka efter gjutning av betongen. Sedan upprepades mätningarna 2, 3 samt 14 veckor efter gjutning. RH-mätningarna gjordes med RH-prober som stacks in i mätrör på provkroppen på 4 cm djup ett dygn innan avläsning. Mätmetoden beskrivs i kapitel 2.3.1 som metod nr 1. RH-mätningarna skedde på 40% av provkroppens totala höjd, inklusive eventuell avjämningsmassa.

Mätningar av emissionen från provkropparna gjordes vid fem tillfällen, 14, 26, 36, 40 samt 44 veckor efter mattläggning. Provtagningen skedde med FLEC och TENAX-rör samt efterföljande analys med GC-FID enligt metoden som beskrivs i kapitel 2.3.3.

5.4.3 Resultat

Resultatet i form av emissionsfaktor EF vid 14 – 44 veckor efter mattlimning presenteras i tabell 5.6. Resultatet från samtliga RH-mätningar i undersökningen redovisas i tabell 5.7 samt i figur 5.11 och 5.12.

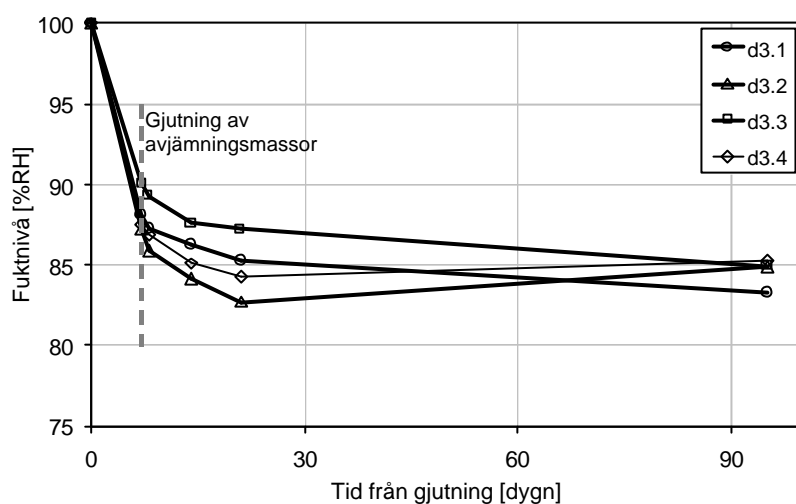
Tabell 5.6 *Försökssammanställning och resultat för undersökning d3.*

Försök	d3.00	d3.01	d3.0	d3.1	d3.2	d3.3	d3.4	d3.5	d3.6	d3.7
Avj.massa	–	–	–	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
t [mm]	–	–	–	5	5	5	5	5	20	20
Σ Tid [dygn]	–	–	8	7+7	7+7	7+7	7+1	7+1	7+14	7+14
Matta	Stål	F1	F1	F1	F1	F1	F1	F1	F1	F1
Lim	–	–	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2
Betong	–	–	C3	C3	C3	C3	C3	C3	C3	C3
Namn	Stål	Matta	A	G	F	H	D	E	C	B
B 14 w	< 2	6	141	16	9	12	< 2	< 2	7	12
B 26 w	< 2	< 2	77	2	15	7	< 2	8	20	7
B 36 w	< 2	< 2	40	4	3	< 2	< 2	5	5	< 2
B 40 w	< 2	< 2	28	5	< 2	< 2	50	< 2	< 2	5
B 44 w	< 2	< 2	24	< 2	< 2	< 2	3	< 2	< 2	< 2
E 14 w	< 2	4	150	9	17	14	< 2	< 2	12	8
E 26 w	< 2	< 2	193	10	17	18	4	15	13	24
E 36 w	8	5	139	29	26	22	144	29	34	26
E 40 w	< 2	< 2	154	143	95	93	159	39	35	42
E 44 w	6	< 2	89	12	< 2	8	7	8	8	12

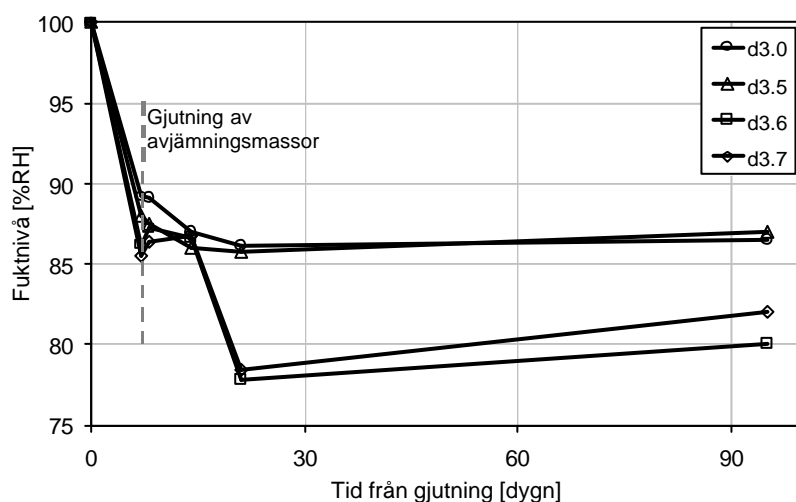
Tabell 5.7 RH i provkropparna på 40% av höjden vid olika tider efter gjutning, undersökning d3.

Försök	7 dygn	8 dygn	14 dygn	21 dygn	95 dygn
d3.0	89,2	89,1 [▲]	87,0	86,1	86,5
d3.1	88,1 [▼]	87,3	86,3 [▲]	85,3	83,3
d3.2	87,2 [▼]	85,9	84,1 [▲]	82,7	84,9
d3.3	90,1	89,3	87,6 [▼]	87,2 [▲]	84,9
d3.4	87,5 [▼]	86,9 [▲]	85,1	84,3	85,3
d3.5	88,0 [▼]	87,5 [▲]	86,0	85,8	87,0
d3.6	86,2 [▼]	87,2	86,6	77,8 [▲]	80,0
d3.7	85,5 [▼]	86,4	86,7	78,4 [▲]	82,0

▼ gjutning av avjämningsmassa
 ▲ limning av PVC-matta



Figur 5.11 RH i provkropparna på 40% av höjden vid olika tider efter gjutning, undersökning d3.1 – d3.4.



Figur 5.12 RH i provkropparna på 40% av höjden vid olika tider efter gjutning, undersökning d3.0 och d3.5 – d3.7.

5.4.4 Utvärdering

Inverkan av typ och sort av avjämningsmassa

Denna jämförelse görs för att utröna om det är någon avgörande betydelse vilken typ av avjämningsmassa som används på byggfuktfri betong.

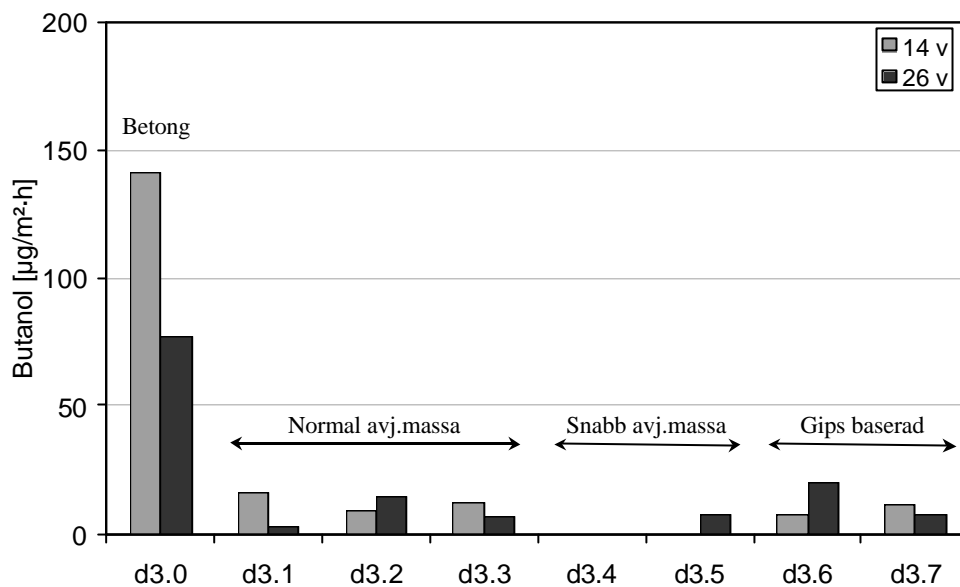
EF från försöket med betong C3 utan avjämningsmassa visas längst till vänster i figur 5.13 och 5.14. Försöket har högst EF av samtliga försök i undersökningen. Resultatet är så högt att det kan handla om sekundära emissioner på grund av alkalisk hydrolys av limmet, detta stämmer även med resultaten i Wengholt Johnsson (1995).

De övriga sju försöken, med avjämningsmassa, har samtliga låga EF vid de två första emissionsmätningarna som sammanställs i figur 5.13 och 5.14. Dock har de höga EF vid mätningen efter 40 veckor, det kan bero på en yttre störning i mät och analysförfarandet.

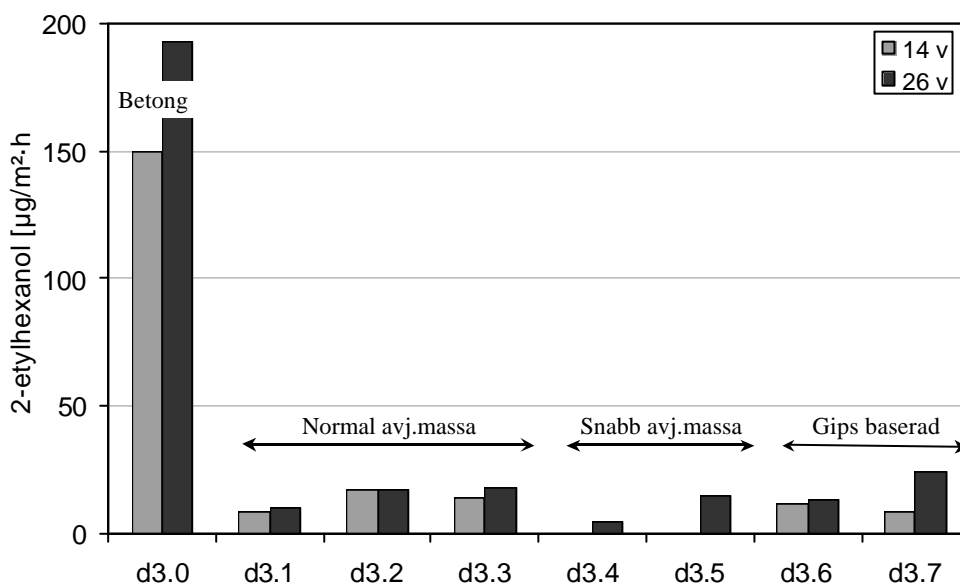
Det är anmärkningsvärt att fuktnivån i betongen sjunkit till ungefär 86 – 90 %RH i efter 7 dygn. Efter tre veckor ligger fuktnivån i de flesta försöken omkring 85 %RH. Sedan sjunker inte nivån i försöken nämnvärt, förutom för prov d3.6 och d3.7 som är belagda med gipsbaserad avjämningsmassa. Den snabba uttorkningen ner till 85 %RH kan bero på självuttorkning hos betong C3.

Att fuktnivån upphör att sjunka kan bero på att en tät matta limmats på försöken och därmed hindrar torkning från ytan. Att fuktnivån stiger mellan 21 och 95 för försök d3.0, .2, .4, .6 och .7 kan bero på att fuktfördelningen i provkroppen omfördelas. Dels kan eventuell fukt från botten av provkroppen transporteras upp till mätdjupet eller så kan fukten i avjämningsmassan transporteras ner till mätplatsen.

En brist i undersökningen är att alla cementbaserade avjämningsmassorna var baserade på aluminatcement. Aluminatcementbaserade avjämningsmassor är lågalkaliska med pH omkring 11.



Figur 5.13 Jämförelse mellan emission av butanol från provkroppar med homogen PVC-matta limmad på olika typer av avjämningsmassa. I försök d3.0 har dock mattan limmats direkt på betong.



Figur 5.14 Jämförelse mellan emission av etylhexanol från provkroppar med homogen PVC-matta limmad på olika typer av avjämningsmassa. I försök d3.0 har dock mattan limmats direkt på betong.

5.5 Inverkan av torktid av betongytan innan limning

Fuktegenskaper i betongskiktet under lim och matta har betydelse för emissionshastigheten. I undersökning d2 ovan som också beskrivs i Fritsche *et al* (1997) visades att väntetiden vid limning på betong med lågt vct betong var en viktig parameter.

I den här undersökningen mättes emissionen från mattor med olika betongunderlag och väntetider vid limning. I några fall varierades tiden för luftningen efter plasten avlägsnats till limning skedde.

5.5.1 Provkropp

Till undersökningen gjöts 21 provkroppar PF3 ”skålen” enligt beskrivningen i kapitel 2.3.3. Av dessa var 13 st betong C2 och resterande 8 betong C4, se tabell 5.7 – 5.9. Direkt efter gjutningen vändes provkropparna upp och ner på en stålplåt och vibrerades. Nästa dag vändes den rätt och täcktes med plast. Därefter förvarades de i klimatstabil rum (20°C, 50 % RH) övertäckta med plastfolie i 25 dygn. Plastfolien avlägsnades och efter 5 dygn limmades PVC-mattor på betongproverna. Mängden påfört lim, 15 g, var densamma för samtliga prover. Mattorna våtlimmades och väntetiden var 2 minuter eller 10 minuter, se kapitel 2.1.3 för beskrivning av limningsmetoder. Några prover torkade utan plast i 20 dygn istället för 5 dygn.

De prover som avjämnades vändes ej utan förvarades övertäckta i 25 dygn och efter ytterligare 5 dygn påfördes ca 5 mm avjämningsmassa. Mattan limmades på underlaget 7 dygn efter avjämning.

Ett udda försök d4.1 med en linoleummatta inkluderades i undersökningen. Syftet var att få ett pilotförsök till en eventuell undersökning om EF från limmade linoleummattor.

5.5.2 Fukt- och Emissionsmätning

Resultatet från RH-mätningar av ytfukt i provkroppar med samma betong, som torkat under samma torkförhållanden, under samma tidsperiod, redovisas i tabell 5.6. Mätningarna av ytfukt är utförda med uttagna prover på 0-5 mm djup enligt metod 3 i kapitel 2.3.1. Fullständiga beskrivning av RH-mätningarna inklusive samtliga resultaten återfinns i Sjöberg & Wengholt Johnsson (1999).

Mätningar av EF utfördes ungefär 10 respektive 26 veckor efter mattläggning. Provtagningen skedde med FLEC och TENAX-rör samt efterföljande analys med GC-FID enligt metoden som beskrivs i kapitel 2.3.3.

5.5.3 Resultat

Resultatet i form av RH i betongytan för respektive betongsort vid de olika torkningstiderna redovisas i tabell 5.8.

Försökssammanställningen och emissionsfaktor EF vid 10 och 26 veckor efter mattlimning redovisas i tabell 5.9 – 5.11 samt i figur 5.15 och 5.16.

Tabell 5.8 *Fuktnivå i betongytan (0-5 mm) vid limning av tät matta.*

Försök	Ytfukt [%RH]	
	C2	C4
Torkning 5 [dygn]	71,8	81,3
Torkning 20 [dygn]	66,9	78,5

Tabell 5.9 *Försökssammanställning och resultat för undersökning d2.*

Försök	4.00	d4.1	d4.2	d4.3	d4.4	d4.5	d4.6	d4.7
Väntetid [min]	–	2	5	5	10	2	2	2
Torkning [dygn]	–	5	5	5	5	5	5	20
Avj. massa	–	–	–	–	–	–	–	–
Matta	Stål	F3	F1	F1	F1	F1	F1	F1
Lim	–	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2
Betong	–	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2
Beteckning	00	EB2	EB1	EB3	EB4	EB5	EB6	EB7
EF BuOH 10 w	< 2	3	899	1254	786	1612	1673	20
EF BuOH 26 w	< 2	2	322	294	266	678	577	152
EF EtHx 10 w	< 2	1	540	895	618	720	813	17
EF EtHx 26 w	< 2	210	726	765	641	1016	876	178

Tabell 5.10 *Försökssammanställning och resultat för undersökning d2.*

Försök	d4.8	d4.9	4.10	4.11	4.12	4.13	4.14	4.15
Väntetid [min]	10	2	2	2	15	25	10	10
Torkning [dygn]	20	5	5+7	5+7	5+7	5+7	5	5
Avj. massa	–	–	S2	S2	S2	S2	–	–
Matta	F1	F1	F1	F1	F1	F1	F1	F1
Lim	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2
Betong	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C4	C4
Beteckning	EB8	EB9	EBA1	EBA2	EBA3	EBA4	ET1	ET2
EF BuOH 10 w	80	1285	27	20	17	0	1383	1319
EF BuOH 26 w	69	579	9	5	1	3	731	590
EF EtHx 10 w	59	780	26	25	31	21	663	730
EF EtHx 26 w	114	1059	26	17	17	17	1303	1177

Tabell 5.11 *Försökssammansättning och resultat för undersökning d2.*

Försök	4.16	4.17	d4.17	D4.19	d4.20	d4.21
Väntetid [min]	2	2	2	2	15	25
Luftning [dygn]	5	5	5+7	5+7	5+7	5+7
Avj. massa	–	–	S2	S2	S2	S2
Matta	F1	M1	M1	M1	M1	M1
Lim	L2	L2	L2	L2	L2	L2
Betong	C4	C4	C4	C4	C4	C4
Beteckning	ET3	ET4	ETA1	ETA2	ETA3	ETA4
EF BuOH 10 w	1986	1411	1	18	12	7
EF BuOH 26 w	723	563	7	6	1	4
EF EtHx 10 w	1121	973	4	32	30	25
EF EtHx 26 w	1505	1232	26	13	20	16

5.5.4 Utvärdering

Inverkan av linoleummatta

EF från försöket med linoleummattan d4.1 kan jämföras med försöken d4.5 och d4.6 som är belagda med PVC-matta men allt i övrigt är lika. Försöket med linoleummattan har lägre EF vid samtliga mätningar än motsvarande med PVC-matta.

Mätvärdena för butanol från d4.1 är låga vid båda tillfällena. Mätvärdet för etylhexanol är lågt vid första mätningen men ökar vid den andra. Detta är ett vanligt uppförande hos EF för etylhexanol i denna undersökning, då höga EF har uppmätts.

Inverkan av olika väntetid vid limning

En jämförelse mellan försök, som i övrigt är lika, kan man studera betydelsen av väntetid vid limning. Vid en jämförelse mellan två och fem minuters väntetid för betong C2 kan man inte säkerställa några tydliga skillnader i EF. Det kan bero på att skillnaden i kvarvarande mängd limfukt inte är så stor att det inverkar nämnvärt, skillnaden är endast 7 % enligt tabell 5.3.

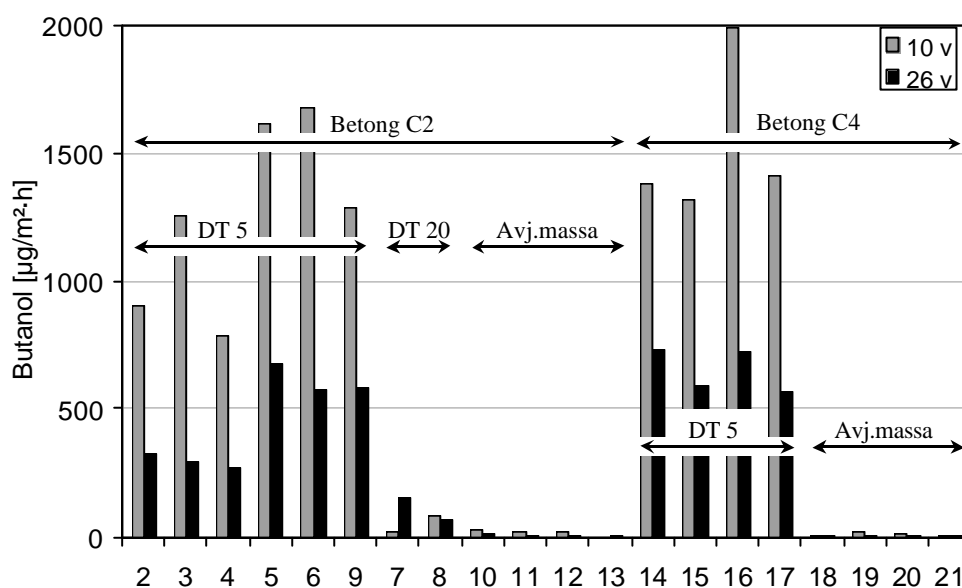
Resultatet vid en jämförelse av EF från motsvarande försök med betong C4, där väntetiden varierats mellan 2 och 10 minuter, visar inte heller några tydliga skillnader. Enligt tabell 5.2 är skillnaden i kvarvarande limfukt 5 % i detta fall.

Inverkan av torktid av betongytan innan limning

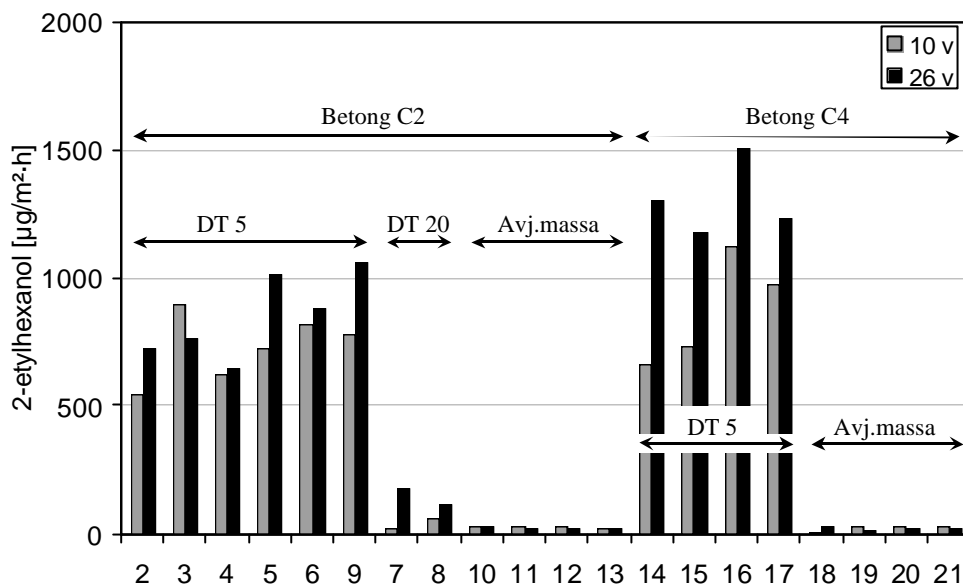
Genom att gruppera staplarna för EF enligt figur 5.15 och 5.16 kan effekten av torktiden bedömas. Staplarna till vänster, EF vid 5 dygns torktid, är generellt högre än staplarna till höger, för varje betong. EF är med andra ord hög från samtliga försök med 5 dygns torktid, oberoende av betong, men låg vid betong C2 med 20 dygns torktid. Detta kan bero på att betongens yta är torrare och klarar fukttillskottet från limmet, se tabell 5.8. Dock kan betongen generellt sett vara torrare i de försöken på grund av längre torktid.

I de försök där avjämningsmassa lagts på betongen är EF låg oberoende av betong. Detta kan förklaras med att avjämningsmassan torkar snabbt och kan klarar fukttillskottet från limmet.

En annan förklaring kan vara alkalisk hydrolys inte uppstår när ytan torkat 20 dygn och / eller då avjämningsmassa används på grund av att pH-värdet är lågt. Vid 20 dygns torktid kan betongytan reagera med luftens koldioxid, det sker en så kallad karbonatisering. Detta sänker pH värdet från ungefär 13 till under 9. pH-värdet hos avjämningsmassan är under 11 enligt tillverkaren.



Figur 5.15 Inverkan på emission av butanol vid olika torktider av betongytan innan limning samt vid användning av avjämningsmassa. Försöken har gjorts på två betongtyper med ungefär 90 % RH vid limning av PVC-matta. Experiment nummer 2 – 21 refererar till d4.x. d4.00 och d4.1 har utelämnats.



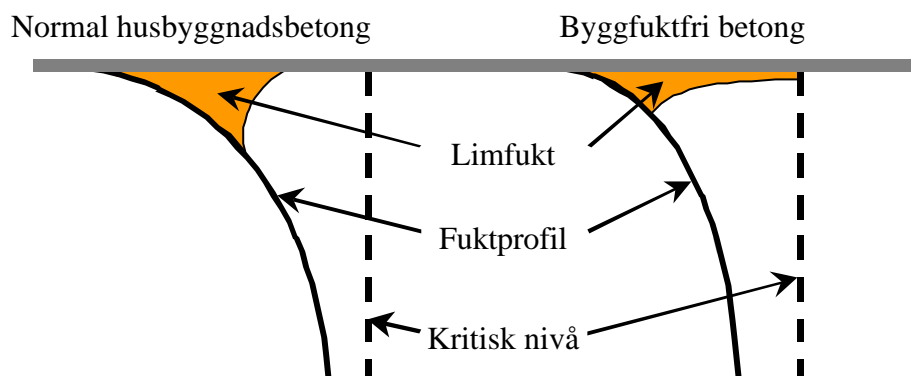
Figur 5.16 Inverkan på emission av etylhexanol vid olika torktider av betongytan innan limning samt vid användning av avjämningsmassa. Försöken har gjorts på två betongtyper med ungefär 90 % RH vid limning av PVC-matta. Experiment nummer 2 – 21 refererar till d4.x. d4.00 och d4.1 har utelämnats.

5.6 Diskussion och konklusion om fuktfördelning, limfukt och förhöjd EF

Ett fukttillskott på betongens översida kan temporärt höja fuktnivån i ytan. Om ett tätt skikt såsom en PVC-matta läggs på betongytan strax efter fukttillskottet kan fukten endast omfördelas ned i betongen. Detta kan ta en eller flera veckor.

Om fukttillskottet är betydande i förhållande till betongytans tillgängliga fuktkapacitet kan en omfattande RH-höjning ske. Denna RH-höjning kan resultera i hydrolys av golvmaterialen, främst golvlimet då detta är i direktkontakt med betongen. Reaktionen bildar nedbrytningsprodukter som kan vandra upp genom mattan och emittera från överytan. Där kan då förhöjda värden på EF mätas under lång tid.

Höjningen av RH i ytan kan vara kraftigast vid fukttillskott på tät betong, om allt annat är lika. Denna betong har oftast en mindre tillgänglig fuktkapacitet än normal betong med högre vct. Lika stort fukttillskott kan orsaka olika RH-höjning beroende på betongens fuktkapacitet och fukttransportegenskaper, se figur 5.17.



Figur 5.17 Profilen av RH (%) före limningen samt fukttillskott på grund av limfukten. Fritsche et al (1997).

Väntetiden vid limning, innan mattan trycks fast, kan påverka EF. En stor andel av limfukten kan avgå under väntetiden om den är tillräckligt lång. Effekten av lång väntetid kan vara dubbelt så stor på betong med lågt vct som på betong med högt.

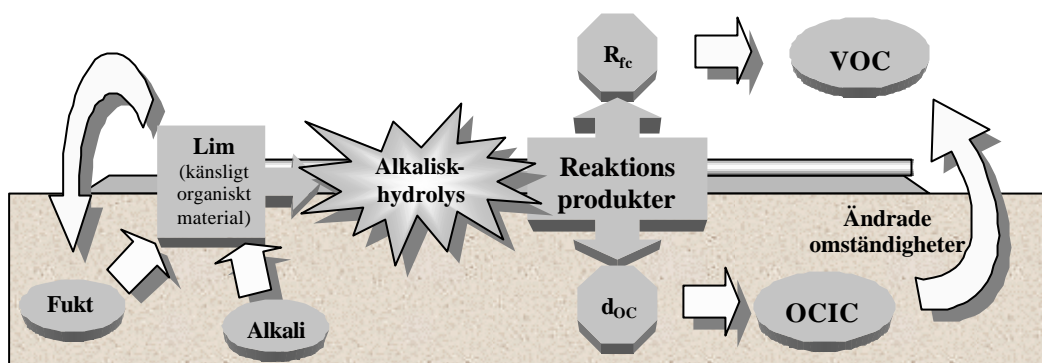
Torkning av betongytan kan minska EF. Detta kan troligen förklaras med att alkalisk hydrolys av golvmaterial inte sker om betongen torkat tillräckligt länge. Anledningen kan vara att betongen då kan ta hand om fukttillskottet från limmet utan att kritisk fuktnivå överskrids. Anledningen kan eventuellt också vara att pH-värdet i betongens yta sjunker till följd av karbonatisering, reaktion med luftens koldioxid, under torktiden.

Avjämningsmassa kan ha en positiv effekt för att hindra förhöjd EF. Enligt försök som gjorts i studien kan de olika typerna av avjämningsmassa tänkas ha liknande effekt. Den gynnsamma effekten kan förklaras med att alkalisk hydrolys av golvmaterial förhindras med hjälp av avjämningsmassa. Anledningen kan vara att avjämningsmassa torkar snabbt och kan därefter ta hand om fukttillskott från limmet. Anledningen kan också vara att avjämningsmassan sänker pH-värdet i kontakt med mattan till cirka 11, betong har 13 eller mer.

6 Kvalitativ modell

6.1 Allmänt

Modellen som diskuterades i det inledande kapitlet har verifierats av mätningar i en mängd försök i den här studien. Samband och egenskaper som kan ha avgörande inverkan för EF från golvkonstruktionen och OCIC har bestämts. I figur 6.1 redovisas den kvalitativa modellen i form av ett blockschema.



Figur 6.1 Blockschema över den kvalitativa modellen.

Alkalisk fukt och akrylatsampolymer är de två avgörande komponenterna för alkalisk nedbrytningen av golvlimt. I vänstra kanten av figur 6.1 illustreras hur fuktfördelningen i betongplattan påverkas av fuktillskottet från limmet.

Det räcker dock inte att det är alkaliskt eller fuktigt i betongen, det måste vara båda delarna samtidigt, och i tillräcklig grad, för att underlaget skall påverka limmet. Om dessa villkor är uppfyllda sker en nedbrytning, så kallad alkalisk hydrolys av limmet och nedbrytningsprodukter bildas.

Dessa nedbrytningsprodukter OC kan sedan transporteras bort. Beroende på de angränsande materialens egenskaper transporterar de i olika omfattning uppåt och nedåt. Den mängd som migrerar ner i betongen OCIC kan bindas där och senare, när omständigheterna på ytan förändrats, vandra upp igen och avgå till luften.

I detta kapitel går tre typfall igenom och utvärderats kvalitativt. Tidsskalan och omfattningen av reaktionen ingår inte i den kvalitativa modellen. Typfallen är limning av PVC-matta på:

1. Normal husbyggnadsbetong
2. Byggfuktfri betong
3. Byggfuktfri betong med avjämningsmassa

6.2 Betong med högt vct, ungefär 0,7

Gjutning fram till limning, figur 6.2

Fuktnivån sjunker i betongen den första tiden efter gjutning. Uttorkningen sker från ytan. En starkt lutande fuktprofil kan bildas då fukt transporteras upp genom betongen.

Alkali kan transporteras med fukten upp mot ytan och anrikas där fukten avdunstar. Karbonatisering av betongytan kan sänka pH-värdet.

Precis innan limningen till ungefär ett dygn efter, figur 6.3

Limfukten kan höja fuktnivån i betongens överkant. Den kritiska fuktigheten behöver dock inte överskridas.

Alkali kan följa med limfukten tillbaka in i betongen. Transporten kan vara så liten att den inte har någon praktisk betydelse.

Från ett dygn efter limningen till ungefär någon månad senare, figur 6.4

Fuktnivån kan jämnar ut sig till samma nivå i hela betongen. Om betongen var fuktig då mattan limmades kan nivån komma att ligga över kritisk fuktighet för alkalisk hydrolys av limmet.

Det karbonatiserade skiktet kan realkaliseras.

OC kan bildas genom hydrolys av limmet. En hög koncentration av OC precis under mattan kan orsaka en transport upp genom mattan och ner i betongen. Det kan ta tid för OC att diffundera genom mattan och börja avges till rumsluften. Under hela tiden kan OC tränga ner i betongen.

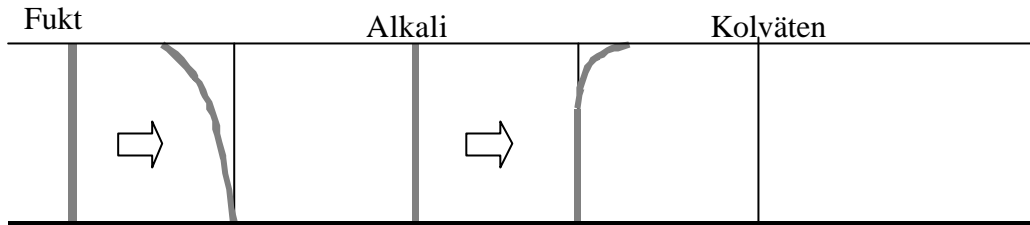
Från någon månad efter limningen till flera år senare, figur 6.5

Fukten i betongen kan långsamt torkar ut genom mattan. Så småningom kan fuktnivån sjunka under kritiskt värde.

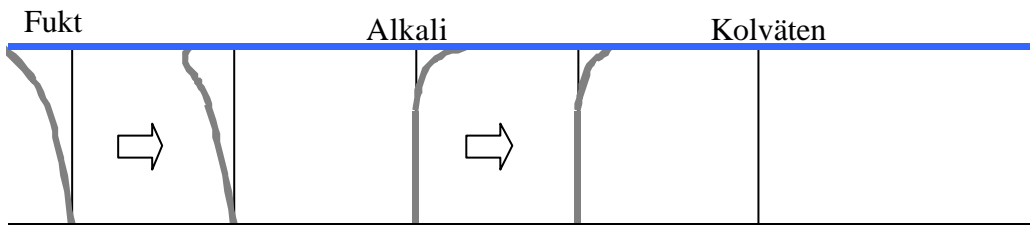
Efter en tid kan nedbrytningen minska och slutar helt om fuktnivån blir tillräckligt låg. Koncentrationen under mattan kan minska då nedbrytningen stannar eftersom inga nya kolväten bildas och det kan sker transport både uppåt och nedåt. Diffusionen genom mattan och avgivningen till rumsluften kan avta proportionellt med minskande koncentration under mattan. Migrationen ner i betongen kan fortsätta men minskar i omfattning då koncentrationen under mattan minskar.

Blir koncentrationen under mattan lägre än den i betongen kan transporten komma att vända och kolvätena transporteras upp från betongen och vidare ut

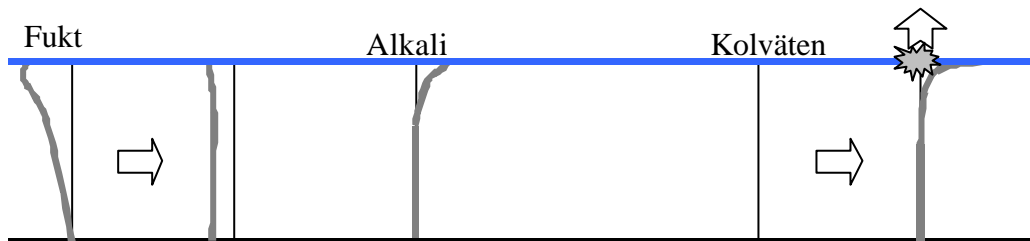
genom mattan till rumsluften. Om det förblir fuktigt länge, kan hydrolysen och emissionen pågå till avgörande komponent tar slut.



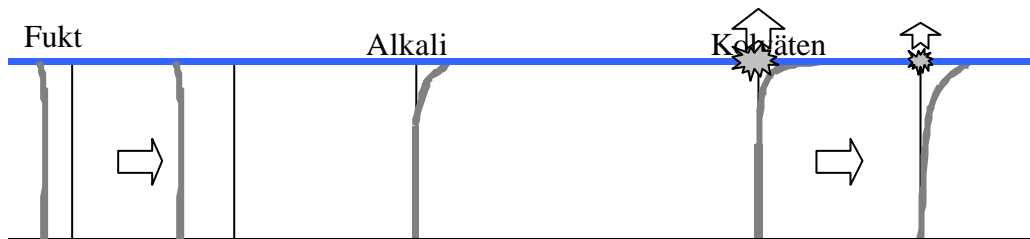
Figur 6.2 Gjutning fram till limning.



Figur 6.3 Precis innan limningen till ungefär ett dygn efter.



Figur 6.4 Från ett dygn efter limningen till ungefär någon månad senare.



Figur 6.5 Från någon månad efter limningen till ungefär något år senare.

6.3 Byggfuktfri betong

Gjutning fram till limning, figur 6.6

Fuktnivån sjunker i betongen den första tiden efter gjutning. Uttorkningen kan till största del ske genom självuttorkning. En liten del av vattnet kan transporteras till ytan där det avdunstar, det kan bildas en fuktprofil som minskar mot ytan

Alkali kan transporteras med fukten upp mot ytan och anrikas när vattnet avdunstar. Betongytan kan karbonatiseras något så att pH-värdet sjunker.

Precis innan limningen till ungefär ett dygn efter, figur 6.7

Limfukten kan höja fuktnivån i betongens överkant. Kritisk fuktnivå kan överskridas eftersom betongen är så tät att den inte kan omfördela fukten.

Alkali kan följa med limfukten tillbaka in i betongen. Transporten kan vara så liten att den inte har någon praktisk betydelse. En total rekarbonatisering kan ske.

OC kan bildas genom alkalisk hydrolys av limmet. En hög koncentration av OC precis under mattan gör att de kan vandra upp genom mattan och ner i betongen. Det kan ta en tid för dessa kolväten att penetrera mattan och börja avges till rumsluften. Liten nerträngning av OC i betongen kan ske under den här tiden.

Från ett dygn efter limningen till ungefär någon månad senare, figur 6.8

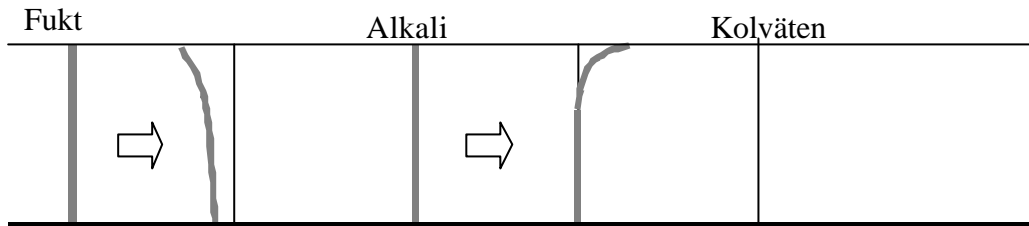
Fuktnivån kan fortsätta att sjunka på grund av självuttorkningen. Fukttillskottet av limfukten kan ha jämnat ut sig liksom det mesta av fuktprofilen på grund av ytuttorkningen. Fuktnivån i ytan kan ha sjunkit under kritisk nivå.

Kolväten som bildats under mattan kan ha penetrerat den och avgår till rumsluften. Nedbrytningen kan ha upphört i och med att fuktnivån har sjunkit under kritisk nivå. Koncentrationen av kolväten under mattan kan minska då nedbrytningen stannar eftersom det sker transport både uppåt och nedåt och inga nya kolväten tillkommer.

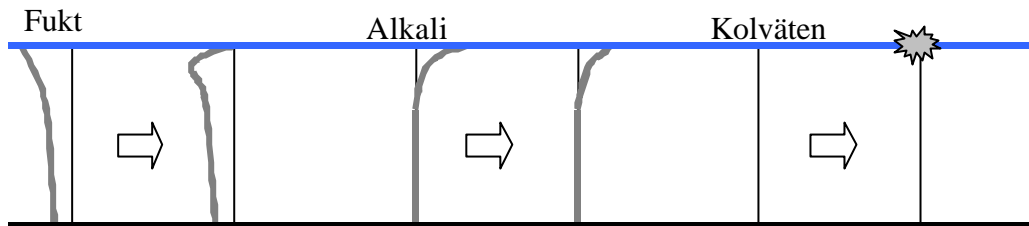
Från någon månad efter limningen till ungefär något år senare, figur 6.9

Fukten i betongen kan långsamt torka ut genom mattan. Betongen kan fortfarande självuttorka, men i mindre omfattning än i början.

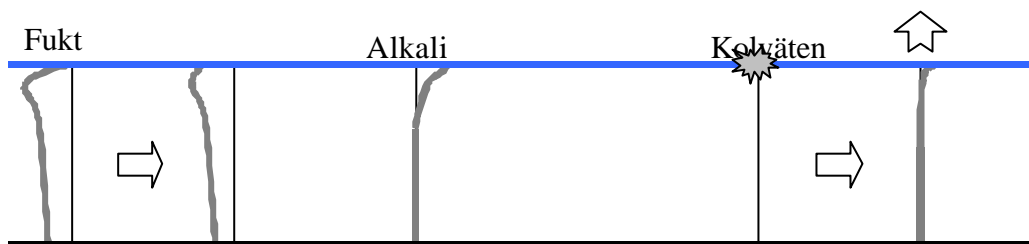
Penetrationen av mattan och avgivningen till rumsluften kan avta proportionellt med minskande koncentration under mattan. Migrationen ner i betongen kan fortsätta men minskar i omfattning då koncentrationen under mattan minskar. Blir koncentrationen under mattan lägre än den i betongen kan transporten vända och OC transporteras upp från betongen och vidare ut genom mattan till rumsluften.



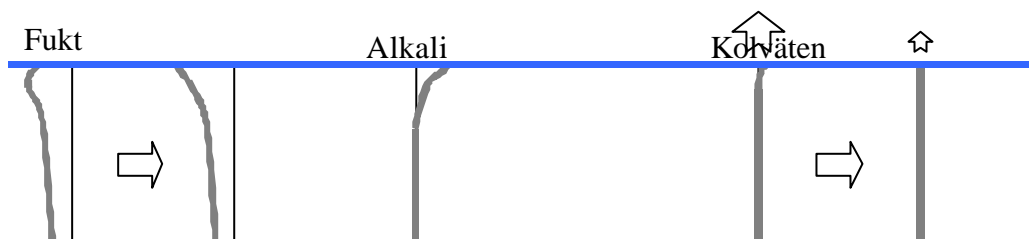
Figur 6.6 Gjutning fram till limning.



Figur 6.7 Precis innan limningen till ungefär ett dygn efter.



Figur 6.8 Från ett dygn efter limningen till ungefär någon månad senare.



Figur 6.9 Från någon månad efter limningen till ungefär något år senare.

6.4 Byggfuktfri betong med avjämningsmassa

Gjutning fram till limning, figur 6.10

Fuktnivån sjunker i betongen den första tiden efter gjutning. Uttorkningen kan till största del ske genom självuttorkning. Avjämningsmassan kan efter gjutning nå en låg fuktnivå på kort tid eftersom den är diffusionsöppen och snabbt kan torka ut genom ytan.

Alkali kan transporteras med fukten upp mot ytan innan avjämningsmassan lagts. Alkali kan följa med fukt från avjämningsmassan tillbaka in i betongen. Transporten kan vara så liten att den inte har någon praktisk betydelse.

Precis innan limningen till ungefär ett dygn efter, figur 6.11

Limfukten kan höja fuktnivån i avjämningsmassan. Avjämningsmassan är så öppen och porös att fukten kan omfördelas i skiktet utan att kritiskt fuktnivå överskrids.

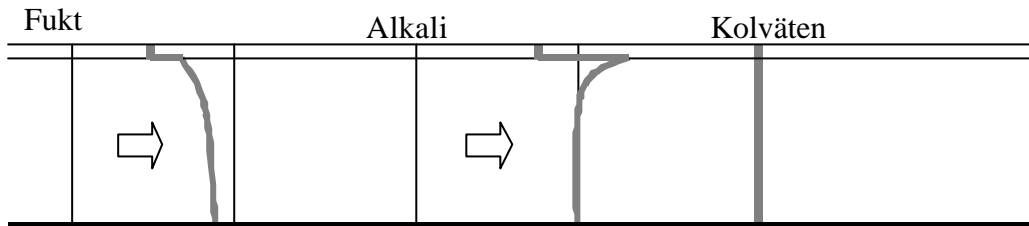
Avjämningsmassor kan vara lågalkaliska vilket innebär att deras pH-värde är lågt, omkring 11, i okarboniserat tillstånd.

Från ett dygn efter limningen till ungefär någon månad senare, figur 6.12

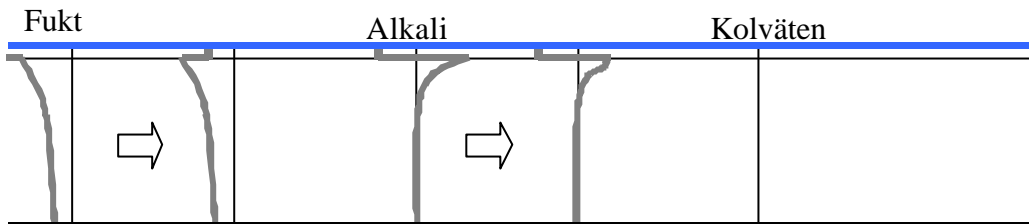
Fukttillskottet av limfukten i avjämningsmassan kan fördela sig ner i betongen samt torka ut genom mattan. Fuktnivån i betongen kan fortsätta att sjunka på grund av självuttorkningen fast i mindre omfattning nu.

Från någon månad efter limningen till ungefär något år senare, figur 6.13

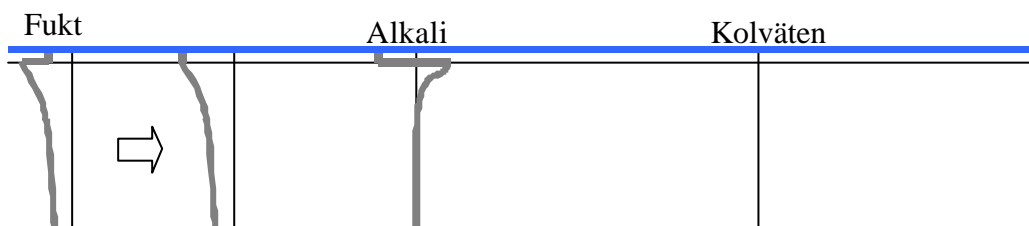
Fukten i avjämningsmassan kan långsamt torka ut genom mattan. Självuttorkningen i betongen kan i det närmaste ha upphört.



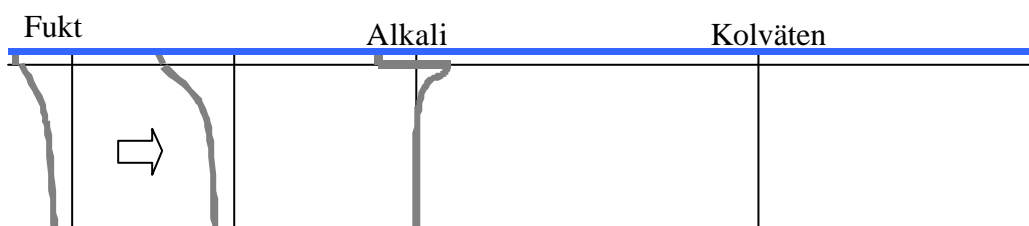
Figur 6.10 Gjutning fram till limning.



Figur 6.11 Precis innan limningen till ungefär ett dygn efter.



Figur 6.12 Från ett dygn efter limningen till ungefär någon månad senare.



Figur 6.13 Från någon månad efter limningen till ungefär något år senare.

7 Kvantitativ modell

Den teoretiska modell som beskrivs i detta kapitel är fokuserad på nedbrytningsprodukter, OC, som bildas i samband med den kemiska reaktionen som kan uppstå när täta golvbeläggningar av PVC limmas med vattenbaserade akrylatlim på fuktiga undergolv av betong. Modellen fokuserar på reaktionen, som kan skapa OC i en materialkombination, men också på bindning av OC i strukturen och transport av OC i materialet. Förutom OC binds och transporteras även fukt i materialen. Fukthalten är avgörande i flera avseenden, exempelvis för produktion, bindning och transport av OC.

Några delar om transport och bindning av fukt förklaras endast överskådligt i denna beskrivning. Anledningen är att fukttransport och fuktfixering i betong kan räknas som känd i dessa sammanhang. För den intresserade läsaren finns litteraturhänvisningar. Även om fuktområdet räknas som känd kunskap finns det fortfarande betydande forskningsinsatser kvar att göra där.

7.1 Producerad mängd OC i reaktionen

Producerad mängd OC (Q) kan beskrivas som en funktion som beror av många olika parametrar, exempelvis. tid, RH och pH. Den beror också av vilka material som är i kontakt med varandra i det studerade snittet, om dessa är inerta eller innehåller komponenter som kan tänkas reagera med varandra. De snitt som är intressanta är främst materialgränser där ämnen från olika material kan konfronteras med en kemisk reaktion som följd. Producerad mängd (Q) av OC kan uttryckas som:

$$Q = \text{funktion}(t, RH, pH, \text{material}) \quad \left[\text{kg/m}^2 \right] \quad (7.1)$$

Ekvationen för Q kan förenklas genom att låsa vissa parametrar till ett konstant värde. Detta får dock till följd att modellen inte gäller i det allmänna fallet utan bara under givna förutsättningar. Låt oss till att börja med göra förenklingen att ekvationen endast gäller i kontaktzonen mellan lim och betong. Som tidigare nämnts är det främst kontaktzonen i materialgränser som är intressanta. Anledningen att studera denna kontaktzon är att där konfronteras ett material som är känsligt för högt pH, dvs. limmet, med fuktig betong som har högt pH.

Degradering av limmet är en alkaliska hydrolys som katalyseras av hydroxidjonerna enligt Meininghaus (2000). Eftersom hydroxidjonerna inte förbrukas ingår pH enbart som ett startvillkor för nedbrytningen och är förknippat till materialgränser enligt ovan.

Om vi väger in erfarenheterna från utredningar av ”sjuka hus” kan vi göra ytterligare förenklingar i modellen. En limfilm där all vidhäftningsförmåga förlorats på grund av degraderingen kan fortfarande innehålla akrylatsampolymerer enligt Schrewelius (2000). Dessa kan i så fall bilda mer nedbrytningsprodukter, OC.

Låt oss därför göra förenklingen att modellen endast gäller i kontaktzoner med högt pH-värde. Och att tillgången till akrylatsampolymerer från limmet inte

begränsar nedbrytningen. I så fall kommer Q bara att beror av reaktionens varaktighet, dvs. tiden (t) den pågått, och RH :

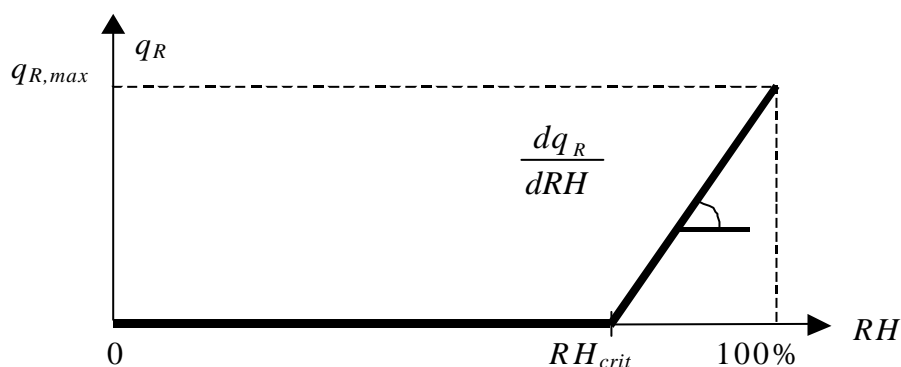
Hastigheten med vilken en kemisk reaktion sker bestäms antingen av hastigheten hos själva reaktionen eller av hastighet hos masstransporten av ämnen som deltar i reaktionen, fram till platsen för reaktionen enligt Ramnäs (2000). Om man betänker att hydroxidjoner (OH^-) i betongen skall finnas tillgängliga i vätskefas, på platsen för reaktionen med limmet kan detta förklara observationen ”ju fuktigare betongyta, desto kraftigare nedbrytning” som beskrivs i kapitel 2. Ju fuktigare betongen är, desto fler transportvägar eller kontaktytor finns för hydroxidjoner, och därmed snabbare masstransport och bättre kontakt, med kraftigare nedbrytning som följd. Låt oss göra det rimliga antagandet att ämnens bildningshastighet (q_R) vid reaktionen beror av RH enligt ovanstående resonemang.

$$q_R = q_R(RH) \quad \left[\text{kg}/\text{m}^2/\text{s} \right] \quad (7.2)$$

Om vi beaktar ovanstående samt observationen av Kumlin (2000) att ”ju längre tid det varit fuktigt i betongytan, desto kraftigare kan nedbrytningen vara” kan vi utveckla resonemanget ytterligare. Det är skäligt att anta att bildad mängd OC (Q) beror av reaktionens varaktighet och att q_R beror av RH som i sin tur kan förändras över tiden, enligt ovanstående tankegång.

$$Q(t) = \int_0^t q_R(t) \cdot dt = \int_0^t q_R(RH(t)) \cdot dt \quad \left[\text{kg}/\text{m}^2 \right] \quad (7.3)$$

Enligt Hedenblad & Nilsson (1987) finns ett kritisk värde på fuktnivån (RH_{crit}) när alkalisk hydrolys inträffar hos systemet med en limmad PVC-matta på betong. Undersökningen kunde inte bestämma ett entydigt RH_{crit} , utan materialkombinationen i sin helhet måste beaktas. Detta föranleder att förenklingen att ingen reaktion äger rum under den kritiska gränsen och att q_R ökar med ökat RH över RH_{crit} . För enkelhetens skull antar vi en linjär ökning från RH_{crit} till ett maximalt värde $q_{R,max}$ vid 100% RH . Se figur 7.1. Förenklingen är kanske inte helt korrekt eftersom det kan handla om en stark ökning av q_R när någon avgörande parameter förändras och att det troligen sker en liten nedbrytning av limmet även under RH_{crit} , men den borde vara praktiskt taget försumbar i dessa sammanhang.



Figur 7.1 Principskiss av reaktionshastighet q_R i intervallet 0 – 100% RH .

Ekvationen för bildningshastigheten är lika med noll i hela intervallet utom då aktuell fuktnivå (RH_{act}) är mellan RH_{crit} och 1,0 (100%RH).

$$q_R = 0 \quad \left[\text{kg}/\text{m}^2/\text{s} \right] \quad RH_{act} < RH_{crit} \quad (7.4)$$

$$q_R = \frac{dq_R}{dRH} \cdot (RH_{act} - RH_{crit}) \quad \left[\text{kg}/\text{m}^2/\text{s} \right] \quad RH_{act} \geq RH_{crit} \quad (7.5)$$

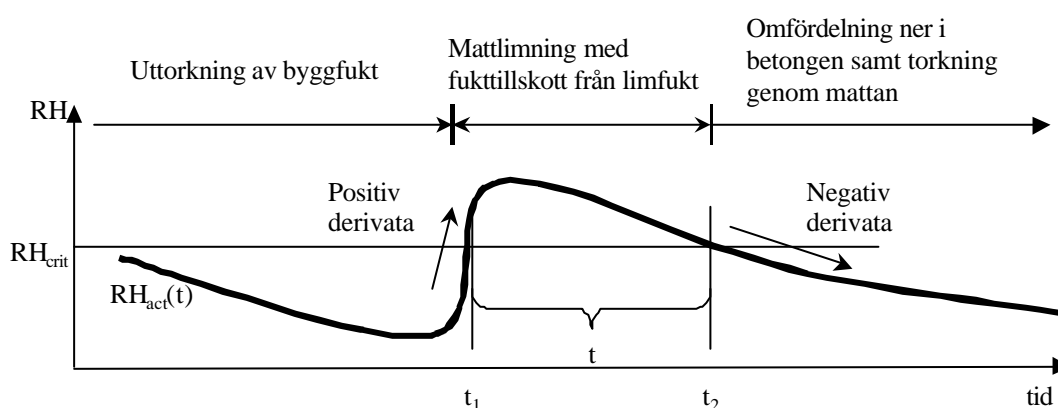
Derivatan för bildningshastigheten med avseende på RH är samma sak som lutningen hos linjen i figur 4.1. I intervallet mellan RH_{crit} och 1,0 kan derivatan skrivas:

$$\frac{dq_R}{dRH} = \frac{q_{R,max}}{1 - RH_{crit}} \quad \left[\text{kg}/\text{m}^2/\text{s} \right] \quad (7.6)$$

Genom att sätta in ekvationerna (7.5) och (7.6) i ekvationen (7.3) fås följande uttryck för Q då $RH_{act} > RH_{crit}$.

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} \frac{q_{R,max}}{1 - RH_{crit}} \cdot (RH_{act}(t) - RH_{crit}) \cdot dt \quad \left[\text{kg}/\text{m}^2 \right] \quad (7.7)$$

Gränserna som anges i ovanstående ekvation ges av de tidpunkter när RH_{act} passerar RH_{crit} . t_1 anger tidpunkten då RH_{act} passerar RH_{crit} med positiv derivata, se figur 7.2. t_2 anger tidpunkten då RH_{act} passerar RH_{crit} med negativ derivata. Detta talpar (t_1 och t_2) kan upprepas i tiden om kontaktzonen återuppfuktas efter det att RH_{act} sjunkit under RH_{crit} . Detta är dock något mycket ovanligt. I kontaktzonen mellan lim och matta kan en normal förändring av fuktnivån se ut som illustreras i figur 7.2.

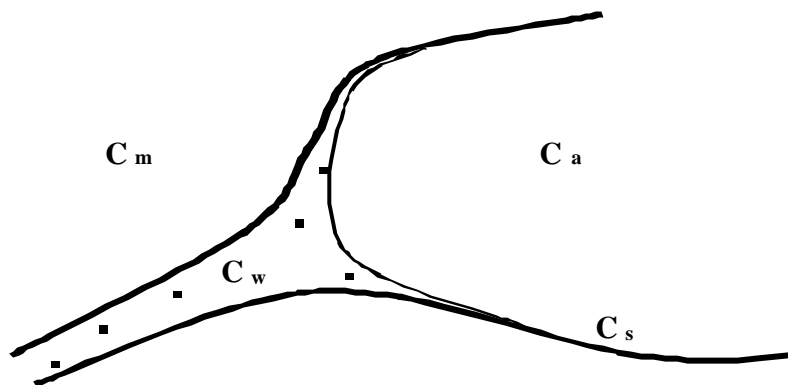


Figur 7.2 Fuktförlopp för RH_{act} i kontaktzonen mellan lim och matta.

7.2 Koncentration OC i betong

Totala innehållet (C_{tot}) av Organiska Compounds (OC) i porösa, fuktiga material är summan av OC i gasfasen (C_{air}), OC bundet på cellväggar i materialets porer (C_s), OC löst i materialets porvatten (C_w) samt OC bundet i materialets strukturmatrix (C_m), se figur 7.3.

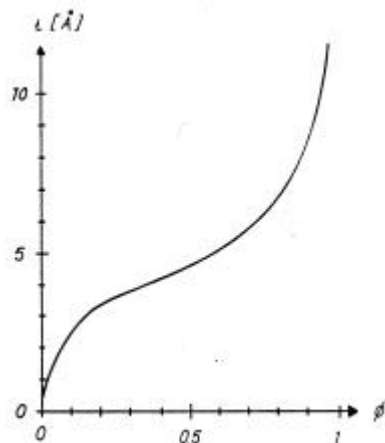
$$C_{tot} = C_{air} + C_c + C_w + C_m \quad \left[\text{kg/m}^3_{\text{material}} \right] \quad (7.8)$$



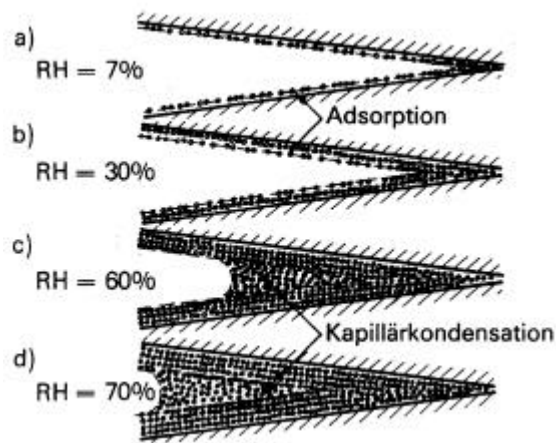
Figur 7.3 Total mängd OC (C_{tot}) i en fuktigt materialpor är summan av OC i gasfasen C_{air} , bundet på cellväggar C_s , löst i porvattnet C_w samt bundet i matrisen C_m .

Matrisen i betong består av ballast, dvs. sten och sand, samt cementgel. Ballasten och matrisen i cementgelen är mycket täta oorganiska material som troligen har liten kapacitet att ta upp OC. Vi kan därför försumma C_m .

Redan vid en så låg fuktnivå som 25-30 %RH binds i genomsnitt ett lager vattenmolekyler ($3,5\text{\AA}$) på cellväggarna i materialets porer, Ahlgren (1972), Hillerborg (1977) samt Xu (1992). När det första lagret har bildats måste OC konkurrera med vatten om platsen genom att hitta "hål" i vattenlagret där det finns en tom materialyta. Fuktnivån i betong är sällan under 60 %RH i normala tillämpningar vilket innebär i genomsnitt 1,5 molekyllager och vid 80%RH som är ett vanligt värde i betong har mer än 2 molekyllager bundits till cellväggarna i genomsnitt, se figur 7.4. Vid höga fuktnivåer binds även fukt genom kapillärkondensation i där porerna är som smalast, figur 7.5



Figur 7.4 Samband mellan adsorberade vattenskiktets medeltjocklek Hillerborg (1975)



Figur 7.5 Gradvis uppfyllning av en por genom adsorption och kapillärkondensation. Ahlgren (1972)

Eftersom OC nästan alltid måste konkurrera med vatten om platsen borde den rena bindningen (C_s) till materialytor kunna försummas. Totala mängden OC i betong kan med dessa förenklat skrivas:

$$C_{tot} = C_{air} + C_w \quad \left[\text{kg}/\text{m}^3_{\text{mtrl}} \right] \quad (7.9)$$

Enligt Henry's Law är den gasmassa som löses av en given vätskevolym vid bestämd temperatur proportionell mot gasens partialtryck, Doland *et al* (1991). Det innebär att c_w kan skrivas som en funktion av OC's löslighet i vatten (S) vid visst partialtryck, rådande temperatur (T), OC's mättnadsånghalt (c_{sat}) samt koncentrationen OC i luften (c_{air}) ovanför vätskan.

$$c_w = \text{funktion}(S, T, c_{sat}, c_{air}) \quad \left[\text{kg}/\text{m}^3_{\text{water}} \right] \quad (7.10)$$

Koncentrationen av OC löst i en viss mängd porvatten kan enligt Henry's Law skrivas som:

$$c_w = S \cdot \frac{c_{air}}{c_{sat}} \quad \left[\text{kg}/\text{m}^3_{\text{water}} \right] \quad (7.11)$$

Nedbrytning av lim i golvkonstruktioner sker nästan alltid i hus som tagits i bruk. Anledningen är att ytmaterial, däribland mattan, är det sista som färdigställs innan brukarna flyttar in. Vi kan då göra förenklingen att det råder inomhustemperatur i betongens överkant där den kemiska reaktionen äger rum och största bindningen av OC sker. Låt oss anta att temperaturen är konstant 20°C.

Låt oss istället studera mängden av ett enskilt, bestämt OC per volym betong. Betongen innehåller en viss mängd fukt w per volymenhet. Vid konstant temperatur, 20°C, kan S och c_{sat} behandlas som konstanter.

$$C_w = \frac{w}{r_w} \cdot S \cdot \frac{c_{air}}{c_{sat}} \quad [kg/m_{mtrl}^3] \quad (7.12)$$

Mängden OC i luften i en viss volym material (C_{air}) är beroende av koncentrationen OC i luften i materialets porer (c_{air}) och den fria porvolymen (V_a). V_a är den del av porerna som saknar vätska och istället är fylld med luft.

$$C_{air} = c_{air} \cdot \frac{V_a}{V_{mtrl}} \quad [kg/m_{mtrl}^3] \quad (7.13)$$

I fuktiga porösa material är en del av porvolymen fylld med vätska. Den fria porvolymen är då beroende av materialets totala porvolym (V_p) och fukthalten, det vill säga hur stor volym porvätskan tar upp.

$$\frac{V_a}{V_{mtrl}} = \frac{V_p}{V_{mtrl}} - \frac{w}{r_w} \quad [m_{air}^3/m_{mtrl}^3] \quad (7.14)$$

Genom att införa uttrycket för porositet p lika med V_p/V_{mtrl} kan den tillgängliga porositet p_a som är lika med V_a/V_{mtrl} tecknas

$$\frac{V_a}{V_{mtrl}} = p_a = p - \frac{w}{r_w} \quad [m_{air}^3/m_{mtrl}^3] \quad (7.15)$$

Kombineras ekvationerna 7.13 och 7.15 fås ett uttryck för C_{air} :

$$C_{air} = c_{air} \cdot \left(p - \frac{w}{r_w} \right) \quad [kg/m_{mtrl}^3] \quad (7.16)$$

Den totala mängden, C_{tot} kan beskrivas genom att sätta in ekvation 7.12 och 7.16 i ekvation 7.9:

$$C_{tot} = C_{air} + C_w = c_{air} \cdot \left(p - \frac{w}{r_w} \right) + \frac{w}{r_w} \cdot S \cdot \frac{c_{air}}{c_{sat}} \quad [kg/m_{mtrl}^3] \quad (7.17)$$

Genom att bryta ut c_{air} som förekommer i båda termerna får ekvationen 7.17 följande utseende:

$$C_{tot} = c_{air} \cdot \left[\left(p - \frac{w}{r_w} \right) + \frac{w}{r_w} \cdot \frac{S}{c_{sat}} \right] \quad [kg/m_{mtrl}^3] \quad (7.18)$$

Termen för OC i vatten är mycket större än termen för OC i luft, se kapitel 8.1. Därför kan C_{air} försummas vilket medför att C_{tot} är lika med C_w .

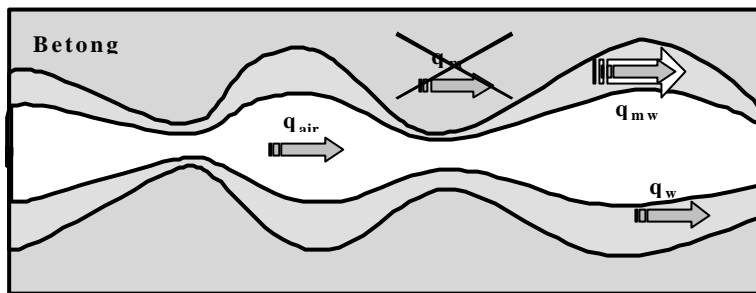
$$C_{tot} = C_w = c_{air} \cdot \frac{w}{r_w} \cdot \frac{S}{c_{sat}} \quad [kg/m_{mtrl}^3] \quad (7.19)$$

7.3 Transport av OC i betong

Transport av Organiska Compounds (OC) i porösa, fuktiga material är summan av diffusion i gasfasen (q_{air}), diffusion i matrisen (q_m), konvektion av OC löst i vatten som transporteras med masstransport av vattnet (q_{mw}) samt diffusion av OC i vatten (q_w)

$$q_{tot} = q_{air} + q_m + q_{mw} + q_w \quad \left[\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}) \right] \quad (7.20)$$

Som vi redan nämnt består matrisen i betong av mycket täta oorganiska material med liten kapacitet att ta upp och omfördela OC. Detta gör att vi kan försumma q_m . Med den förenklingen sker transporten av OC enbart i materialets porer. Dessa är alltid helt eller delvis fyllda med vatten, se figur 7.6.



Figur 7.6 Principiell modell för transport av OC i en fuktig betongpor.

Storleken på transporten av OC löst i vatten som transporteras med vattnet då detta rör sig (q_{mw}) är dels beroende av vätsketransportens hastighet samt på koncentrationen OC löst i vattnet (c_w). Transport av fukt i vätskefas i porsystemet kan enligt ekvation 7.46 beskrivas med fukthalten (w) och diffusionskoefficient för vätsketransport (D'_w).

$$q_{mw} = \text{function}(w, D'_w, c_w) \quad \left[\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}) \right] \quad (7.21)$$

Transport av OC i betong sker främst i betong med tät beläggning, det vill säga fukttransporten i vätskefas är liten. Transporten av OC med masstransport av vatten som rör sig kan därför försummas.

Diffusionen av OC i porvatten (q_w) är beroende av koncentrationsskillnader av OC i vätskefas och förekomst av kontinuerlig vätskefas i porsystemet. Vätskefasens tjocklek och kontinuitet kan beskrivas med hjälp av RH, se figur 7.4 och 7.5.

$$q_w = \text{function}(RH, c_w) \quad \left[\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}) \right] \quad (7.22)$$

I modellen försummas även migrationen av OC i vatten eftersom diffusionen av OC i ångfas är 10^3 gånger snabbare enligt materialdata hämtat ur CRC (2000).

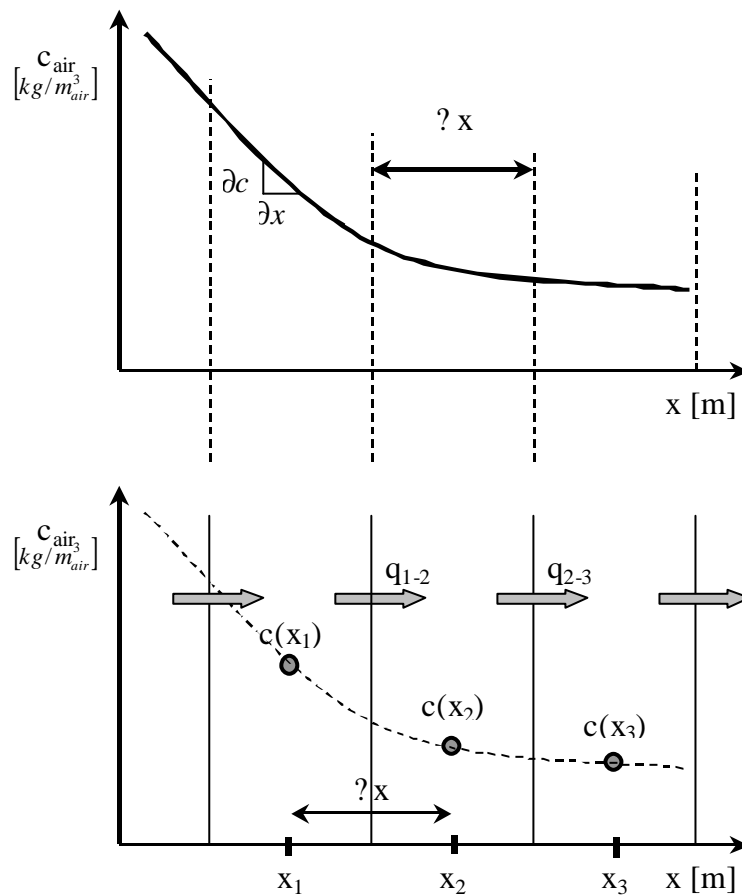
Diffusion av OC i gasfasen (q_{air}) beror av koncentrationsskillnader av OC i luften (c_{air}) på så sätt att skillnader strävar efter att utjämnas. När gasen är instängd i ett poröst material inverkar även en materialberoende diffusionskoefficient (d_{OC}) på diffusionshastigheten. Enligt tankemodellen som redovisas i figur 7.7 varierar d_{gas} med fuktnivån.

$$q_{air} = function(d_{OC}, c_{air}) \quad [kg/(m^2 \cdot s)] \quad (7.23)$$

Med hjälp av Fick's första lag kan diffusionen skrivas:

$$q_{air} = -d_{OC} \cdot \frac{\partial c_{air}}{\partial x} \quad [kg/(m^2 \cdot s)] \quad (7.24)$$

Vid numerisk lösning av flödet enligt ekvation 7.24 sker flödet mellan två "mittpunkter" i celler med utbredningen Δx . Drivande potential vid flödesberäkningen är $\partial c/\partial x$, det vill säga "lutningen" hos kurvan som beskriver koncentrationen, se figur 7.7.



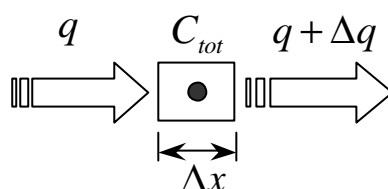
Figur 4.8 "Verklig" koncentrationsprofil av c_{air} ovan, samt numerisk approximation med fördelning av koncentrationen i "punkter" nedan.

Flödet q_{1-2} mellan punkt 1 och 2 samt flöde q_{2-3} mellan punkt 2 och 3 kan i ett allmänt fall beskrivas med skillnad i koncentration som drivande potential, dividerat med avståndet mellan punkterna.

$$q_{1-2} = -d_{oc} \frac{c(x_2) - c(x_1)}{\Delta x} \quad [kg/(m^2 \cdot s)] \quad (7.25)$$

$$q_{2-3} = -d_{oc} \frac{c(x_3) - c(x_2)}{\Delta x} \quad [kg/(m^2 \cdot s)] \quad (7.26)$$

Flödet i materialet ger upphov till förändringar av totala koncentrationen (C_{tot}) i varje punkt. Förändringen av koncentrationen i en punkt kan beskrivas som skillnaden i flöde till och från punkten under en kort tidsperiod (Δt). "Punkten" har en utbredning (Δx) enligt figur 7.8.



Figur 4.8 Koncentrationsändringen (ΔC_{tot}) i en "punkt" med utbredning (Δx) beskrivs av flödet till och från punkten under en kort tidsperiod.

Under ett litet tidssteg blir förändringen av koncentrationen i en "cell" lika med:

$$\Delta C_{tot} = \frac{q_{air} - (q_{air} + \Delta q_{air})}{\Delta x} \cdot \Delta t \quad [kg/m^3_{mtrl}] \quad (7.27)$$

Förkortat och omskriven, i gränsen då Δx och $\Delta t \rightarrow 0$, får ovanstående ekvation formen:

$$\frac{\partial C_{tot}}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \cdot q_{air} \quad [kg/(m^3_{mtrl} \cdot s)] \quad (7.28)$$

Genom insättning av 7.24 i 7.28 beskrivs koncentrationförändringen i cellen med koncentrationsskillnaden c_{air} som drivande potential:

$$\frac{\partial C_{tot}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \cdot d_{oc} \cdot \frac{\partial c_{air}}{\partial x} \quad [kg/(m^3_{mtrl} \cdot s)] \quad (7.29)$$

Vid numerisk lösning av förändringen i en cell enligt ekvation 7.26 utgår man ofta från att d är konstant och kan därför flyttas utanför deriveringen.

$$\frac{\partial C_{tot}}{\partial t} = d_{oc} \frac{\partial}{\partial x} \cdot \frac{\partial c_{air}}{\partial x} \quad [kg/(m^3_{mtrl} \cdot s)] \quad (7.30)$$

Ibland kan man använda en effektiv diffusionskoefficient (D_{eff}) som innehåller betongens lagringskapacitet (dC_{tot}/dc_{air}), i ekvation 7.29, enligt Nilsson (1992).

$$D_{eff} = \frac{d_{OC}}{dC_{tot}/dc_{air}} \quad [m^2/s] \quad (7.31)$$

En omskrivning av ekvation 7.30 ger ett uttryck för d_{OC} :

$$d_{OC} = D_{eff} \cdot dC_{tot}/dc_{air} \quad [m^2/s] \quad (7.32)$$

Ekvation. 7.32 insatt i ekvation 7.29 ger:

$$\frac{\partial C_{tot}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \cdot D_{eff} \cdot \frac{dC_{tot}}{dc_{air}} \cdot \frac{\partial c_{air}}{\partial x} \quad [kg/(m_{mtrl}^3 \cdot s)] \quad (7.33)$$

Med förenklingen att D_{eff} är konstant kan 7.33 skrivas om och förkortas till Ficks andra lag. Ekvationen kan skrivas om på följande två sätt:

$$\frac{\partial c_{air}}{\partial t} = D_{eff} \cdot \frac{\partial^2 c_{air}}{\partial x^2} \quad [kg/(m_{air}^3 \cdot s)] \quad (7.34)$$

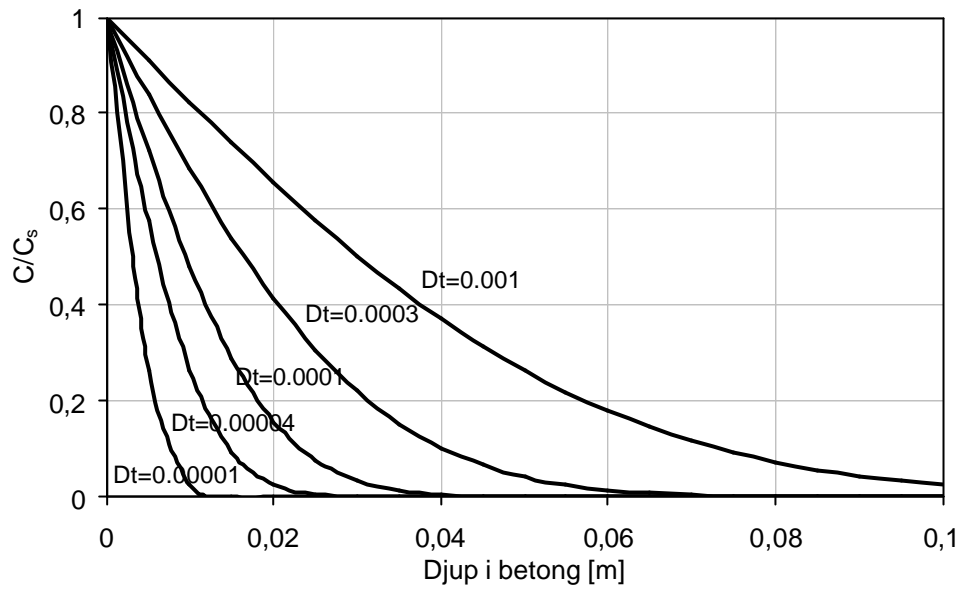
$$\frac{\partial C_{tot}}{\partial t} = D_{eff} \cdot \frac{\partial^2 C_{tot}}{\partial x^2} \quad [kg/(m_{mtrl}^3 \cdot s)] \quad (7.35)$$

Den matematiska lösningen till Ficks andra lag vid en stegändring i ett halvoändligt medium är komplementet till "felfunktionen", Crank (1975):

$$C(x, t) = C_s \cdot \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{D_{eff} \cdot t}} \right) \right] \quad [kg/m_{mtrl}^3] \quad (7.36)$$

Genom tillståndsmätningar av c_{air} eller C_{tot} i konstruktionerna kan D_{eff} utvärderas om man känner tiden för transportens varaktighet. Genom att anta kvoten C_{tot}/c_{air} konstant kan D_{gas} utvärderas.

Ekvation 7.38 som behövs till utvärderingen redovisas för olika värden på D_{eff} i figur 7.9. Koncentrationen i betongens yta C_s antas vara konstant.



Figur 7.9 Komplementet till felfunktionen. Siffrorna vid kurvorna i figuren är värden på $D_{eff}t$ i ekvation 7.36.

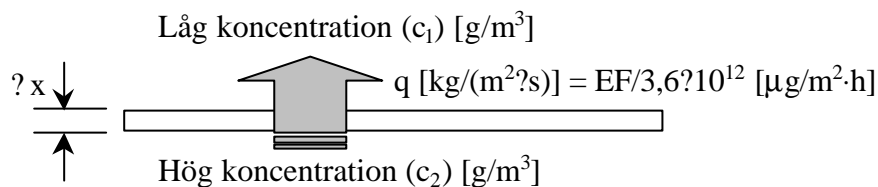
7.4 Transport av OC genom matta

Förenklad beräkning av OC-flödet kan göras om man antar att det bara finns ett motstånd utan lagringskapacitet mellan två olika koncentrationer. Ekvation 7.24 kan skrivas om för att gälla ett skikt mellan två olika koncentrationer:

$$q_{air} = d_{OC} \frac{c_2 - c_1}{\Delta x} \quad \left[\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}) \right] \quad (7.37)$$

Detta skikt kan exempelvis vara en matta där tjockleken är specificerad, lagringskapaciteten liten och det råder strängt olika koncentrationen på ömse sidor, se figur 7.10

q är flödet uttryckt i SI-enheter eller som emissionsfaktorn (EF) från mattan. EF kan, exempelvis, mätas med FLEC (Field and Laboratorie Emission Cell) och anges i enheten $\mu\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$. FLEC är beskriven i kapitel 2.3.3.



Figur 7.10 Flödet q strävar efter att jämna ut koncentrationsskillnader på ömse sidor av mattan. Mattans lagringskapaciteten är försummad.

Genomgångsmotståndet (R_f) för mattan definieras som:

$$R_{fc} = \frac{\Delta x}{d_{OC}} \quad \left[\text{s}/\text{m} \right] \quad (7.38)$$

Genom att sätta in uttrycket för genomgångsmotståndet ekvation 7.38 i omskrivningen av Ficks första lag ekvation 7.37 erhålls en ny ekvation för flödet:

$$q_{air} = \frac{(c_2 - c_1)}{R_{fc}} \quad \left[\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}) \right] \quad (7.39)$$

Ekvationen kan skrivas om för att bättre passa fallet med reaktion under matta i ett ventilerat rum. I jämförelse med koncentrationen under mattan (c_2) är koncentrationen i rummet (c_1) liten. Låt oss sätta c_1 lika med bakgrundskoncentrationen i lokalen (c_0). Ekvationen får då formen:

$$q_{air} = \frac{(c_2 - c_0)}{R_{fc}} \quad \left[\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}) \right] \quad (7.40)$$

7.5 Fuktfixering i betong

Varje poröst material har förmågan att binda (fixera) fukt som tas ur luften. Ju högre RH hos luften, desto mer fukt kan bindas i materialet. Fukten binds genom adsorption mot de inre materialytor och kapillärkondensation i små porer. Denna typ av bindningar behandlas utförligt av Ahlgren (1972).

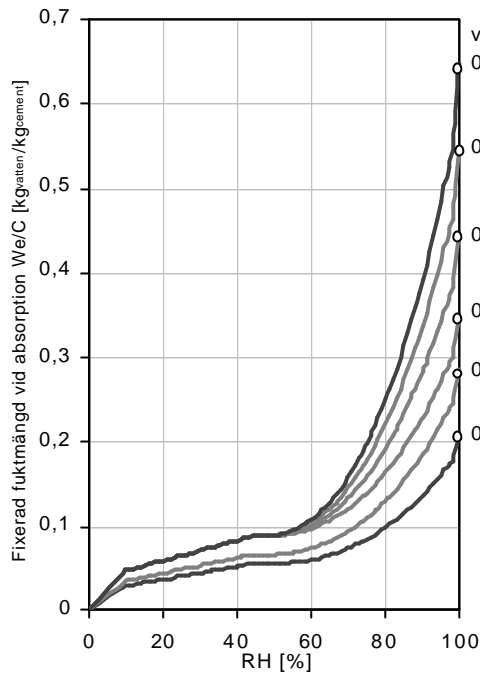
Maximal fukthalt (w_{max}) i betong kan uppskattas utifrån cementhalten (CEM), water/cement ratio (w/c) och betongens mognad, dvs. hydratationsgrad (a), Fagerlund (1982).

$$w_{max} = CEM(vct - 0,19a) \quad [kg/m^3] \quad (7.41)$$

Speciellt för betong jämfört med andra byggnadsmaterial är att mängden fukt i intervallet ovanför det hygroskopiska området (98-100%RH) är mycket liten. Vid 98%RH är porsystemet i betong nästan kapillärt mättat.

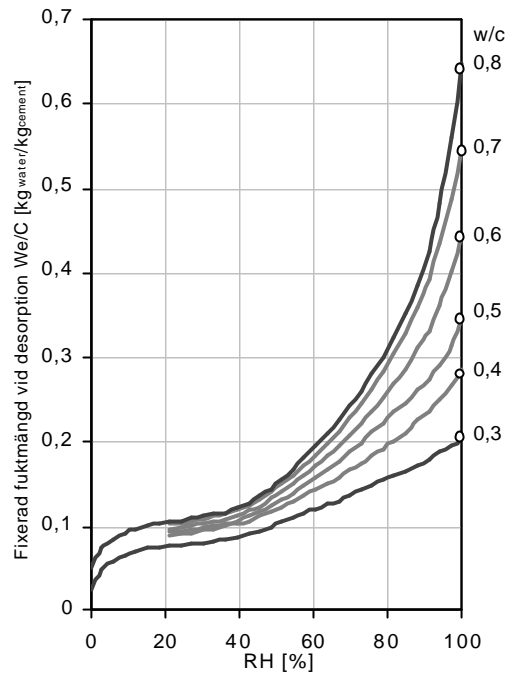
Sorptionisotermen beskriver förhållandet mellan RH i luften och fukthalten i materialet vid en given temperatur. Absorptions- och desorptionisotermen skiljer sig åt för betong på grund av hysteresis. En jämförelse mellan figurerna 7.11 och 7.12 visar att desorptionisotermen ligger mycket högre än absorptionsisotermen. Sorptionsisotemer och hysteresis behandlas ingående av Ahlgren (1972).

Eftersom det är svårt att hantera hysteresis matematiskt användes endast en isoterm i modellen.



Figur 7.11 Absorptionsisotermer för betong, enligt beräkning baserad på Fagerlund (1982). I figuren har w_{max} enligt formel 7.41 markerats med ringar.

w/c 0,3 är a=0,50
w/c 0,40 är a=0,60
w/c 0,50-0,90 är a=0,80



Figur 7.12 Desorptionsisotermer för betong. Nilsson (1980) I figuren har w_{max} enligt formel 7.41 markerats med ringar.

w/c 0,3 är a=0,50
w/c 0,40 är a=0,60
w/c 0,50-0,90 är a=0,80

En viktig egenskap hos materialet vid modellering av fuktfixering är fuktkapaciteten. Fuktkapaciteten hos ett material kan beskrivas som lutningen i sorptionsisotermen i en punkt, se figur 7.13.

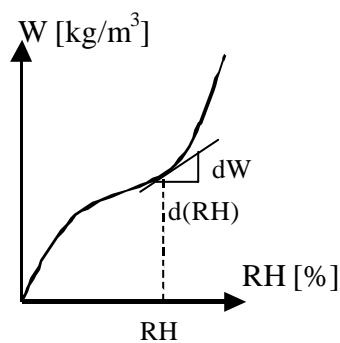
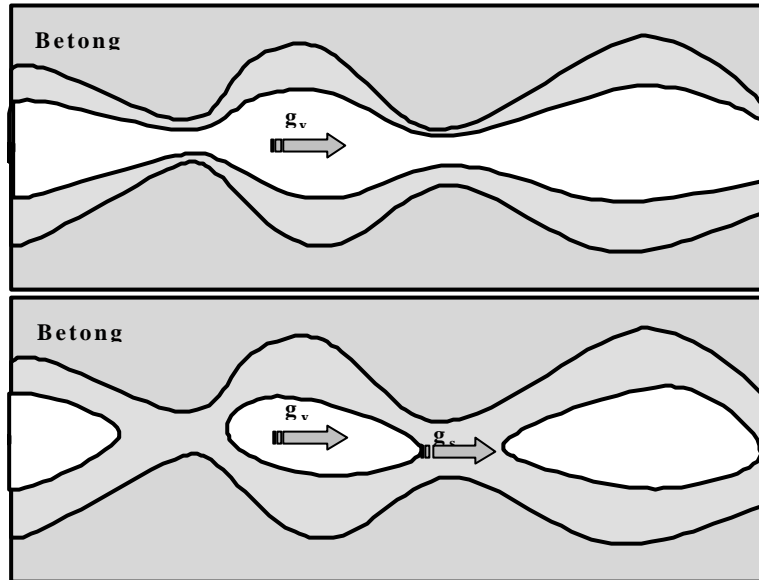


Fig. 7.13. Fuktkapacitet för betong är lika med lutningen hos fuktisotermen. Nilsson (1994).

$$\frac{dw}{dRH} \quad \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \quad (7.42)$$

7.6 Fuktttransport i betong

Transport av fukt i betong sker som en kombination av flera olika transportmekanismer. Enligt Nilsson (1994) sker den huvudsakliga transporten i ång- och vätskefas. I figur 7.14 åskådliggörs de olika mekanismer som är dominerande vid olika fuktnivåer i betong.



Figur 7.14 Fuktttransport enligt betonghandboken. Vid låg fuktnivå sker transporten enbart genom ångdiffusion (g_v). Vid höga fuktnivåer sker transporten i kombination av ångdiffusion och kapillärsugning (g_s).

Ren diffusion av vattenånga i porsystemet beskrivs med Ficks lag, som allmänt anger hur koncentrationsskillnader utjämnas.

$$g_v = -\mathbf{d}_v \frac{\partial v}{\partial x} \quad \left[\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}) \right] \quad (7.43)$$

Ren kapillärsugning g_s i ett vätskefyllt porsystem bör, rent fysikaliskt, beskrivas med porvattentrycket P_w som drivande potential:

$$g_s = -\frac{k_p}{\mathbf{h}} \cdot \frac{\partial P_w}{\partial x} \quad \left[\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}) \right] \quad (7.44)$$

För att slippa använda porvattentrycket som drivande potential kan en vätskediffusivitet D'_w införas för vätsketransporten:

$$D'_w = -\frac{k_p}{\mathbf{h}} \cdot \frac{1}{dw/dP_w} \quad \left[\text{m}^2/\text{s} \right] \quad (7.45)$$

Ekvationen för kapillärsugning kan då tecknas med totala fukttinnehållet, dvs. fukthalten w , som drivande potential:

$$g_s = -D'_w \frac{\partial w}{\partial x} \quad \left[\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}) \right] \quad (7.46)$$

Den totala fukttransporten är en kombination av ångtransport och kapillärsugning i porsystemet.

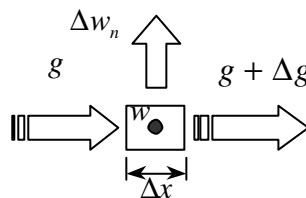
$$g_w = -d_v \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{k_p}{h} \cdot \frac{\partial P_w}{\partial x} = -d_v \frac{\partial v}{\partial x} - D'_w \frac{\partial w}{\partial x} \quad \left[\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}) \right] \quad (7.47)$$

Porvattentrycket är en entydig funktion av ånghalten, om temperaturen är konstant, Ahlgren (1972) Detta innebär att det totala fuktflödet g_w kan beskrivas med endast en drivande potential. Vanligtvis väljs ånghalten v eller fukttinnehållet w .

$$g_w = -d_{tot} \frac{\partial v}{\partial x} \quad d_{tot} = d_v + D'_w \frac{1}{v_{sat}} \cdot \frac{dw}{dRH} \quad (7.48)$$

$$g_w = -D_w \frac{\partial w}{\partial x} \quad D_w = d_{tot} \left(\frac{v_{sat}}{\frac{dw}{dRH}} \right) \quad (7.49)$$

Fukthalten w i en punkt betong kan ändras, på en viss tid Δt , om fuktflödet dit och därifrån är olika stort, se figur 7.15 och om cementreaktionen binder fukt kemiskt (w_n). Uttorkning av betongen genom cementreaktionens bindning av fukt behandlas noggrant av Norling Mjörnell (1997)



Figur 7.15 Fuktförändringen i en punkt med utbredningen Δx beskrivs av fuktflödet till och från samt ökning av kemiskt bundet vatten w_n per tidsperiod Δt .

Under ett litet tidsteg blir fuktförändringen i en liten cell

$$\Delta w = \frac{g - (g + \Delta g)}{\Delta x} \Delta t - \Delta w_n \quad \left[\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}) \right] \quad (7.50)$$

I gränsen då Δx och $\Delta t \rightarrow 0$ kan ekvationen skrivas:

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -\frac{\partial g}{\partial x} - \frac{\partial w_n}{\partial t} \quad \left[\text{kg}/(\text{m}^3_{\text{mtrl}} \cdot \text{s}) \right] \quad (7.51)$$

7.7 Limfukt

När golvlimmet sprids på betongen kan en del av limfukten avdunsta innan mattan läggs på, se kapitel 5.2. När mattan lagts på stängs det mesta av den kvarvarande fukten inne, endast en liten del kan transporteras upp genom mattan och avdunsta.

Det mesta av den kvarvarande fukten kommer att omfördelas ned i betongen. Flödet ner i betongen bestäms av fuktnivån i limmet och i betongens yta, samt av diffusionskoefficienten hos limmet (d_{tot}), ekvation 7.52.

$$g_w = -d_{tot} \frac{\partial v}{\partial x} \quad \left[\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}) \right] \quad (7.52)$$

Det är rimligt att göra förenklingen att fukten är jämnt fördelat i limmet. Eftersom limskiktet är väldigt tungt kan det beaktas som ett motstånd mot fukttransport. Motståndet hos limmet mot fukttransport in i betongen är lika med halva det totala motståndet hos ett limskikt. Flödet beskrivs med ekvation 7.53.

$$g_w = \frac{\Delta v}{Z_{ad}/2} \quad \left[\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}) \right] \quad (7.53)$$

Fuktfixeringen i limmet behandlas på motsvarande sätt som för betong, med en sorptionskurva, se kapitel 7.5.

7.8 Fukttransport genom matta

Fukttransporten genom ett skikt med försumbar fuktkapacitet kan beräknas på ett förenklat sätt. Denna förenkling är analog med den som gjorts för transport av OC genom täta skikt med låg kapacitet, se kapitel 7.4. PVC-matta utgör ett ytskikt med stort fuktgenomgångsmotstånd men med liten fuktkapacitet.

Ånggenomgångsmotståndet Z_{fl} hos mattan kan tecknas på liknande sätt som genomgångsmotståndet i ekvation 7.38.

$$Z_{fc} = \frac{\Delta x}{d_{tot}} \quad \left[\text{s}/\text{m} \right] \quad (7.54)$$

Flödet genom mattan beskrivs oftast med ånghalten som drivande potential. Jämför ekvation 7.55 med ekvation 7.40 som beskriver flödet av OC genom mattan.

$$g_v = \frac{\Delta v}{Z_{fc}} \quad \left[\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}) \right] \quad (7.55)$$

7.9 Numerisk lösning

Vid lösning av ekvationerna används Finit framåtberäkningsmetod. För att få en konvergerande lösning beräknas tidsteget för fukt och OC i varje tidsteg. Vanligtvis bestämmer fuktflödet storleken på tillåtet tidsteg.

$$\Delta t \leq \frac{(\Delta x)^2 \cdot \frac{dw}{dRH}}{2 \cdot d \cdot v_{sat}} \quad [s] \quad (7.56)$$

För extrema värden kan tidsteget bli så kort som en minut!

Modellen beräknar ökningen av OC samt transporten av fukt och OC på följande sätt:

1. Indata i form av materialparametrar och miljödata anges.
2. Startvärden för $w(x, t=0)$ and $Q(x, t=0)$ anges.
3. Tidsteget beräknas.
4. Randvillkor hämtas från klimatfil innehållande $T(t)$ and $RH_{act}(t)$ för luften ovanför ytan.
5. Ånghalten $v(x,t)$ i varje cell beräknas med hjälp av temperatur $T(x,t)$, fukthalt $w(x,t)$ och sorptionskurvan.
6. Gradienten hos ånghalten $v(x,t)$ bestämmer ångflödet.
7. Fuktflödet till varje cell ger en fukthaltsförändring $\Delta w(x,t)$ och en ny fukthalt $w'(x,t)$.
8. RH i limmet avgör mängden nyproducerade nedbrytningsprodukter, OC. Dessa summeras till $Q(lim,t)$.
9. Med mängden OC, $C_{tot}(x,t)$ beräknas den fria koncentrationen OC, $c_{air}(x,t)$ i varje cell.
10. Gradienten hos den fria koncentrationen OC, $c_{air}(x,t)$ bestämmer flödet av OC.
11. Flödet av OC till varje cell ger en förändring i mängden OC, $\Delta C_{tot}(x,t)$ och ett nytt innehåll av OC, $C'_{tot}(x,t)$.
12. Ett nytt tidsteg beräknas utifrån de nya fukt- och OC-förhållandena.
13. Beräkningen repeteras från punkt 4.
14. Beräkningsresultaten sparas med bestämda intervall för redovisning.
15. Beräkningen fortsätter till beräkningstidens slut nåtts.
16. Beräkningsresultaten sparas och döps.

Beräkningarna utförs i Excel Workbook.

8 Kvantifiering av parametrar i modellen,

Många av de parametrar som ingår i modellen i kapitel 7 är sedan tidigare kända. Detta gäller speciellt de parametrar som rör fukttransport och fuktfixering i betong. Sammanställningar av sådana parametrar görs bland annat i Hedenblad (1996) och Nevander & Elmarsson (1994). Dessa parametrar behandlas inte vidare i denna studie.

De parametrar som rör transport och fixering av butanol eller annan OC i betong är inte tidigare behandlade i litteraturen i samma omfattning. Två av parametrarna, δ_{OC} och R_{fc} , har dock bestämts genom undersökningar i kapitel 4. I detta kapitel utvärderas ytterligare två av parametrarna i modellen, nämligen bindningskapaciteten (dC_{tot}/dc_{air}) samt maimalt producerad mängd OC per tid ($q_{R,max}$).

8.1 Evaluering av lagringskapacitet för butanol i betong

Det övervägande delen OC är bundet i betongen, C_{bound} . Endast en liten del av den totala mängden OC finns fritt i luften i porerna, C_{air} .

Vid en ökning eller minskning av C_{tot} i betongen till följd av exempelvis ett flöde kommer såväl den bundna mängden av OC som den fria koncentrationen av OC i luften i betongens porerna att förändras. Lagringskapaciteten dC_{tot}/dc_{air} är ett mått på hur en förändring av totala mängden OC kommer att inverka på den fria koncentrationen. Vice versa kan man beräkna den totala mängden OC utifrån mängden av den fria koncentrationen.

8.1.1 Teoretisk evaluering

Grunden för en teoretisk utvärdering av lagringskapaciteten ges i kapitel 7 där den totala mängden, C_{tot} , beskrivs som en funktion av c_{air} . Uttrycket gäller för de fall när man kan anta att OC endast förekommer i betong i ångfas samt löst i porvattnet. Ekvation 7.17 i kapitel 7 tecknar det sambandet.

$$C_{tot} = C_{air} + C_w = c_{air} \cdot \left(p - \frac{w}{r_w} \right) + \frac{w}{r_w} \cdot S \cdot \frac{c_{air}}{c_{sat}} \quad [kg/m^3_{mtrl}] \quad (8.1)$$

De uppgifter som behövs för att beräkna ekvation 8.1 ovan återfinns i litteraturen. Enligt CRC (2000) är S lika med $0,077 [kg/m^3_{vatten}]$ samt c_{sat} lika med $17 \cdot 10^{-3} [kg/m^3_{air}]$ för butanol vid $20^\circ C$. Betongens porositet p kan med stöd av Fagerlund (1994) uppskattas till $0,15$.

Ekvation 8.1 får till följd att totala mängden OC i en viss mängd material varierar med fukthalten w . I figur 8.1 redovisas relationen mellan C_{tot} och c_{air} hos butanol för ett antal fukthalter w .

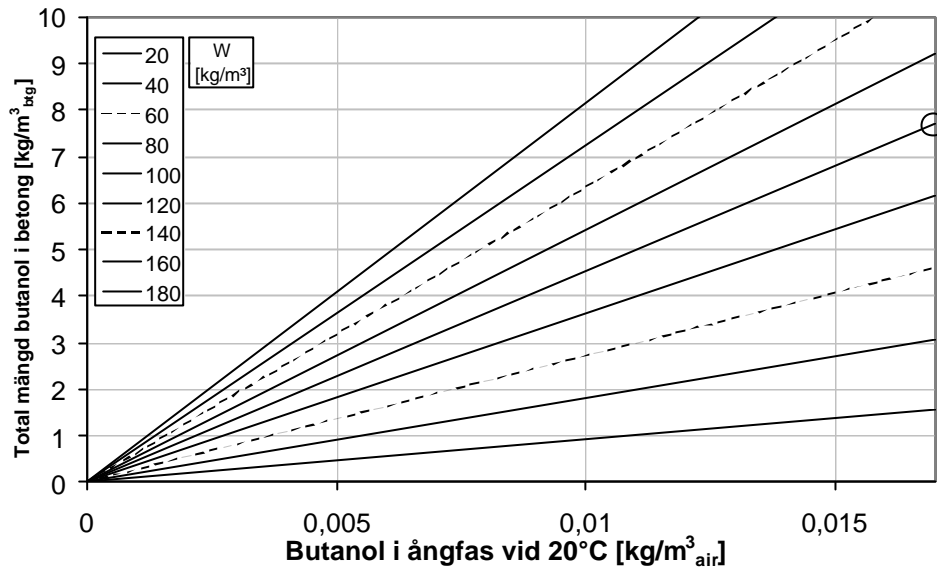


Fig. 8.1 Lagringskapacitet enligt bound 0. C_{tot} är beroende av c_{air} och w vid konstant temperatur, 20°C

Lagringskapaciteten kan utläsas som respektive linjes lutning i figur 8.1. Vid till exempel fukthalten $w = 100 \text{ kg/m}^3$ är lagringskapaciteten $0,44 \cdot 10^{-3}$ [-] enligt ekvation 8.2 nedan.

$$\frac{dC_{tot}}{dc_{air}} = \frac{\Delta C_{tot}}{\Delta c_{air}} = \frac{7,5}{17 \cdot 10^{-3}} = 0,44 \cdot 10^3 \quad \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3_{\text{mtrl}}} / \frac{\text{kg}}{\text{m}^3_{\text{air}}} \right] \quad (8.2)$$

8.1.2 Evaluering ur mätdata

Lagringskapaciteten kan även utvärderas med hjälp av mätdata för δ_{OC} och D_{eff} . I kapitel 4.2 bestämdes δ_{OC} för butanol i betong till $92,7 \cdot 10^{-9} \text{ [m}^2/\text{s]}$ och i kapitel 4.3 bestäms D_{eff} till $5,80 \cdot 10^{-12} \text{ [m}^2/\text{s]}$. Enligt ekvation 7.31 kan lagringskapaciteten skrivas som kvoten mellan diffusionskoefficienten för OC i gasfas och den effektiva diffusionskoefficienten, se ekvation 8.3. Lagringskapaciteten blir då $16,0 \cdot 10^{-3}$ [-].

$$\frac{dC_{tot}}{dc_{air}} = \frac{d_{OC}}{D_{eff}} = \frac{92,7 \cdot 10^{-9}}{5,80 \cdot 10^{-12}} = 16,0 \cdot 10^3 \quad \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3_{\text{mtrl}}} / \frac{\text{kg}}{\text{m}^3_{\text{air}}} \right] \quad (8.3)$$

8.1.3 Utvärdering av evaluering

Resultatet av de olika sätten att evaluera lagringskapaciteten skiljer sig med en faktor 36. Det kan bero på att resultatet från ekvation 8.3 är missvisande eftersom diffusionskoefficienterna D_{OC} samt D_{eff} kan ha utvärderats ur betonger med olika egenskaper och olika fuktnivå. Diffusionskoefficienterna är starkt fuktberoende enligt kapitel 4.2. Dessutom har D_{eff} utvärderats ur en profil under förutsättningen att ytkoncentrationen varit konstant, vilket kan vara felaktigt om vi beaktar variationerna hos flödet genom mattan från den provkroppen i figur 8.6. Det kan också vara så att den teoretiska evalueringen av lagringskapaciteten inte är korrekt.

Låt oss kalla den lagringskapacitet vi evaluerat i kapitel 8.1.1 för Bound,0.

Bound,0

Enkelt uttryckt säger ekvation 8.1 att totala koncentrationen OC i betongen är summan av den fria C_{air} och den bundna C_{bound} koncentrationen. Den fria koncentrationen kan beskrivas som koncentrationen i luftporerna multiplicerat med tillgänglig porvolym, enligt ekvation 8.4.

$$C_{tot} = C_{air} + C_{bound} = c_{air} \cdot \left(p - \frac{w}{r_w} \right) + C_{bound} \quad \left[kg/m^3_{mtrl} \right] \quad (8.4)$$

Mängden bundna OC som beräknas i ekvation ekvation 8.3 kan vara för låg. Beräkningen baseras på att OC endast "binds" proportionellt med en faktor k_0 med fukten i cellernas porer enligt ekvation 8.5. k_0 beräknas med hjälp av Henrys lag.

$$C_{bound,0} = \frac{w}{r_w} \cdot S \cdot \frac{C_{air}}{C_{sat}} = k_0 \cdot w \cdot c_{air} \quad \left[kg/m^3_{mtrl} \right] \quad (8.5)$$

Bound,1

Det kan vara möjligt att OC binds i fuktig betong på något annat sätt än det som beskrivs i ekvation 8.5. Ett annat tänkbart sätt är att OC även binder till våta ytor i betongen enligt figur 8.2.

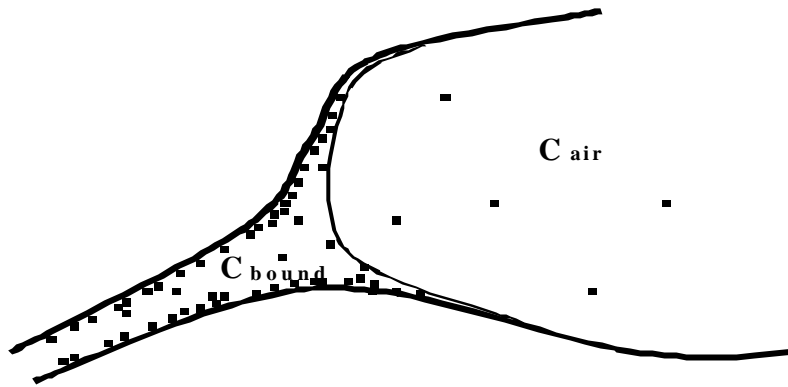


Fig. 8.2 *Bound,1* innebär att OC kan lösas i vätska samt bindas mot fuktiga ytor i betongen. Bindningskapaciteten kan i så fall vara starkt fuktberoende.

Enligt detta antagande kan OC även lösas i porvätskan med framförallt bindas mot våta ytor i betongens porer. Fuktberoendet kan till exempel beskrivas med konstant k_1 i ekvation 8.6.

$$C_{bound,1} = k_1 \cdot w \cdot c_{air} \quad \left[\text{kg/m}_{\text{mtrl}}^3 \right] \quad (8.6)$$

Genom att utgå från att lagringskapaciteten som beräknats i ekvation 8.3 gäller för $w = 100 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ kan k_1 fastställas till $165 \text{ [m}^3\text{/kg]}$. Lagringskapaciteten med $C_{bound,1}$ för olika fukthalter kan utläsas i figur 8.3.

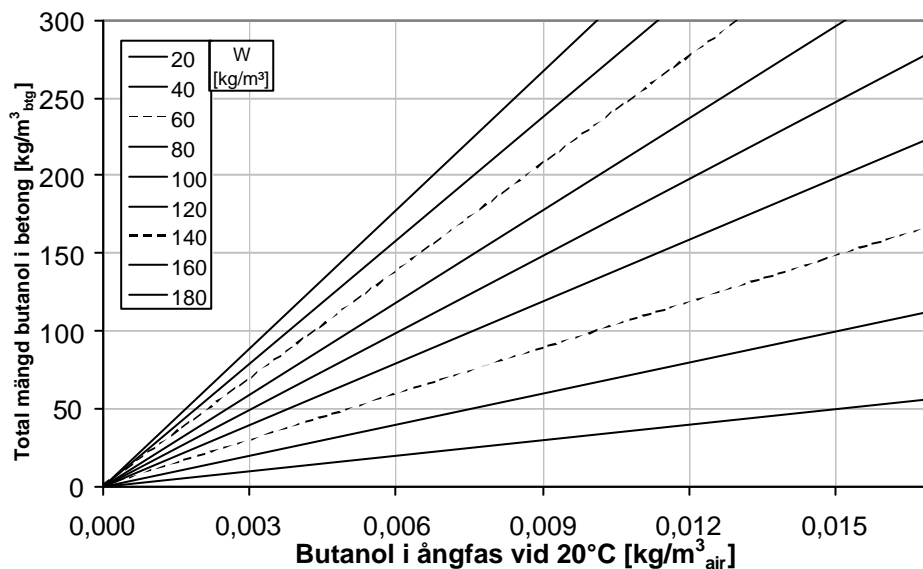


Fig. 8.3 *Lagringskapacitet enligt bound 1. C_{tot} är beroende av c_{air} och w vid konstant temperatur, 20°C. $k_1 = 165 \text{ [m}^3\text{/kg]}$.*

För $w = 100 \text{ kg/m}^3$ blir lagringskapaciteten nu $16,5 \cdot 10^{-3}$.

Bound,2

Bindningen av OC behöver inte vara direkt proportionell mot fukthalten. Det kan vara så att bindningen av OC sker mot alla ytor i betongen, men främst i cementgelen.

Bindningskapaciteten blir även i detta fall något fuktberoende. Fuktberoendet beskrivs med konstant k_2 i ekvation 8.7. Den delen av bindningskapaciteten som inte är fuktberoende beskrivs med konstant b . b bör vara starkt beroende av strukturen och kanske främst den specifika ytan i betongen.

$$C_{bound,2} = (k_2 \cdot w + b) \cdot c_{air} \quad \left[\text{kg}/\text{m}^3_{\text{mtrl}} \right] \quad (8.7)$$

Genom att utgå från att lagringskapaciteten som beräknats i ekvation 8.3 gäller för $w = 100 \text{ [kg/m}^3]$ och att k_2 är lika med $k_0 (= S/(\rho_w \cdot c_{\text{sat}}))$, det vill säga $4,53 \text{ [m}^3/\text{kg}]$, kan b fastställas till $16,1 \cdot 10^3 [-]$. Lagringskapaciteten med $C_{bound,2}$ blir nu nästan oberoende fukthalten, se figur 8.4. För $w = 100 \text{ kg/m}^3$ blir lagringskapaciteten fortfarande $16,5 \cdot 10^{-3}$.

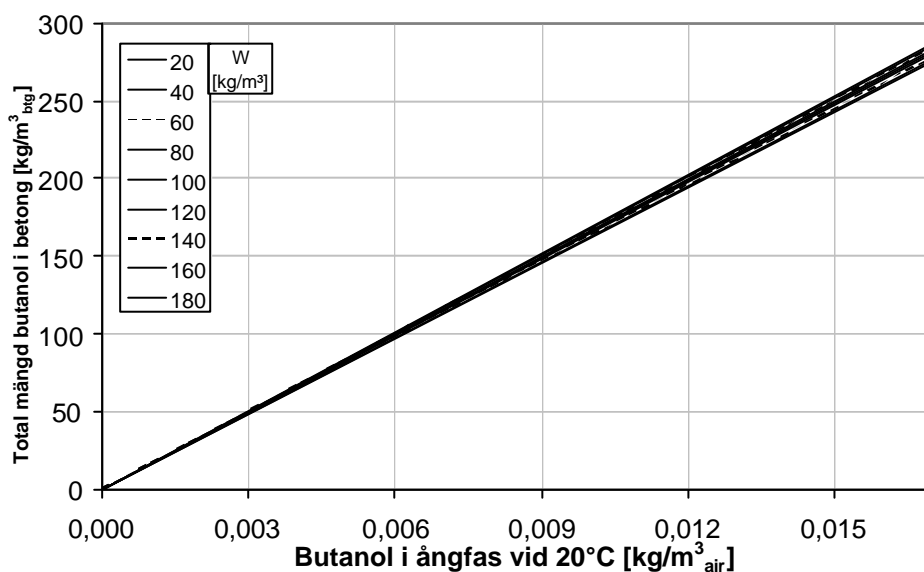


Fig. 8.4 $C_{bound,2} \cdot C_{tot}$ as a function of c_{air} and w at constant temperature, 20°C. $k_2 = 4,53 \text{ [m}^3/\text{kg}]$ och $b = 16,1 \cdot 10^3 [-]$.

8.2 Evaluering av q_R för butanol från försök

Bildningshastigheten q_R har avgörande betydelse för uppkomsten av OC i golvkonstruktioner med höga fuktillstånd. q_R kan bestämmas från försök där fuktillståndet samt total mängd OC som bildats är kända. Sambandet mellan q_R , fuktillstånd och total mängd bildad OC ges i ekvation 7.7.

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} \frac{q_{R,\max}}{1 - RH_{crit}} \cdot (RH_{act}(t) - RH_{crit}) \cdot dt \quad [kg/m^2] \quad (8.8)$$

Den totala mängden OC (Q) som producerats i materialkombinationen kan beräknas genom en massbalans. Total mängd producerad OC är lika med summan av mängden OC som lagrats i betongen samt den mängd OC som emitterat från konstruktionen, om det som eventuellt lagrats i golvbeläggningen och limfilmen försummas.

Den totala mängden OC bunden i betongen kan utvärderas från försöket som beskrivs i kapitel 4.3. I den ursprungliga studien av Wengholt Johnsson (1995), där provkropparna användes, mättes även emissionsfaktorn EF samt fuktfördelningen. Detta gör det möjligt att ställa upp en massbalans för provkropp NSt2.

8.2.1 Mängd OC som emitterat från provet genom mattan

Emissionsfaktorn, det vill säga flödet, mättes vid fem tillfällen i undersökningen av Wengholt Johnsson (1995). Dessa mätresultat tillsammans med startvärdet, $EF \sim 0$ vid mattläggning, ger en god uppskattning av total mängd OC som emitterat från provkroppen under ungefär 450 dygn.

Den totala mängden emitterat OC från provkroppen kan beräknas genom att integrera flödet från provkroppens över tiden som emissionen pågår enligt ekvation 8.9.

$$Q_{emit} = \int_0^t q \cdot dt \quad [kg/m^2] \quad (8.9)$$

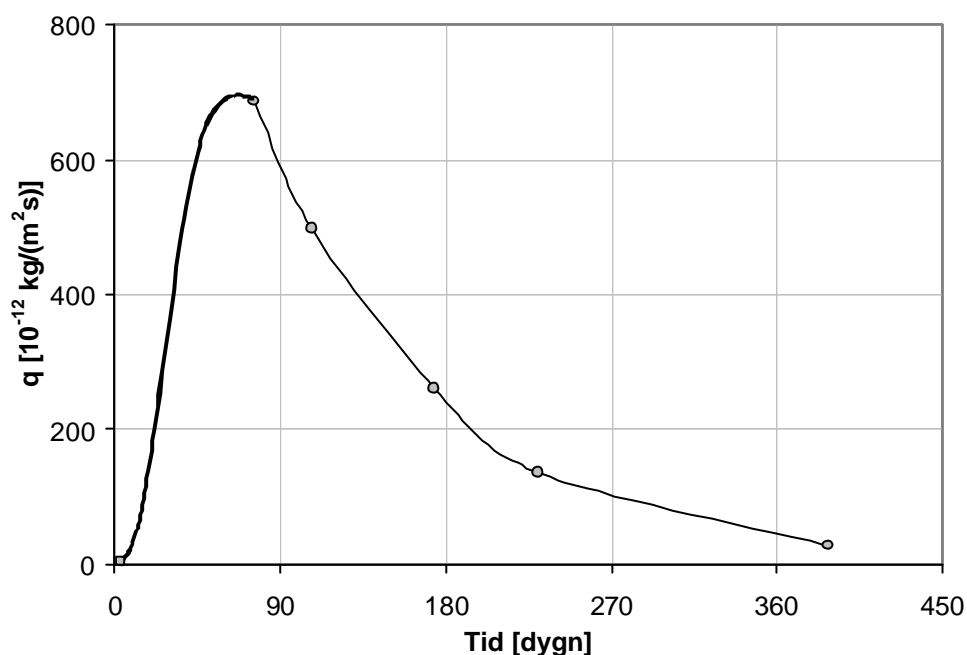
Tabell 8.1 Sammanställning av de flöden som uppmätts vid emissionsmätningar av NSt2; värden för EF [$\mu g/m^2 \cdot h$] ur Wengholt Johnsson (1995).

Dygn	Butanol	
	EF [$\mu g/m^2 \cdot h$]	q [$kg/m^2 \cdot s$]
0	$\sim 0^*$	$\sim 0^*$
76	2470	$686 \cdot 10^{-12}$
107	1790	$497 \cdot 10^{-12}$
174	940	$261 \cdot 10^{-12}$
230	490	$136 \cdot 10^{-12}$
388	100	$27 \cdot 10^{-12}$

* Startvärde, försumbar avgivning vid mattläggning

Dag 0, i tabell 8.1, limmades mattan på betongen. Betongen hade gjutits 29 dygn innan dag 0. Avgivningen av OC orsakade av nedbrytning av golvbeläggningen antas starta efter mattläggningen. Emissionsförloppet för butanol från NSt2 visas i figur 8.6.

Den snabba minskningen av emissionshastigheten i figur 8.6 kan bero på att koncentrationen under mattan minskade till följd av att reaktionen upphörde. Det är rimligt att reaktionen upphörde eftersom fuktillståndet i betongytan sjönk under kritiskt värde under mätperioden, enligt kapitel 8.2.3. Detta kan bero på läckage i kanten av provkroppen, mellan matta och stålform.



Figur 8.6 Emission av Butanol från provkropp NSt2 som funktion av tiden, värden från Wengholt Johnsson (1995).

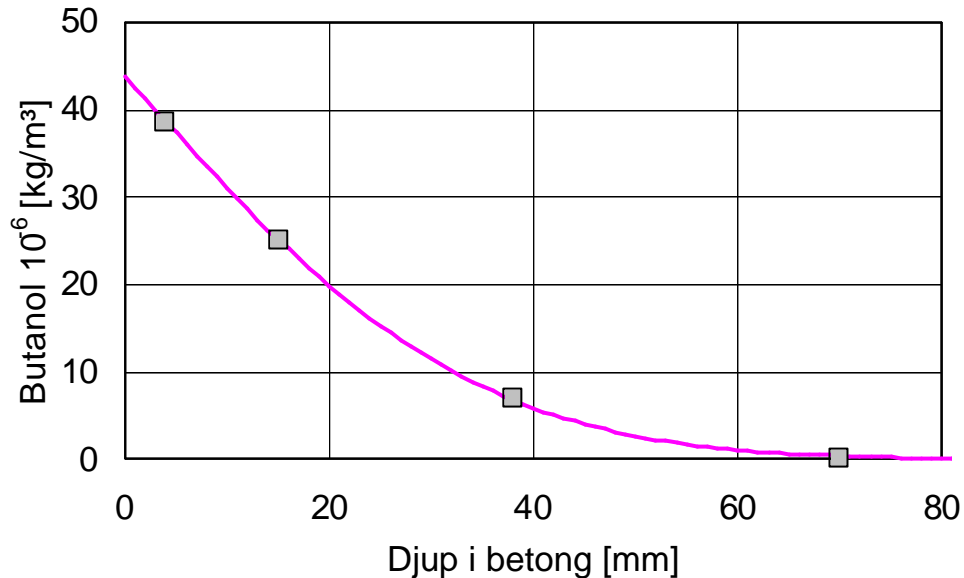
Integralen i ekvation 8.9 ovan kan beräknas som ytan under kurvan Y_{tan} multipliceras sedan med en skalfaktor för att få resultatet i rätt enhet.

Tabell 8.2 Total mängd emitterad butanol. Utvärderad ur figur 8.6

Storhet	Sort	Butanol
Y_{ta}	$\left[10^{-9} \cdot \frac{kg}{m_{mtrl}^2 \cdot s} \cdot dygn \right]$	100,5
Q_{emit}	$\left[10^{-3} \cdot kg / m_{mtrl}^2 \right]$	8,69

8.2.2 Mängd OC lagrat i betongen

Koncentrationen av fri butanol i betongen c_{air} hos prov NSt2 (c1.2) redovisas i figur 8.7.



Figur 8.7 Fria koncentrationen c_{air} av butanol i provkropp NSt2 som funktion av djupet. Värderna uppmätta cirka 2 år efter mattlimning.

Med hjälp av lagringskapaciteten kan den totala koncentrationen C_{tot} beräknas enligt ekvation 8.10.

$$C_{tot} = c_{air} \cdot \frac{dC_{tot}}{dc_{air}} \quad \left[\text{kg/m}_{mtrl}^3 \right] \quad (8.10)$$

Den totala mängden OC i provkroppen beräknas genom att integrera C_{tot} över inträngningsdjupet

$$Q_{store} = \int_0^L C_{tot} \cdot dx \quad \left[\text{kg/m}^2 \right] \quad (8.11)$$

Tabell 8.3 Sammanställning av c_{air} och C_{tot} beräknat från tabell 4.7. $C_{tot,0}$ beräknad med lagringskapacitet enligt ekvation 8.2 och $C_{tot,1,2}$ enligt ekvation 8.3.

Djup [10^{-3} m]	c_{air} [kg/m_{air}^3]	$C_{tot,0}$ [kg/m_{mtrl}^3]	$C_{tot,1,2}$ [kg/m_{mtrl}^3]
4	$38,5 \cdot 10^{-6}$	$18,2 \cdot 10^{-3}$	$672 \cdot 10^{-3}$
15	$25,0 \cdot 10^{-6}$	$11,8 \cdot 10^{-3}$	$429 \cdot 10^{-3}$
38	$7,0 \cdot 10^{-6}$	$3,3 \cdot 10^{-3}$	$121 \cdot 10^{-3}$
70	0	0	0

Integralen i ekvation 8.11 ovan löses genom att beräkna ytan under kurvan i figur 8.7. Ytans storlek är $978 \cdot 10^{-6}$ [$\text{mm} \cdot \text{kg} / \text{m}^3_{\text{air}}$]. Ytan multipliceras sedan med en skalfaktor så att resultatet får rätt enhet

Resultatet för två olika sätt att beskriva lagringskapaciteten presenteras i tabell 8.4.

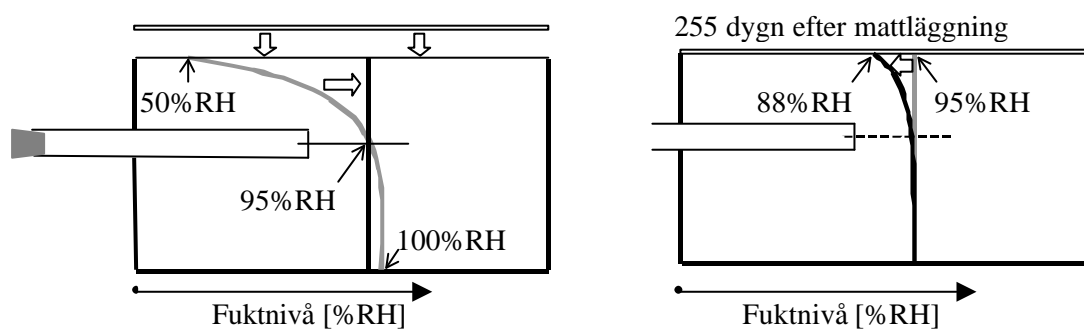
Tabell 8.4 Sammanställning av Q_{store} av butanol i betongen. Ytan

	Sort	Bound ₀	Bound _{1,2}
Q_{store}	$[10^{-3} \cdot \text{kg} / \text{m}^2_{\text{mtrl}}]$	0,461	16,75

8.2.3 Mängd OC producerad vid reaktionen

Mängden bildad OC i konstruktionen Q_{prod} kan beskrivas som en funktion av maximala bildningshastigheten $q_{R,\text{max}}$ om aktuell fuktfördelning RH_{act} och kritisk fuktnivå RH_{crit} är känd, för perioden. Sambandet beskrivs i ekvation 8.8.

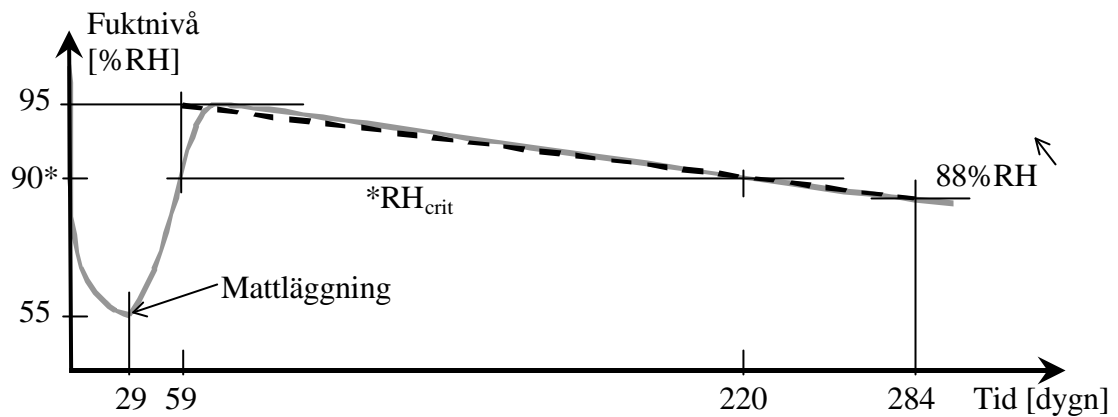
I NSt2 uppmättes fuktnivån vid mattläggning till 95%RH i mätroret på 0,4d, se figur 8.8. Mätningen skedde med metod 1 som beskrivs i kapitel 2.3.1. Vid 255 dygn efter mattläggning mättes fuktnivån i betongytan. Vid mätningen av fuktnivån i ytan högs betongbitar ur en identisk provkropp. Bitarna lades därefter genast i ett provrör av glas och fuktnivån uppmättes till ca 88%RH. Mätningen skedde enligt metod 3 som beskrivs i kapitel 2.3.1.



Figur 8.8 Fuktfördelningen i provkroppen innan mattlimning, efter omfördelning av kvarvarande "byggfukt" och 255 dygn efter mattlimning. Mätvärden enligt Wengholt Johnsson (1995).

Fuktnivån som uppmättes på 0,4d, det vill säga på 40% av djupet, är lika med betongens genomsnittliga fuktfördelning efter omlagring enligt Nilsson (1979). Figur 8.9 visas resultatet från beräkningar av fukttillståndet i betongens överkant. Beräkningarna är gjorda med finit framåtberäkningsmetod och utgår från RH-nivåerna i figur 8.8.

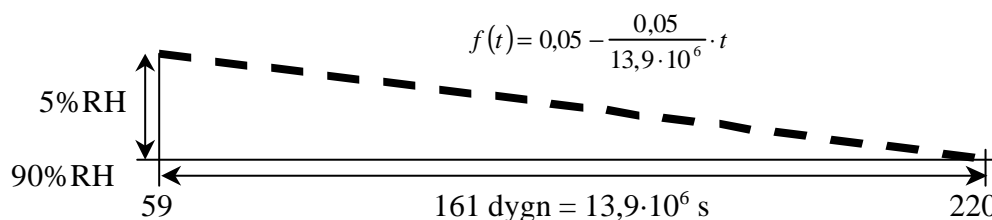
Under de första 29 dygnen sjunker fuktnivån från 100% till ca 55%RH i betongytan. Efter mattläggning omfördelas fukten i betongen så att fuktnivån i ytan stiger. Efter ungefär 30 dygn överskrider RH_{crit} i ytan. Fuktnivån under mattan sjunker fort. Orsaken kan vara ångdiffusion genom mattan och läckage mellan matta och stålform.



Figur 8.9 Fukt fördelningen i ytan på provkroppen innan mattläggning, efter omfördelning och 255 dygn senare. Enligt Wengholt Johnsson (1995). RH_{crit} enligt Svenska Betongföreningen (1997).

Betongen som användes i NSt2 var B4 som beskrivs i kapitel 2.1. Fukttillskottet från limmet påverkar inte fuktnivån i någon större omfattning på grund av betongens höga fuktkapacitet. Betydelsen av tillskott från limfukt behandlas ingående i kapitel kapitel 5.

Fuktnivån i betongens yta kan under den tid då RH_{act} är större än RH_{crit} förenklas med en rät linje. Den högsta fuktnivån uppträder i början av perioden, när kvarvarande byggfukt omlagrats. Därefter minskar fuktnivån monotont enligt figur 8.10.



Figur 8.10 Förenklad fukt fördelning i ytan av provkropp NSt2 under den tid då RH_{act} är större än RH_{crit} .

Om vi ansätter RH_{krit} att vara 90%RH kan ekvation 8.8 förenklas.

$$Q_{prod} = \frac{q_{R,max}}{0,1} \cdot \int_{t_1}^{t_2} (RH_{act}(t) - 0,9) \cdot dt \quad [kg/m^2] \quad (8.12)$$

Funktionen för $RH(t)$ kan i detta speciella fallet skrivas om som ekvationen för den räta linjen enligt figur 8.10. $RH(t) = 0,05 - (0,05/13,9 \cdot 10^6) \cdot t$.

$$Q_{prod} = \frac{q_{R,max}}{0,1} \cdot \int_0^{13,9 \cdot 10^6} \left(0,05 - \frac{0,05}{13,9 \cdot 10^6} \cdot t \right) \cdot dt \quad [kg/m^2] \quad (8.13)$$

Efter integration blir det:

$$Q_{prod} = \frac{q_{R,max}}{0,1} \cdot \left[0,05 \cdot t - \frac{0,05}{13,9 \cdot 10^6} \cdot \frac{t^2}{2} \right]_{0}^{13,9 \cdot 10^6} \quad [kg/m^2] \quad (8.14)$$

Med gränserna insatta blir sambandet mellan Q_{prod} och $q_{R,max}$:

$$Q_{prod} = \frac{q_{R,max}}{0,1} \cdot \frac{0,05}{2} \cdot 13,9 \cdot 10^6 = q_{R,max} \cdot 3,5 \cdot 10^6 \quad [kg/m^2] \quad (8.15)$$

8.2.4 Massbalans

För att massbalansen skall stämma gäller att summan av den emitterade och den lagrade mängden OC är lika med den producerade mängden.

Bildningshastigheten kan beskrivas med hjälp av den producerad mängden OC enligt ekvation 8.16. Sammanställning av bildade mängder och bildningshastigheter ges i tabell 8.5.

$$Q_{emit} + Q_{store} = Q_{prod} = q_{R,max} \cdot 3,5 \cdot 10^6 \quad [kg/m^2] \quad (8.16)$$

Tabell 8.5 Bildade mängder och bildningshastigheter. Bound,0 är beräknad med lagringskapacitet enligt ekvation 8.2 och Bound,1,2 är beräknad enligt ekvation 8.3.

	Sort	Bound,0	Bound,1,2
Q_{prod}	$[10^6 \cdot kg / m_{mtrl}^2]$	$3,5 \cdot q_{R,max}$	$3,5 \cdot q_{R,max}$
Q_{emit}	$[10^{-3} \cdot kg / m_{mtrl}^2]$	8,69	8,69
Q_{store}	$[10^{-3} \cdot kg / m_{mtrl}^2]$	0,46	16,75
$q_{R,max}$	$[10^{-9} \cdot kg / m_{mtrl}^2]$	2,6	7,3

Den maximal bildningshastighet för butanol utvärderad med bound₀ beräknas genom insättning av värden i tabell 8.5 i ekvation 8.16.

$$q_{R,max}^{Bound0} = \frac{Q_{emit} + Q_{store}}{3,5 \cdot 10^6} = \frac{8,69 \cdot 10^{-3} + 0,46 \cdot 10^{-3}}{3,5 \cdot 10^6} = \frac{9,15 \cdot 10^{-3}}{3,5 \cdot 10^6} = 2,6 \cdot 10^{-9} \quad (8.17)$$

Den maximal bildningshastighet för butanol utvärderad med bound₁ eller bound₂ beräknas genom insättning av värden i tabell 8.5 i ekvation 8.16.

$$q_{R,max}^{Bound1,2} = \frac{Q_{emit} + Q_{store}}{3,5 \cdot 10^6} = \frac{8,69 \cdot 10^{-3} + 16,75 \cdot 10^{-3}}{3,5 \cdot 10^6} = \frac{25,44 \cdot 10^{-3}}{3,5 \cdot 10^6} = 7,3 \cdot 10^{-9} \quad (8.18)$$

8.3 Diskussion

Utvärderingen i detta kapitel har gjorts i ett fall, från ett singelförsök. Detta tillsammans med att det finns anledning att tro att det förekommit läckage i försöket, mellan matta och stålform, gör att resultatet är osäkert.

Bindningskapaciteten enligt Bound_0 verkar vara alldeles för liten. Den innebär att bara 1/20 av de bildade OC som redovisas i tabell 8.5, gå ner i betongen. Detta stämmer inte med erfarenheter som Kumlin (2000) förmedlar. Efter byte av mattan mäts fortfarande betydande EF trots att ingen reaktion föreligger. En hög c_{air} i betongen, på grund av att Q_{store} är stor kan förklara fenomenet. Med en bindningskapacitet enligt Bound_1 eller Bound_2 har cirka 2/3 av nedbrytningsprodukterna vandrat ner i betongen, vilket kan vara betydligt rimligare.

Det finns en tvetydighet i värdet på ytkoncentrationen c_s . Den antas ha varit konstant $45 \cdot 10^{-6}$ [$\text{kg}/\text{m}^3_{\text{air}}$] under två år vid utvärderingen av OCIC. Samtidigt antas den ha givit upphov till ett flöde genom en matta (med konstant motstånd) vid utvärdering av EF. EF antas variera på sådant sätt att c_s har sjunkit från toppvärdet $2540 \cdot 10^{-6}$ till $100 \cdot 10^{-6}$ under det första året. Eventuellt kan c_s avta det andra året på sådant sätt att båda antagandena är korrekta.

Sänkning av RH i limskiktet som redovisas i figur 8.9 är mycket snabb. Eftersom denna tidiga variant av provkropp inte hade någon kantförsegling kan hastigheten bero på läckage mellan matta och stålform.

Sänkningen kan också bero på ett ”okänt” mätfel. Det är vanligt att avvikande (låga) RH-värden uppmäts i betong, i närheten av platser där limmet hydrolyserats. En vanlig förklaring på fenomenet är att egenskaper hos RH-sensorn påverkas av OC. Olika RH-sensorer kan påverkas på olika sätt.

9 Jämförelse mellan mätresultat och beräkningar med modellen

I detta kapitel görs jämförelser mellan några av mätningarna som tidigare beskrivits i denna studie och beräkningar med datormodellen, som beskrivs i kapitel 7.9.

Först jämförs RH-höjningen som uppstår vid insugning av limfukt i betongytan. Dessa beskrivs i kapitel 5.1. Sedan jämförs mätningar av fuktnivå, emission från ytan samt OCIC som beskrivs i kapitel 8.2. Slutligen görs några jämförelser mellan FLEC-mätningar och modellen.

9.1 Materialdata till beräkningarna

Materialdata för beräkning av modellen har i första hand hämtats från litteraturen. När materialdata inte funnits att tillgå har egna värden utvärderats eller ansatts.

Generellt sett har materialdata för fukttransport och fuktfixering hämtats i litteraturen medan motsvarande värden för OC har utvärderats i denna studie eller ansatts.

Data enligt Hedenblad (1996) gäller för gammal välhärdad betong. I brist på data för ung betong, har dessa data använts för betong C1 – C4 som, särskilt i försöket med limfukt, är mycket yngre.

9.1.1 Materialdata för transport och fixering av fukt

Materialdata för fukttransport och -fixering behövs både vid beräkning av insugning av limfukt i betongytan och vid beräkningarna av emissioner från golvsystem. I det senare fallet är de avgörande eftersom fuktnivån i betongens yta styr reaktionens varaktighet. Vid bindning av OCIC är fuktnivån i betongen också avgörande.

Vid beräkningar av insugning av fukt har materialdata för tre olika betongkvaliteter använts, C1, C3 och C4 enligt tabell 2.1. Vid beräkning av EF från golvsystem har materialdata för betongkvalitet C4 använts. Materialdata för är hämtade ur Hedenblad (1996), med undantag av w_{\max} som utvärderats ur figur 7.12.

Fuktfixering

Fuktfixeringen i betongen sker genom adsorption mot de inre materialytor och kapillärkondensation i små porer, på det sätt som beskrivs i kapitel 7.5.

I modellen används endast en sorptionsisoterm per betong för att beskriva relationen mellan RH och fukthalt. Scanningeffekten som uppstår då betongen

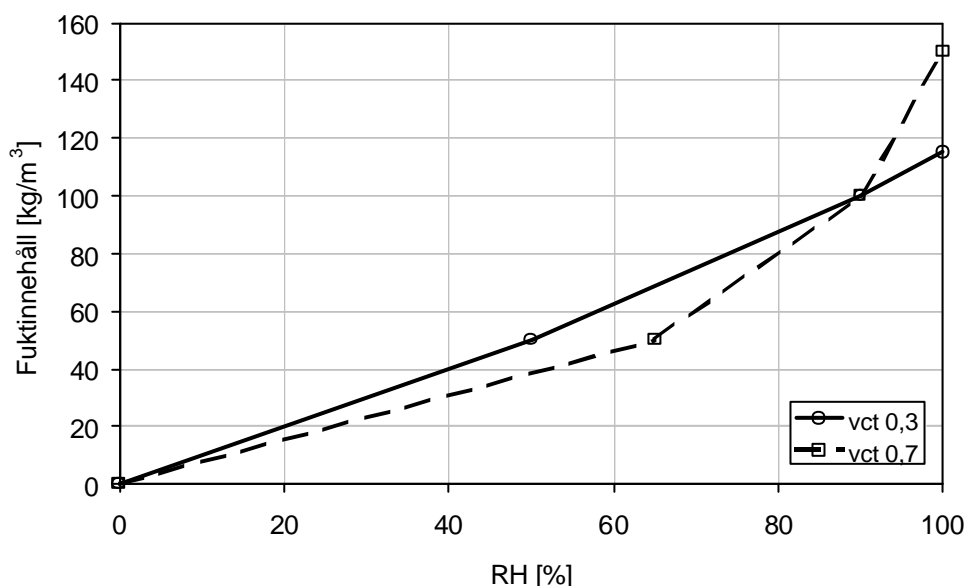
går från uttorkning till uppfuktning eller vice versa har försumrats. Detta kan vara en kraftig förenkling då ett litet fuktillskott kan ge en stor ökning av RH i de fall fuktillståndet i betongen befinner sig på desorptionsisotermer. Fukttillståndet går då från att beskrivas med desorptionsisotermer, figur 7.11, till att beskrivas med absorptionsisotermer, figur 7.12.

I modellen har förenklade sorptionsisotermer använts. Isotermerna beskrivs av tre räta linjer som bestäms av origo, w_{max} vid 100%RH samt ytterligare två brytpunkter. I tabell 9.1 redovisas "brytpunkter" för sorptionsisotermerna. I figur 9.1 redovisas de förenklade sorptionsisotermerna, som består av tre räta linjer.

Beräkningarna är förenklade genom att sorptionsisotermen för betong C1 och betong C3 har satts lika. På så sätt kan värden från Hedenblad (1996) användas i samtliga fall.

Tabell 9.1 Brytpunkter för förenklade sorptionsisotermer för fukt i betong.

Betong W [kg/m ³]	C1 / C3 RH [%]	C4 RH [%]
0	0	0
50	50	65
100	90	90
115	100	–
150	–	100



Figur 9.1 Sorptionsisotermer för fukt i betong, värdena för betong C1 och C3 har satts lika. Figuren baseras på värden från Hedenblad (1996).

Motsvarande materialdata för fuktfixering i limmet har inte återfunnits i litteraturen. I beräkningsmodellen har limmet givits en förenklad sorptionsisoterm på samma sätt som betongen. Sorptionsisotermen för limmet består dock endast av två räta linjer. Dessa begränsas av origo, w_{ad} vid 100 %RH samt $w_{ad}/8$ vid 96 %RH.

Maximal w_{ad} har beräknats till $80 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^2$. Enligt värdena i tabell 2.4 är vatteninnehållet i ett vått lim ungefär $400 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3$. Samt vid limning sprids limmet så att åtgången blir ungefär 5 l/m^2 enligt Sjöberg & Wengholt Johnson (1999).

Fukttransport

I modellen beräknas fukttransporten med ånghalten som drivande potential, kapitel 7.6. I tabell 9.2 redovisas diffusionskoefficienter d_{tot} som hämtats ur Hedenblad (1996). Analogt med fixering av fukt i betong har materialdata för betong C1 har satts lika med C3.

I modellen har ett förenklat samband för diffusionskoefficientens fuktberoende använts. Sambandet består av ett antal räta linjer, analogt med förenklingen av sorptionsisotermen ovan. Brytpunkterna för de räta linjerna redovisas i tabell 9.2.

Tabell 9.2 *Brytpunkter för förenklat samband med anseende på fuktberoende hos diffusionskoefficient för fukt i betong.*

Betong W [kg/m^3]	C1 / C3 d_{tot} [m^2/s]	C4 d_{tot} [m^2/s]
0	$0,13 \cdot 10^{-6}$	$0,17 \cdot 10^{-6}$
70	$0,2 \cdot 10^{-6}$	$0,17 \cdot 10^{-6}$
100	$0,5 \cdot 10^{-6}$	$1,3 \cdot 10^{-6}$
115	$0,7 \cdot 10^{-6}$	–
120	–	$9,0 \cdot 10^{-6}$
150	–	$40,0 \cdot 10^{-6}$

Genomgångsmotståndet Z_{fc} mot fukt hos golvbeläggningen är $2 \cdot 10^6$ [s/m] för tät (PVC)matta och $0,1-0,2 \cdot 10^6$ [s/m] för öppen (linoleum)matta, enligt Hedenblad (1996).

Genomgångsmotstånd Z_{ad} mot fukt hos limfilmer har inte återfunnits i litteraturen. I beräkningarna har Z_{ad} givits värdet 600 s/m. Värdet är valt lågt med tanke på att vätsketransport kan förekomma i det våta limmet.

9.1.2 Materialdata för transport, bildning samt fixering av butanol

Materialdata för transport och fixering av butanol i betong har inte hittats i litteraturen. Dessa värden tillsammans med genomgångsmotstånd hos golvbeläggningar för butanol krävs för beräkningar med modellen i kapitel 7.9. Värdena som används till beräkningarna är antingen utvärderade i denna studie eller ansatta.

I studien har sammanlagt fem olika uppsättningar av värden använts till beräkningar, se tabell 9.3. Två av beräkningsfallen, Calc.1 & .3, används till jämförelsen i detta kapitel. Samtliga beräkningsfall används i parameterstudien i kapitel 10. Alla resultat från samtliga beräkningsfall redovisas i bilaga 4.

Samtliga värden för transport och fixering av butanol i betong är konstanta, det vill säga att deras eventuella fuktberoende försummas.

$q_{R,max}$ för Calc.2-4 är hämtad från utvärderingen i tabell 8.5, dock är de något justerade på grund av begränsningar i beräkningsmodellen. δ_{OC} för Calc.4-5 är utvärderade ur mätningar i kapitel 4.2.

Bound står för olika sätt att beskriva lagringskapaciteten, se kapitel 8.1.3. Faktor b är den del av bindningen som inte är beroende av fukthalten i bound,3.

Tabell 9.3 *Värden för beräkning av transport och fixering av butanol i betong C4.*

Storhet	Enhet	Calc.1	Calc.2	Calc.3	Calc.4	Calc.5
$q_{R,max}$	$[10^{-9} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$	0,03	0,26	2,6	7,3	7,3
δ_{OC}	$[10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}]$	2,5	2,5	2,5	93	93
Bound	–	0	0	0	1	2
S	$[\text{kg}/\text{m}^3]$	0,077	0,077	0,077	2,8	0,077
k_x	$[\text{m}^3/\text{kg}]$	4,53	4,53	4,53	165	4,53
b	$[10^3]$	–	–	–	–	16,1

Genomgångsmotstånd R_{fc} mot butanol hos golvbeläggningen är $3,7 \cdot 10^6$ [s/m] för tät (PVC)matta och $2,9 \cdot 10^6$ [s/m] för öppen (linoleum)matta, enligt tabell 4.3. Motståndet för fukttransport i limfilmen Z_{ad} har givits värdet $0,6 \cdot 10^3$ [s/m]

9.2 Insugning av limfukt

I detta kapitel har resultaten från de tre mätningarna av insugning av limfukt, som redovisas i kapitel 5.1, jämförts med beräkningar. Beräkningarna är gjorda med modellen och baserar sig på materialdata som beskrivits ovan.

Vid varje beräkning har ursprunglig fuktfördelning, innan mattläggning, uppskattats utifrån mätvärden. Den redovisas tillsammans med beräknat fuktförlopp för respektive fall.

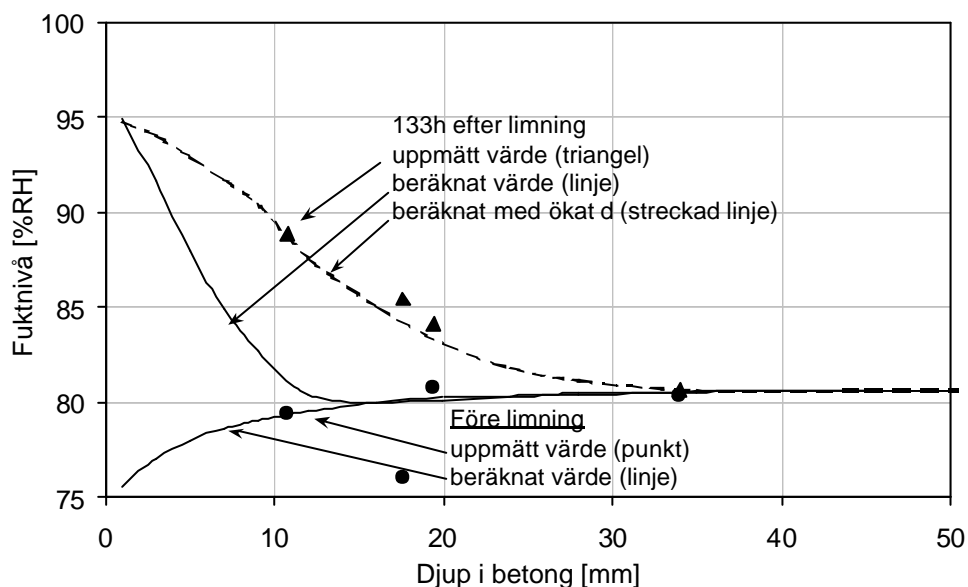
9.2.1 Beräkning av försök 1, 300g limfukt per m² på betong C1, vct 0,32

I figur 9.2 redovisas mätvärden från försöket med stor limmängd som punkter och trianglar samt resultaten från beräkningarna som linjer.

Punkterna visar resultaten från mätningar av fuktnivån innan mattläggning. Trianglarna är mätvärden av fuktnivån 133 timmar efter mattläggning. RH i betongytan har då nått sitt maximum, se figur 5.1.

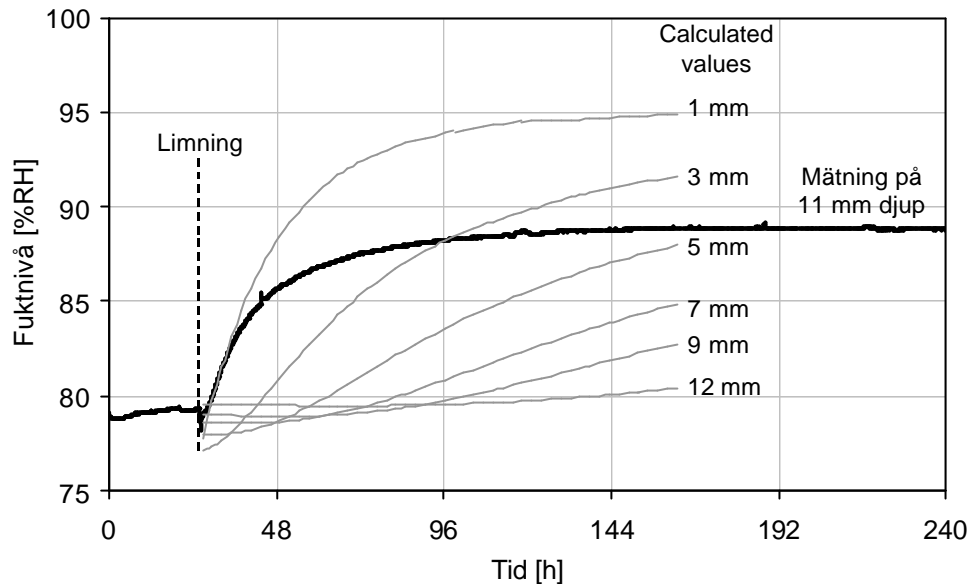
Den undre heldragna linjen i figur 9.2 är uppskattad fuktfördelning innan mattläggning. Denna fuktfördelning är antagen som startvärde i beräkningarna. Den övre heldragna linjen är beräknad fuktfördelning efter 133 timmar.

Vid upprepad beräkning ökades diffusionskoefficienten d_{tot} i de höga fuktområdena ungefär 10 gånger. Beräkningsresultatet redovisas med streckad linje i figur 9.2.



Figur 9.2 Beräknad och uppmätt fuktfördelning vid olika tidpunkter före och efter limning av PVC-matta med stor limmängd på betong med lågt vct (C1).

I figur 9.3 redovisas uppmätt och beräknat fuktförlopp. Det uppmätta fuktförloppet redovisas på 11 mm djup från ytan. De beräknade fuktförloppen redovisas på sex olika djup 1, 3, 5, 7, 9 samt 12 mm.



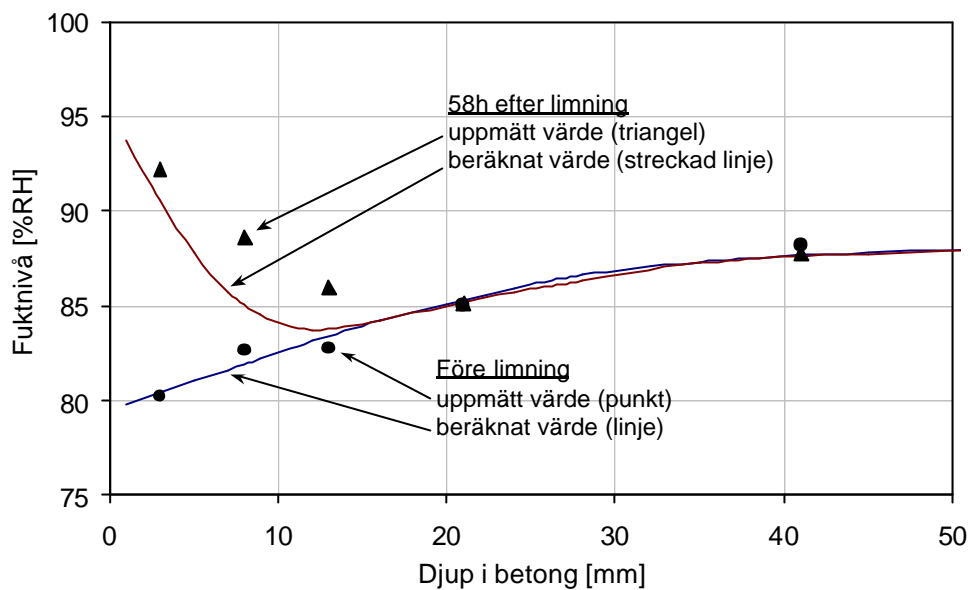
Figur 9.3 Fuktfordelning vid olika tidpunkter efter limning av PVC-matta med stor limmangd på betong med lågt vct (C1), jämfört med uppmätt fuktnivå 11 mm in i i betongen.

9.2.2 Beräkning av försök 2, 90g limfukt per m² på betong C3, vct 0,42

I figur 9.4 redovisas mätvärden från försöket med liten limmangd som punkter och trianglar samt resultaten från beräkningarna som linjer.

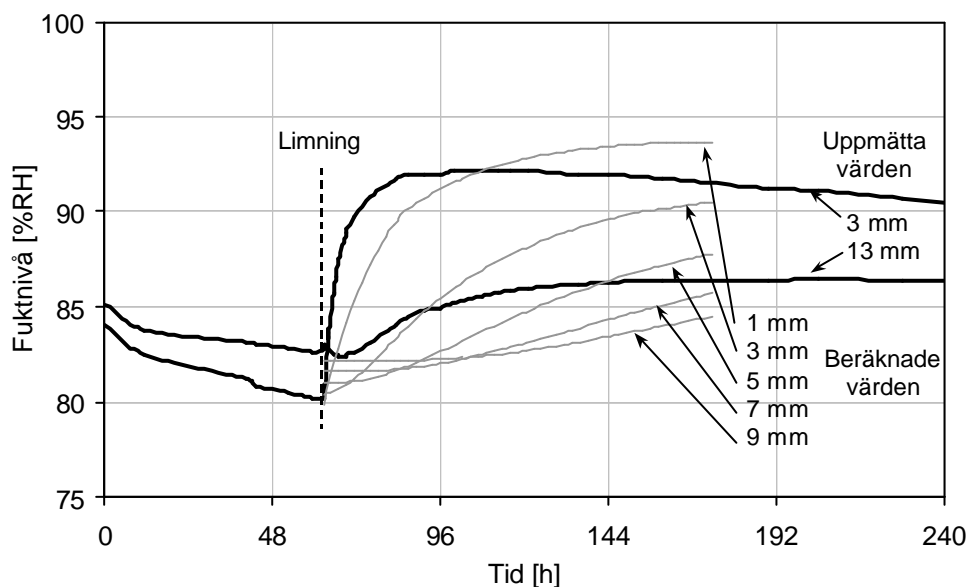
Punkterna visar resultaten från mätningar av fuktnivån innan mattläggning. Denna fuktfordelning är antagen som startvärde i beräkningarna. Trianglarna är mätvärden av fuktnivån 58 timmar efter mattläggning. RH i betongytan har då nått sitt maximum, se figur 5.2.

Den heldragna linjen i figur 9.4 är uppskattad fuktfordelning innan mattläggning. Den streckade linjen är beräknad fuktfordelning efter 58 timmar.



Figur 9.4 Beräknad och uppmätt fuktfördelning vid olika tidpunkter efter limning av PVC-matta med liten limmängd på betong med lågt vct (C3).

I figur 9.5 redovisas uppmätt och beräknat fuktförlopp. Det uppmätta fuktförloppet redovisas på 3 och 13 mm djup från ytan. De beräknade fuktförloppen redovisas på fem olika djup 1, 3, 5, 7 samt 9 mm.



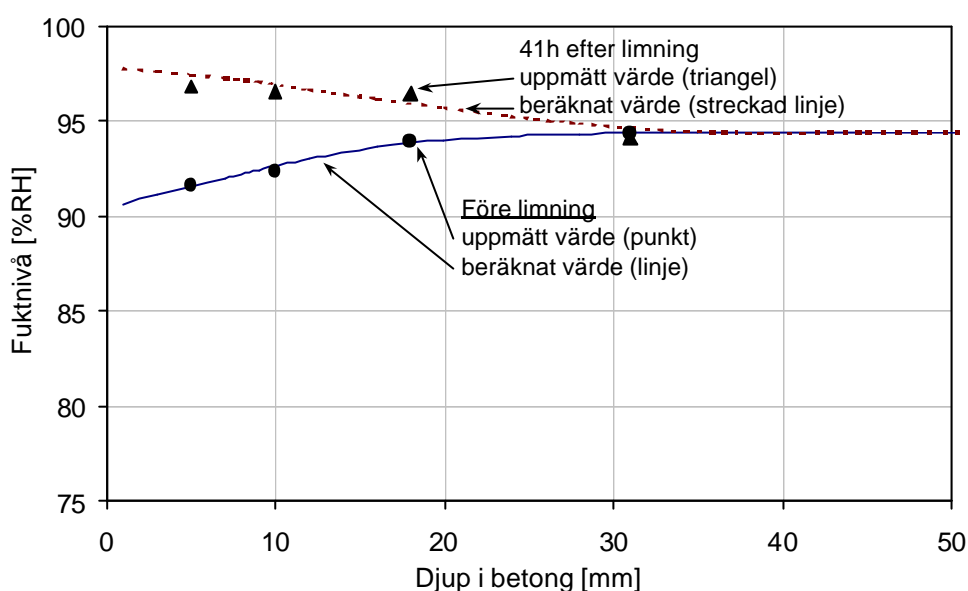
Figur 9.5 Beräknad fuktfördelning vid olika tidpunkter efter limning av PVC-matta med liten limmängd på betong med lågt vct (C3). Jämfört med uppmätt fuktfördelning 3 och 13 mm in i betongen.

9.2.3 Beräkning av försök 3, 230g limfukt per m² på betong C4, vct 0,66

I figur 9.6 redovisas mätvärden från försöket med stor limmängd på betong med högt vct (C4) som punkter och trianglar samt resultaten från beräkningarna som linjer.

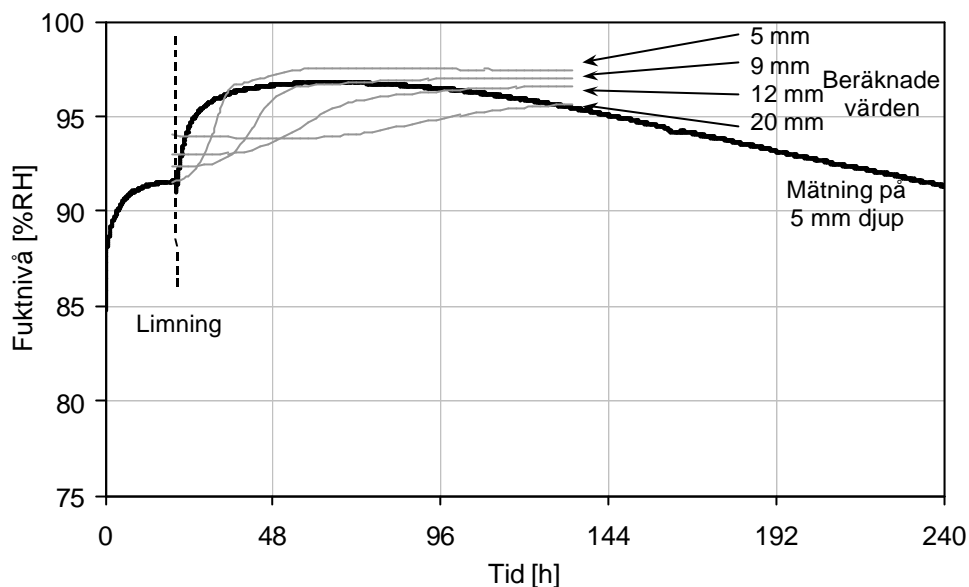
Punkterna visar resultaten från mätningar av fuktnivån innan mattläggning. Denna fuktfördelning är antagen som startvärde i beräkningarna. Trianglarna är mätvärden av fuktnivån 41 timmar efter mattläggning. RH i betongytan har då nått sitt maximum, se figur 5.3.

Den heldragna linjen i figur 9.6 är uppskattad fuktfördelning innan mattläggning. Den streckade linjen är beräknad fuktfördelning efter 41 timmar.



Figur 9.6 Beräknad och uppmätt fuktfördelning vid olika tidpunkter efter limning av PVC-matta med stor limmängd på betong med högt vct (C4).

I figur 9.7 redovisas uppmätt och beräknat fuktförlopp. Det uppmätta fuktförloppet redovisas på 5 mm djup från ytan. De beräknade fuktförloppen redovisas på fyra olika djup 5, 9, 12 samt 20 mm.



Figur 9.7 Beräknad fuktfördelning på olika nivåer vid olika tidpunkter efter limning av PVC-matta med stor limmängd på betong med högt vct (C4). Jämfört med uppmätt fuktfördelning 5 mm in i betongen.

9.2.4 Diskussion, insugning av limfukt

Beräkningarna visar att limfukten inverkar på fuktillståndet i betongens yta, dock inte så mycket som mätningarna anger.

Mätningarna visar en snabbare höjning av RH-nivån än beräkningarna. Dessutom sker höjningen av fuktnivån på större djup enligt mätningarna än vad beräkningsresultaten visar.

En viktig förklaring till skillnaden mellan beräknade och uppmätta fuktförlopp, främst i hastigheten, kan vara hysteresen (Scanning effekten). Limfukten ger en uppfuktning av den torkande betongytan. Uppfuktningen följer då egentligen en scanningkurva som är mycket flack jämfört med desorptions- och adsorptionsisotermerna i tabell 9.1 och figur 9.1, det vill säga att fuktkapaciteten är mycket lägre än i beräkningarna, vilket ger en större, och snabbare, RH-höjning.

En annan förklaringen kan vara det förenklade sätt varmed fukttransporten beräknats, det vill säga att all transport sker med ånghalten som drivande potential. Beräkningen kan stämma bättre om transporten delas i två separata delar enligt kapitel 7.4 och kvantifieras mer noggrant.

9.3 Jämförelse med tidigare mätningar

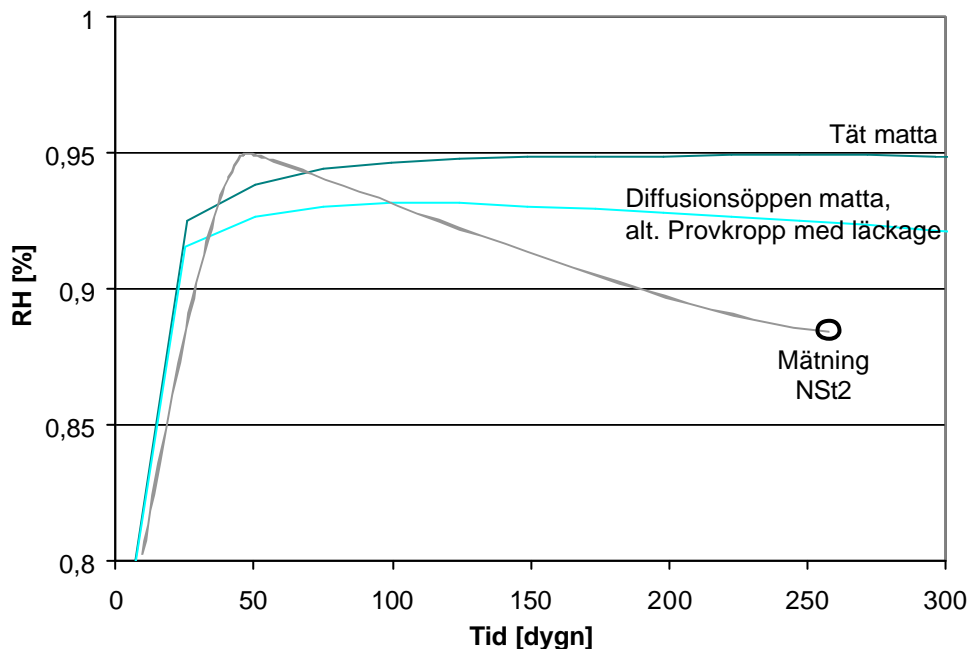
I detta kapitel jämförs mätningarna av fuktförlopp, emission från ytan och OCIC från provkropp NSt2, Limmad PVC-matta på fuktig betong med vct 0,66 (C4), med beräkningar med modellen. Provkroppen och mätningarna beskrivs i kapitel 8.2. Beräkningarna är gjorda med modellen och baserar sig på materialdata som beskrivits ovan.

9.3.1 Fuktförlopp

Fuktnivåerna som mätts i provkropp NSt2 ligger till grund för antagandet i kapitel 8.2.3 om ett fuktförlopp som kan ha uppträtt i betongytan efter mattlimning. Förloppet redovisas i figur 8.9.

Uttorkning före mattläggning har i beräkningen skett till 95 %RH på 0,4d, i 60%RH och 20°C torkklimat. Provkropp NSt2 har torkat i klimatrum med 50%RH och 20°C. NSt2 har under större del av torktiden dock varit övertäckt med plast, Wengholt Johnsson (1995).

I figur 9.8 jämförs fuktförloppet i provkropp NSt2 med beräknade förlopp. Beräkningarna har gjorts dels med en tät matta, PVC $Z_{fc} = 2 \cdot 10^6$ s/m samt med ett lägre motstånd $Z_{fc} = 0,1 \cdot 10^6$ s/m. Det lägre motståndet kan motsvara ett eventuellt läckage mellan matta och plåtform hos provkroppen, eller en beläggning av linoleum.



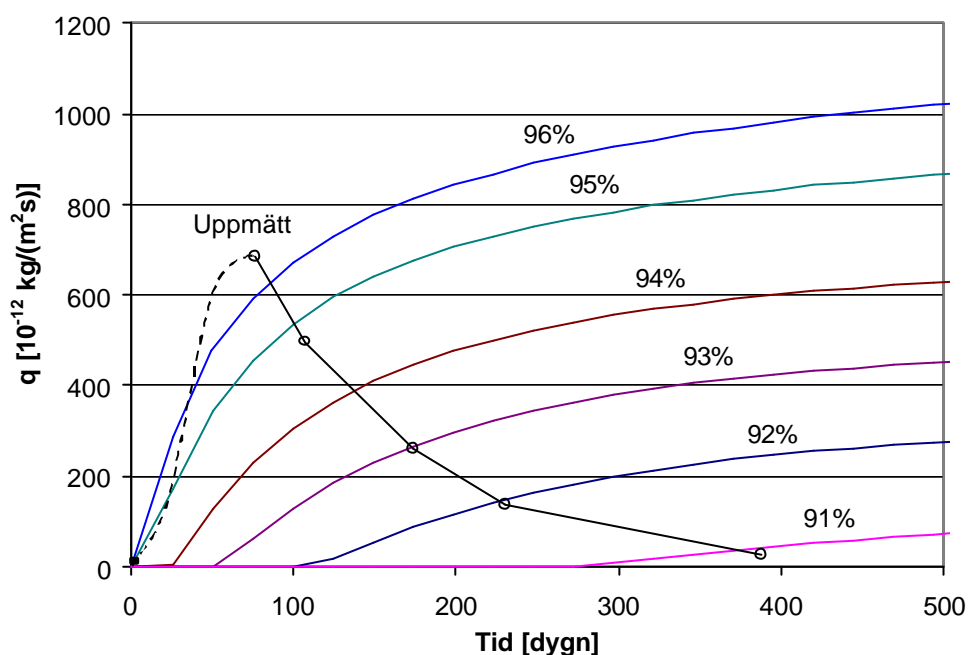
Figur 9.8 RH i ytan av betongen, jämförelse mellan provkropp NSt2 och beräknat värde med $Z_{fc} = 2 \cdot 10^6$ respektive $0,1 \cdot 10^6$ s/m

9.3.2 Emission från ytan

I figur 9.9 redovisas jämförelse mellan mätningar av emissionen från NSt2 under drygt ett års tid med beräknade värden för Calc.3, se tabell 9.3. De uppmätta värdena för NSt2 redovisas i tabell 8.1. Beräkningsresultaten för Calc.3 är fullständigt sammanställda i bilaga 4.

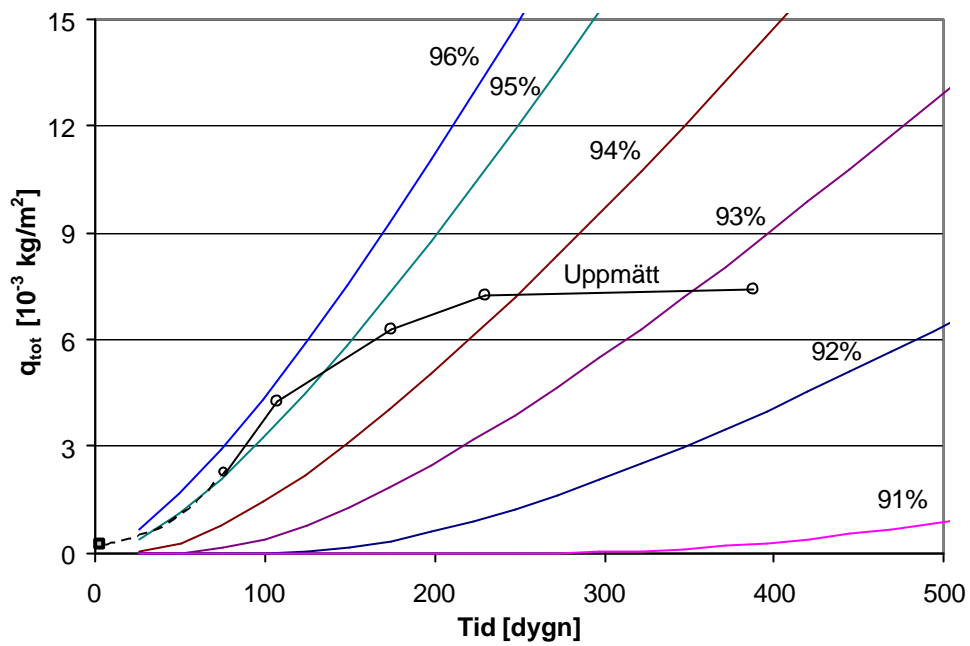
I figur 9.9 redovisas mätningar av emissionen från ytan vid olika tillfällen efter mattläggning. Streckad linje kan vara en minsta tänkbar avgivning från NSt2. Emissionen kan också ha varit högre än den streckade linjen innan första mätningen vid 76 dygn.

De beräknade emissioner som redovisas i figur 9.9 gäller för golvsystem som torkats till respektive fuktnivå, 91 – 96 %RH på 0,4d innan mattläggning. Beräkningarna motsvarar sedan en limning av PVC-matta där betongytan tillförs 80 g/m² limfukt.



Figur 9.9 Emission från ytan, jämförelse mellan uppmätta värden där streckad linje kan vara en minsta start. Emission beräknat med modellen för olika fuktnivåer med Calc.3.

I figur 9.10 redovisas sammanlagd (ackumulerad) emission från ytan som funktion av tiden. Kurvorna baseras på värden i figur 9.9.

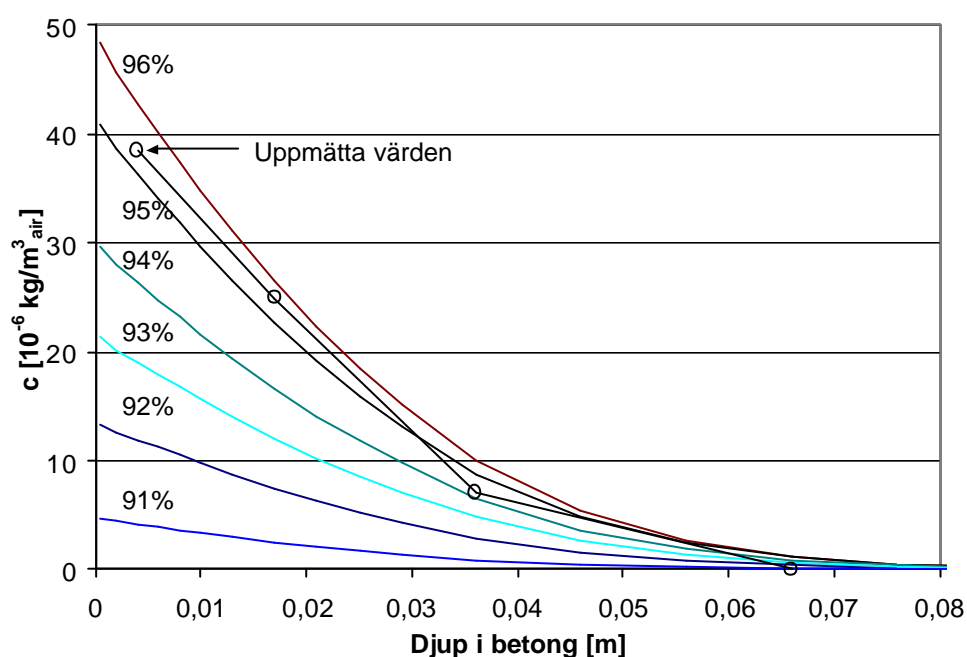


Figur 9.10 Sammanlagd emission från ytan, uppmätt från provkropp NSt2 samt beräknat för olika fuktnivåer med Calc.3.

9.3.3 OCIC

I figur 9.11 redovisas jämförelse mellan mätningar av OCIC i NSt2 efter cirka två år med beräknade värden för Calc.1. De uppmätta värdena för NSt2 redovisas i tabell 8.3. Beräkningsresultaten för Calc.1 är fullständigt sammanställda i bilaga 4.

Ringarna i figur 9.11 är uppmätta värden. De beräknade profilerna för OCIC gäller för golvsystem som torkats till respektive fuktnivå, 91 – 96 %RH på 0,4d innan mattläggning. Beräkningarna motsvarar sedan en limning av PVC-matta där betongytan tillförs 80 g/m² limfukt. Samtliga profiler är cirka 2 år efter mattläggning.



Figur 9.11 Profil av butanol i gasfas i betongen beräknat Calc.1. Samtliga profiler är cirka 2 år efter mattläggning. Jämfört med värden som är uppmätta i NSt2. Ringar är mätvärden.

9.3.4 Diskussion, tidigare mätningar

Fuktförlopp

Fuktförloppet som antagits för NSt2 kan inte återskapas i beräkningarna. Den höga fuktnivån i betongytan strax efter limning kan inte erhållas samtidigt som fuktnivån sedan skall sjunka till 88% RH på cirka 200 dagar.

Förklaringen kan vara ett felaktigt antaget fuktförlopp, stora osäkerheter i mätresultaten eller något annat. Det troligast är dock att fuktförloppet som antagits, med hjälp av ett fåtal mätningar, är felaktigt. Mätningarna i sig är gjorda på andra, olika djup, och kan vara behäftade med stora mätosäkerheter.

Det är förmodligen orimligt att fuktförloppet sjunker så fort som antagits i en provkropp av stålbehållare med ”lock” av tät PVC-matta. Inte ens om det är ett läckage mellan matta och stålform.

Emission från ytan

Formen på kurvan, av emissionsmätningar på NSt2, i figur 9.9 överensstämmer inte med de beräknade. Dock är emissionen från ytan ungefär lika stor som den uppmätta omkring 3 månader efter mattläggning. Därefter stiger värdena i beräkningen medan de uppmätta sjunker. Skillnaden kan bero på att det i beräkningen är fuktigt under mattan och nya emissioner produceras medan reaktionen avstannat i provkroppen. Endast de kvarvarande ämnena transporteras ut.

Formen hos kurvan från mätningarna liknar mer de som uppkommer vid beräkningar med en öppen (linoleum)matta, se figur 9.14. Sänkning av emissionen från ytan uppkommer där på grund av att reaktionen upphör. Detta sker då fuktnivån i betongens yta sjunker under kritisk nivå.

Reaktionen i provkroppen kan ha avstannat innan den första mätningen. Det är i så fall troligt att emissionen har varit större, tidigare. De har redan vid den första mätningen avklingat. Avklingningen kan sedan fortsätta under lång tid och medelkoncentrationen i ytan ger upphov till den uppmätta inträngningsprofilen. Detta har dock inte kunna modellerats med den enkla beräkningsmodellen som använts.

OCIC

I Calc.1 blir inträngningen i betongen sådan att den motsvarar uppmätt OCIC-profil enligt figur 9.11. Dock är ytkoncentrationen i det beräkningsfallet (Calc.1) så låg att det inte kan ge upphov till de höga emissioner som uppmätts, se bilaga 4. Vid en fuktnivå i betongen på 95% RH blir maximala emissionen, under de första 3 åren, i Calc.1 ungefär lika med $11 \cdot 10^{-12}$ kg/(m²·s). Maximal uppmätt emission från provkroppen är $686 \cdot 10^{-12}$ kg/(m²·s). Det innebär att ytkoncentrationen i NSt2 kan vara drygt 60 gånger högre än i motsvarande beräkning som skapar samma inträngningsprofil.

I beräkningsfall Calc.3 är emissionen från ytan ungefär lika stor som den uppmätta men inträngningsprofilen stämmer inte. Den fria koncentrationen i betongytan är drygt 80 gånger för stor, se bilaga 4.

9.4 Jämförelse med nya mätningar

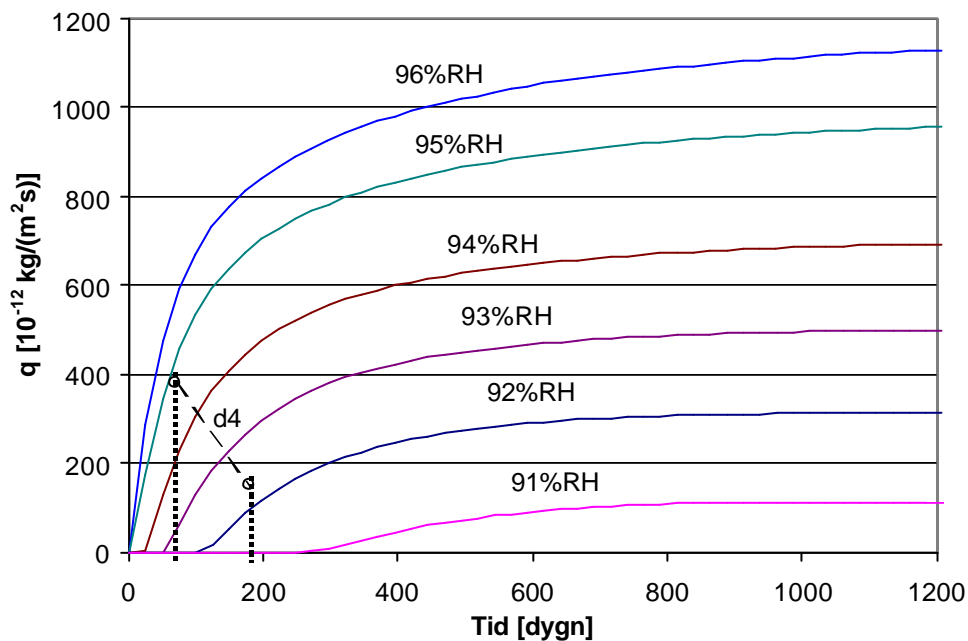
I detta kapitel jämförs några av mätningar från undersökningen i kapitel 5.3 och 5.5 med beräknade resultat från Calc.3.

9.4.1 PVC-matta

Mätningar som gjorts på provkropp d4.2 – .6, d4.9 samt d4.14 – .17 med PVC-matta visar i genomsnitt EF efter 70 dygn på cirka $1300 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, vilket motsvarar $380 \cdot 10^{-12} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, se tabell 5.9 – 11 samt figur 5.15. Efter 180 dygn var emissionen i genomsnitt omkring $150 \cdot 10^{-12} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$.

Resterande provkroppar i undersökning d4 jämförs inte med beräkningar eftersom de belagts med avjämningsmassa eller ytan fått torkat under lång tid.

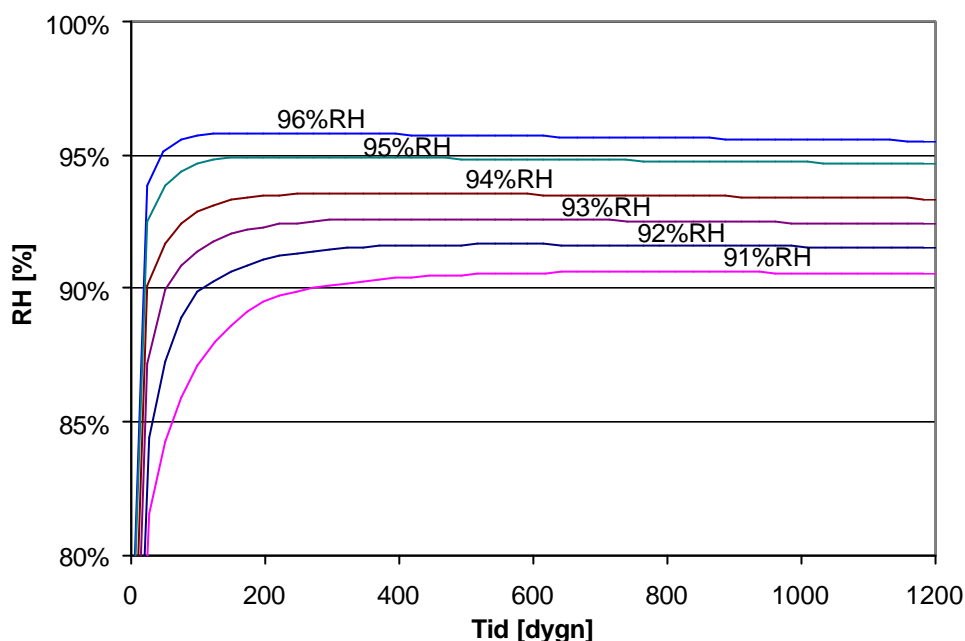
I figur 9.12 redovisas medelvärdena av ovanstående mätningar samt beräkningar av emissionen från golvsystem med limmad PVC-matta. De beräknade emissioner gäller för golvsystem som torkats till respektive fuktnivå, 91 – 96 %RH på 0,4d innan mattläggning. Beräkningarna motsvarar sedan en limning av PVC-matta där betongytan tillförs $80 \text{ g}/\text{m}^2$ limfukt.



Figur 9.12 Emission från ytan. Ringarna är medelvärden för flera mätningar i undersökning d4. Kurvorna är beräknade med Calc.3 för olika fuktnivåer.

Beräkningar visar att fuktnivån i betongens ytan kommer att omfördelas till ungefär den nivå som rådde på 0,4d innan limning. Därefter kommer fuktnivån i ytan långsamt att sjunka, se figur 9.13. Detta stämmer inte med fuktförloppet som antagits för NSt2, se figur 9.8. Dessa provkroppar är lika som NSt2 och kan därför uppvisa samma fuktförlopp.

Emissionshastigheten i mätningarna sjunker också med tiden mycket tidigare än i beräkningarna, vilket stämmer med förmodade RH-sänkningen i provkroppen.

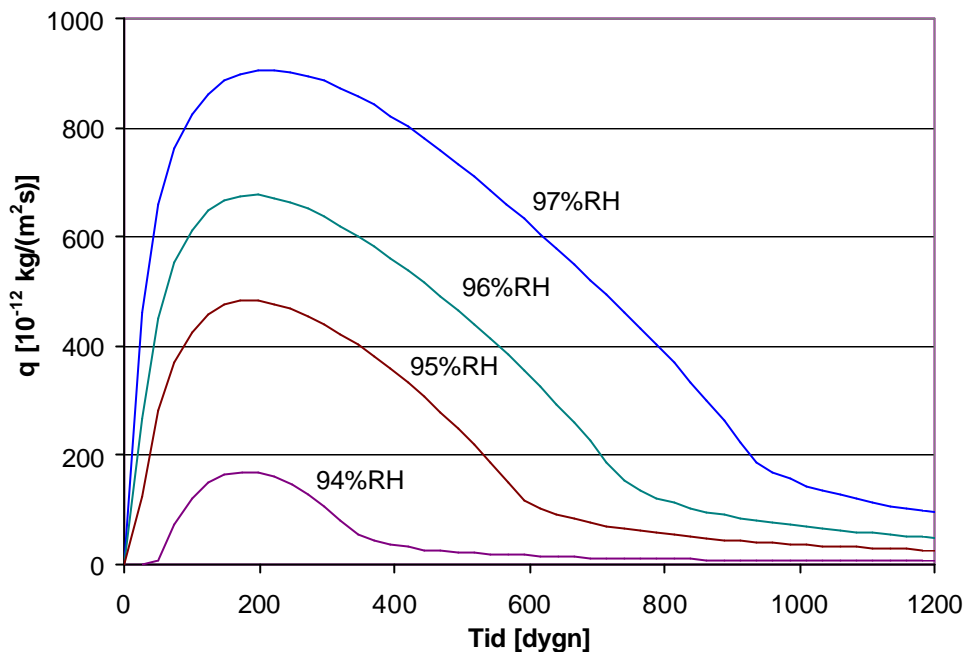


Figur 9.13 RH i ytan av betongen. Värdena är beräknade med Calc.3 för olika fuktnivåer. Z_{fc} för PVC-matta är antagen till $2 \cdot 10^6$ s/m.

9.4.2 Linoleummatta

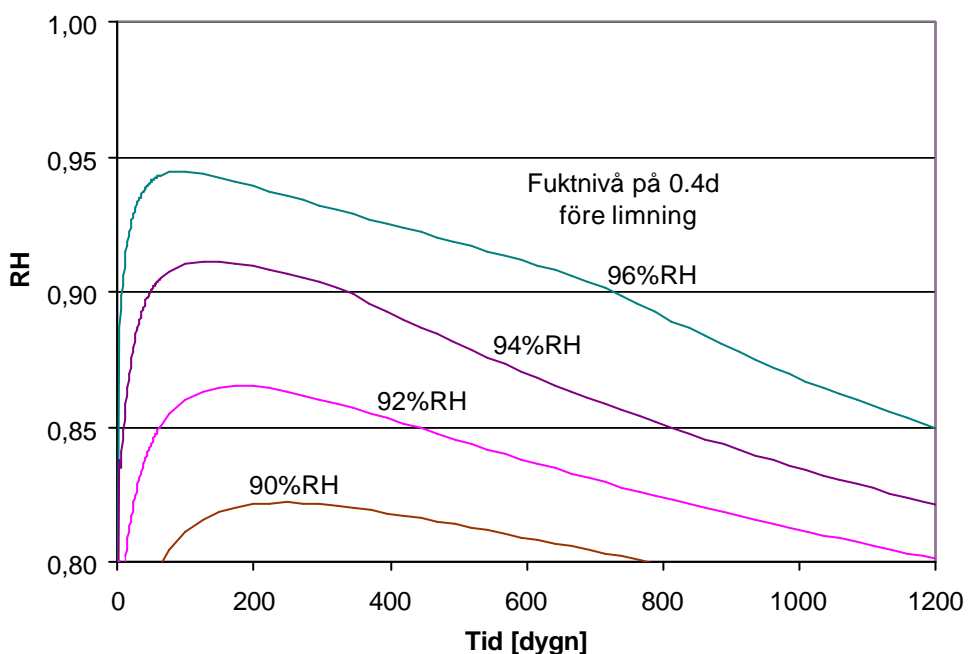
Mätningar som gjorts på provkropp d4.1 med linoleummatta visar inga förhöjda emissioner av butanol efter 10 samt 26 veckor, se tabell 5.9. Fuktnivån uppmättes till ungefär 72%RH i ytan innan mattläggning.

I figur 9.14 redovisas beräkningar av emissionen från golvsystem med limmad linoleummatta. De beräknade emissioner gäller för golvsystem som torkats till respektive fuktnivå, 94 – 97 %RH på 0,4d innan mattläggning. Beräkningarna motsvarar sedan en limning av linoleummatta där betongytan tillförs 80 g/m^2 limfukt.



Figur 9.14 Emission från ytan. Värdena är beräknade med Calc.3 för olika fuktnivåer.

Beräkningar visar att golvsystem som har lägre fuktnivå än 94% på 0,4d innan limning kommer inte upp över kritisk fuktighet i golvytan, se figur 9.15. Därför kan inga nedbrytningsprodukter bildas och följaktligen ingen emission från ytan.



Figur 9.15 RH i ytan av betongen Värdena är beräknade med Calc.3 för olika fuktnivåer. Z_{fc} för PVC-matta är lika med $0,1 \cdot 10^6 \text{ s}/\text{m}$.

9.4.3 Löslagd matta

Mätningar som gjorts på provkropp d2.01 och .02 med löslagd PVC-matta visar inga förhöjda emissioner av butanol, se tabell 5.2. Detta överensstämmer med modellen.

Modellen förutsätter att det finns lim som kan hydrolyseras för att det skall bildas butanol och andra nedbrytningsprodukter. Enbart kontakt mellan PVC-matta och ett fuktigt, alkaliskt underlag ger inga nedbrytningsprodukter enligt modellen.

9.4.4 Diskussion

PVC-matta

Formen på kurvan, av mätningar i figur 9.9 överensstämmer inte med de beräknade kurvorna. Mätvärdena sjunker med tiden medan de beräknade värdena stiger.

Skillnaden kan bero på att det i beräkningen är fuktigt under mattan och nya emissioner produceras medan reaktionen avstannat i provkroppen. Endast de kvarvarande ämnena transporteras ut.

Reaktionen i provkroppen kan ha avstannat innan den första mätningen på grund av att fuktnivån i ytan sjunkit under kritiskt värde. Det är i så fall troligt att emissionen har varit större tidigare, vilket stämmer med beräkningarna.

Linoleummatta

Under förutsättning att fuktnivån i betongens ytan hela tiden varit lägre än 90% kan mätningarna på d4.1 överensstämma med beräkningar. Enligt beräkningarna innebär det att fuktnivån på 0,4d var lägre än 94%RH innan limningen. Ett eventuellt fuktläckage mellan matta och plåtform kan sänka fuktnivån i betongens yta ytterligare.

Löslagd matta

I modellen kan det inte bildas några nedbrytningsprodukter vid lösläggning. Modellen förutsätter att det finns lim som kan hydrolyseras för att det skall bildas butanol och andra nedbrytningsprodukter. Därmed kan inte OC emittera från ytan eller tränga ner i betongen.

De uppmätta värdena för dessa golvsystem är mycket låga. Det kan röra sig om egenemissioner från mattan.

Sekundära emissioner kan dock uppstå från ett golvsystem med löslagd matta om någon av mattans komponenter bryts ner av alkalisk fukt. Att så sker är dock inte visat.

Deponerade OCIC i betonggolvet kan transporteras upp om en matta lösläggs på ett förorenat bjälklag. Detta sker analogt med de resultat som visas i bilaga 4.

Datorprogram

Använda materialdata vid beräkning är uppmätta på gammal välhärdad betong medan mätningarna har utförts på färsk betong som inte hunnit härda ut ordentligt. Eftersom betongens struktur utvecklas under härdningen förändras också materialets egenskaper. Transportprocesserna går i regel fortare i en färsk betong med öppen porstruktur.

En stor begränsning i jämförelsen mellan modellen och mätningar har varit att antagen fuktfördelning i NSt2 inte kunnat återskapats i beräkningarna. Det är en begränsning att inte kunna styra fuktnivån i betongens yta på annat sätt än med begynnelsevärden samt att ansätta olika materialdata i beräkningen.

Fuktransporten är behandlad på ett förenklat sätt med ånghalten som drivande potential. Scanning effekten på grund av hysteres vid återuppfuktning av betonytan försummas. Detta är två kraftiga förenklingar i modellen. Genom att förbättra modellen för transport och fixering av fukt kan bättre resultat från beräkningar för insugning av limfukt erhållas.

Transport och fixering av butanol i betong är ytterligare ett område som behöver ses över. Antagandena i denna studiekan vara för enkla för att ge ett tillfredsställande resultat.

Datormodellen är utförd i Excel med Macro i Visual Basic. Detta innebär att den inte är särskilt kraftfull och en enstaka beräkning kan ta flera timmars datorkapacitet i anspråk.

10 Parameterstudie med modellen

I detta kapitel görs några analyser av parametrar i modellen. Först görs en analys av maximal acceptabel fuktnivå i ytan vid torkning till olika fuktnivåer i ett antal torkklimat.

Sedan görs en analys av några parametrar som påverkar emissionen av OC från ytan. Analyserade parametrar är bildningshastigheten, $q_{R,max}$, RH på 0,4d vid limning, samt valet av golvbeläggning, PVC eller linoleum.

Därefter analyseras några parametrar som påverkar transport och fixering av OCIC. Analyserade parametrar är bindningsmetoden, $Bound_0 - 2$, RH på 0,4d vid limning, samt valet av golvbeläggning, PVC eller Linoleum.

Slutligen görs en analys av emission från ytan samt kvarvarande OCIC efter ”åtgärd med vädring” av ett skadat golv. Samtliga resultat från alla beräkningar redovisas i bilaga 4.

10.1 Högsta möjliga fukttillstånd i ytan

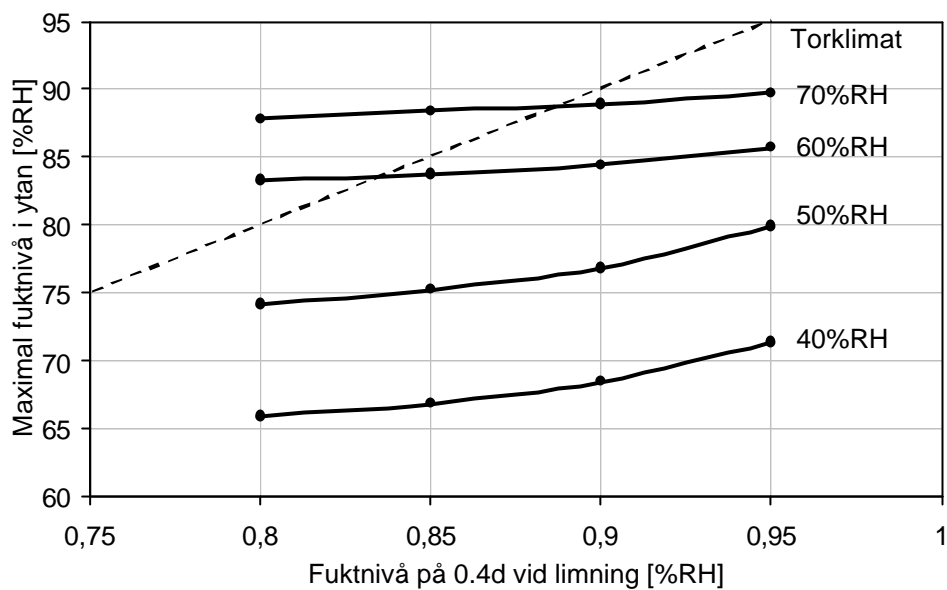
Torkklimatet och betongsammansättningen är avgörande för tillgänglig fuktkapacitet i betongytan. I nedanstående diagram visas resultatet från beräkningar med modellen i kapitel 7.9 av det högsta fukttillstånd som uppkommer i ytan på grund av 80g/m^2 limfukt.

Med fukttillståndet i ytan menas medelnivån i de översta 2 mm betong. Fuktnivån i 2 mm betong är naturligtvis svår att mäta men möjligt att beräkna teoretiskt.

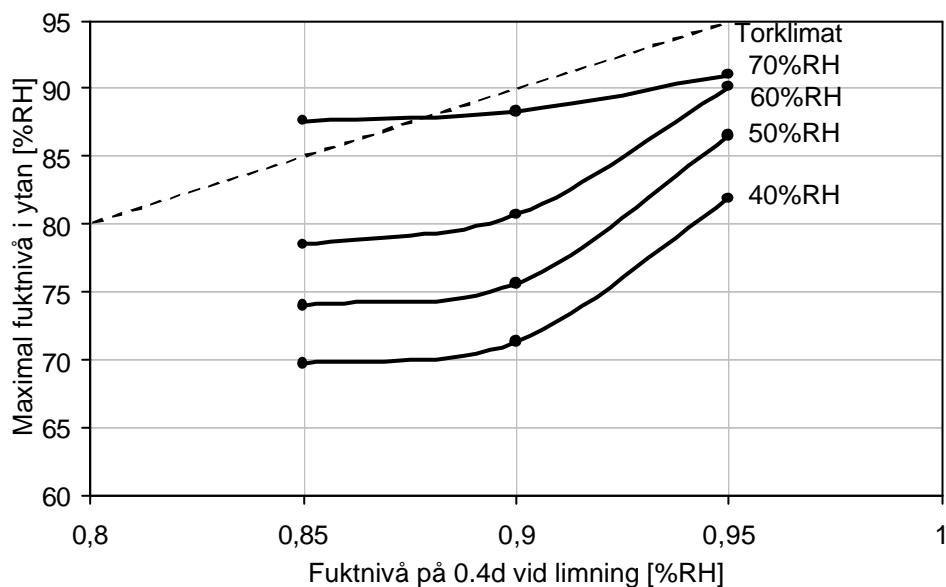
Innan limfukten påförs ytan har betongen torkats till varierande fuktighet på karakteristiskt mätdjup, 0,4d. Dessa fuktnivåer redovisas på x-axeln.

Torkklimatet innan limning av mattan representeras av olika kurvor i figur 10.1 och 10.2. Torkklimatet har varierats mellan 40 och 70%RH. Eventuell självuttorkning hos betongen är inte beaktad.

Högsta fuktnivå i ytan avläses på y-axeln. Den streckade linjen representerar fukttillståndet som kommer att inställa sig efter utjämning av kvarvarande fukt i betongen efter limning av tät PVC-matta. Mängden limfukt är då helt försumbar jämfört med byggfukten i betongen



Figur 10.1 Fuktnivå i betongyta inkl limfukt i betong C1 (vct 0,32) för olika torkklimat. Den streckade linjen representerar fukttillståndet som kommer att inställa sig efter utjämning av kvarvarande fukt i betongen efter limning av tät PVC-matta.



Figur 10.2 Fuktnivå i betongyta inkl limfukt i betong C4 (vct 0,66) för olika torkklimat. Den streckade linjen representerar fukttillståndet som kommer att inställa sig efter utjämning av kvarvarande fukt i betongen efter limning av tät PVC-matta.

10.1.1 Diskussion, högsta fukttillstånd

Enligt beräkningsresultaten som redovisas i figur 10.1 och 10.2 kan betongytan ta hand om limfukten om betongen torkats i torra torkklimat (<60%RH). För normal husbyggnadsbetong med vct 0,66 kan något fuktigare torkklimat (<70%RH) tillåtas.

I övre vänstra hörnet, ovanför den streckade linjen, i figur 10.1 samt 10.2 återfinns de fukttillstånd där limfukten temporärt kommer att höja fuktfördelningen till en högre nivå än den slutliga, efter omfördelning.

I de beräkningar som redovisas inverkar endast limfukten på maximalt fukttillstånd i ytan när betongen torkas till under 90%RH i ett torkklimat som är 60%RH eller fuktigare.

10.2 Emission av butanol från ytan

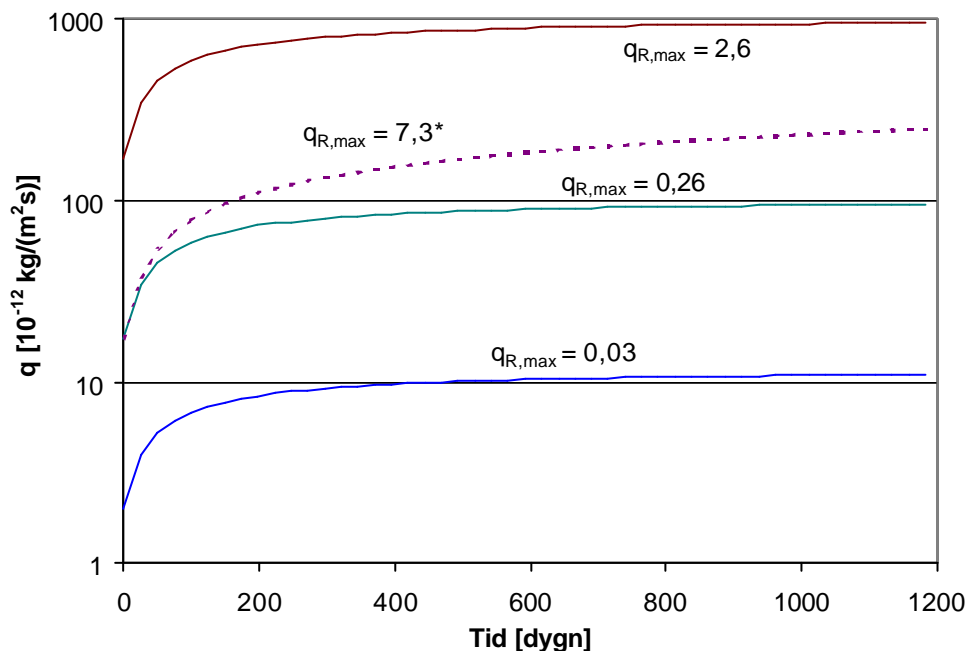
Emissionen av butanol från ytan påverkas av koncentrationen i betongens överkant och motståndet hos mattan.

Inverkan av koncentrationen i betongens överyta analyseras med hjälp av inverkan av $q_{R,max}$ i fyra olika nivåer $0,03 - 7,3 \cdot 10^{-9}$ samt av fuktnivån på 0,4d djup innan mattläggning. Fuktnivån på 0,4d varierar mellan 91 och 97%RH.

Inverkan av motståndet hos mattan R_{fc} analyseras för två värden, $2,9 \cdot 10^{-6}$ samt $3,7 \cdot 10^{-6}$ s/m. Dessa benämns linoleummatta respektive PVC-matta enligt utvärderingen i tabell 4.3. Dessa har också helt olika motstånd Z mot fukttransport, vilket påverkar fuktnivån i ytan och därmed uppkomsten av butanol.

10.2.1 Inverkan av $q_{R,max}$

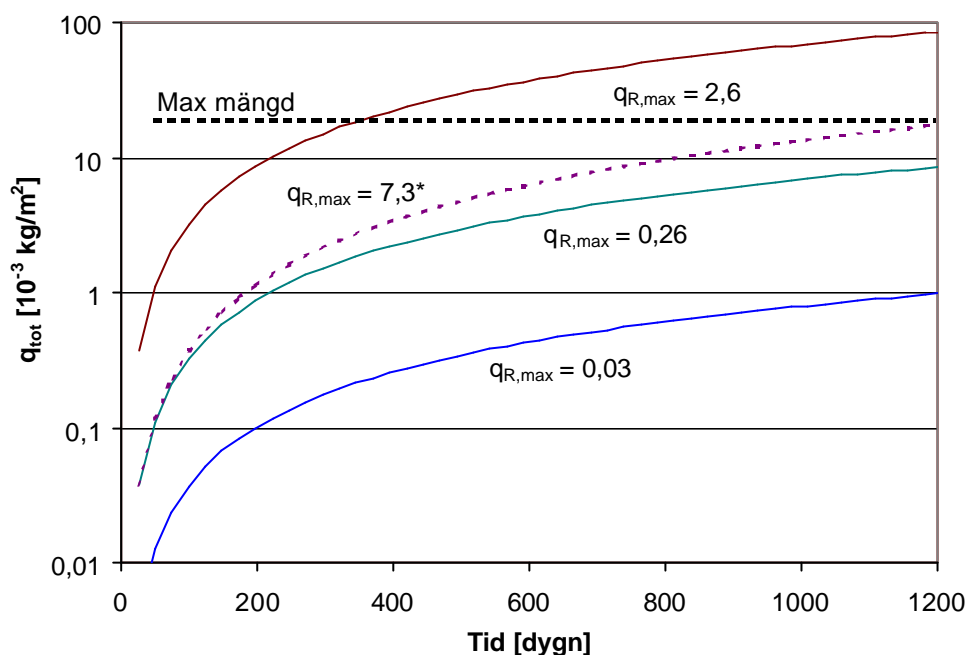
I figur 10.3 redovisas beräknad emission av butanol från ytan som funktion av tiden, för fyra olika $q_{R,max}$. Observera att y-axeln har logaritmisk skala. Tre av kurvorna, $q_{R,max} = 0,03, 0,26$ samt $2,6$, är beräknade med samma värden för transport och fixering av OCIC. Kurvan som benämns $q_{R,max} = 7,3^*$ har beräknats med annorlunda värden, se tabell 9.3.



Figur 10.3 Beräknad emission av butanol från ytan av betonggolv med PVC-matta. Beräknad fuktnivå 95%RH på 0,4d innan mattläggning. Samtliga kurvor är beräknade med bindningsantagandet bound.0, utom * där Bound.1 använts.

I figur 10.4 redovisas sammanlagd emission från ovanstående beräkningsfall. Beräkningarna baseras på resultaten som redovisas i figur 10.3.

Maximal mängd butanol som kan bildas från limmet är $20,8 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^2$, under förutsättning att limningen sker med $5 \text{ m}^2/1$, limmets densitet är 1300 kg/m^3 och limmet innehåller 8% butylakrylat, se kapitel 2.1.3 samt 3.3.3. Mängden limfukt blir då $80 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^2$.

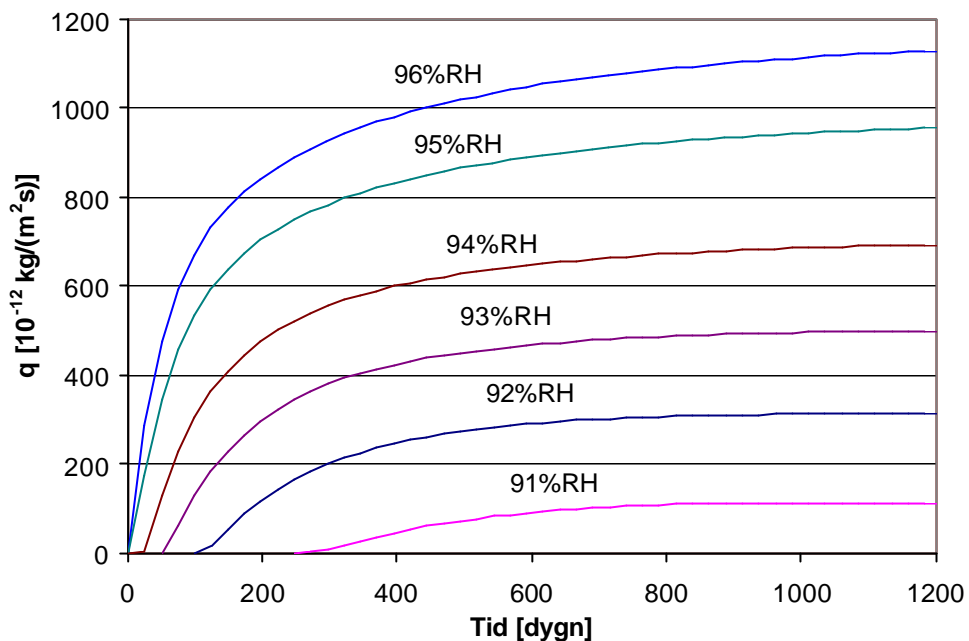


Figur 10.4 Sammanlagd beräknad emission av butanol från ytan av betonggolv med PVC-matta. Beräknad fuktnivå var 95%RH på 0,4d innan mattläggning. Samtliga kurvor är beräknade med bindningsantagandet bound.0, utom * där Bound.1 använts.

10.2.2 Inverkan av RH vid golvkonstruktioner med PVC-matta

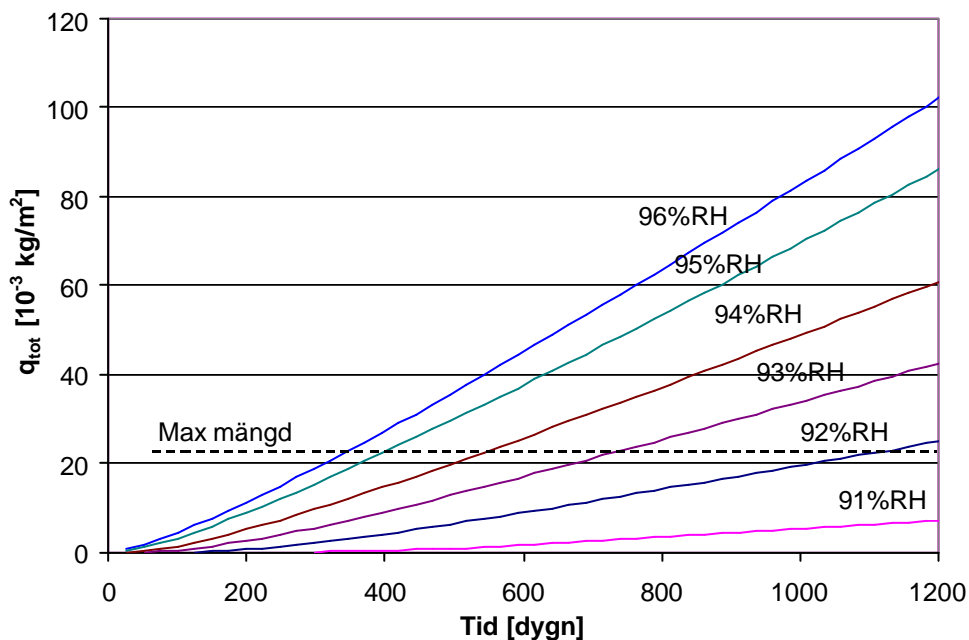
I figur 10.5 redovisas beräknad emission av butanol från ytan som funktion av tiden, för sex olika RH. Fuktnivåerna 91 – 96 % avser RH på 0,4d innan mattlimning. Genomgångsmotståndet för butanol hos golvbeläggningen är $3,7 \cdot 10^{-6} \text{ s/m}$ (PVC-matta). På grund av brister i beräkningsmodellen har inte fall med fuktnivåer över 96 % RH kunnat beräknas.

I beräkningarna är $q_{R,max} = 2,6 \cdot 10^{-9} \text{ kg/(m}^2 \cdot \text{s)}$. Samtliga parametrar redovisas i tabell 9.3 som Calc.3



Figur 10.5 Beräknad emission av butanol från ytan av betonggolv med PVC-matta. Fuktnivåerna avser 0,4d. Beräknat med Calc.3 och $q_{R,max} = 2,6 \times 10^{-9} \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$.

I figur 10.6 redovisas sammanlagd emission från ovanstående beräkningsfall. Beräkningarna baseras på resultaten som redovisas i figur 10.5.



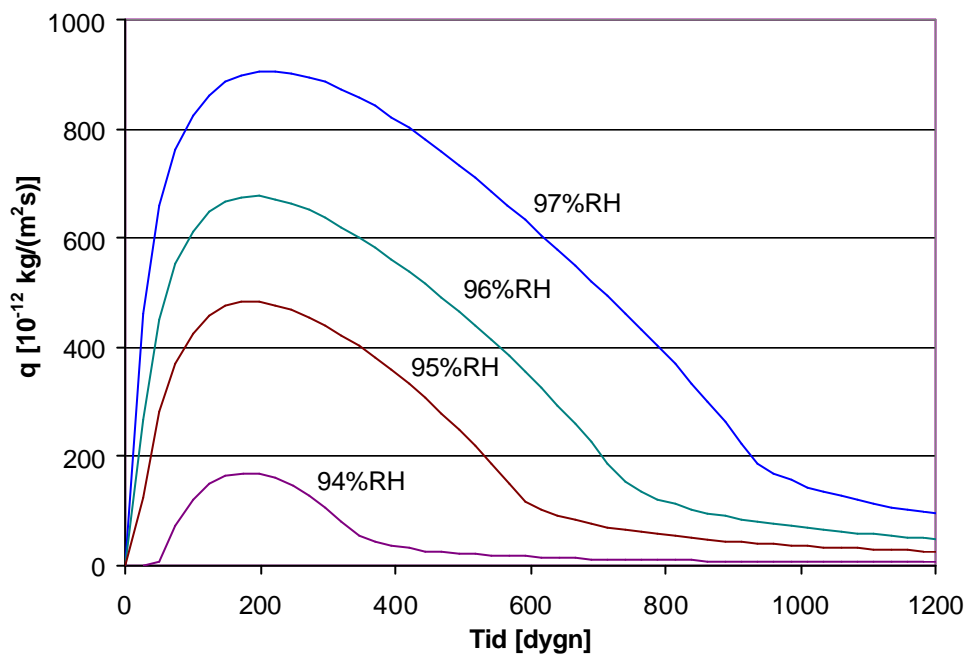
Figur 10.6 Sammanlagd beräknad emission av butanol från ytan av betonggolv med PVC-matta. Fuktnivåerna avser 0,4d. Beräknat med Calc.3 och $q_{R,max} = 2,6 \times 10^{-9} \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$.

10.2.3 Inverkan av RH vid golvkonstruktioner med Linoleummatta

I figur 10.7 redovisas beräknad emission av butanol från ytan som funktion av tiden, för fyra olika RH. Fuktnivåerna 94 – 97 % avser RH på 0,4d innan mattlimning. Genomgångsmotståndet för butanol hos golvbeläggningen är $2,9 \cdot 10^{-6}$ s/m och $0,1 \cdot 10^{-6}$ s/m för fukt (Linoleummatta).

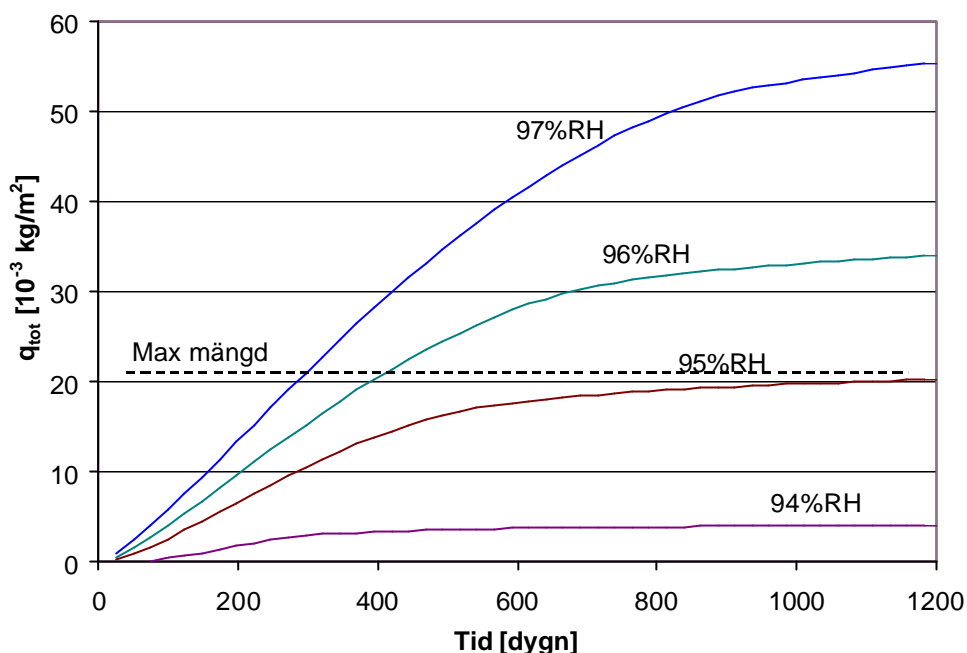
Vid beräkningar av fuktnivåer under 94%RH erhöles inga emissioner från ytan. Detta förklaras med att ingen reaktion startade, på grund av att RH_{krit} inte överskreds i betongytan. På grund av brister i beräkningsmodellen har inte fall med fuktnivåer över 97 % RH kunnat beräknas.

I beräkningarna är $q_{R,max} = 2,6 \cdot 10^{-9}$ kg/(m²·s). Samtliga parametrar redovisas i tabell 9.3 som Calc.3



Figur 10.7 Beräknad emission av butanol från ytan av betonggolv med linoleummatta. Fuktnivåerna avser 0,4d. Beräknat med Calc.3 och $q_{R,max} = 2,6 \cdot 10^{-9}$ kg/(m²·s).

I figur 10.8 redovisas sammanlagd emission från ovanstående beräkningsfall. Beräkningarna baseras på resultaten som redovisas i figur 10.7.



Figur 10.8 Sammanlagd beräknad emission av butanol från ytan av betonggolv med linoleummatta. Fuktnivåerna avser 0,4d. Beräknat med Calc.3 och $q_{R,max} = 2,6 \cdot 10^{-9} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$.

10.2.4 Diskussion, emission från ytan

Emissionen från ytan beror främst av koncentrationen i betongens överkant och motståndet hos mattan. Ytkoncentrationen styrs till stor del av $q_{R,max}$. Detta är en parameter vars värde noggrant måste verifieras för att styrka modellens tillförlitlighet.

Även bindningsantagandet har stor inverkan på emissionen från ytan. I figur 10.3 har kurvan med $q_{R,max} = 7,3$ lägre emission än kurvan $q_{R,max} = 2,6$ fast det borde vara omvänt om allt annat var lika. Förklaringen är att kurvan med $q_{R,max} = 7,3$ har beräknats med ett annat bindningsantagande, Bound.1 istället för Bound.0, det innebär att mer OC binds i betongen. Emissionen från beräkningar med $q_{R,max} = 7,3$ och Bound.0 skulle uppskattningsvis ge 10 gånger högre emission från ytan än med Bound.1.

Genomgångsmotståndet hos mattan är också avgörande för emissionen. Ju högre genomgångsmotstånd för OC desto lägre emission (under längre tid) vid samma ytkoncentration. Genomgångsmotståndet för fukt är också viktigt eftersom ett lågt motstånd möjliggör uttorkning av betongen. Detta kan få till följd att en eventuell reaktion slutar efter en tid och emissionen från ytan minskar, se figur 10.7.

Det är troligt att emissionsförloppen som redovisas i kapitel 10.2 är ungefär desamma från en golvkonstruktion med en liknande golvbeläggning om allt annat är lika. Om golvbeläggningen har ett annat genomgångsmotstånd R_{fc} kan

emissionshastigheten dock skilja sig. För att beräkna emissionshastigheten i det nya fallet, som har ett känt genomgångsmotstånd används ekvation 7.40.

På motsvarande sätt kan emissionshastigheten beräknas utifrån en känd ytkoncentration c_s . Dock påverkas inträngningen av OCIC också av ytkoncentrationen c_s vilket innebär att ovanstående samband endast är approximativt.

10.3 Transport och fixering av butanol i betong

Transport och fixering av butanol i betong påverkas bland annat av koncentrationen av butanol i betongens överkant c_s , diffusionsmotståndet d_{OC} samt bindningssättet *Bound*.

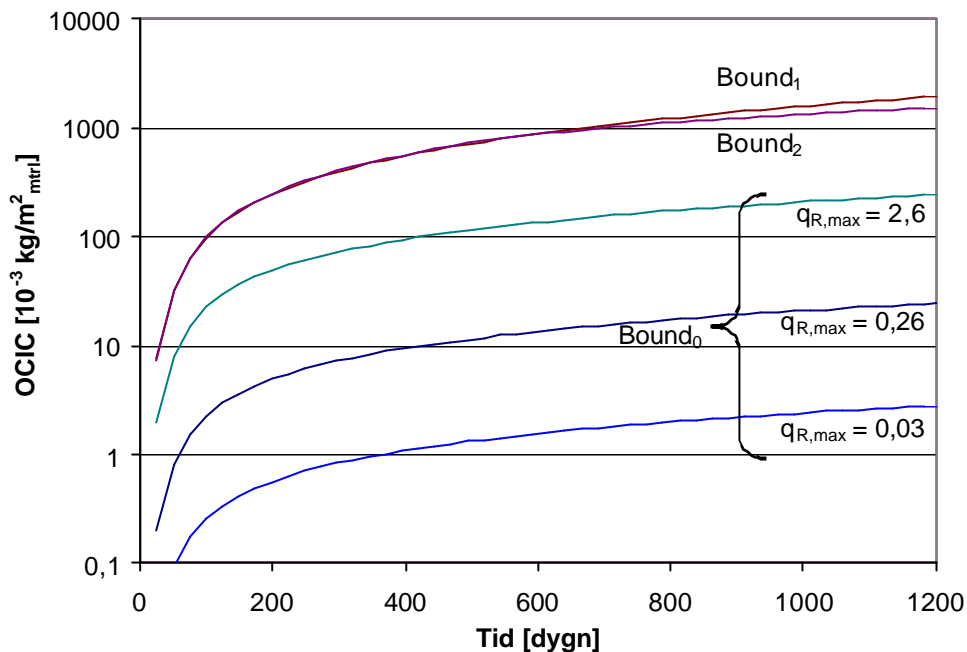
Inverkan av koncentrationen i betongens överyta analyseras med hjälp av inverkan av $q_{R,max}$ i fyra olika nivåer $0,03 - 7,3 \cdot 10^{-9}$. I de tre första beräkningarna med $q_{R,max} = 0,03 \cdot 10^{-9}$, $0,26 \cdot 10^{-9}$ samt $2,6 \cdot 10^{-9}$ har *Bound*₀ använts. I de två beräkningarna för $q_{R,max} = 7,3 \cdot 10^{-9}$ har *Bound*.1 och *Bound*.2 använts.

Två olika diffusionskoefficienter har använts i beräkningarna, $d_{OC} = 2,5 \cdot 10^{-9}$ och $93 \cdot 10^{-9}$. Slutligen har tre olika bindningssätt analyserats, *bound*.0, *Bound*.1 samt *Bound*.2, se kapitel 8.1.3.

10.3.1 Inverkan av olika bindningsantagande

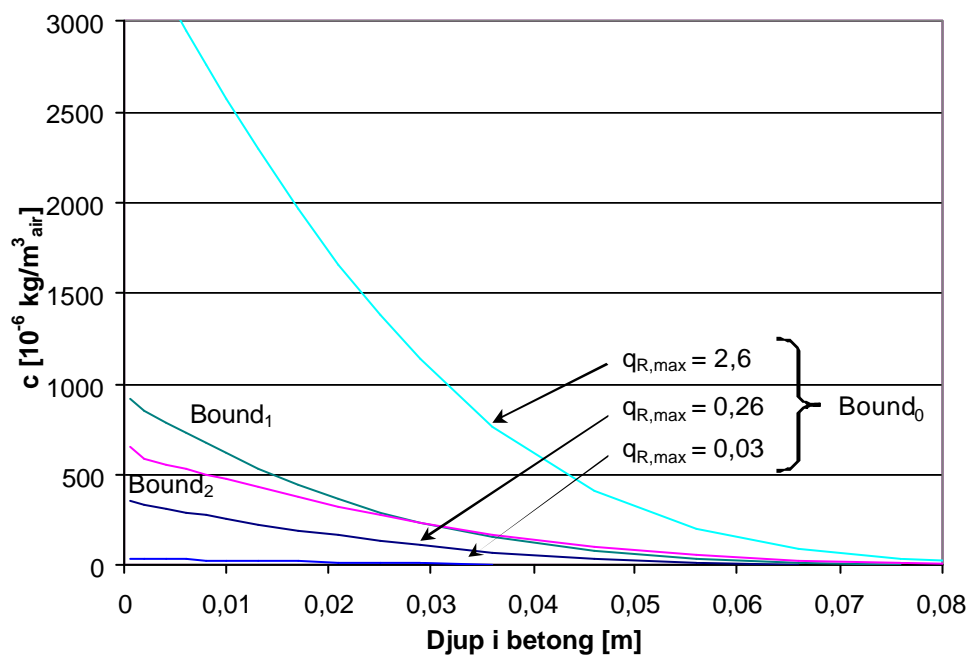
I figur 10.9 redovisas beräknad mängd butanol som transporteras ner i betongen som funktion av tiden, för fem olika fall. Tre av fallen är beräknade med samma bindningssätt, *Bound*₀ men med olika ytkoncentration. Ytkoncentrationen har varierats genom att ansätta olika värden på bildningshastigheten $q_{R,max}$.

I de fall som benämns *Bound*₁ och *Bound*₂ i figur 10.9 har $q_{R,max} = 2,6 \cdot 10^{-9}$ använts. Samtliga parametervärden som använts i beräkningarna redovisas i tabell 9.3. Fuktnivån innan mattlimning var 95% RH i samtliga beräkningar.



Figur 10.9 Beräknad mängd butanol som transporteras ner i betonggolvet med PVC-matta. Analys av effekten av olika ytkoncentrationer och bindningssätt.

I figur 10.10 redovisas profiler av butanol i gasfas som bildas i betongen efter lång tid (1200 dygn). Resultaten baseras på samma beräkningar som ligger till grund för figur 10.9.

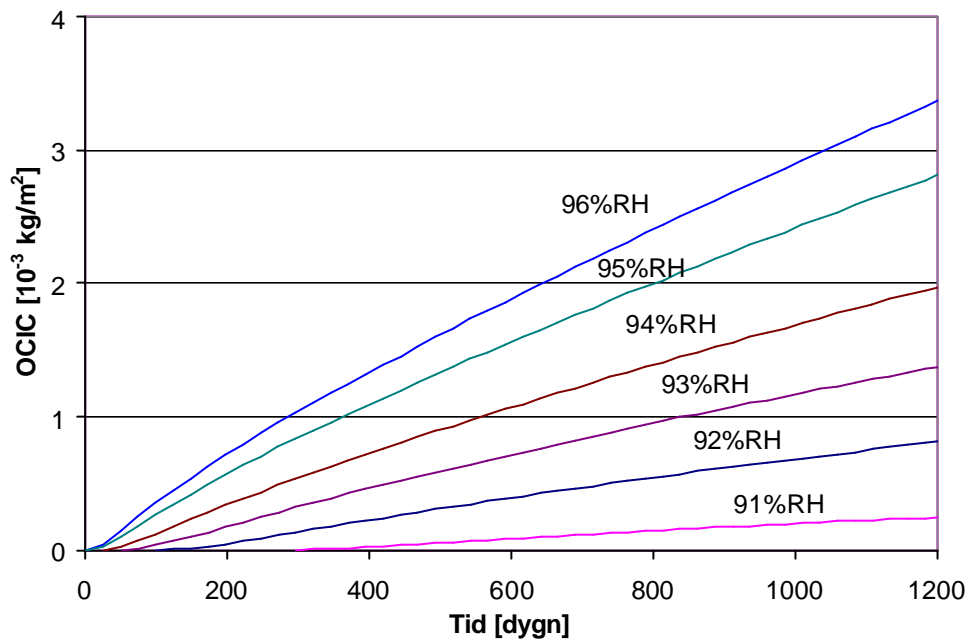


Figur 10.10 Profil av butanol i gasfas i betongen, efter lång tid (1200 dygn). Analys av effekten av olika bildningshastigheter och bindningsantagande.

10.3.2 Inverkan av RH vid PVC-matta

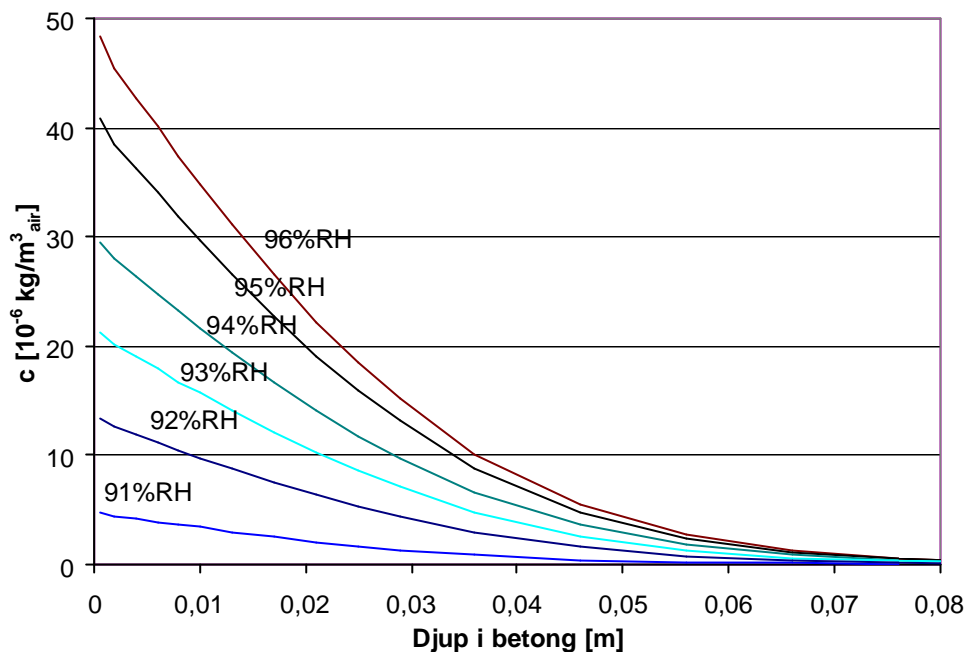
I figur 10.11 redovisas beräknad mängd butanol som transporteras ner i betongen som funktion av tiden, för sex olika RH. Fuktnivåerna 91 – 96 % avser RH på 0,4d innan mattlimning. Genomgångsmotståndet för butanol hos golvbeläggningen är $3,7 \cdot 10^{-6}$ s/m (PVC-matta). På grund av brister i beräkningsmodellen har inte fall med fuktnivåer över 96 % RH kunnat beräknas.

I beräkningarna är $q_{R,max} = 0,03 \cdot 10^{-9}$. Bindningsantagande Bound.0 som ger liten bunden mängd OCIC i betongen har använts. Samtliga parametrar redovisas i tabell 9.3 som Calc.1.



Figur 10.11 Beräknad mängd butanol som transporteras ner i betonggolv med PVC-matta. Fuktnivåerna avser 0,4d. Beräknat med Calc.1 och $q_{R,max} = 0,03 \cdot 10^{-9}$ kg/(m² s).

I figur 10.12 redovisas profiler av butanol i gasfas nere i betongen efter lång tid (1200 dygn). Resultaten baseras på samma beräkningar som ligger till grund för figur 10.11.



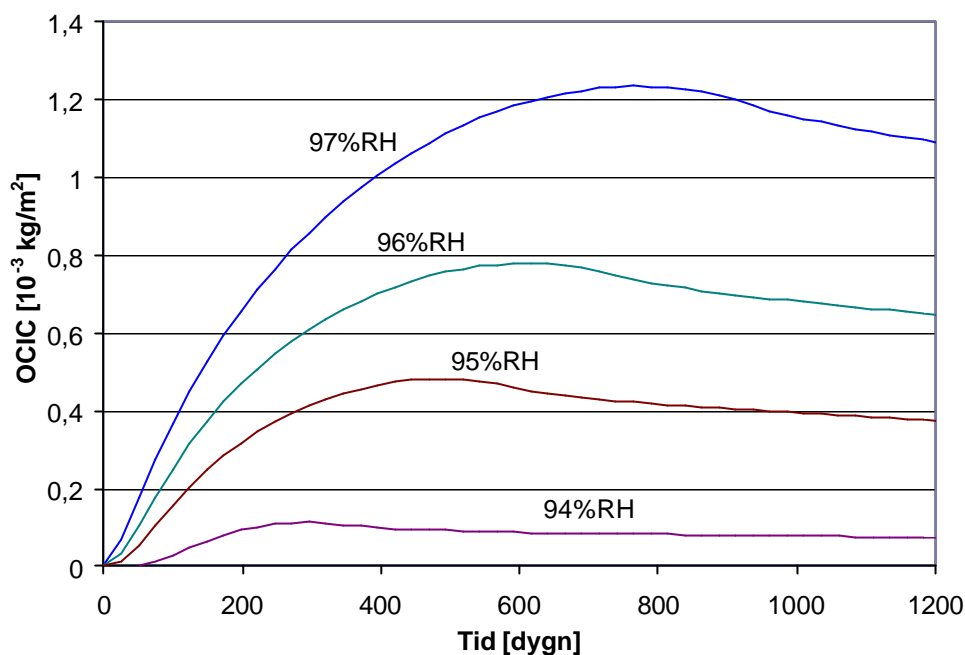
Figur 10.12 Profil av butanol i gasfas c i betonggolv med PVC-matta, efter lång tid (1200 dygn). Fuktnivåerna avser 0,4d. Beräknat med Calc.1 och $q_{R,max} = 0,03 \cdot 10^{-9}$.

10.3.3 Inverkan av RH vid Linoleummatta

I figur 10.13 redovisas beräknad mängd butanol som transporteras ner i betongen som funktion av tiden, för fyra olika RH. Fuktnivåerna 94 – 97 % avser RH på 0,4d innan mattlimning. Genomgångsmotståndet för butanol hos golvbeläggningen $2,9 \cdot 10^6$ s/m (Linoleummatta).

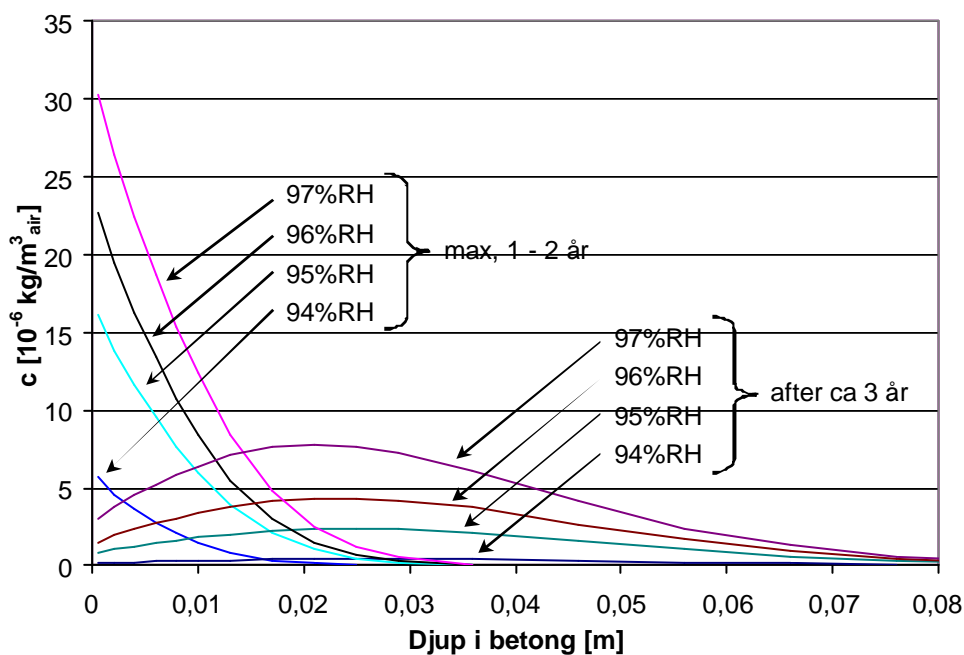
Vid beräkningar av fuktnivåer under 94%RH erhöles ingen transporter av butanol ner i betongen. Detta förklaras med att ingen reaktion startade, på grund av att RH_{krit} inte överskreds i betongytan. På grund av brister i beräkningsmodellen har inte fall med fuktnivåer över 97 % RH kunnat beräknas..

I beräkningarna är $q_{R,max} = 0,03 \cdot 10^{-9}$. Bindningsantagande Bound.0 som ger liten bunden mängd OCIC har använts. Samtliga parametrar redovisas i tabell 9.3 som Calc.1.



Figur 10.13 Beräknad mängd butanol som transporteras ner i betonggolv med PVC-matta. Fukt nivåerna avser 0,4d. Beräknat med Calc.1 och $q_{R,max} = 0,03 \times 10^{-9} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$.

I figur 10.14 redovisas dels profiler av butanol i gasfas c vid maximal ytkoncentration: Dessa profiler uppträder ungefär samtidigt som mängden OCIC i betongen är som störst, se figur 10.13. Dels redovisas profiler av butanol efter lång tid (1200 dygn). Resultaten baseras på samma beräkningar som ligger till grund för figur 10.13.



Figur 10.14 Profil av butanol i gasfas c i betonggolv med linoleummatta, efter lång tid (1200 dygn). Fukt nivåerna avser 0,4d. Beräknat med Calc.1 och $q_{R,max} = 0,03 \times 10^{-9} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$.

10.3.4 Diskussion, transport och fixering av OCIC

Diffusionskoefficienten och lagringskapaciteten är avgörande för mängden OCIC som kan finnas. Detta är också parametrar vars värden noggrant skall verifieras för att styrka modellens tillförlitlighet

I golvkonstruktioner där reaktionen avtar efter en tid kommer OCIC att fortsätta att avgå från ytan. Efter att reaktionen stannat bildas ingen ny VOC. Fortsatt emission från ytan kan ske på grund av att OCIC transporteras uppåt i konstruktionen. Emissionshastigheten från ytan minskar då reaktionen slutat. Den fortsatta emissionen bidrar till att minska den totala mängden OCIC i bjälklaget.

10.4 Kvarvarande OCIC efter vädring

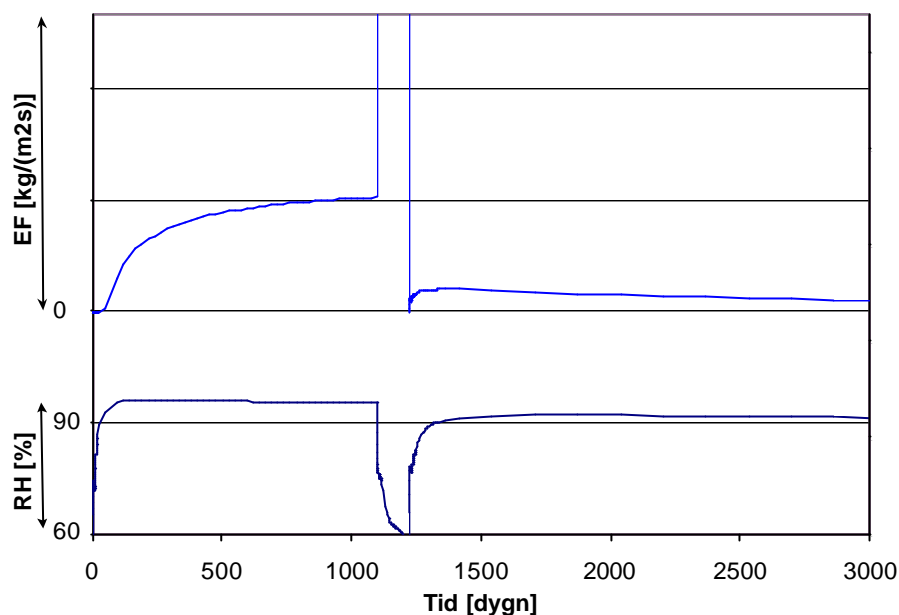
En åtgärd vid hög emission från golvkonstruktionen kan vara att byta ut mattan. En eventuell alkalisk hydrolys kommer då att sluta i och med att limmet avlägsnas. Om fuktnivån i betongens yta, inklusive ny limfukt, är över RH_{crit} efter att ny matta limmats kan en ny reaktion börja.

När den gamla mattan avlägsnas kan avgivningen från golvet öka kraftigt. Under denna så kallade vädring av golvkonstruktionen minskas mängden OCIC i betongen.

I figur 10.15 redovisas beräknad fuktnivå i betongytan samt emission från ytan hos ett golv som åtgärdas enligt ovanstående. Fuktnivån är 95%RH på 0,4d innan limning av PVC-matta vid tiden 0.

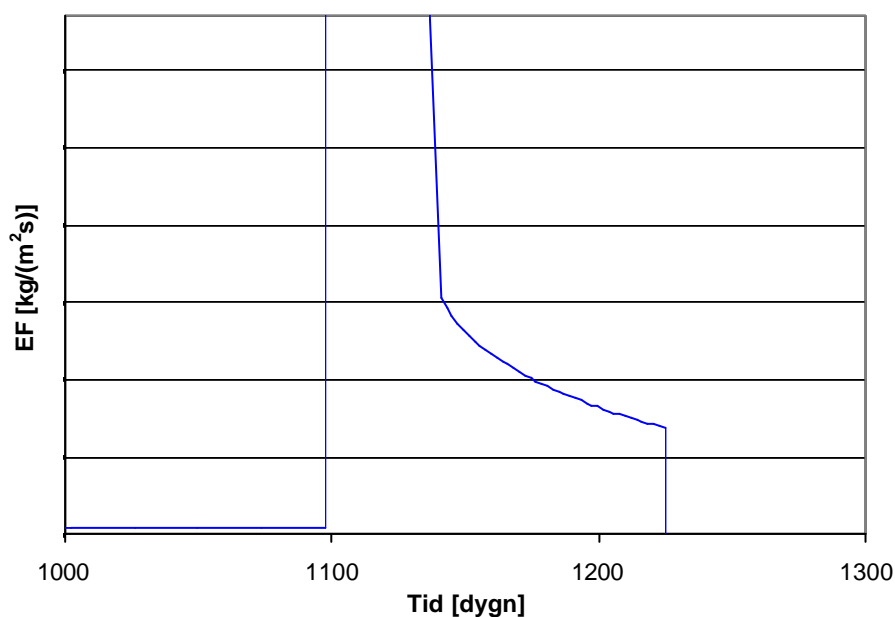
Cirka tre år efter limning av mattan avlägsnas den. Golvet vädras därefter under fyra månader. Därefter limmas en linoleummatta på golvet.

I beräkningarna är $q_{R,max} = 0,03 \cdot 10^{-9}$, $R_{fc} = 3,7 \cdot 10^{-6}$ s/m för PVC-matta samt $2,9 \cdot 10^{-6}$ s/m för linoleummatta. Bindningsantagande Bound.0 som ger liten bunden mängd OCIC i betongen har använts. Samtliga parametrar redovisas i tabell 9.3 som Calc.1.



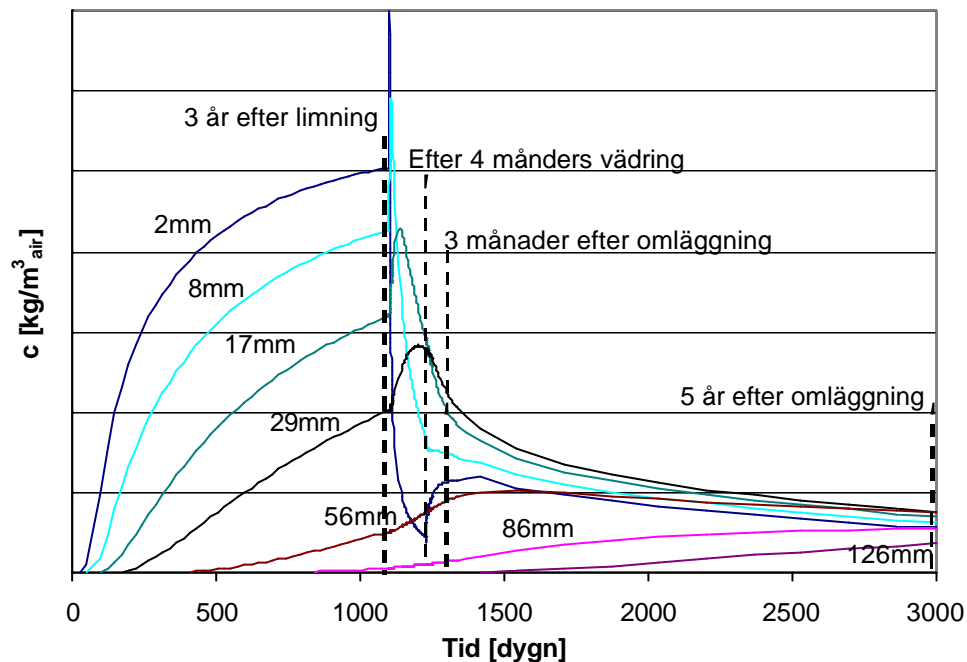
Figur 10.15 Beräknad emission av butanol från ytan, samt fuktnivå i ytan hos ett golv med PVC-matta som "vädras" vid cirka 1100 – 1230 dygn. Därefter limmas linoleummatta. I beräkningarna är $q_{R,max} = 0,03 \cdot 10^{-9} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, Calc.1.

I figur 10.16 redovisas emissionen från ytan under vädringen. Figuren är en uppförstoring av förloppen när mattan avlägsnats. Emissionshastigheten är mycket hög i början när PVC-mattan avlägsnats, vid cirka 1100 dygn. Emissionen av butanol från ytan minskar successivt i och med att mängden butanol nära ytan avgår. Vid limning av linoleummatta, 1230 dygn, minskar emissionen. Brytpunkten vid cirka 1140 dygn kan bero på begränsningar i beräkningsmodellen.



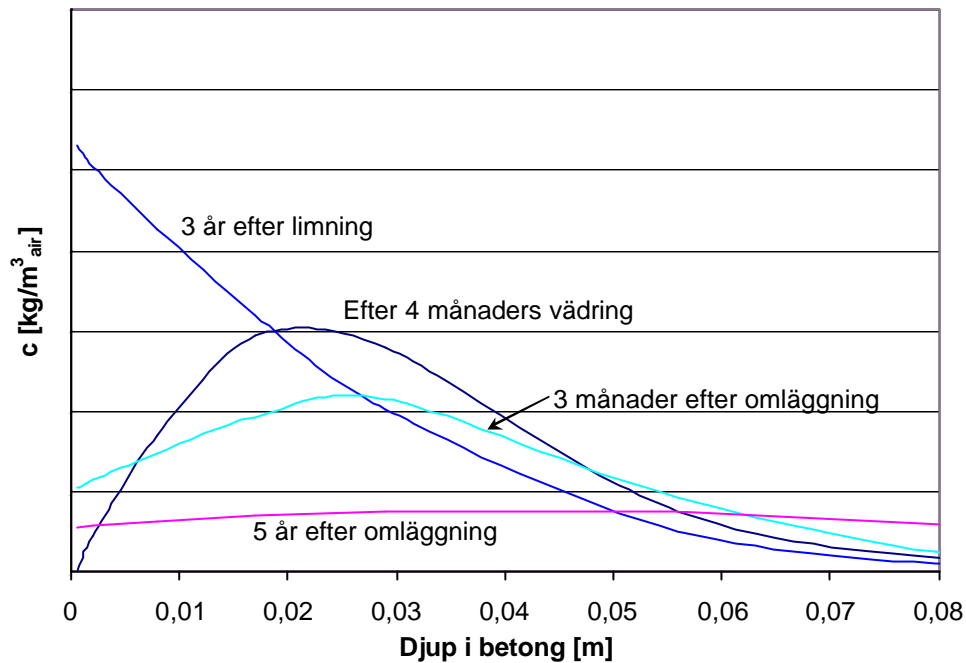
Figur 10.16 Beräknad emission av butanol från ytan under vädring av ett betonggolv vid cirka 1100 – 1230 dygn. Vid 1230 limmas linoleummatta. I beräkningarna är $q_{R,max} = 0,03 \cdot 10^{-9} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, Calc.1.

I figur 10.17 redovisas den fria koncentrationen butanol, på sju olika djup i betongen, som funktion av tiden.



Figur 10.17 Fri koncentrationen butanol, på sju olika djup i betongen, som funktion av tiden. I beräkningarna är $q_{R,max} = 0,03 \cdot 10^{-9} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, Calc.1.

I figur 10.18 redovisas profilen av fria koncentrationen butanol vid fyra olika tillfällen. Dessa är markerade i figur 10.17. Den första är tre år efter limning av PVC-matta, precis innan den avlägsnas vid åtgärd. Nästa profil i kronologisk ordning är efter 4 månaders vädring, precis innan ny linoleummatta limmas på betongen. Den tredje profilen visar fördelningen cirka tre månader efter linoleummattan limmats. Den sista profilen visar hur fördelningen av fria koncentrationen butanol kan se ut i betongen många år efter att reaktionen avstannat.



Figur 10.18 Profilen av fria koncentrationen butanol vid fyra olika tillfällen som är markerade i figur 10.17. I beräkningarna är $q_{R,max} = 0,03 \times 10^{-9} \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$, Calc.1.

10.4.1 Diskussion, kvarvarande OCIC efter vädring

Resultaten från beräkningarna som redovisas i figur 10.15 visar att emissionen från golvet ökar då mattan avlägsnas. I och med att limmet avlägsnas och / eller fuktnivån i ytan sjunker upphör en eventuell reaktion. Den snabba emissionen då mattan avlägsnats bidrar till att minska totala mängden OCIC i betongytan.

När den fria koncentrationen av OC i betongytan sjunker blir transporten av OC i betongen, upp till ytan, avgörande för emissions hastigheten, se figur 10.16. Detta får till följd att minskningen av OCIC i betongen går fortast i början, då den fria koncentrationen av OC i betongens ytan är hög.

I beräkningen sker emissionen hela tiden till försumbar rumskoncentration. I ett verkligt fall kan koncentrationen i rummet öka kraftigt när mattan tas bort. Luftflödet i rummet måste vara mycket stort för att rumskoncentrationen skall stanna på en låg nivå.

Alla beräkningar har här gjorts med antagandet att OC bara kan bindas genom att det löses i porvattnet. Om beräkningarna istället grundas på de andra två bindningssätten kan mängden OCIC bli mycket större. Det får till följd att emissionen blir högre under en längre tid.

11 Diskussion och konklusion

11.1 Måluppfyllelse

Studien hade ett antal mål som beskrivs i kapitel 1.3. Alla dessa mål har i någon mån uppfyllts. Målen kan sammanfattas i följande punkter.

- Öka kunskapen om samverkan inom materialkombinationer vid limmade golvkonstruktioner där betong ingår.
- Skapa en modell som kan förutse förkortad livslängd av ovanstående materialkombinationer och bygger på fysikalisk förståelse av förlopp i golvkonstruktionen.
- Utveckla metoder för att icke accelererat mäta egenskaper i konstruktionen som är viktig för dessa förlopp.
- Ta fram kunskap, som hjälper till att hindra eller begränsa emissionen av VOC till inomhusluft, från byggnaden, på lång och kort sikt.

Projektet har behandlat samtliga dessa punkter. I kapitel 6 och 7 redovisas processerna som ger upphov till sekundär emission. Samtliga processer som inte återfinns i litteraturen har kvantifierats. I några fall har detta skett genom mätningar med metoder som är väl dokumenterade, i andra fall med mätmetoder som utvecklats i studien. Några mekanismer såsom exempelvis bildningshastigheten av OC under mattan har inte kunnat mätas direkt. Värden för dessa har istället utvärderats ur andra mätningar, med hjälp av modellen.

En kvalitativ och en kvantitativ modell har utvecklats. Den kvantitativa modellen redovisas i kapitel 6 och innehåller alla relevanta delprocesser. Modellen beskriver processerna i materialkombinationer för olika tillämpningar: normal husbyggnadsbetong, byggfuktfri betong med och utan avjämningsmassa. Den kvantitativa modellen redovisas i kapitel 7. Modellen bygger på fysikalisk förståelse och kvantifierbara materialparametrar. Den beskriver transport och fixering av väsentliga komponenter i systemet, såsom fukt och OC.

Nya mätmetoder för icke accelererade mätningar har utvecklats i studien. Metoderna syftar till att mäta materialegenskaper som används i den kvantitativa modellen samt processer som verifierar modellen. Mätningarna beskrivs i kapitel 2 – 5. Några av mätmetoderna behöver dock förbättras då de visat sig vara behäftade med stora osäkerheter.

11.2 Hypotesen

Den ursprungliga hypotesen som beskrevs i kapitel 1.5 har till största delen visat sig riktig. Den har nästan fullt ut kunnat verifierats i studien.

Till att börja med visades det i studien att betydelsefulla ämnen, såsom fukt och OC, kan migrera i och mellan materialen samt avgå från konstruktionens yta. Detta är den viktigaste hörnstenen i hypotesen.

Fukten är betydelsefull i den meningen att fuktnivån avgör nedbrytningen av limmet, när den finns i kontakt med den alkaliska miljön som betongytan utgör. Rikligt med fukt i betongen är en förutsättning för att hydroxidjonerna skall kunna finnas, samt kunna komma i kontakt med limmet. Fukthalten i betongen kan också påverka bindingsisotermen för OCIC. Detta är dock ej säkerställt.

Transporten och bindningen av OC i materialen är betydelsefull för emissionen från ytan, dels på grund av att genomgångsmotståndet hos mattan avgör emissionen uppåt i hög grad och dels på grund av att transportegenskaper och bindingsisotemer avgör mängden OCIC som kan tränga ner och lagras i betongen.

Hypotesen stämmer också i och med att det finns vissa ämnen i undergolvet, hydroxidjoner, som kan påverka golvbeläggningen. Det har dock visats att det i främsta hand är limmet och inte mattan som bryts ned.

Den alkaliska hydrolysen av limmet är en katalytisk process. Hydroxidjonerna förbrukas inte på det sättet som antogs i hypotesen. För varje hydroxidjon som ”åtgår” i reaktionen bildas istället en ny genom att vattnet sönderdelas. Mängden alkali, det vill säga de positiva motjonerna av alkalimetaller, är ett startvillkor för hydrolysen. Det krävs inte en ständig transport mot ytan för att ”ersätta förbrukad” alkali, som antagits i hypotesen.

11.3 Beräkningsmodellen

Beräkningsmodellen som utvecklats som en del i studien har visat sig vara rimlig vid en jämförelse med uppmätta resultat. Tyvärr har dock flertalet av mätningarna varit bristfälliga och ej kompletta då de kommer från ett tidigare projekt. Vid den tiden fanns inte kunskapen om vad som var viktigt att mäta och hur det skulle göras.

Svagheter hos modellen ligger främst i att det inte gått att mäta alla ingående parametrar på ett tillfredsställande sätt. Två exempel på parametrar som inte uppmätts i studien är maximal bildningshastighet samt bindingsisotermen för OC.

Det är också önskvärt att fuktberäkningarna i modellen utvecklas till att ta hänsyn till hysteresen som uppstår vid limning av ytbeläggningen. Den befintliga modellen underskattar ökningen av RH vid tillskottet av limfukt.

För att beräkningsmodellen skall kunna bli användbar för andra krävs att den görs mer användarvänlig. Det är också önskvärt att den görs om till ett fristående program som bättre utnyttjar datorns beräkningskapacitet än vad Excel gör.

11.4 Bindningsantagandet

En av de stora osäkerheterna i den kvantitativa modellen är bindningsantagandet. I studien har tre olika bindningsantaganden gjorts. Dessa baseras på antaganden som inte kunnat verifieras ordentligt. Antagandena får stora konsekvenser för fördelningen av OC mellan emission från ytan och mängden OCIC som deponeras i betongen.

Det har inte gjorts några mätningar av bindningsisotermen i studien och de få värden som hittas i litteraturen försummar beroendet av fukt i betongen. Bindningsisotermerna i andra undersökningar studerar ofta överskådligt ett flertal ämnens bindning till många olika material. Ett material som ofta studeras är gipsskiva, tanken bakom valet kan vara att gipsskivan sitter ytterst i konstruktionen och är i direktkontakt med inomhusluftens ämnen. Dock är gipsskivor vanligtvis täckta med ett ytmaterial, färg eller tapet, och det är detta materials egenskaper som avgör mängden OC som kan transporteras in och lagras. Resultatet från dessa studier kan inte direkt översättas eftersom gips och papper har en annan porstruktur och fuktbindning än betong.

Rumskoncentrationen av OC är oftast försumbar i jämförelse med total koncentrationen i jämvikt med ett kraftigt emitterande material. I de fall ett kraftigt emitterande material finns i en konstruktion kan den huvudsakliga transporten till andra material ske direkt till intilliggande material, inte via emission till rumsluften och sedan absorption i rummets ytmaterial.

Detta gäller naturligtvis under förutsättningarna att materialen i kontakt med det emitterande materialet och rummets ytmaterial har struktur och egenskaper som tillåter adsorption, samt att rummet har en godtagbar allmänventilation som späder ut rumskoncentrationen.

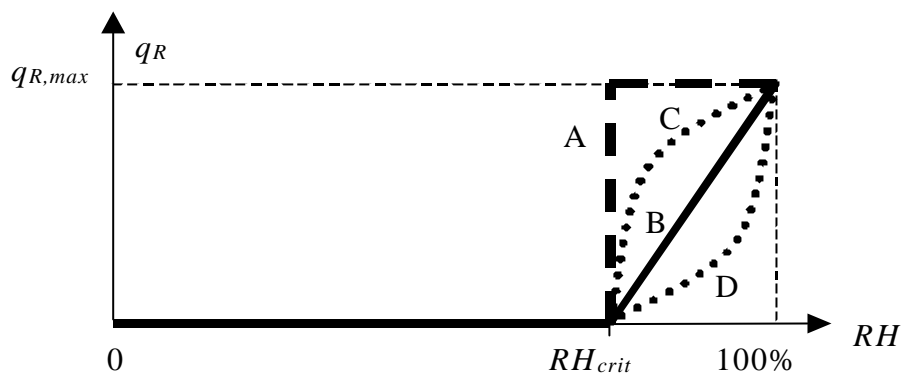
11.5 Maximal bildad mängd OC

Antagandet att mängden bildad OC per tidsenhet, det vill säga bildningshastigheten, är direkt proportionell mot fuktnivån över RH_{crit} har inte kunnat verifierats på ett tillfredsställande sätt.

Det är rimligt att bildningshastigheten påverkas av fuktnivån på något sätt. Det enklaste sambandet vore dock att reaktionen inte sker vid fukttillstånd under RH_{krit} och med maximal hastighet över det. Detta redovisas som A i figur 11.1.

Genom erfarenheter från SBS-utredningar som förmedlats av Kumlin (2000) kan det vara rimligare att anta att bildningshastighet ökar med ökande fuktnivå, över RH_{krit} . Det enklaste sambandet är då en rät linje enligt B i figur 11.1. Detta samband för bildningshastigheten är det som använts i beräkningsmodellen.

Sambandet mellan bildningshastigheten och RH behöver inte vara linjärt. I figur 11.1 ges även exempel på två tänkbara olinjära samband. Samband C är ett mellanting mellan samband A och B. Samband D är en funktion där hastigheten ökar kraftigt med ökande fuktnivå, över RH_{krit} .



11.1 Fyra tänkbara antaganden av bildningshastigheten som funktion av fuktillståndet. Antagandet enligt linje B har använts i beräkningsmodellen.

Även fast sambandet mellan RH och bildningshastigheten är okänt finns viss kunskap om reaktionen genom de mätningar som redovisas i kapitel 3. I de mätningarna visades det dels att reaktionen går snabbare vid högre pH och dels att det bildas mer nedbrytningsprodukter vid större limmängd.

11.6 Emission av VOC från ytan

Beräkningarna som redovisas i kapitel 10 visar att fuktillståndet i betongen är avgörande för emissionen från ytan. Skillnader hos fuktillståndet på någon enstaka %RH ger markant olika emissionshastighet.

11.7 Deponerad OCIC i betongen

Koncentrationen deponerade nedbrytningsprodukter i betongen kan vara mycket stor efter en tids nedbrytning an limmet. Det är idag svårt att uttala sig om den totala koncentrationen OCIC eftersom mätningarna är gjorda på den fria koncentrationen. För att översätta till den totala mängden behövs en verifierad bindningsisoterm.

Vi vet dock från skadeutredningar att den deponerade mängden OCIC kan ge upphov till SBS. Denna kunskap har vi genom att det gjorts riktade åtgärder mot dessa problem som minskat eller helt avlägsnat brukarnas besvär. I de fall åtgärderna enbart inneburit byte av golvbeläggningen utan att åtgärda OCIC har det vid flera fall inneburit att besvären återkommit hos brukarna efter kort tid.

Den bundna mängden är följaktligen mycket större än summan av den fria koncentrationen i luften och den som är bunden i fukten i porsystemet.

11.8 Praktisk tillämpning av koncentrationer i betongen

Det är svårt att fastställa ett säkert gränsvärde för koncentrationen av OCIC som deponerats i betongen. De ämnen som vi hittills studerat är spårämnen som visar på avvikelser i konstruktionen och inte säkert kan förklaras orsaka SBS. Enligt försiktighetsprincipen kan det ändå vara lämpligt att minska alla emissioner från materialen i en byggnad. Det gäller också emissionen från en fuktskada inklusive deponerade OC.

Enligt Svenska Inneklimatinstitutet (1990) kan nya material delas in i materialemissionsklasser. MEC-A (Material Emission Class) står för lågemitterande material och ytskikt med högsta emissionsfaktorn vid 20°C och 50% RH av $40\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$. MEC-B är medelemitterande material och ytskikt med övre gränsen $100\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ och MEC-C står för högemitterande material och ytskikt utan övre gräns på emissionsfaktorn.

MEC-A är den klassen som projektörer strävar efter att använda vid uppförandet av sunda hus. Eftersom kraven på emission från materialen i denna klass är $40\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ kan det vara rimligt att emissionen från sammansatta konstruktioner i huset inte heller tillåts öka över denna nivå under husets livslängd.

Seifert (1990) skriver att "No individual VOC should exceed 50% of the concentration allotted to its class and 10% of the TVOC concentration". Med Seiferts resonemang och krav på lågemitterande byggnadskonstruktioner får EF för ett enskilt ämne inte överstiga $4\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$. Vid emission från nedbrytning av golvläm är alkoholerna BuOH och EtHx de dominerande ämnena.

Med en vanlig PVC-matta som har genomgångsmotståndet $R_{fc} = 3,7\cdot 10^6$ s/m för butanol innebär det att skillnaden mellan koncentrationen butanol på ömse sidor om golvbeläggningen högst får vara $4,1\cdot 10^{-6}$ kg/m³ vid maximal emission $4\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$. Motsvarande värde för motståndet för etylhexanol är $R_{fc} = 0,38\cdot 10^6$ s/m och ger en maximal skillnad hos koncentrationen på ömse sidor golvbeläggningen $0,4\cdot 10^{-6}$ kg/m³.

Fler värden för OC vid olika koncentrationer under mattan samt täthet hos golvbeläggningen är utvärderade i tabell 2.3. I tabellen har en streckad linje lagts in vid $EF = 4\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ och en heldragen vid $40\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$. Dessa relaterar till gränserna för lågemitterande material enligt MEC-A respektive enligt Seiferts resonemang.

Tabell 11.1 Emissionsfaktor [$\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$] vid olika genomgångsmotstånd mot OC hos golvbeläggningen och ytkoncentrationer av OC. Rumskoncentrationen av OC försummas.

$c_s \setminus R_{fc}$		R_{fc} - genomgångsmotstånd mot OC $\cdot 10^6$ [s/m]					
		4 000	400	40	4	0,4	0,04
Ytkoncentration i betong, c_s 10^{-6} [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	0,11	0,0001	0,001	0,01	0,1	1	10
	1,1	0,001	0,01	0,1	1	10	100
	11	0,01	0,1	1	10	100	1 000
	22	0,02	0,2	2	20	200	2 000
	55	0,05	0,5	5	50	500	5 000
	110	0,1	1	10	100	1 000	10 000
	220	0,2	2	20	200	2 000	20 000
	1 100	1	10	100	1 000	10 000	100 000
	11 000	10	100	1000	10 000	100 000	1 000 000

Enligt Boverket (1994) finns det erfarenheter från de större städerna i Sverige att TVOC-halter på mellan 150 – 300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ normalt leder till mycket få besvär. Det är dock mycket osäkert vad värdena baseras på och hur de är framtagna. Den svenska ventilationsguiden för bostäder BFR (1993) anger dock 200 resp. 400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ för sina bästa komfortklasser.

Enligt försiktighetsprincipen är det rimligt att försöka begränsa förekomsten av kemiska ämnen i rumsluften. Låt oss anta att 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ är den högsta koncentration vi accepterar av försiktighetsskäl, även då vi inte kan säga att ämnena är skadliga för brukarnas hälsa. Detta är inlagt som en heldragen begränsningslinje i tabell 11.2 som beskriver golvet bidrag till rumskoncentrationen vid olika EF och ventilationsgrad.

Tabell 2.11 bygger på att man uttrycker rumskoncentrationen som summan av emissionsfaktorer delat med ventilationsgraden och rumshöjden, se ekvation 11.1.

$$TVOC = \frac{\sum EF [\text{ng}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})]}{Vent [\text{oms}] \cdot \text{rumshöjd} [\text{m}]} \quad [\text{ng} / \text{m}^3] \quad (11.1)$$

Det är rimligt att begränsa en enskild källas bidrag till rumsluftens koncentration. Om man exempelvis låter 10% av koncentrationen härstamma från en enskild källa, då maximeras golvet bidrag till 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Detta är inlagt som en prickad begränsningslinje i tabell 11.2.

Tabell 11.2 Bidraget till rumskoncentration [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] vid olika emissionsfaktor från golvet och ventilationsgrad. Beräkningarna baseras på ekvation 11.1. Rumshöjden är 2,40m.

oms \ EF		EF - emissionsfaktor från golvet [$\mu\text{g}/(\text{m}^2\text{h})$]					
		1	10	20	40	100	1 000
Ventilationsgrad [oms/h]	50	0,008	0,083	0,167	0,333	0,833	8,33
	10	0,042	0,417	0,833	1,67	4,17	41,7
	5	0,083	0,833	1,67	3,33	8,33	83,3
	2	0,208	2,08	4,17	8,33	20,8	208
	1	0,417	4,17	8,33	16,7	41,7	417
	0,5	0,833	8,33	16,7	33,3	83,3	833
	0,2	2,08	20,8	41,7	83,3	208	2080

11.9 Konklusion

Sekundära emissioner som avges från en golvkonstruktion bestående av limmad matta på betonggolv kan härröra från en kemisk reaktion som bryter ned limskiktet. Något bidrag som härstammar från komponenter i mattan har inte kunnat identifierats i denna studie.

Avgörande för reaktionen, och därmed den framtida emissionen från konstruktionen, är alkaliteten och fuktnivån i betongytan som är i kontakt med limmet. Reaktionen är en alkaliska hydrolys där hydroxidjoner katalyserar nedbrytningen av akrylat- och eventuellt acetatsampolymererna som utgör en betydande del av limmet, cirka 25% av torrvikten. Fuktnivån i ytan bestäms bland annat av byggfukten i betongen och fukttillskott på ytan, från till exempel limfukt. Byggfukten kan kontrolleras med en fuktmätning på karakteristiskt djup. Ytfuktens inverkan minskar vid uttorkning av betongen i torrt torkklimat, RH < 60%.

Förutom att reaktionsprodukterna vandrar upp genom mattan och emitterar till inomhusluften kan de också vandra ner i betongen och fixeras. Den deponerade mängden nedbrytningsprodukter i betongen (OCIC) utgör en stor andel av den totala mängden skapade nedbrytningsprodukter. De deponerade nedbrytningsprodukterna kan avgå till inomhusluften under lång tid efter det att reaktionen upphört. OCIC kan vara en betydande källa för flyktiga kolväten (VOC) i inomhusluften efter att en fuktskadad golvkonstruktion renoverats om inte särskild omsorg ägnats de deponerade ämnena.

Dessa processer kan nu kvantifieras med den modell som tagits fram i projektet. Modellen förefaller kunna beskriva många praktiska tillämpningar på ett korrekt sätt. Modellens prognoser är dock kraftigt beroende av tillförlitligheten hos de parameterindata som finns tillgängliga. Här saknas så gott som helt data för de material som används idag. Mätmetoder för att ta fram dessa behöver utredas mera och modellen behöver valideras mot noggrannare laboratorie-fältnätningar.

12 Fortsatt forskning och utveckling

Låt oss för en stund bortse från faktumet att vi egentligen inte vet vad som orsakar SBS och istället acceptera de nordiska skadeutredarnas erfarenheter att det finns en koppling mellan sekundär emission från nedbrutet lim och SBS. I så fall kan vi få ett hanterbart problem och dels inrikta våra resurser på att lära oss mer om denna koppling och dels lära oss att minska dessa emissioner. Det kan vara en framkomlig väg att minska SBS i många byggnader. För att lära oss att minska den sekundära emissionen måste vi sätta förståelsen av de bakomliggande fysikaliska sambanden i centrum. Forskning som bygger på svaga medicinska statistiska samband, mellan ohälsa och byggnadstekniska parametrar i allmänhet, kan inte ge den kunskap som behövs till detta.

Den kunskap och de forskningsresultat som finns idag inom detta område kan räcka för att ge rekommendationer om hur nedbrytning skall undvikas vid nyproduktion med befintliga materialkombinationer. Vill man däremot utforma nya golvkombinationer där speciella material väljs för att öka säkerhetsmarginalen finns det ett behov av mer kunskap om de bakomliggande mekanismerna och materialens egenskaper.

Vid utredning av en fuktrelaterad skada i en byggnad behövs ofta mycket säkrare kunskap om materialegenskaper, skademekanismer och kritiska gränsvärden för att beskriva orsakssambandet. Den kunskapen finns idag att tillgå när det gäller fukt, men är inte alls lika stor om man så bara går ett steg längre och ser till följdverkningen av fukt, exempelvis emissioner och hälsoeffekter från nedbrytning av limmet eller mögelangrepp. Ofta vill skadeutredaren till och med skriva historia utifrån den tillståndskontroll och de undersökningsfynd som görs i objektet. Detta har visat sig vara mycket mer kunskapskrävande än att veta hur man gör rätt från början.

De samband och kritiska nivåer som styr nedbrytningen av golvkonstruktionen är ännu inte tillräckligt kartlagda. Det behövs mer kunskap om hur olika fukt- och pH-nivåer påverkar mekanismen bakom nedbrytningen av limskiktet. Vi vet idag inte hur temperaturen påverkar förloppet eller om vi kan hindra det genom att basera limmet på andra polymerer. Vi vet dock att vi inte får samma nedbrytningsprodukter.

Att beskriva de ingående materialen på ett relevant sätt är också viktigt för att kunna förutspå och skriva historia. Bindningskapaciteten av OCIC för betong men också för lim och matta behöver mätas och verifieras. Dessa har stor betydelse för att kunna bedöma hur stor mängd OC som kan finnas lagrade i materialen och utgör en framtida emissionskälla. Även diffusionskoefficienter är viktiga materialegenskaper som behöver bestämmas för att kunna göra dessa bedömningar.

De beräkningsverktyg som vi använder idag för fukt och dess skadeverkningar behöver förbättras för att lösa relevanta uppgifter med godtagbar noggrannhet. Idag är verktygen snarare utformade för forskare än för industrin. Ofta är det svårt att inse när de kan användas, vilka förenklingar som görs och därmed hur tillförlitliga resultaten är. Det krävs en utveckling av lättanvända

beräkningsverktyg som bygger på accepterad och väldokumenterad kunskap för att lösa industins problem.

Ingångsuppgifterna som används till dessa program har ofta brister och borde även de förbättras. Materialdata är ofta gamla, nya materialkvaliteter och förbättrade mätmetoder har ofta utvecklats efter det att egenskaperna bestämdes. De kritiska gränsvärden som beräkningsresultaten jämförs med behöver undersökas bättre. Inom fuktmekniken och dess skadeverkningar är de ofta dåligt underbyggda uppskattningar som gäller för gamla materialkvaliteter. Genom att klara ut mekanismerna för de olika skadetyperna kan det kritiska värdet bestämmas hos relevanta parametrar för varje skadetyper och material.

För att med säkerhet kunna värdera effekten av de mellanskikt i form av avjämningsmassor, alkali- och fuktspärrar som finns på marknaden idag behöver dessa undersökas. Vi behöver kartlägga och förstå deras materialegenskaper och påverkan på golvsystemet som helhet för att avgöra om de bidrar med positiva egenskaper till en golvkonstruktion.

13 Referenser

- Afshari A. 2000. Determination of VOC Emissions from Surface Coatings by Environmental Test Chamber Measurements. Inst. för Installationsteknik. Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg. Dokument D46:1999. 152 sidor.
- Ahlgren L. 1972. Fuktfixering i Porösa Byggnadsmaterial. Fuktgruppen i Lund, Avd. För Byggnadsmaterial, Lunds tekniska högskola. Rapport 36. 200 sidor.
- Ahlgren L, Bergström S G, Fagerlund G, Nilsson LO. 1976. Fukt i Betong. Stockholm: CBI kursverksamheten.
- Alexandersson J. 1998. Långtidseffekter av alkalisk nedbrytning i golv. Golv till tak nr 3, 1998. 3 sidor.
- Andersson K, Bakke JV, Bjørseth O, Bornehag CG, Clausen G, Hongslo JK, Kjellman M, Kjærgaard S, Levy F, Mølhav L, Skerfving S and Sundell, 1977. TVOC and health in non-industrial indoor environments. Rapport från ett nordiskt konsensusmöte för forskare, Långholmen, Stockholm, 1996. Indoor Air 1997;7. Sida 78 – 91.
- ASTM 1985 Standard E104-85. Standard Practice for Maintaining Constant Relative Humidity by Means of Aqueous Solutions. American Society for Testing and Materials, USA. 3 sidor.
- Atlassi E. 1995 Influence of silica fume on the properties of concrete at varying water-ratios. 2nd CANMET/ACI International Symposium on Advances in Concrete Technology, Las Vegas, June 1995.
- Atlassi E, Norling K, Radocea A. 1991. Fuktfri betong – en fråga om rätt materialkombination. Betong nr 3, 1991. Sida 24–26.
- Betonghandboken, 1994. Betonghandboken, Material, utgåva 2. AB Svensk Byggtjänst, Solna. 1127 sidor.
- BFR, 1993. Ventilationsguiden, byggherrens guide för bostadsventilation, Nybyggnad. Byggforskningsrådet, Stockholm. Publikation T19:1993. 47 sidor.
- Björk F. 1996. Kursmaterial i "Utvecklingsmöjligheter för plaster i byggtillämpningar". Institutionen för Byggnader och Installationer, KTH
- Björk F, Eriksson C-A., Karlsson S, Khabbaz F. 1999. Alkalisk nedbrytning av golvkomponenter. Två rapporter som behandlar: Kemisk nedbrytning av material i golvbjälklag. Alkalitetsmätning av golvavjämningsmassa utsatt för påskjutande alkalitet. Samt: Alkalisk nedbrytning av golvkomponenter. Institutionen för Byggnader och Installationer, KTH, Stockholm. Meddelande No 177. 49 sidor.
- Blom P. 1998. Betong i byggnader - en vurdering av konsekvenser för inneklima og helse. BYGGFORSK, Norges byggeforskningsinstitutt. Prosjektrapport 236-1998. 37 sidor.

- Boverket, 1994. Boverkets Byggregler – BBR 94, kurskompendium. Bygginfo, Stockholm. 183 sidor.
- Box G, Hunter W, Hunter S. 1978. Statistics for Experimenters. An Introduction to Design, Data Analysis, and Model Building. John Wiley & Sons, USA. 653 sidor.
- Crank J. 1975. The Mathematics of diffusion. Clarendon Press, Oxford.
- CRC 2000. Handbook of Chemistry and Physics, 81st edition 2000 - 2001. CRC press, INC., USA. 2400 sidor.
- Edenholm K. 1998. Personligt förmedlade mätresultat av Fil. Kand. Krister Edenholm. Analyscentrum, Casco products, Stockholm.
- Fagerlund G. 1982. Fuktmekaniska egenskaper, kapitel 8.6 i Betonghandboken Material. AB Svensk Byggtjänst och Cements AB. Svenskt Tryck AB Stockholm. 619 sidor.
- Fritsche M. 1996. Kemisk emission från golvlīm på betong – effekt av olika fukt- och alkalispärrar. Examensarbete vid Inst. för Byggnadsmaterial, Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg. E-96:1. 44 sidor.
- Fritsche M, Sjöberg A, Wengholt Johnsson H. 1997. Kemisk emission från golvsystem av limmad PVC-matta på självtorkande betong – inverkan av limningsteknik, torkförlopp samt cement-, lim- och mattyper. Inst. för Byggnadsmaterial, Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg. P-97:2. 17 sidor.
- GBR, 1999. Mätning av emissionsegenskaper hos sammansatta golvkonstruktioner. Branchstandard, Golvbranschens Riksorganisation, Stockholm. 8 sidor.
- Gustafsson H., Jonsson B. 1993. Trade Standards for Testing Chemical Emission from Building Materials. Part 1: Measurements of Flooring Materials. Conference Proceeding. Indoor Air '93. Helsinki. Vol 2, 437–442.
- Gustafsson H, Jonsson B, Lundgren B. 1995. Emissionen aus Beschichtungsstoffen – Stand der Technik, Analyse der Emissionen und deren Einfluß auf die Innenraumluft. (Bidragets titel:) Chemical Emission from Paints and Other Surface Materials – Measurements with Field and Laboratory Emission Cell (FLEC) and other climate chambers. Kontakt & studium Band 478, Expert verlag. Sid 95 – 105.
- Gustafsson H. 1996. Golvmaterial på olika typer av fuktiga betonggolv – översikt och kommentarer till undersökningar med inriktning på kemisk nedbrytning och emission. Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut, Borås. SP-RAPPORT 1996:25. 27 sidor.
- Hedenblad G, Nilsson LO. 1987. Kritiska Fukttillstånd För Några Byggnadsmaterial, Preliminär Undersökning Fuktgruppen i Lund, Avd. för Byggnadsmaterial, Lunds tekniska högskola. Rapport TVBM-3028. 47 sidor.

- Hedenblad G, Jans M. 1994. Inverkan av alkali på uppmätt RH i betong. , Avd. för Byggnadsmaterial, Lunds tekniska högskola. Rapport TVBM-3057. 26 sidor.
- Hedenblad G. 1996. Materialdata för Fukttransportberäkningar, Byggeforskningsrådet T19:1996.
- Hedenblad G. 1997. Drying of Construction Water in Concrete, drying times and moisture measurements. Byggeforskningsrådet, Stockholm. T9:1997. 54 sidor.
- Hilleborg 1975. Kompendium i Byggnadsmateriallära för V3. Avd. för Byggnadsmaterial, Lunds tekniska högskola. 151 sidor.
- Konieczny H. 1997. Gypsum and Gypsum Based Screeds. Examensarbete vid . Inst. för Byggnadsmaterial, Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg. E-97:2. 88 sidor.
- Kumlin A. 2000. Personlig samtal med C. Ing Anders Kumlin, AK-konsult Indoor Air AB. Stockholm.
- McQuarrie D A., Rock P A., 1991, General Chemistry, third edition. W. H. Freeman and Company, New York. 1991. 1083 sidor.
- Meinighaus R. 2000a. Gravimetric Studies on VOC Adsorption By Indoor Materials Under near-Ambient Conditions. Utkast till artikel som accepterats av Indoor G Built Environment.
- Meinighaus R. 2000b. Personligt samtal med Ph.D. Roman Meinighaus, INERS – Institut National de L'environnement Industriel et des Risques, France.
- Nevander LE, Elmarsson B. 1994. Fukthandboken – praktik och teori. AB Svensk Byggtjänst, Stockholm. ISBN 91-7332-716-6. 538 sidor.
- Nilsson LO. 1979. Fuktmetning, Del 2 av Byggefukt i betongplatta på mark – torknings- och mätmetoder. Avd. för Byggnadsmaterial, Lunds tekniska högskola. Rapport TVBM-3008. 75 sidor.
- Nilsson LO. 1980. Hygroscopic Moisture in Concrete – Drying, Measurements & Related Material Properties. Avd. för Byggnadsmaterial, Lunds tekniska högskola. Rapport TVBM-1003. 162 sidor.
- Nilsson LO. 1984. Fukt i flytspackel. Verksamheten 1981 – 84; Fuktgruppen vid LTH, Lund. Fuktgruppen informerar 1984:1.
- Nilsson LO. 1987. Temperature effects in relative humidity measurements on concrete – some preliminary studies. Proceedings of Nordic Symposium on Building Physics, Lund. BFR-Rapport D13:1988. 7 sidor.
- Nilsson LO. 1992. A Theoretical Study on the Effects of Non-linear Chloride Binding on Chloride Diffusion Measurements in Concrete. . Inst. för Byggnadsmaterial, Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg. P-92:13. 40 sidor.

Nilsson LO, Luping T. 1992. Relations Between Different Transport Parameters, section 3 in Performance Criteria for Concrete Durability. E & FN Spon, London. Rilem Report 12. 327 sidor

Nilsson LO. 1994. Fukt och Betong, kapitel 14 i Betonghandboken. AB Svensk Byggtjänst och Cementa AB. Svenskt Tryck AB Stockholm. 1127 sidor.

Nodling Mjörnell K. 1997. Moisture Conditions in High Performance Concrete – mathematical modelling and measurements. Inst. för Byggnadsmaterial, Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg. P-97:6. 126 sidor.

Nordtest. 1995. Building Materials: Emission of Volatile Compounds – Field and Laboratory Emission Cell (FLEC). Nordtest method NT BUILD 438. Approved 1995-11. 4 sidor.

Ramnäs O. 2000. Personlig samtal med Tekn. Dr Olle Ramnäs, Kemisk Miljövetenskap, Chalmers University of Technology, Göteborg.

RBK. 1999. Manual – Fuktmätning i betong. Sveriges byggindustrier, Stockholm. 76 sidor.

Salthammer T. 1999. Organic Indoor Air Pollutants. Occurrence, Measurement, Evaluation. WILEY-VCH. Weinheim, Germany. 329 sidor.

Salthammer T, Kephelopoulos S, Villberg K. 2000. WS29 Assessment of Material Emission on IAQ. Workshop summaries, Healthy Buildings 2000, Espoo, Finland. 6 sidor.

Schrewelius K. 1997. Personlig information av Kaj Schrewelius, Bona kemi AB, Malmö.

Schrewelius K. 2000. Personlig samtal med Kaj Schrewelius.

Sjöberg A. 1997. En mätmetod för studier av fukttillskottet till betong under nylimnad PVC-matta. Department of Building Materials, Chalmers University of Technology, Göteborg. P-97:4. 21 sidor.

Sjöberg A. 1998a. Transportprocesser och reaktioner i belagda betonggolvs – olika faktorer inverkan på emission från golvkonstruktioner. Inst. för Byggnadsmaterial, Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg. P-98:13. 193 sidor. www.bm.chalmers.se/research/publika/p9813.htm

Sjöberg A. 1998b. Mätosäkerhet vid fuktmätning i betong med kapacitiva fuktgivare – en bedömning av faktorer som påverkar osäkerheten samt hur de kan minskas. Inst. för Byggnadsmaterial, Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg. P-98:1. 60 sidor. www.bm.chalmers.se/research/publika/p981.htm.

Sjöberg A. 1998c. Uncertainty in Measurements of Relative Humidity in Concrete. 5th Symposium on Building Physics in the Nordic Countries. Göteborg, Sweden. 24-26 August 1999. 8 sidor.

Sjöberg A, Wengholt Johnsson H. 1999. Fukt- och emissionsförhållanden vid limning av PVC- och linoleummatta på betong. Inst. för Byggnadsmaterial, Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg. P-99:1.

Svenska Betongföreningen 1997. Betong för sunda golv - fuktdimensionering, materialval och produktion. Svenska betongföreningens rapportserie, rapport nr 6. Stockholm. 36 sidor.

Svenska Inneklimatinstitutet (1990). Klassindelade Inneklimatsystem - riktlinjer och specifikationer. SCANVAC Riktlinjeserien, Rapport R1. Stockholm. 63 Sidor.

Tutti K. 1982. Corrosion of Steel in Concrete. Cement och Betong Institutet (CBI). Stockholm. No4.82.

Wengholt Johnsson H. 1995. Kemisk emission från golvsystem – effekt av olika betongkvalitet och fuktbelastning. Inst. för Byggnadsmaterial, Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg.. P-95:4. 58 sidor.

Wengholt Johnsson H. 1998. Golvmaterial på betongunderlag – fältmätningar av torktider och emissioner i kv Gärdsrået, Umeå. NCC / SBUF. 27 sidor.

Wolkoff P, Clausen P A, Nielsen P A, Gustafsson H, Jonsson B, Rasmusen E. 1991 Field and Laboratory Emission Cell: FLEC. Conference Proceeding. Healthy Building '91. Washington D.C. Sida 160–165.

Xu A. 1992. Structure of hardened cement - fly ash systems and their related properties. Inst. för Byggnadsmaterial, Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg.. P-92:7. 296 sidor.

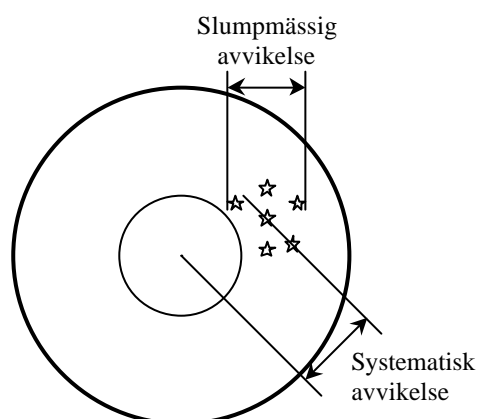
Bilaga 1 Osäkerhet vid RH-mätning med elektriska instrument

Mätosäkerheten för de tre metoderna som byggde på RH-mätningar med elektriska instrument har tagits fram genom att tillämpa anvisningarna som ges i Sjöberg (1998b), rapporten sammanfattas även på engelska i Sjöberg (1998c). I den här bilagan görs en genomgång av de faktorer som inverkar i respektive metod.

Allmänt

Vid bedömning av totala osäkerheten beaktas både systematiska och slumpmässiga effekter. Dessa effekter summerades på det förenklade sätt med kvadratsummor som beskrivs senare i denna bilaga och i Sjöberg (1998b,c)

Systematiska och slumpmässiga avvikelser (faktorer) kan beskrivas med hjälp av träffbilderna på en måltavla, figur B1.1. Slumpmässig avvikelse (spridning, precision) motsvarar spridningen i träffbilderna. Systematisk avvikelse (accuracy, bias) är skillnaden mellan måltavlans mittpunkt och mitten av träffbilderna.



Figur B1.1 Systematisk och slumpmässig avvikelse illustrerade som träffbild på en måltavla.

De systematiska och slumpmässiga effekter som inverkar på resultatet vid RH-mätningar kommer i huvudsak från några få källor. Vid mätning av relativ fuktighet i material kan följande uppdelning göras mellan fyra olika huvudkällor.

- Mätinstrumentet, det vill säga faktorer som uppkommer på grund av egenskaper hos materialen som instrumenten är gjorda av, eller på grund av elektronikens uppbyggnad i instrumenten.
- Kalibrering av mätinstrumentet som görs för att minska dess mätosäkerhet samt att korrigera avvikelser.
- Handhavande av utrustning vid och mellan RH-mätningar.
- Utvärdering av mätdata

Nedan beskrivs de fyra huvudkällorna samt de faktorer hos dem som inverkar på resultatet.

Mätinstrument

Osäkerhet i mätvärdena på grund av instrumentet kan kompenseras genom att en kalibrering görs. Intervallet mellan kalibreringarna skall anpassas efter mätinstrumentets stabilitet och prestanda så att inga stora förändringar hos instrumentet hinner ske mellan kalibreringarna.

Enligt Vaisala OY är den totala osäkerhet för de använda proberna $\pm 2\%RH$ i intervallet 0-90%RH samt $\pm 3\%RH$ i intervallet 90-100%RH. Osäkerheten vid temperaturmätningar är $\pm 0,3^\circ C$. Inga uppgifter om värdenas täckningsfaktorer uppges. Denna osäkerhet anses vara väl tilltagen, kanske orimligt stor i vissa fall. Därför har det gjorts en mer exakt utvärdering av de instrument som använts i denna studie. Källor till osäkerheter i RH-mätningar som kan särskiljas hos mätinstrumentet är:

Systematiska faktorer

- a) Icke-linearitet hos RH-instrument.
- b) Drift hos RH-prob, det vill säga mätvärdet för en prob ändras med tiden.

Slumpmässiga faktorer

- c) Hysterés hos RH-prob, det vill säga olika kalibreringskurvor vid uppfuktning respektive uttorkning av RH-proben.

Kalibrering

Kalibreringen är till för att kvantifiera storleken på avvikelser och eventuella osäkerheter i mätinstrumentet. Den korrektion som tas fram vid en kalibrering är även den behäftad med en mätosäkerhet som måste beaktas.

Exempel på faktorer som ger osäkerhet i kalibreringen är:

Systematiska faktorer

- d) Temperaturavvikelse under kalibrering.

Slumpmässiga faktorer

- e) Slumpmässiga faktorer hos saltlösningar.
- f) Temperaturvariationer under kalibrering.
- g) Övriga faktorer vid kalibrering.
- h) Total mätosäkerhet för kalibrering i tvåtrycks fuktgenerator.

Handhavande

Faktorer som uppstår på grund av handhavande kan inte kalibreras bort. De kan bara undvikas genom ett korrekt handhavande eller i vissa fall genom korrigerings av mätvärdena i efterhand.

Sammanställningen av faktorer som uppstår vid handhavande förutsätter att mätningen utförs på korrekt sätt och att inte ytterligare faktorer uppstår på grund av felaktigt handhavande.

Systematiska faktorer

- i) Fuktmätningen görs vid annan temperatur än vid kalibrering.
- j) Fuktmätningen görs vid annan temperatur än i bruksskedet.
- k) Förvaring av RH-prob i torr miljö.
- l) Fuktkapacitet hos RH-prob vid mätning på uttagna provbitar.
- m) Fuktkapacitet hos RH-prob vid mätning i borrhål.
- n) Temperaturskillnad mellan sensor och betong.
- o) Nyligen borrade mätthål.
- p) Avvikande alkalitet.

Slumpmässiga faktorer

- q) Temperaturvariation under mätning.
- r) Ojämnt uttagna prover.
- s) Kondens i provrör vid transport av uttagna prover.
- t) Avvikelser i mätthålets djup.

Utvärdering

Det finns faktorer som kan påverka resultatet vid utvärdering, vilka inte berörs av mätningen eller mätinstrumentets prestanda. Inverkan av dessa faktorerna kan tas hänsyn till genom en riktig och noggrann utvärdering av mätdata. I många fall kan till och med en korrigerings av dessa faktorerers inverkan göras i efterhand.

Systematiska faktorer

–

Slumpmässiga faktorer

- u) Felaktig plattjocklek.

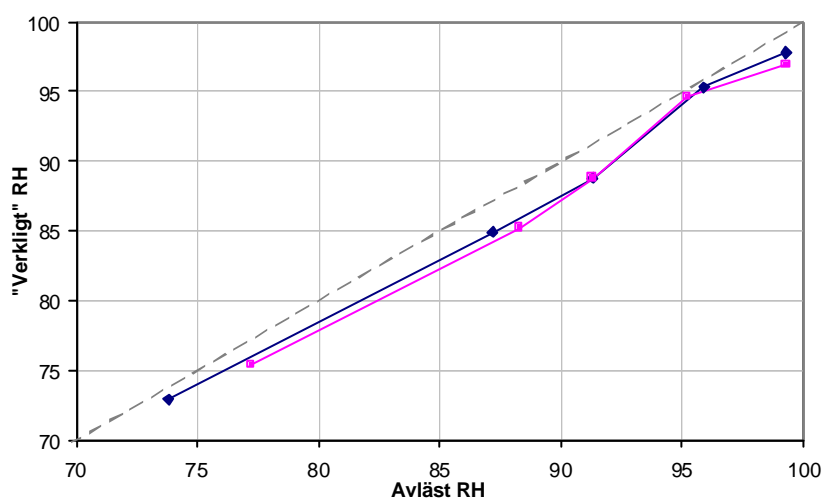
Metod 1, Mätning med elektriska RH-prober i ingjutna mätrör.

I denna metod användes RH-prob HMP 36 och handinstrument HMI 31 från Vaisala. Mätningen gjordes i speciella rör som monterades i provkropparna innan gjutning. Proberna stoppades in i rören ett dygn innan mätningen. Kalibrering av RH-instrumenten gjordes mot jämvikts-RH ovanför mättade saltlösningar före och efter mätningar.

Nedan diskuteras och kvantifieras de faktorer som bidrar till mätosäkerheten i metod 1.

a) Icke-linearitet hos RH-instrument

RF-prob HMP 36 från Vaisala som användes i denna metod bedöms ha en olinearitet av samma storleksordning som beskrivs i Hedenblad (1995). Maximala skillnaden är 2%RH mellan avläst RH och ”verkligt” RH: Maximal skillnad uppkommer vid fuktnivån 90%RH, se figur B1.2.



Figur B1.2 Olinearitet hos RH-prob, uppmätt vid två olika laboratorier enligt Hedenblad (1997).

Värdet på olinearitet som Hedenblad (1995) redovisar är 2%RH avvikelse vid 90%RH. Antag att den avvikelsen är normalfördelad med 90% konfidensintervall. Standardiserade mätosäkerheten ($S_a^\#$) blir då:

$$S_a^\# = \frac{2}{1,645} = 1,22\%$$

där 1,645 är täckningsfaktorn vid dubbelsidigt konfidensintervall med 90 % sannolikhet att ”täcka” det sanna värdet.

b) Drift hos RH-prob

Med drift avses att det avlästa värdet hos en RH-prob förändras med tiden (för samma RH).

I Sjöberg (1998b) har 496 mätningar i samband med återkommande kalibrering av 17 st RH-prob HMP 36 från Vaisala utvärderats statistiskt. Utvärderingen kan inte visa på att någon systematisk drift förekommit hos proberna.

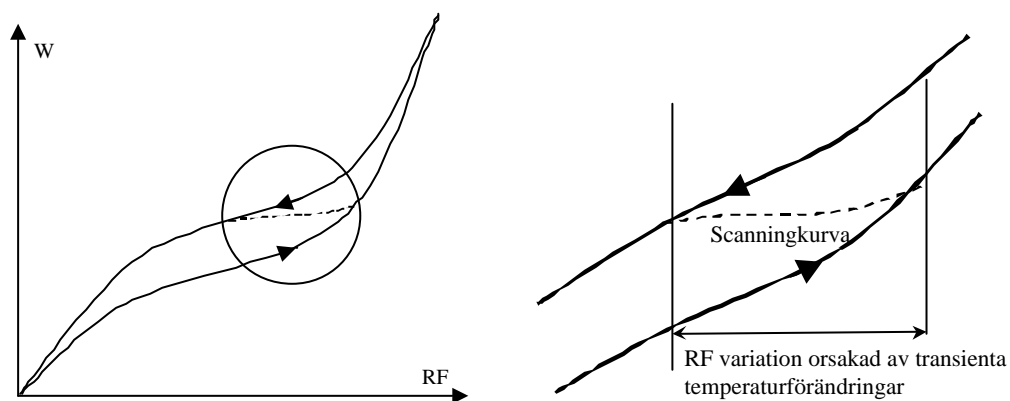
Standardiserade mätosäkerheten ($S_b^\#$) kan därför antas vara lika med noll i denna metod:

$$S_b^\# = 0$$

c) Hysterés hos RH-prob

Med hysterés hos en RH-prob menas att den följer olika kalibreringskurvor vid uppfuktning respektive uttorkning.

Om temperaturen har små transienta (snabba) variationer är avvikelserna på grund av hysterés mindre än om temperaturen är konstant. Vid små transienta temperaturändringar varierar RH hela tiden på grund av att luftens fukttillstånd är konstant medan mätnadsånghalten varierar. Fukttillståndet befinner sig utmed scanningkurvorna (övergångskurvor) och avläst RH hamnar mellan sorptionsisotermen för uppfuktning och uttorkning, se figur B1.3.



Figur B1.3 Temperaturvariationernas inverkan på jämvikts-RH på grund av hysterés.

Hedenblad (1995) anger dock att vid en undersökning som gjordes vid avdelningen för byggnadsmaterial på Lunds tekniska högskola kan hysterés på upp till 1% observeras hos RH-prober. Om vi antar att sannolikheten är normalfördelad med ett 90 procentigt konfidensintervall blir täckningsfaktorn 1,645. Standardiserade mätosäkerheten (S_c) blir då:

$$S_c = \frac{1}{1,645} = 0,61\%$$

d) Temperaturavvikelse under kalibrering

Saltlösningarnas jämvikts-RH är temperaturberoende. Avviker temperaturen i saltlösningen från den förväntade temperaturen uppstår en avvikelse. De flesta salter har ett litet temperaturberoende av jämvikts-RH. Faktorn är dock försumbar vid små temperaturavvikelser, se tabell B1.1.

Tabell B1.1 Avvikelser i jämvikts-RH ovanför mättad saltlösning på grund avvikelser i temperatur.

Salt	RH (20°C)	%RH / °C	0,1°C	0,5°C	1,0°C
Litiumklorid LiCl	11,3	0,00	0,00	0,00	0,00
Kaliumacetat $KC_2H_3O_2$	23,1	-0,09	-0,01	-0,05	-0,09
Magnesiumklorid $MgCl_2$	33,1	-0,06	-0,01	-0,03	-0,06
Kaliumkarbonat K_2CO_3	43,2	0,00	0,00	0,00	0,00
Magnesiumnitrat $Mg(NO_3)_2$	54,4	-0,30	-0,03	-0,15	-0,30
Natriumklorid NaCl	75,5	-0,03	0,00	-0,02	-0,03
Kaliumklorid KCl	85,1	-0,16	-0,02	-0,08	-0,16
Bariumklorid $BaCl_2$	91	-0,17	-0,02	-0,09	-0,17
Kaliumnitrat KNO_3	94,6	-0,18	-0,02	-0,09	-0,18
Kaliumsulfat K_2SO_4	97,6	-0,06	-0,01	-0,03	-0,06

Kaliumnitrat KNO_3 är det känsligaste saltet för temperaturavvikelser som användes vid kalibrering av RH-prober i denna studie. På grund av osäkerheten i klimatrummets temperaturnivå och interna värmekällor, exempelvis belysning och mättekniker, är det inte helt säkert att saltlösningen höll exakt +20°C.

Eftersom inte storleken på skillnaden är känd så uppskattades den ha maximivärdet 1,0°C. Det är rimligt att anta att temperaturskillnaden är normalfördelad och att sannolikheten för maximala temperaturskillnaden (1,0°C) skall överskridas är mindre än 1%. Konfidensintervallet är då 99% och täckningsfaktorn 2,576. Den standardiserade osäkerheten ($S_d^{\#}$) blir:

$$S_d^{\#} = \frac{-0,16}{2,576} = -0,06$$

e) Slumpmässiga faktorer hos saltlösningar

Under ideala förhållanden anger ASTM E104 (85) en osäkerhet eller noggrannhet (accuracy) som är beroende av vilket salt som används och lösningens temperatur. Tabell B1.2 redovisar osäkerhet i jämvikts-RH vid mättade saltlösningar enligt ASTM E 104 (1985) samt standardiserad mätosäkerhet, ur Sjöberg (1998b,c).

Tabell B1.2 Osäkerhet i jämvikts-RH vid mättade saltlösningar enligt ASTM E 104 (1985).

Salt	RH (20°C)	Osäkerhet	Std. mät-osäkerhet
Litiumklorid LiCl	11,3	± 0,3	0,17
Kaliumacetat $\text{KC}_2\text{H}_3\text{O}_2$	23,1	± 0,3	0,17
Magnesiumklorid MgCl_2	33,1	± 0,2	0,12
Kaliumkarbonat K_2CO_3	43,2	± 0,3	0,17
Magnesiumnitrat $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$	54,4	± 0,2	0,12
Natriumklorid NaCl	75,5	± 0,1	0,06
Kaliumklorid KCl	85,1	± 0,3	0,17
Bariumklorid BaCl_2	91	± 2	1,2
Kaliumnitrat KNO_3	94,6	± 0,7	0,40
Kaliumsulfat K_2SO_4	97,6	± 0,5	0,29

Kaliumnitrat KNO_3 är det salt som har störst standardiserad mätosäkerhet, på grund av denna effekt, som användes vid kalibrering av RH-prober i detta arbete. Standardiserade mätosäkerheten (S_e) blir då:

$$S_e = 0,40\%$$

f) Temperaturvariationer under kalibrering

Transienta (snabba) temperaturvariationer i den luft som står i jämvikt med saltlösningen ger avvikelser från förväntat RH-värde. Vid dessa transienta temperaturförlopp hann inte jämvikten mellan saltlösningen och luften ställa in sig. Dessa transienta temperaturförlopp kan orsakas av till exempel att en dörr öppnades, ljusets tändes eller att en person kom in i rummet, alltså händelser som vanligtvis inträffade i samband med avläsningen av RH-instrument.

Fenomenet förklaras med att luften har kvar samma ånghalt under en hastig temperatursvängning medan temperaturen och därmed mätnadsånghalten förändrades. Stiger temperaturen i luften ökar mätnadsånghalten och RH sjunker. Sjunker temperaturen minskar mätnadsånghalten och RH ökar.

Maximala teoretiska osäkerheter för vanliga variationer samt de största uppmätta variationerna redovisas i tabell B1.3. Storleken på osäkerhet som orsakas av en viss temperaturvariation beror av temperatur och RH-nivån som kalibreringen görs vid.

Tabell B1.3 Maximal teoretisk osäkerhet i RH på grund av transienta temperaturförlopp samt största uppmätta variationen i betong. Sjöberg (1998b).

Variation	Osäkerhet	Uppmätt variation
±0,1 °C	±0,6 %RF	±0,5 %RF
±0,5 °C	±3,0 %RF	±1,0 %RF
±1,0 °C	±6,0 %RF	-

Temperaturvariationerna vid mätningar i klimatstabila rummet (CA 12) är ungefär ±0,5 °C vid måttlig personbelastning enligt Sjöberg (1998a). Kalibrering med kaliumsulfat K₂SO₄ (97,6%RF) vid +20°C ger enligt Sjöberg (1998b) en osäkerhet på 2,93%RH då temperaturvariationen är ±0,5. Antag att temperaturen är normalfördelad och sannolikheten för att maximala temperaturvariationen skall överskridas är mindre än 1%. Konferensintervallet är då 99% och täckningsfaktorn 2,576. Den standardiserade osäkerheten (S_f) blir:

$$S_f = \frac{2,93}{2,576} = 1,14\%$$

där 2,576 är täckningsfaktorn vid dubbelsidigt konfidensintervall med 99 % sannolikhet att ”täcka” det sanna värdet.

g) Övriga faktorer vid kalibrering

Om inte stor noggrannhet och renlighet beaktas vid arbetet med saltlösningar är det troligt att nya faktorer uppstår som påverkade osäkerheten. Eftersom färska saltlösningar som preparerats enligt ASTM (1985) användes kan osäkerheten (S_g) försummas.

$$S_g = 0\%$$

h) Total mätosäkerhet för kalibrering i tvåtrycks fuktgenerator

Denna typ av kalibrering gjordes inte så den standardiserade osäkerheten (S_h) för denna effekt behöver inte beaktas.

i) Fuktmätning vid annan temperatur än vid kalibrering

Kalibreringar och fuktmätningar gjordes i samma laboratorielokaler och temperaturen skilde aldrig mer än 5°C. Den standardiserade osäkerheten (S_i[#]) kan därmed försummas.

$$S_i^{\#} = 0\%$$

j) Fuktmätning vid annan temperatur än i bruksskedet

Bruksskedet bedömdes vara i samma laboratorielokaler som fuktmätningar gjordes eftersom proverna aldrig lämnade dessa lokaler. Den standardiserade osäkerheten ($S_j^\#$) kan därmed försummas:

$$S_j^\# = 0\%$$

k) Förvaring av RH-prob i torr miljö

Om RH-prober förvaras i torrare miljö än den som mätningen sker i ökade tiden till jämvikt. Detta beror på att RH-sensorn har torkat och behöver tid att fuktas upp på nytt.

RF-proberna förvaras med sensorn i ett klimat på cirka 75% RF. Den standardiserade osäkerheten ($S_k^\#$) kan därför försummas.

$$S_k^\# = 0\%$$

l) Fuktkapacitet hos RH-prob vid mätning på uttagna prover

Denna metod använde sig inte av uttagna prover så den standardiserade osäkerheten ($S_l^\#$) för denna effekt behöver inte beaktas.

m) Fuktkapacitet hos RH-prob vid mätning i borrhål

En viss mängd av fukten i betongen går åt för att fukta upp RH-proben. Det resulterar i en systematisk faktor som ger ett för lågt mätvärde.

Skyddsfiltret är den detalj på RH-proben som har störst fuktkapacitet. Beroende på utförande kan fuktkapaciteten bedömas vara 4-10 mg för intervallet 40-97% RF, det vill säga att filtret tar upp 4-10 mg fukt från det stoppas i mätområdet om det varit exponerat för rumsluft till det att filtret kommer i jämvikt med den fuktiga betongen. Enligt Nilsson (1979) har ett sintrat bronsfilter en fuktkapacitet på 4,3 mg/(40% RF;97% RF) och en RH-sensor <0,5 mg/(40% RF;97% RF).

Faktorn blir mindre för en RH-prob med liten fuktkapacitet och för en diffusionsöppen betong, se tabell B1.4. Avvikelsen avtar med tiden om RH-proben får sitta kvar eftersom fukt transporterades till hålet från betongen. Som tumregel kan man säga att avvikelsen halveras var 5:e dag, Sjöberg (1998b).

En RH-prob med väldigt liten fuktkapacitet påverkar inte RH i betongen så mycket. Genom att använda ett beröringsskydd med minimal fuktkapacitet, till exempel RH-prob HMP44 från Vaisala med bortplockat "pappersfilter", kan fuktkapacitet reduceras till mindre än 1 mg.

Tabell B1.4 Systematisk avvikelse (%RF) orsakat av att fukt från borrhål i betongen med fuktnivå på 90%RH går åt för att fukta upp instucken RH-prob. Sjöberg (1998b).

Fuktkapacitet (mg)	Betongkvalitet (vct)		
	Vct = 0,4	Vct = 0,5	Vct = 0,7
1	0,7	0,6	0,5
4	2,5	2,3	2,0
10	5,3	4,7	4,2

Fuktkapaciteten hos proberna som användes i studien är ungefär 4 mg. Avläsningen sker efter ungefär ett dygn med den här metoden. Den systematiska avvikelsen ($S_m^\#$) blir då som visas i tabell B1.5.

Tabell B1.5 Systematisk avvikelse $S_m^\#$ (%RH) för olika betongkvaliteter.

	Betongkvalitet (vct)		
	Vct = 0,4	Vct = 0,5	Vct = 0,7
$S_m^\#$	2,5	2,3	2,0

n) Temperaturskillnad mellan sensor och betong

Vid temperaturskillnad mellan RH-sensor och betongen uppkommer ett systematiskt fel vid mätning. Om RH-sensorn har högre temperatur än betongen blir mätvärdet lägre än verkligt RH-värde hos betongen. Har RH sensorn lägre temperatur blir mätvärdet högre.

Provkroppar och mätutrustning har i studien förvarats i samma klimat som mätningen utfördes i. Det har alltså rimligen inte varit någon temperaturskillnad mellan sensorn på RH-proben och betongen. Den standardiserade osäkerheten ($S_n^\#$) kan därmed försummas:

$$S_n^\# = 0\%$$

o) Nyligen borrade mäthål

Mätrören är ingjutna i provkropparna, inte borrade efter att betongen härdat. Den standardiserade osäkerheten ($S_o^\#$) för denna effekt behövs därför inte beaktas.

p) Avvikande alkalitet

RH påverkas av alkaliinnehållet i betongen. Om mängden fukt i kg/m^3 är densamma för två betongtyper, som fransett alkaliinnehållet är lika, så är uppmätt RH högre för betongen med lägst alkaliinnehåll enligt Hedenblad och

Janz (1994). Porvätskan i betongen kan då liknas vid en saltlösning som får ett lägre RH i jämvikt med luften.

Eftersom det är RH i luften i betongens porer som mäts och ingen omräkning görs till fukttinnehåll kan effekten försummas och den standardiserade osäkerheten $S_p^{\#}$ blir:

$$S_p^{\#} = 0\%$$

q) Temperaturvariation under mätning

Betong är ett värme- och fuktrögt material. Temperaturen och fukttinnehållet ändras ganska långsamt. Det är inte sannolikt att det kan uppstå stora transienta temperaturvariationer i betongen. Egna mätningar som gjorts vid Institutionen för byggnadsmaterial på Chalmers visade att avvikelserna kan bli upp till 1%RF, Sjöberg (1998a).

Största uppmätta skillnaden på grund av denna effekt är 1%RH i en provkropp. Om man antar att sannolikhetsfunktionen är normalfördelad med 90% konfidensnivå blir täckningsfaktorn 1,645. Standardiserade mätosäkerheten (S_q) blir då:

$$S_q = \frac{1\% \text{ RF}}{1,645} = 0,61$$

r) Ojämnt uttagna prover

Denna metod använde inte uttagna provbitar. Mätningen sker i ingjutna mätrör. Den standardiserade osäkerheten (S_r) för denna effekt behöver därför inte beaktas.

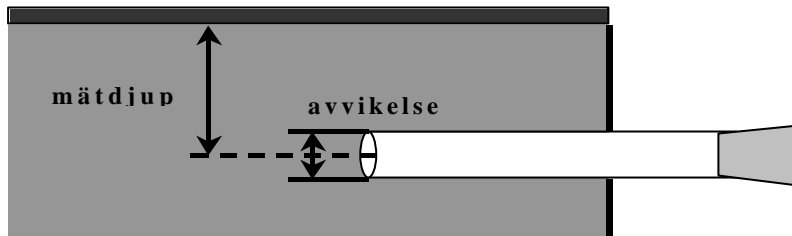
s) Kondens i provrör vid transport av uttagna prover

Denna metod använder inte uttagna provbitar. Mätningen sker i ingjutna mätrör. Den standardiserade osäkerheten (S_r) för denna effekt behöver därför inte beaktas.

t) Avvikelser i mätstålets djup

Borrhålen blir inte alltid precis så djupa som de ska vara. Denna avvikelse är till exempel viktig då RH mäts på karaktäristiskt djup vid uttorkning av betongplattor och värdet jämföras med ett kritiskt gränsvärde. Om hålet borrar för djupt kommer mätvärdet att ligga på säkra sidan medan om det däremot borrar för grunt kommer ett lägre värde än det på karaktäristiskt djup att mätas.

Mätrören som är ingjutna i provkropp 3 (skålen) har öppningen så att mätvärdet blir ett medelvärde över ett djup som är lika med innerdiametern, se figur B1.4. Placeringen av mätrören förbättrades i provkropp 4 (hinken). Där sitter de istället fast i botten och mätdjupet bestäms av avståndet från överkant av rören till ytan, se figur 2.12.



Figur B1.4 Bestämning av mätdjup.

Mätrörens position är bestämda och väl dokumenterade i denna studie. Därför kan denna effekt försummas och den standardiserade osäkerheten (S_t) blir:

$$S_t = 0\%$$

u) Felaktig plattjocklek

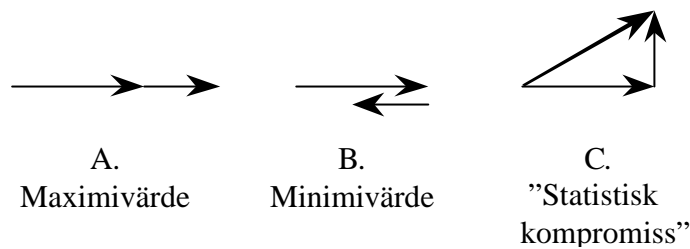
Det förekommer att uppgiften om plattans tjocklek inte stämmer med den aktuella tjockleken. Felaktigheten kan bero på att uppgiftslämnaren har blandat ihop olika siffror eller kommer ihåg fel. Det kan också bero på att plattan av någon anledning inte får det mått vid gjutning som stod angivet på ritningen. I vilket fall som helst blir utvärderingen av maximal fuktighet efter utjämning av kvarvarande byggfukt felaktig om måttet på plattans tjocklek inte är riktigt. Efter applicering av ett tätt ytskikt kommer hela plattan att få den nivå på fuktighet som rådde på karakteristiskt djup innan omfördelningen.

Eftersom provkropparnas djup samt mätrörens position är bestämda och dokumenterade kan effekten försummas och den standardiserade osäkerheten (S_u) blir:

$$S_u = 0\%$$

Total mätosäkerhet vid mätning med metod 1

För att beräkna den totala osäkerhet i metoden kombineras de 21 standardiserade mätosäkerheterna $S_a \dots S_u$. Faktorerna som påverkar osäkerheten kan antas vara normalfördelade och därför är sannolikheten att alla faktorerna samverkar fullt ut ganska liten. Sannolikheten att alla faktorerna skall ta ut varandra, alltså helt motverka varandra är också väldigt liten. En lämplig ”statistisk kompromiss” är enligt Lindskog (1994) att summera faktorerna enligt C i figur B1.5.



Figur B1.5. Figuren illustrerar tre möjligheter att kombinera mätosäkerheter. A och B ger för höga eller för låga värden medan C innebär en lämplig kompromiss enligt Lindskog (1994).

Den kombinerad standardiserad mätosäkerhet ("statistiska kompromissen") kan beräknas som:

$$S_{\text{tot}} = \sqrt{S_a^2 + S_b^2 + S_c^2 + \dots + S_s^2 + S_t^2 + S_u^2}$$

där:

S_{tot} = kombinerad standardiserad mätosäkerhet

$S_a \dots S_u$ = standardiserad mätosäkerhet för faktor a...u

Den kombinerad standardiserad mätosäkerhet har en standardiserad täckningsfaktor på 1,0 och dess konfidensintervall är lika med 68,27.

I tabell B1.6 summeras de faktorer som bidrar till den totala mätosäkerheten för metod 1.

Tabell B1.6 Sammanställning av faktorer och dess storlek, metod 1.

	namn	vct	0,4	0,5	0,7
a	olinearitet		1,22	1,22	1,22
b	drift		0	0	0
c	hysterés		0,61	0,61	0,61
d	ΔT kal.		-0,06	-0,06	-0,06
e	salt		0,40	0,40	0,40
f	ΔT^* kal.		1,14	1,14	1,14
g	kal.		0	0	0
h	2-tryck		–	–	–
i	ΔT kal./mätn.		0	0	0
j	ΔT mätn./bruk.		0	0	0
k	torr förvaring		0	0	0
l	fuktkap. prover		–	–	–
m	fuktkap. mätthål		2,50	2,30	2,00
n	ΔT sensor/betong		0	0	0
o	nya borrhål		–	–	–
p	alkalitet		0	0	0
q	ΔT^* mätn.		0,61	0,61	0,61
r	ojämnt uttagna prover		–	–	–
s	kondens		–	–	–
t	avvikelser i mätdjup		0	0	0
u	felaktig plattjocklek		0	0	0
a-u	Summa		3,15	3,00	2,77

* transienta temperaturvariationer

Metod 2, Mätning med kvarsittande elektriska RH-prober i ingjutna mätrör.

I denna metod används RH-prob HMP 44 från Vaisala och datasamlingslogger Mitec AT40 samt RH-prob HMP 36 och handinstrument HMI 31 från Vaisala. Mätningen gjordes i speciella rör som monterades i provkropparna innan gjutning. Proberna satt kvar i rören under hela mätperiodens längd. Mätperiodens längd varierade mellan 11 och 45 dygn för olika mätningar. Kalibrering av RH-instrumenten gjordes mot jämvikts-RH ovanför mättade saltlösningar före och efter mätningar.

Nedan diskuteras och kvantifieras de faktorer som bidrar till mätosäkerheten i metod 2. I brist på bättre uppgifter bedöms faktor a för RH prob HMP 44 vara desamma som för HMP 36, dessa har redan diskuterats i metod 1. Faktorena c - e, g - i, k - s bedöms vara samma som i metod 1.

b) Drift hos RH-prob

Standardiserade mätosäkerheten ($S_b^{\#}$) hos RH-prob HMP44 från Vaisala befaras vara mycket stor, detta är dock ej verifierat. Ej dokumenterade uppgifter gör gällande att det kan röra sig om flera %RH per månad.

Antag att driften är normalfördelad och sannolikheten för att maximala en drift över 3%RH mellan kalibreringarna skall överskridas är mindre än 5%. Konferensintervallet är då 95% och täckningsfaktorn 1,96. Den standardiserade osäkerheten ($S_b^{\#}$) blir:

$$S_b^{\#} = \frac{3}{1,96} = 1,53\%$$

f) Temperaturvariationer under kalibrering

Kalibreringen av prober HMP44 sker i ett isolerad aluminiumblock. Metoden beskrivs ingående i Sjöberg (1998a). De transienta temperaturvariationerna uppgår i blocket till ungefär $\pm 0,1$ °C eftersom det förvarades i ett temperaturstabil rum.

Kalibrering med kaliumsulfat K_2SO_4 (97,6%RF) vid +20°C ger enligt Sjöberg (1998b,c) en osäkerhet på 0,58%RH då temperaturvariationen är $\pm 0,1$ °C. Antag att temperaturen är normalfördelad och sannolikheten för maximala temperaturvariationen skall överskridas är mindre än 1%. Konfidensintervallet är då 99% och täckningsfaktorn 2,576. Den standardiserade osäkerheten (S_f) blir:

$$S_f = \frac{0,58}{2,576} = 0,23\%$$

m) Fuktkapacitet hos RH-prob vid mätning i borrhål

En viss mängd av fukten i betongen går åt för att fukta upp proben. Det här systematiska faktorn ger ett för lågt mätvärde. Avvikelsen avtog med tiden om RH-proben får sitta kvar eftersom fukt transporterades till hålet från betongen. Som tumregel kan man säga att avvikelsen som visas i tabell B1.5 halveras var 5:e dag.

Eftersom proberna får sitta kvar i mätrören i den här metoden är denna effekt störst i början av mätningen och liten i slutet. Mätningarna varade i snitt 18 dygn. Mittan av mätningen inföll alltså i medel efter 9 dygn och effekten har då nästan halverats två gånger enligt tumregeln.

Fuktkapaciteten hos proberna som använts i studien är ungefär 4 mg. Mätningen sker över en lång period och det kan antas att effekten halverats i medeltal två gånger. Den systematiska avvikelsen ($S_m^{\#}$) blir då som visas i tabell B1.7.

Tabell B1.7 Systematisk avvikelse ($S_m^{\#}$) för olika betongkvaliteter.

S (mg)	Betongkvalitet (vct)		
	Vct = 0,4	Vct = 0,5	Vct = 0,7
$S_m^{\#}$	0,63	0,58	0,50

t) Avvikelser i mätstålets djup

Mätrörens position bestämdes i efterhand med mätlocka. Noggrannheten i mätningen är uppskattningsvis bättre än $\pm 0,5$ mm. I Sjöberg (1998b,c) beskrivs att en vanlig fuktgradient är 3%RF/cm.

Antag att det är väldigt liten sannolikhet att rörets position mättes mer än 0,5 mm fel och att det innebar $\pm 0,15\%$ RH ($0,05 \text{ cm} \cdot 3 \text{ \%RF/cm}$). Låt säga att konfidensintervallet är 99%, då blir täckningsfaktorn 2,576. Om felmätningen bedömdes vara normalfördelad blir den standardiserade mätosäkerheten (S_t) lika med:

$$S_t = \frac{0,15}{2,576} = 0,06\%$$

Total mätosäkerhet vid mätning med metod 2

I tabell B1.8 summeras de faktorer som bidrar till den totala osäkerheten för metod 2.

Tabell B1.8 Sammanställning av faktorer och dess storlek, metod 2.

vct	namn	0,4	0,5	0,7
a	olineritet	1,22	1,22	1,22
b	drift	1,53	1,53	1,53
c	hysterés	0,61	0,61	0,61
d	ΔT kal.	-0,06	-0,06	-0,06
e	salt	0,40	0,40	0,40
f	ΔT^* kal.	0,23	0,23	0,23
g	kal.	0	0	0
h	2-tryck	–	–	–
i	ΔT kal./mätn.	0	0	0
j	ΔT mätn./bruk.	0	0	0
k	torr förvaring	0	0	0
l	fuktkap. prover	–	–	–
m	fuktkap. mätthål	0,63	0,58	0,50
n	ΔT sensor/betong	0	0	0
o	nya borrhål	–	–	–
p	alkalitet	0	0	0
q	ΔT^* mätn.	0,61	0,61	0,61
r	ojämnt uttagna prover	–	–	–
s	kondens	–	–	–
t	avvikelser i mätdjup	0,06	0,06	0,06
u	felaktig plattjocklek	0	0	0
a-u	Summa	2,28	2,26	2,24

* transienta temperaturvariationer

Den eventuella avvikelsen i fuktnivå mellan betongen precis ovanför röret och övrig betong på samma avstånd från ytan har inte tagits hänsyn till i denna uppskattning. Avvikelsen blir troligtvis större vid mindre avståndet mellan röret och ytan.

Metod 3, Mätning med elektriska RH-prober på uttagna prover i provrör.

I denna metod användes RH-prob HMP 36 och handinstrument HMI 31 från Vaisala. Mätningen gjordes i provrör där betongbitar från provkroppen placerats. Proberna stoppades in i rören ett dygn innan mätningen. Kalibrering av RH-instrumenten gjordes mot jämvikts-RH ovanför mättade saltlösningar före och efter mätningar.

Nedan diskuteras och kvantifieras de faktorer som bidrar till mätosäkerheten i metod 3. . Faktorerna a – k, m – q samt u bedöms vara samma som i metod 1.

l) Fuktkapacitet hos RH-prob vid mätning på uttagna prover

En viss mängd av fukten i provbitarna går åt för att fukta upp RH-proben. Observera att den här systematiska faktorn ger ett för lågt mätvärde och att faktorn blir mindre ju större provbit som användes.

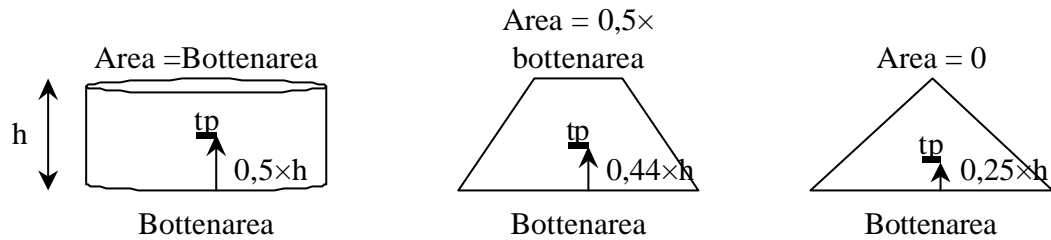
Betongbitarna som användes i studien var minst 20 gram stora. Enligt Sjöberg (1998b) blir den standardiserade systematiska avvikelsen ($S_1^{\#}$) i intervallet 80 – 90 %RH enligt värdena i tabell B1.9.

Tabell B1.9 Systematisk avvikelse ($S_1^{\#}$) i området 80 – 90 %RH för olika betongkvaliteter.

S (mg)	Betongkvalitet (vct)		
	Vct = 0,4	Vct = 0,5	Vct = 0,7
$(S_1^{\#})$	0,24	0,24	0,20

r) Ojämnt uttagna prover

Vid uttagning av betongbitar skall de representera betongen på mätdjupet. Om provbitarna har oregelbunden form eller inhomogen fördelning av ballastkorn kan deras tyngdpunkt förskjutas så att den inte hamnar på beräknat mätdjup, se figur B1.6. RH kan variera ungefär 2-3%RF/cm på karaktäristiskt djup i en 100 mm tjock platta av normal husbyggnadsbetong.



Figur B1.6 Systematisk avvikelse hos ”tyngdpunkten” i cirkulära provbitar på grund av formen.

Bitarna i studien är ungefär 1 cm höga. Antag att de bitarna får formen enligt mittenillustrationen i figur B1.6 men med den stora arean uppåt. Mätvärdet blir då för lågt eftersom tyngdpunkten hos biten ligger ovanför mätdjupet.

RH- gradienten antas vara omkring 3%RF/cm. Den slumpmässiga avvikelsen kommer då att bli $(0,5-0,44) \times 3 = 0,18\% \text{ RH}$

Vidare är det rimligt att anta att läget hos tyngdpunkten i cementpasta är normalfördelat om man tar ut ett stort antal prov och att konfidensintervallet för bedömningen ovan är cirka 68%. Täckningsfaktorn blir då lika med 1 och standardiserade mätosäkerheten (S_r) blir:

$$S_r = \frac{0,18}{1} = 0,18\%$$

s) Kondens i provrör vid transport av uttagna prover

Provrören med betongbitarna utsattes aldrig för stora temperaturvariationer. Den standardiserade osäkerheten (S_s) för denna effekt kan försummas:

$$S_s = 0\%$$

t) Avvikelser i mätstålets djup

I denna metod finns effekten av på vilket djup proverna är tagna.

Uppskattningsvis är den noggrannheten $\pm 5 \text{ mm}$ i studien. I Sjöberg (1998b) beskrivs att en vanlig fuktgradient är 3%RF/cm.

Antag att det är väldigt liten sannolikhet att provtagningsdjupet position mäts mer än 5 mm fel och att det innebar $\pm 1,5\% \text{ RH}$ ($0,5 \text{ cm} \cdot 3 \text{ \%RF/cm}$). Låt säga att konfidensintervallet är 99%, då blir täckningsfaktorn 2,576. Om felmätningen bedömdes vara normalfördelat blir den standardiserade mätosäkerheten (S_t) lika med:

$$S_t = \frac{1,5}{2,576} = 0,58\%$$

Total mätosäkerhet vid mätning med metod 3

I tabell B1.10 summeras de faktorer som bidrar till den totala osäkerheten för metod 3.

Tabell B1.10 Sammanställning av faktorer och dess storlek, metod 3.

vct	namn	0,4	0,5	0,7
a	olineritet	1,22	1,22	1,22
b	drift	0	0	0
c	hysterés	0,61	0,61	0,61
d	ΔT kal.	-0,06	-0,06	-0,06
e	salt	0,40	0,40	0,40
f	ΔT^* kal.	1,14	1,14	1,14
g	kal.	0	0	0
h	2-tryck	–	–	–
i	ΔT kal./mätn.	0	0	0
j	ΔT mätn./bruk.	0	0	0
k	torr förvaring	0	0	0
l	fuktkap. prover	0,24	0,24	0,24
m	fuktkap. mätthål	–	–	–
n	ΔT sensor/betong	0	0	0
o	nya borrhål	–	–	–
p	alkalitet	0	0	0
q	ΔT^* mätn.	0,61	0,61	0,61
r	ojämnt uttagna prover	0,18	0,18	0,18
s	kondens	–	–	–
t	avvikelser i mätdjup	0,58	0,58	0,58
u	felaktig plattjocklek	0	0	0
a-u	Summa	2,03	2,03	2,03

* transienta temperaturvariationer

Bilaga 2 Osäkerhet vid mätning av kolväten

Allmänt

I litteraturen finns det studier som bland annat utvärderar osäkerheten i mätning av emission med FLEC-GC-FID/MS (Field and Laboratory Emission Cell – Gas Chromatography – Flame Ionization Detector / Mass Spectrometry). Fyra av dessa undersökningar, varav en egen undersökning, samt erfarenheter förmedlade av Tekn. Dr Ramnäs ligger till grund för bedömningen av totala standardiserade mätosäkerheten i denna studie, se tabell B2.1.

Tabell B2.1 Mätosäkerhet vid mätning av kolväten med FLEC - GC. TF 1.

Författare	Osäkerhet	Typ
Gustafsson och Jonsson (1993)	±16%	Reproducerbarhet
Wengholt Johnsson (1995)	±19%	Reproducerbarhet
Gustafsson <i>et al</i> (1995)	±15%	Reproducerbarhet
Sjöberg (1998a)	±10%*	Repeterbarhet

*>20 timmar konditioneringstid

Total Standardiserad mätosäkerhet för metoden bedöms ligga under ±20 %. Enligt Ramnäs (2000) står analysen av TENAX-rör i GC-FID endast för en mindre del (< ±3 %). Större delen av den totala osäkerheten ligger troligen i variationer hos mätobjekten, provtagningen, hanteringen av TENAX-rören eller eventuellt något annat, vilket behandlas senare i denna bilaga.

Några tidigare undersökningar

Gustafsson och Jonsson (1993) redovisar en studie där dubbla analyser gjordes parallellt vid provtagningen. 35 olika material mättes vid två tillfällen. Vid dessa 70 provtagningar har två TENAX-rör använts parallellt. Den utvärderade totala standardiserade mätosäkerheten från dessa ”dubbel-analyser” var 16 %.

Wengholt Johnsson (1995) använde dubbla provkroppar för att utvärdera totala mätosäkerheten i provningsmetoden. Ett stort antal ”par” med likadana provkroppar, bestående av limmad PVC-matta på betong, göts och konditionerades på exakt samma sätt. Vid provtagningen togs ett TENAX-rör från varje provkropp i paret. Den standardiserade mätosäkerheten, utvärderad från 30 par av analyser, för hela metoden var 19 %.

Gustafsson *et al* (1995) beskriver en studie där emissionsmätningar har gjorts på samma material vid två laboratorier. Emissionsmätningar gjordes av egenemissioner från en PVC-matta vid tre tillfällen; 1, 14 och 28 dygn efter tillverkning. Totala standardiserade mätosäkerheten för undersökningen var 15 %.

Sjöberg (1998a) mäter koncentrationen i frånluften från FLEC efter olika konditioneringsstider, utan att däremellan flytta FLEC:en. Undersökningen finns beskriven senare i denna bilaga.

Olika faktorerers bidrag

Den totala osäkerheten i studierna som redovisas i tabell B2.1 kan delas upp i fyra bidragande huvudkomponenter. Dessa huvudkomponenter bidrar olika mycket i de olika studierna. Huvudkomponenterna är bidraget från GC-analys av TENAX-rör (I), bidraget från provtagning med FLEC inklusive hantering av TENAX-rör (II), bidraget från skillnad mellan laboratorium (III) samt bidraget från skillnad mellan dubbla provkroppar (IV).

Dessa huvudkomponenter kan sedan delas upp i underkomponenter som bidrar till huvudkomponentens bidrag. Ett exempel är att provtagning med FLEC kan delas upp i bidraget från variationer av konditioneringsstid, bidrag från variation av flödet genom FLEC, bidraget från kvarvarande ämnen i TENAX-röret med flera. Ju mer man sätter sig in i en metod desto fler bidrag kan identifieras och senare kvantifieras.

Tabell B2.2 Fyra huvudkomponenter som bidrar till totala osäkerheten vid mätning med FLEC.

Komponent	Bidrag
I GC-analys av TENAX-rör	±3 %
II Provtagning med FLEC	±9,5 %
III Olika laboratorium	±11 %
IV Dubbla provkroppar	±16 %

Bidraget av GC-analys av TENAX-rör (I) kan uppskattas till omkring ±3 % enligt Ramnäs (2000). Detta är en vedertagen uppskattning av osäkerheten vid en analys med GC.

Bidraget från provtagning med FLEC (II) inklusive hantering av TENAX-rör kan uppskattas från Sjöberg (1998a), som även beskrivs senare i denna bilaga. Alla mätningar är utförda på samma laboratorium med samma utrustning samt av samma person. Mätningarna i en serie är dessutom utförda på samma provkropp. I dessa mätningar är det därför bara komponent (I) och (II) som bidrar till den totala mätosäkerheten. Enligt Box et al (1978) kan man kombinera bidrag till totala mätosäkerheten genom att summera dem kvadratisk.

$$(\text{Tot. Std. Osäkerhet})^2 = (\text{bidrag 1})^2 + (\text{bidrag 2})^2 \dots (\text{bidrag n})^2.$$

Om den total mätosäkerheten är ±10% blir bidrag (II) lika med $\sqrt{10^2 - 3^2} = 9,5\%$ i detta fall.

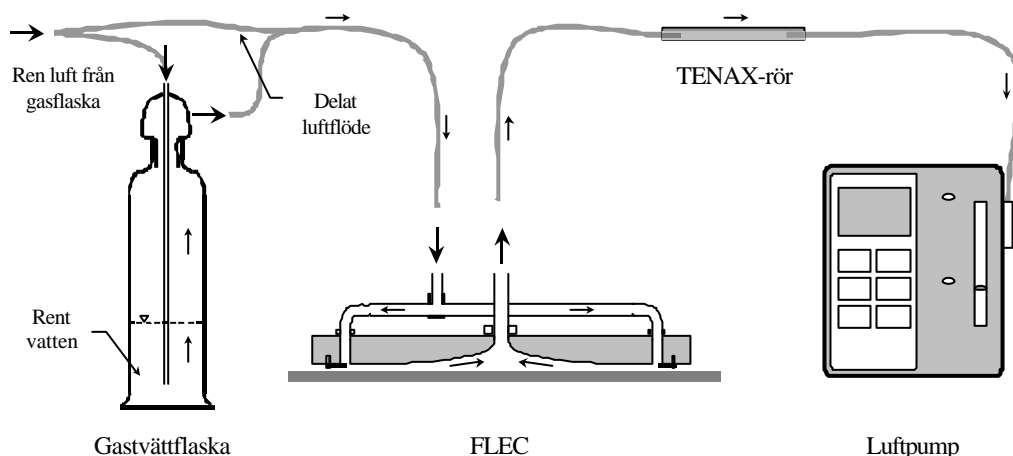
Bidraget från skillnad mellan laboratorium (III) kan uppskattas från Gustafsson *et al* (1995). I undersökningen har ett material delats upp och skickats under kontrollerade former till olika laboratorium för mätning. I dessa mätningar kan man därför anta att komponent (I), (II) och (III) tillsammans bidrar till den totala mätosäkerheten. Med hjälp av tidigare uppskattningar kan bidraget från (III) beräknas till $\sqrt{15^2 - 3^2 - 9,5^2} = 11\%$.

Bidraget från skillnad mellan dubbla provkroppar (IV) kan uppskattas från Wengholt Johnsson (1995). Alla mätningar är utförda på samma laboratorium, med samma utrustning samt av samma person. Mätningarna är parvis utförda på dubbelprov som tillverkats och hanterats på exakt samma sätt av samma person. I dessa mätningar kan man därför anta att komponent (I), (II) och (IV) tillsammans bidrar till den totala mätosäkerheten. Med hjälp av tidigare uppskattningar kan bidraget från (IV) beräknas till $\sqrt{19^2 - 3^2 - 9,5^2} = 16\%$.

Experimentell studie av mätosäkerheten vid provtagning med FLEC

I studien gjordes en undersökning av inverkan av konditioneringstiden av ytan med FLEC, det vill säga tiden som ytan ”spolades” med luft innan provtagning sker. Från resultatet kan bidraget från denna parameter, till den totala mätosäkerheten vid provtagning med FLEC utvärderas.

Provtagningen gjordes med mätcellen FLEC (Field and Laboratory Emission Cell) och TENAX-rör som adsorbent. Vid efterföljande analys användes GC – FID. Hela mätförloppet finns beskrivet i kapitel 2.3.3. Uppställningen vid provtagning visas i figur B2.1.

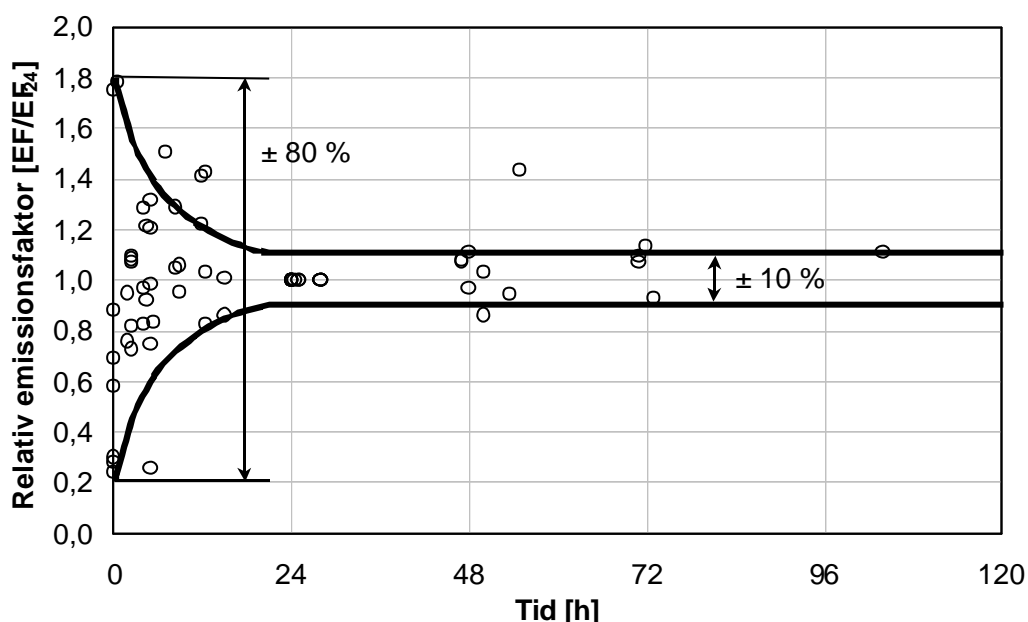


Figur B2.1 Uppställning vid provtagning med FLEC.

I undersökningen har totala osäkerheten bestämts experimentellt genom att utföra ett antal mätningar på samma provkropp. Mängden samt fördelningen mellan OC i TENAX-rören kan förändras om de får ligga lång tid innan analysen. Risken ökar om de förvaras varmt. För att minimera "liggtiden" för TENAX-rören avslutades GC analysen innan nästa provtagning gjordes.

Sammanlagt gjordes 64 emissionsmätningar i 12 "mätserier". Med en mätserie menas de mätningar som gjordes med olika konditioneringstid på en provkropp (utan att FLEC:en flyttades). Varje mätserie bestod av i medeltal fem mätningar varav en gjordes efter ungefär 24 timmars konditioneringstid.

Mätningen efter 24 timmars konditioneringstid har använts som referens då mätserierna jämförts. Mätvärdena i varje mätserie har dividerats med värdet som erhöles efter 24 timmar. Kvoten kallas relativ emissionsfaktor. I figur B2.2 redovisas sambandet mellan konditioneringstid och relativ emissionsfaktor.



Figur B2.2 Relativ emissionsfaktor (EF/EF_{24}) som funktion av konditioneringstid samt ungefärliga intervall för total standardiserad mätosäkerhet.

Konfidensintervallet med en standardavvikelse redovisas som heldragna linjer i figur B2.2. Linjerna beskriver yttre gränserna för det intervall inom vilket det är 68% sannolikhet att mätvärdet skall hamna. Om det antas att värdet som mäts efter 24 timmar är det "sanna" är det 68% sannolikhet att ett värde som mäts efter 1 timma ligger inom "sant värde" $\pm 80\%$. Mätningar som görs med 20 timmars konditioneringstid eller mer har en repeterbarhet (osäkerhet) på $\pm 10\%$.

Fältförsök av konditioneringstidens betydelse

Edenholm (1998) har utfört jämförande mätningar i fält för att studera inverkan av konditioneringstiden. Provtagningen gjordes efter 1 respektive 24 timmars konditioneringstid med rumsluft genom FLEC. Efterföljande analys är utförd med GC – FID / MS enligt beskrivningen i kapitel 2.3.2

Mätobjektet var en nybyggd lägenhet i Stockholm med golvbeläggning av linoleum (1) och PVC (2 & 3). I tabell B2.3 redovisas resultaten från tre mätningar efter att värdena kompenserats för föroreningar i rumsluften.

Tabell B2.3 Fältmätning med FLEC – GC. Jämförelse mellan resultat efter 1 och 24 timmar konditioneringstid med FLEC.

Försök	1 timma	24 timmar	Förhållande
1	>2000♥	>2000♥	osäkert
2	180	115	1,6
3	125	125	1,0

♥ större än instrumentets mätområde

Fältmätningarna visar inte på något entydigt samband mellan emissionen efter 1 respektive 24 timmars konditioneringstid. Avvikelsen varierade mellan mätningarna och förhållandet mellan resultaten var olika i de tre mätserierna.

Diskussion

Det har visat sig att det är svårt att, med stor noggrannhet, mäta emission från golvkombinationer hjälp av FLEC. Det är många faktorer som inverkar på resultatet, inte bara provtagningen. FLEC –GC är dock en användbar mätteknik för att bedöma storleksordningen på emissionen från ytor.

Störst bidrag till totala mätosäkerheten vid mätning av emissionen från materialkombinationer fås från skillnader mellan provkropparna vid dubbelprover. I provkropparna i undersökningen har det skapats en kemisk reaktion vars förutsättningar inte är helt klarlagda. Nedbrytningsprodukterna från reaktionen kommer i viss utsträckning att fixeras i materialen men också att avgå från ytan. Vad som styr denna fixering och transport har vi idag bara börjat utforska. Med dessa förutsättningar är det inte orimligt att skillnaden hos emissionen mellan två provkroppar blir 16% när vi gör så bra vi kan.

Att det finns en variation i analysresultat mellan laboratorium är vedertaget. I detta fall blev golvskillnaden upphov till en mätosäkerhet på 9,5%. Det kan vara rimligt att tro att skillnaden är lika stor oberoende vad syftet med emissionsmätningen är. Detta kan vara något att ha i åtanke när EF för olika material ställs mot varandra.

Bilaga 3 Mättnadsånghalt för några OC

Diagrammen bygger på värden om mättnadstryck vid olika temperaturer hämtade från CRC 2000.

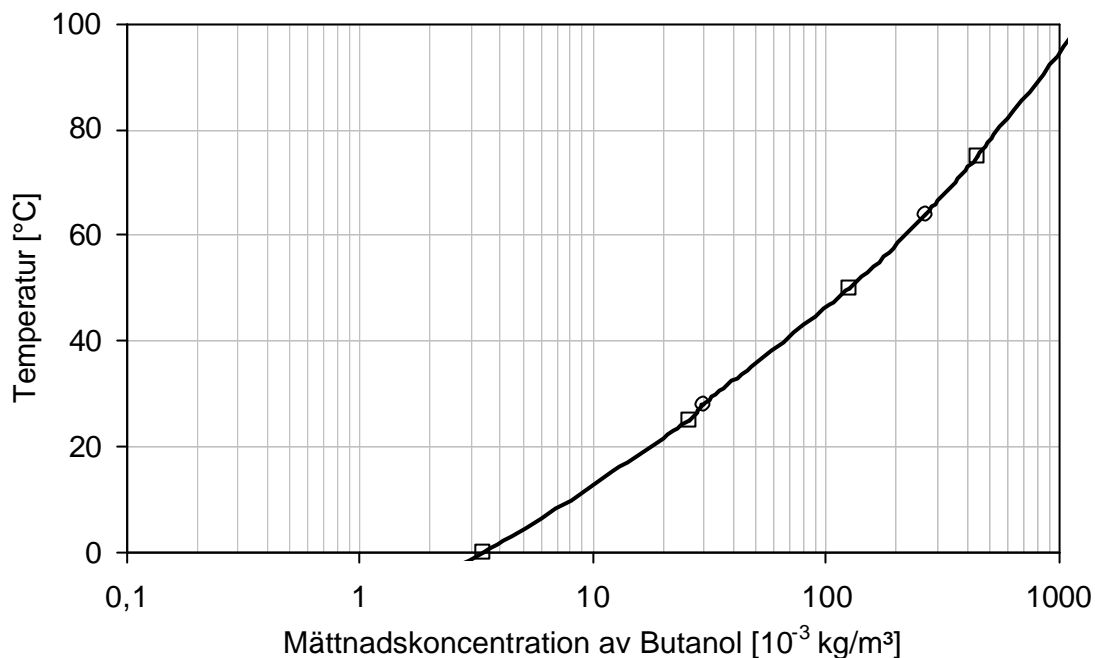


Fig. B3.1 Koncentration av n-butanol i gasfas vid mättnad, som funktion av temperatur.

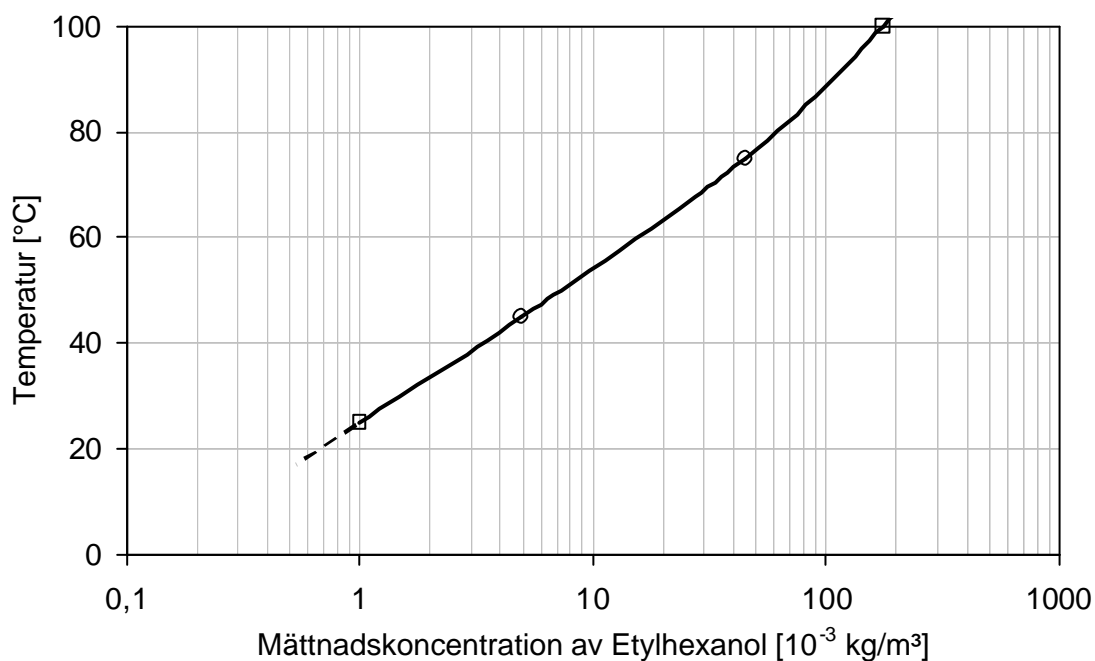


Fig. B3.2 Koncentration av 2-etylhexanol butanol i gasfas vid mättnad, som funktion av temperatur.

Bilaga 4, Resultat från samtliga beräkningar

I denna bilaga sammanställs beräkningsresultaten för 10 beräkningar som utförts i Excel med beräkningsmodellen som beskrivs i kapitel 7. Beräkningsresultaten jämförs i kapitel 9 mot uppmätta värden för butanol. I kapitel 10 studera inverkan på beräkningsresultatet vid variation av några av parametrarna i modellen.

Beräkningarna är utförda med 5 olika kombinationer av parametrar för bildning, fixering och transport av butanol i betong. Dessa kombinationer av parametrar kallas Calc.1 – 5, se tabell B4.1.

För varje parameterkombination har beräkningen utförts med två olika golvbeläggningar, PVC- och linoleummatta. Golvbeläggningarna hanteras beräkningsmässigt som genomgångsmotstånd för fukt och OC, utan någon som helst lagringskapacitet, se tabell B4.2.

RH-värdena i figurerna refererar till fuktnivån på 0,4d i betongplattan, innan mattan limmas.

Tabell B4.1 Värden för beräkning av transport och fixering av butanol i betong C4.

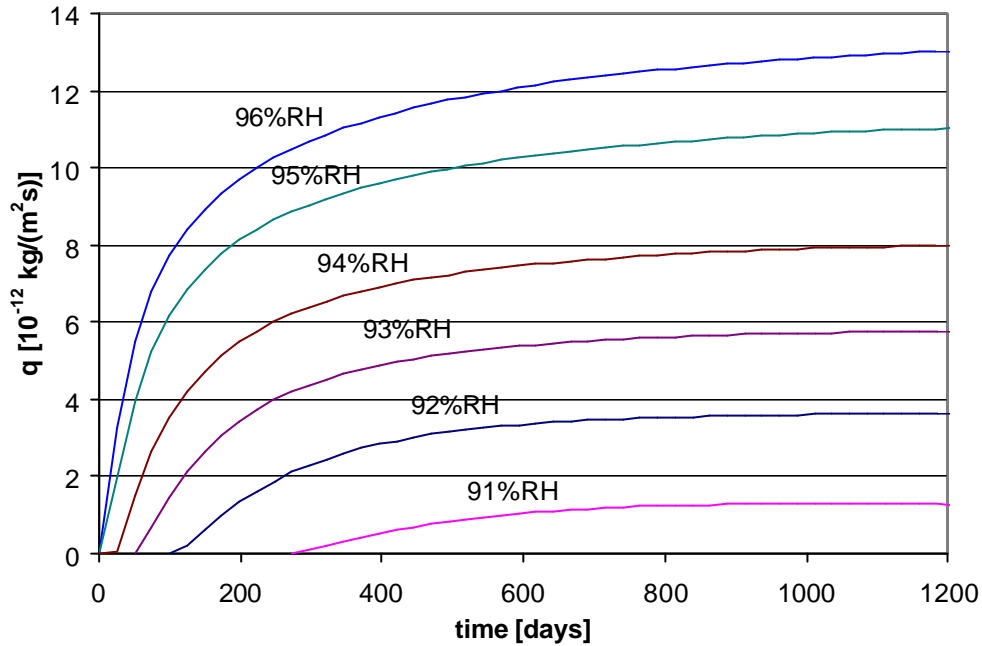
Storhet	Enhet	Calc.1	Calc.2	Calc.3	Calc.4	Calc.5
$q_{R,max}$	$[10^{-9} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$	0,03	0,26	2,6	7,3	7,3
D_{OC}	$[10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}]$	2,5	2,5	2,5	93	93
Bound	–	b_0	b_0	b_0	b_1	b_2
S	$[\text{kg}/\text{kg}]$	0,077	0,077	0,077	2,8	0,077
b	$[10^3]$	–	–	–	–	16,1

Tabell B4.2 Genomgångsmotstånd för fukt och OC vid PVC- respektive linoleummatta.

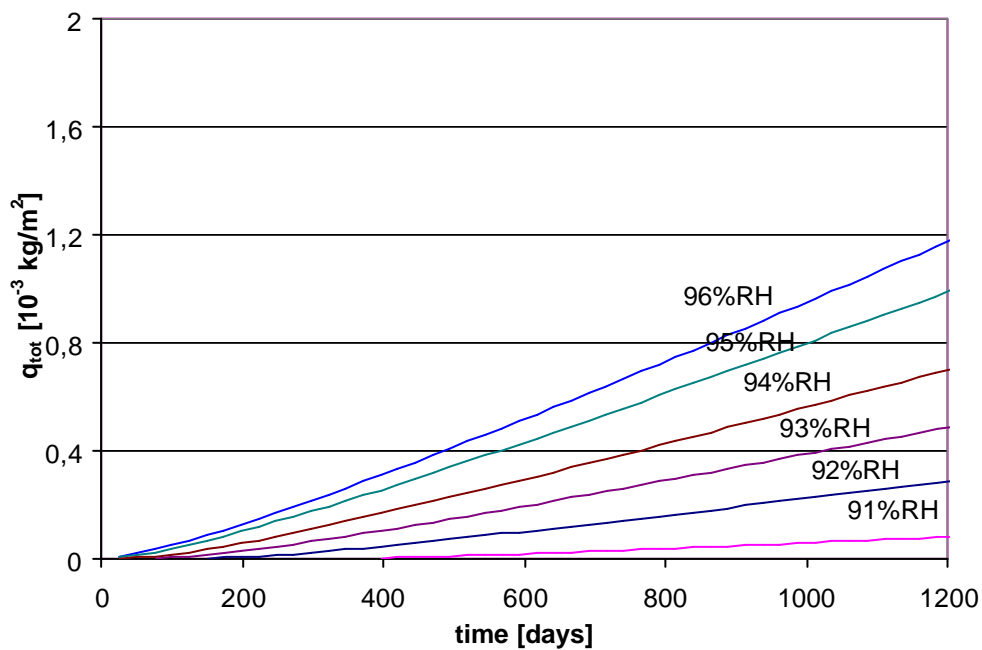
Storhet	Enhet	PVC	Linoleum
Z_{fc}	$[10^6 \text{ s}/\text{m}]$	2	0,1
R_{fc}	$[10^6 \text{ s}/\text{m}]$	3,7	2,9

B4.1 Calc.1, resultat med PVC-matta

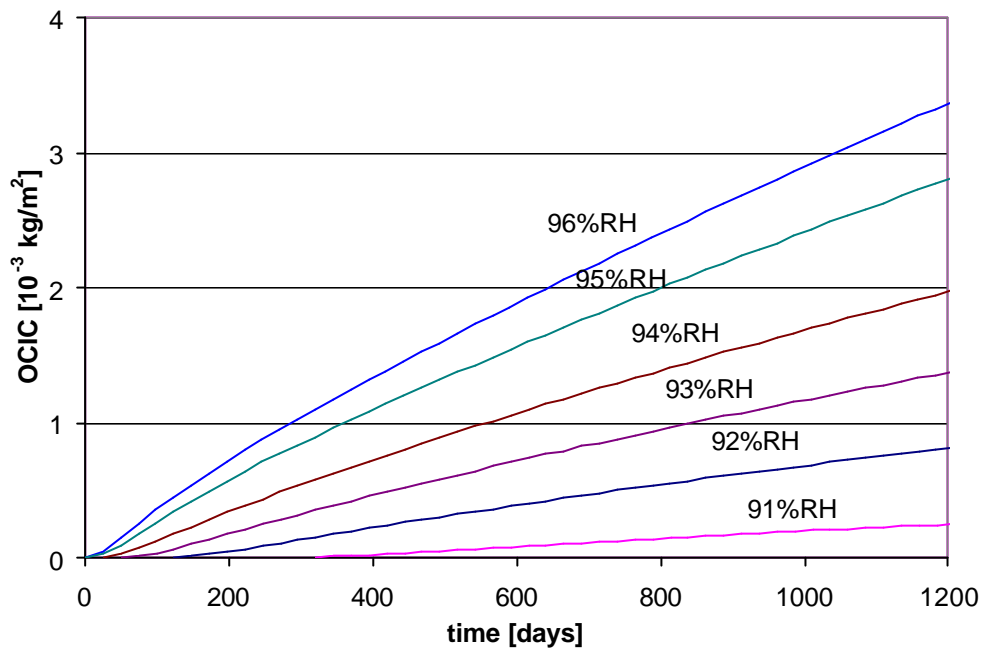
Beräkningar utförda med maximal bildningshastighet $q_{R,max} = 0,03 \cdot 10^{-9}$ [kg/(m²·s)]. Betongens diffusionskoefficient för OC i gasfas $D_{OC} = 2,5 \cdot 10^{-9}$ [m²/s]. Bindningsantagande enligt ekv 8.5, $C_{bound,0} = k_0 \cdot w \cdot c_{air}$ där $k_0 = 0,077$ [m³/kg].



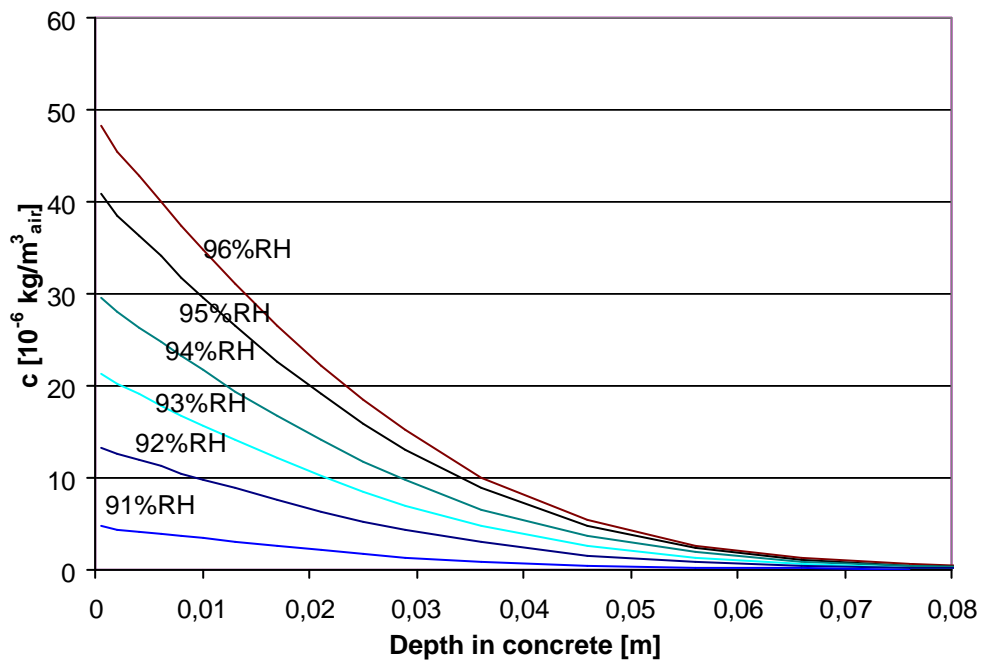
Figur B4.1 Emission från ytan, resultat från Calc.1 med PVC-matta.



Figur B4.2 Sammanställning av totala emissionen från Calc.1 med PVC-matta.



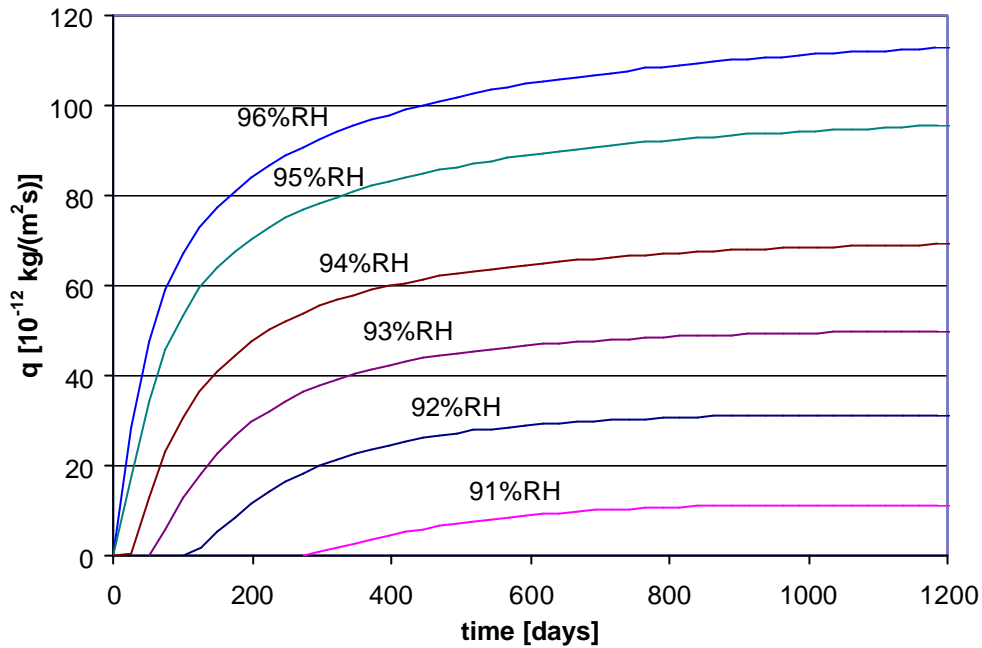
Figur B4.3 OCIC som funktion av tiden i Calc.1 med PVC-matta.



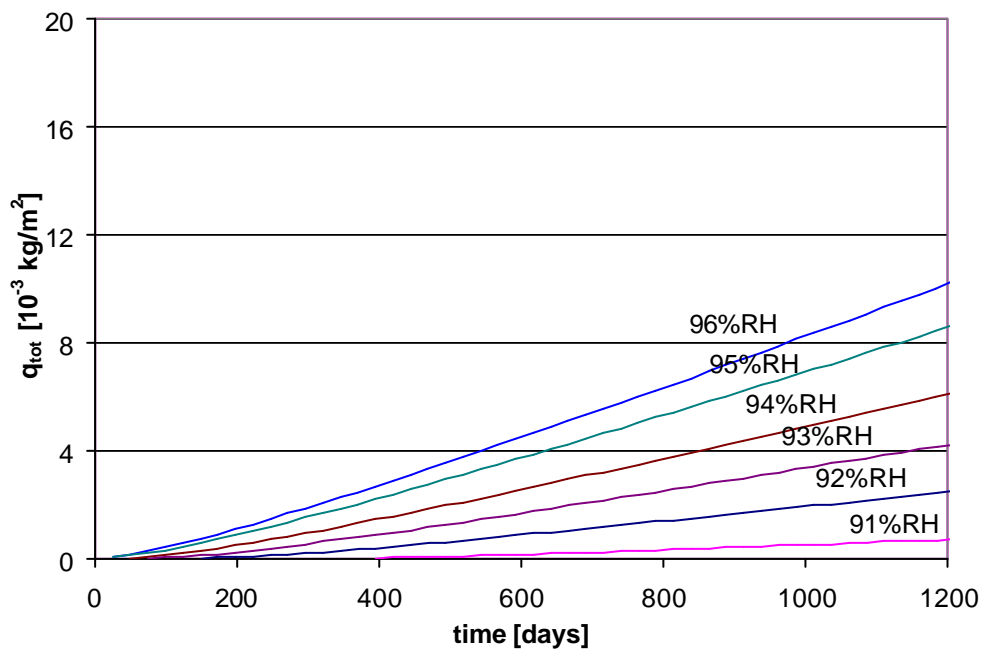
Figur B4.4 Profil av OCIC efter långtid i Calc.1 med PVC-matta.

B4.2 Calc.2, resultat med PVC-matta

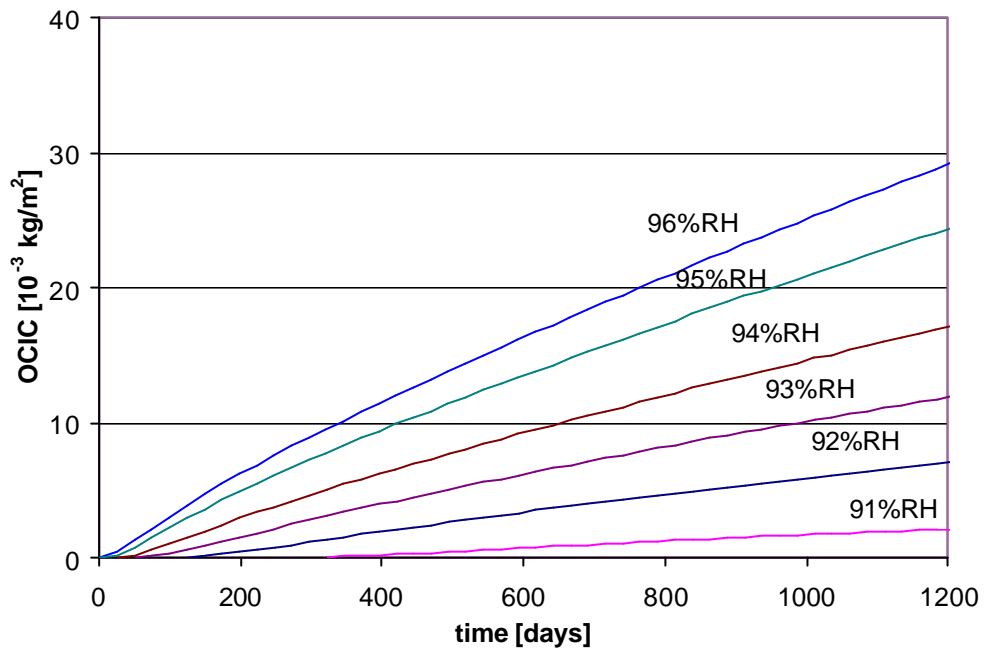
Beräkningar utförda med maximal bildningshastighet $q_{R,max} = 0,26 \cdot 10^{-9}$ [kg/(m²·s)]. Betongens diffusionskoefficient för OC i gasfas $D_{OC} = 2,5 \cdot 10^{-9}$ [m²/s]. Bindningsantagande enligt ekv 8.5, $C_{bound,0} = k_0 \cdot w \cdot c_{air}$ där $k_0 = 0,077$ [m³/kg].



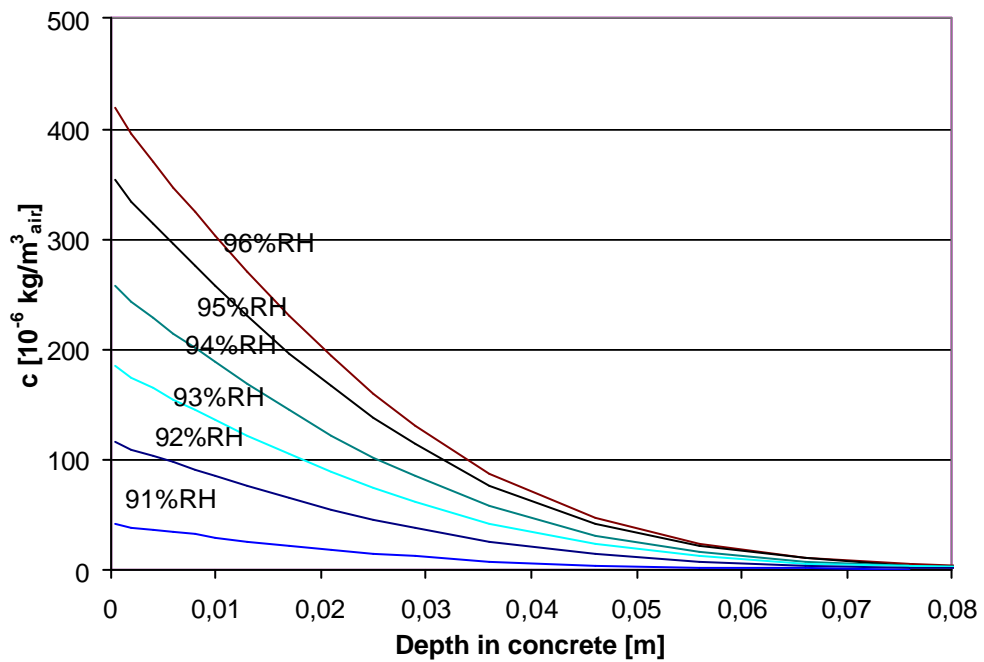
Figur B4.5 Emission från ytan, resultat från Calc.2 med PVC-matta.



Figur B4.6 Sammanställning av totala emissionen från Calc.2 med PVC-matta.



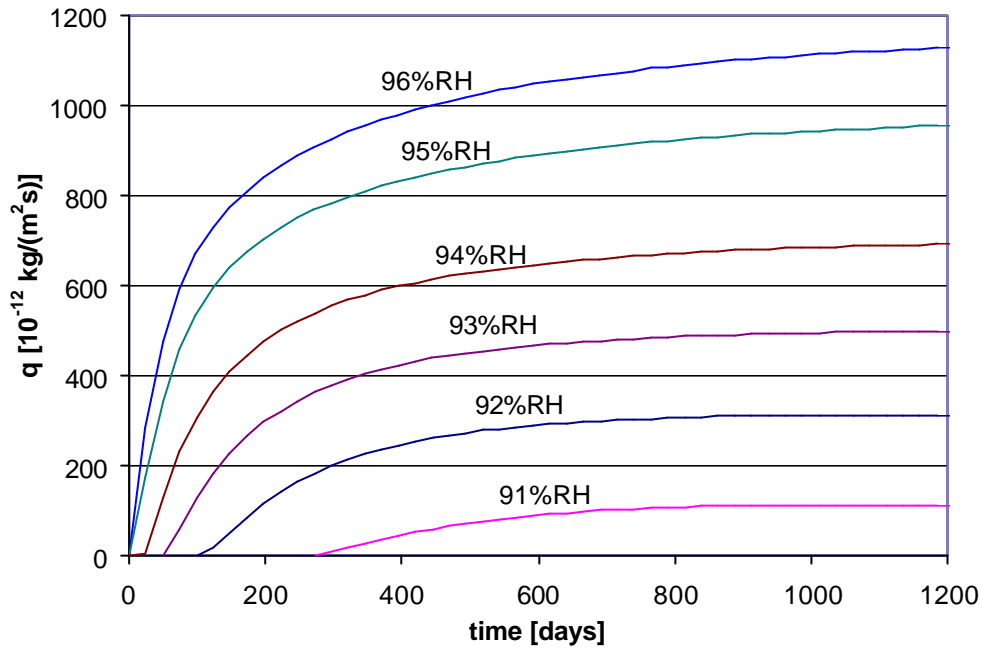
Figur B4.7 OCIC som funktion av tiden i Calc.2 med PVC-matta.



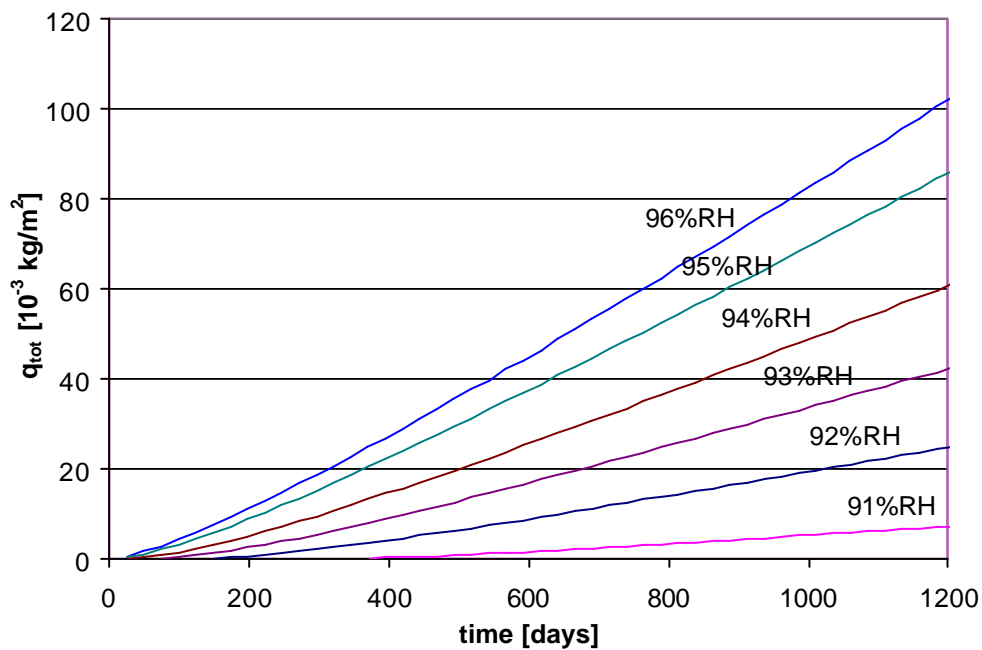
Figur B4.8 Profil av OCIC efter långtid i Calc.2 med PVC-matta.

B4.3 Calc.3, resultat med PVC-matta

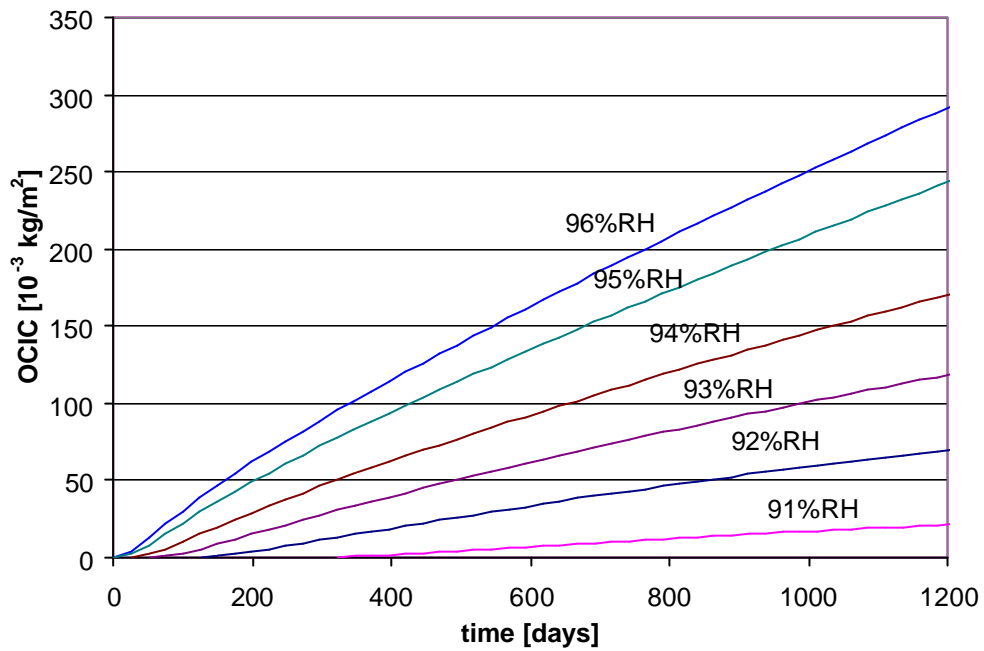
Beräkningar utförda med maximal bildningshastighet $q_{R,max} = 2,6 \cdot 10^{-9}$ [kg/(m²·s)]. Betongens diffusionskoefficient för OC i gasfas $D_{OC} = 2,5 \cdot 10^{-9}$ [m²/s]. Bindningsantagande enligt ekv 8.5, $C_{bound,0} = k_0 \cdot w \cdot c_{air}$ där $k_0 = 0,077$ [m³/kg].



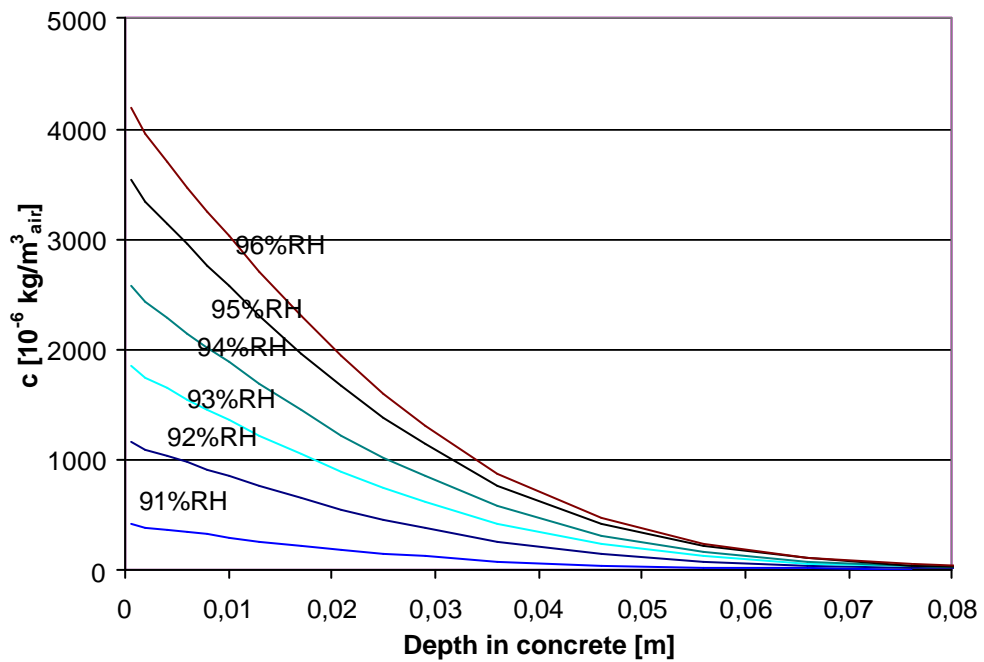
Figur B4.9 Emission från ytan, resultat från Calc.3 med PVC-matta.



Figur B4.10 Sammanställning av totala emissionen från Calc.3 med PVC-matta



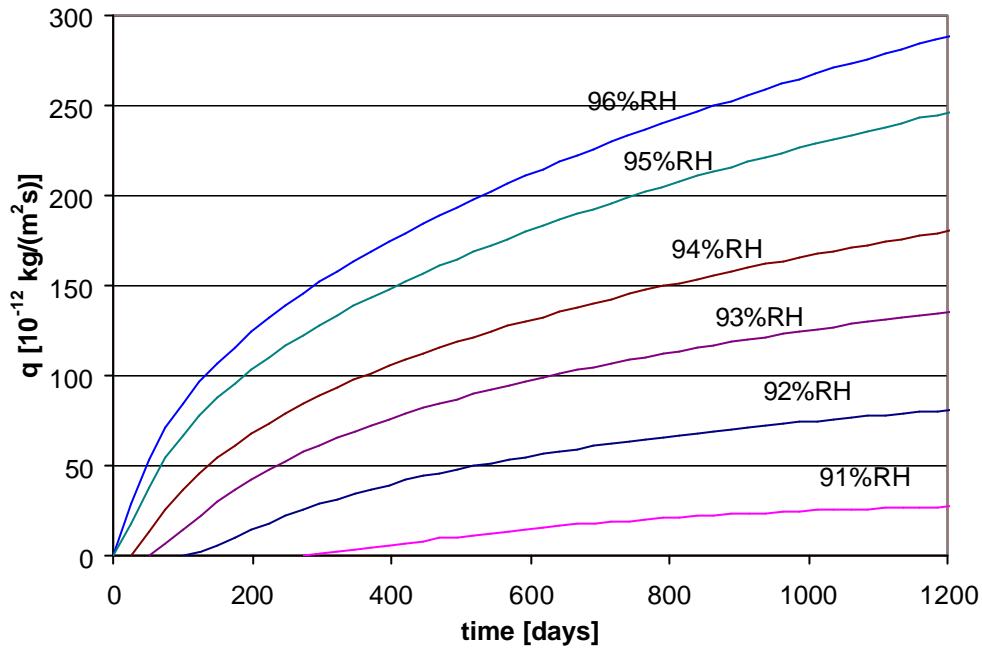
Figur B4.11 Sammanställning av totala emissionen från Calc.3 med PVC-matta.



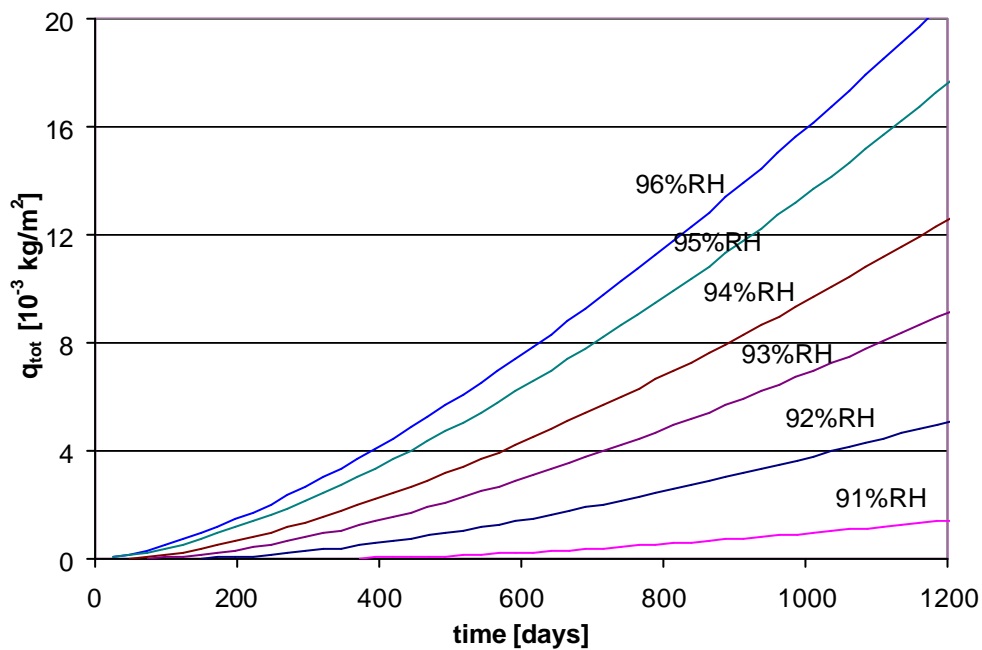
Figur B4.12 Profil av OCIC efter långtid i Calc.3 med PVC-matta.

B4.4 Calc.4, resultat med PVC-matta

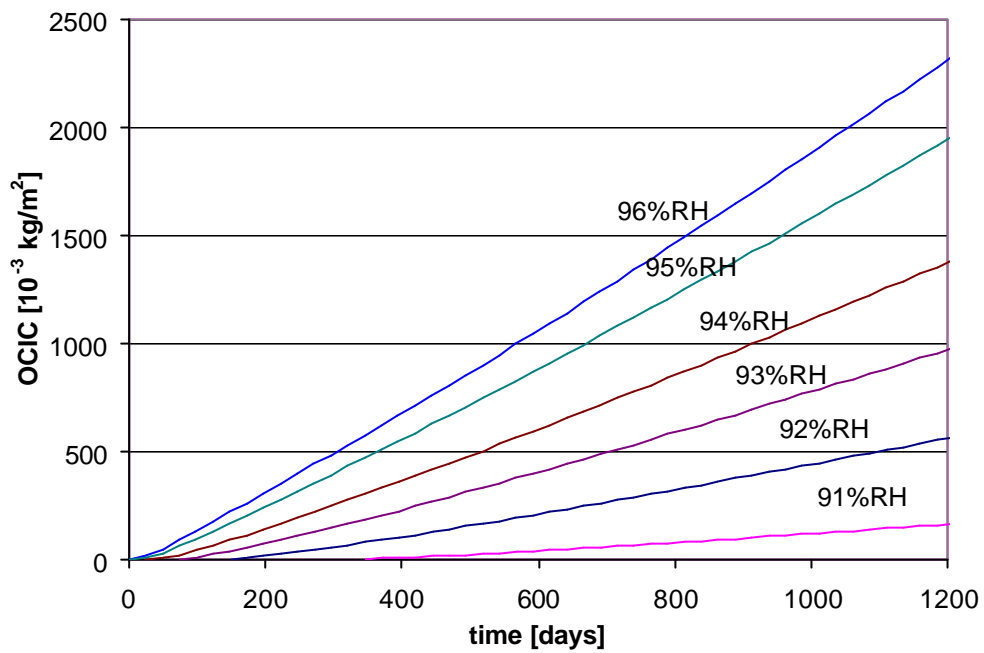
Beräkningar utförda med maximal bildningshastighet $q_{R,max} = 7,3 \cdot 10^{-9}$ [kg/(m²·s)]. Betongens diffusionskoefficient för OC i gasfas $D_{OC} = 9,3 \cdot 10^{-8}$ [m²/s]. Bindningsantagande enligt ekv 8.6, $C_{bound,0} = k_1 \cdot w \cdot c_{air}$ där $k_1 = 2,8$ [m³/kg].



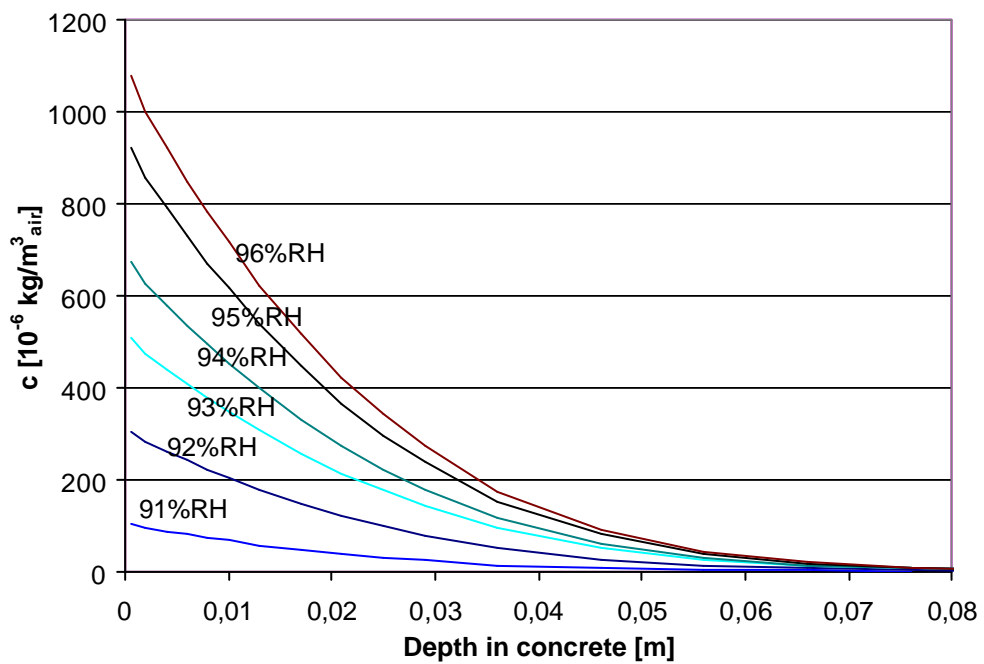
Figur B4.13 Emission från ytan, resultat från Calc.4 med PVC-matta.



Figur B4.14 Sammanställning av totala emissionen från Calc.4 med PVC-matta.



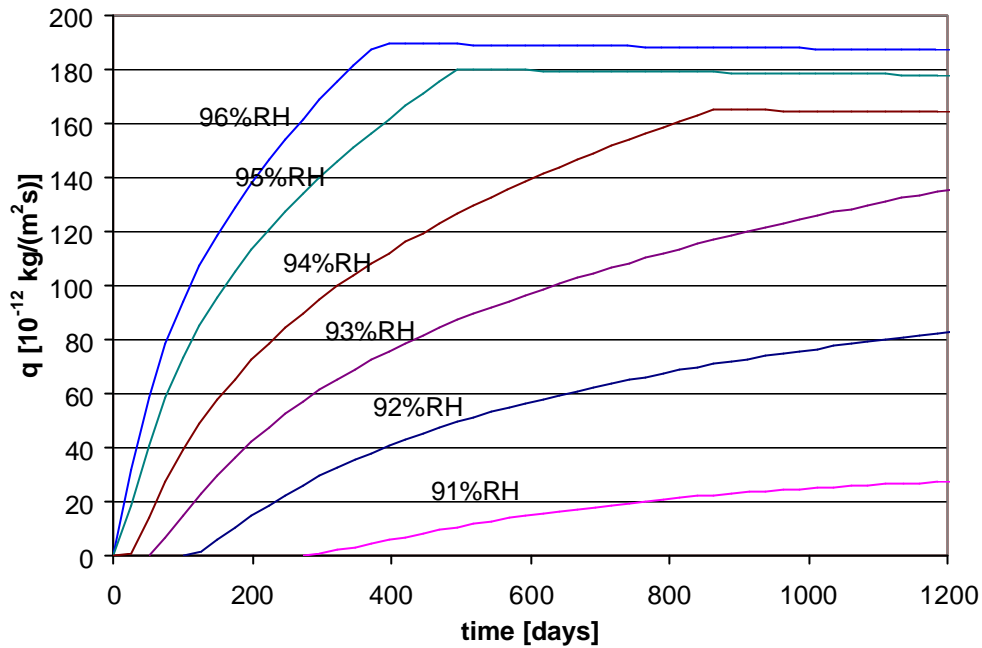
Figur B4.15 OCIC som funktion av tiden i Calc.4 med PVC-matta.



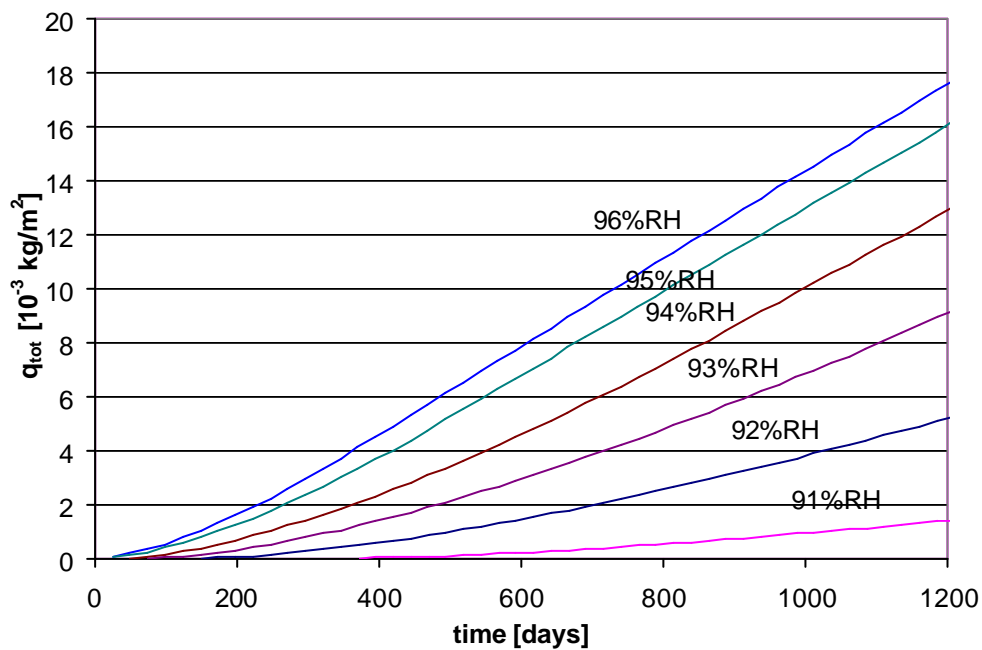
Figur B4.16 Profil av OCIC efter långtid i Calc.4 med PVC-matta.

B4.5 Calc.5, resultat med PVC-matta

Beräkningar utförda med maximal bildningshastighet $q_{R,max} = 7,3 \cdot 10^{-9}$ [kg/(m²·s)]. Betongens diffusionskoefficient för OC i gasfas $D_{OC} = 9,3 \cdot 10^{-8}$ [m²/s]. Bindningsantagande enligt ekv 8.7, $C_{bound,0} = (k_2 \cdot w + b) \cdot c_{air}$ där $k_2 = 0,077$ [m³/kg] och $b = 16100$ [-].

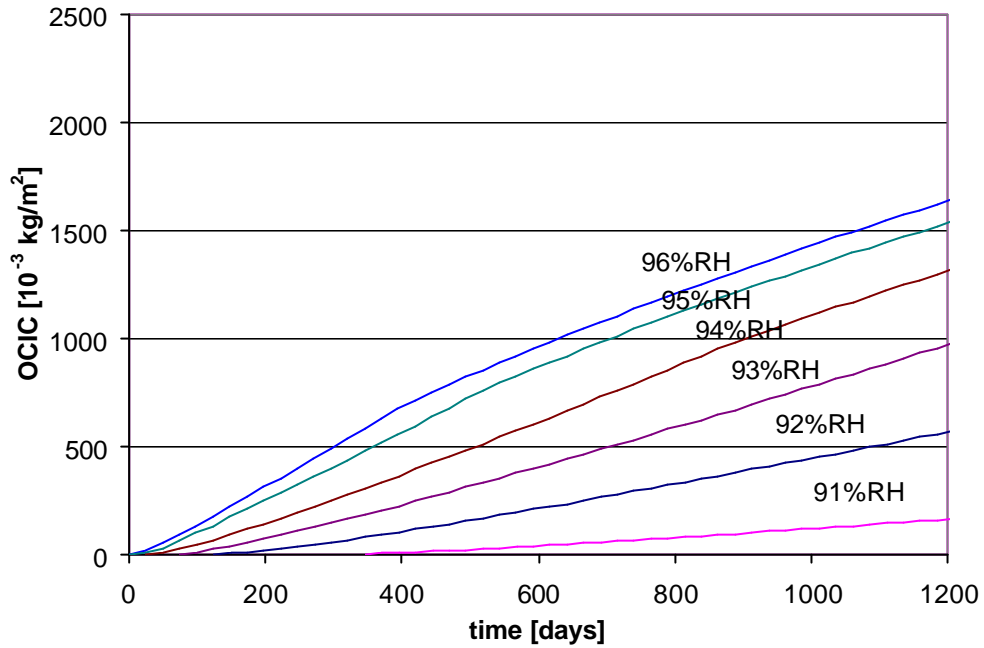


Figur B4.17 Emission från ytan, resultat från Calc.5 med PVC-matta.

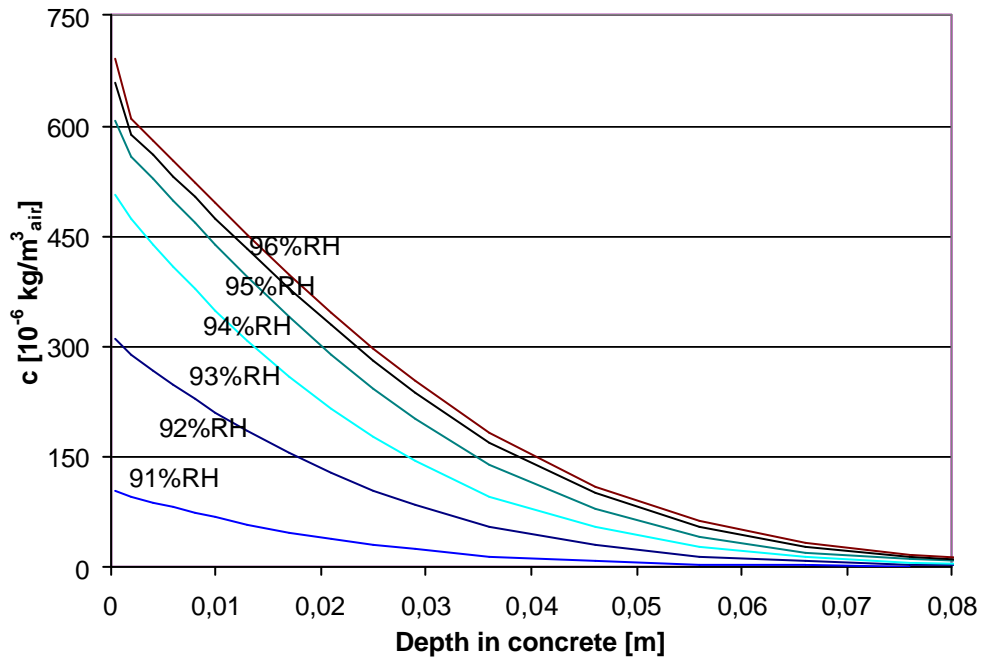


Figur B4.18 Sammanställning av totala emissionen från Calc.5 med PVC-matta.

Den lineära sektionen i slutet av linje 94, 95 samt 96%RH i diagram B4.17 – 20 har uppstått på grund av brister i den datoriserade beräkningsrutinen.



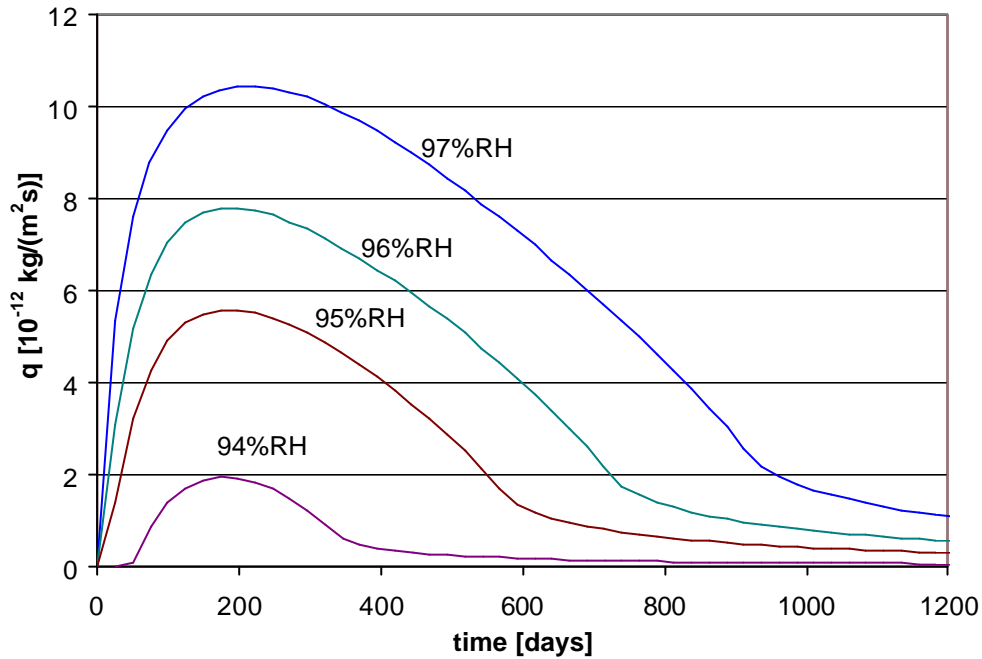
Figur B4.19 OCIC som funktion av tiden i Calc.5 med PVC-matta.



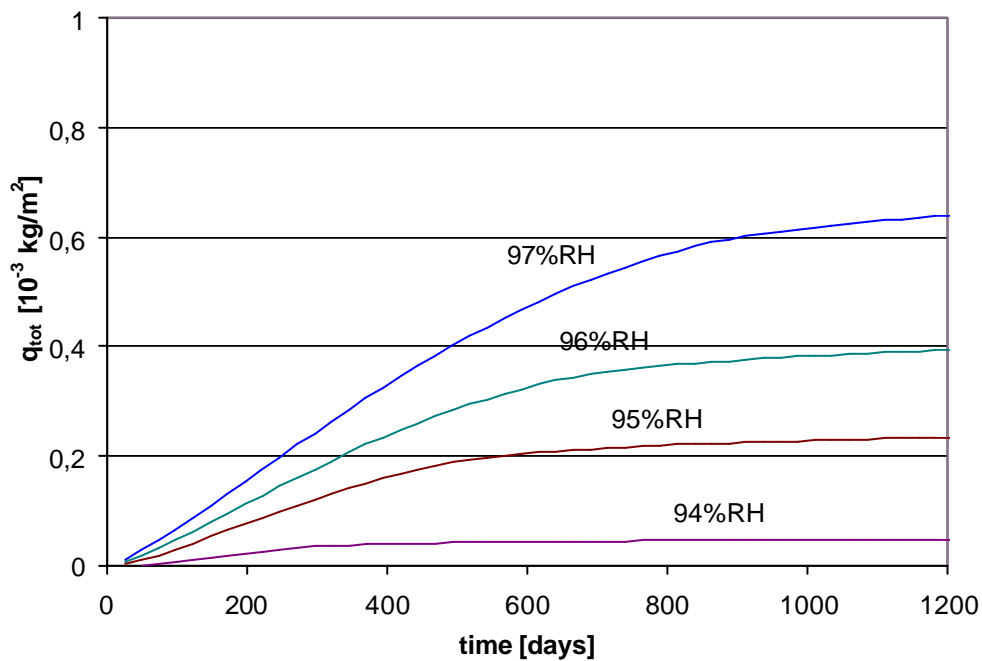
Figur B4.20 Profil av OCIC efter långtid i Calc.5 med PVC-matta.

B4.6 Calc.1, resultat med Linoleummatta

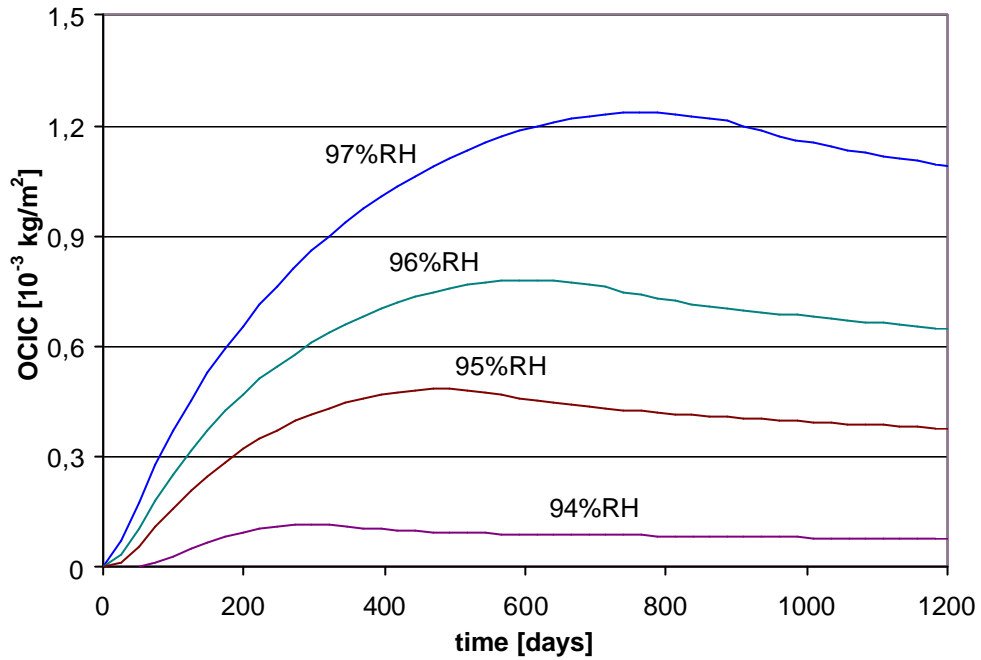
Beräkningar utförda med maximal bildningshastighet $q_{R,max} = 0,03 \cdot 10^{-9}$ [kg/(m²·s)]. Betongens diffusionskoefficient för OC i gasfas $D_{OC} = 2,5 \cdot 10^{-9}$ [m²/s]. Bindningsantagande enligt ekv 8.5, $C_{bound,0} = k_0 \cdot w \cdot c_{air}$ där $k_0 = 0,077$ [m³/kg].



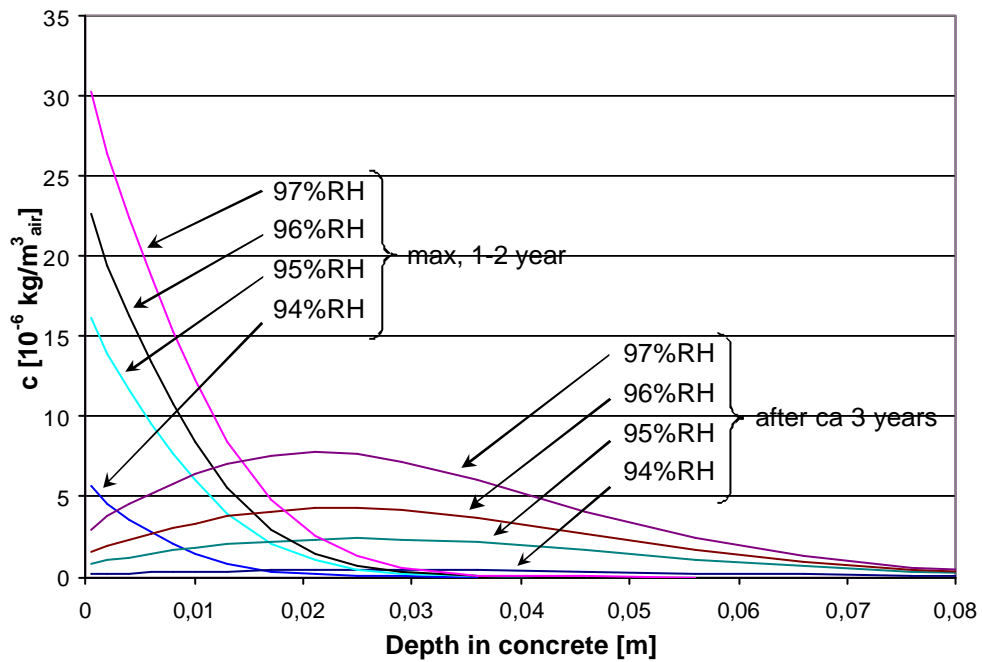
Figur B4.21 Emission från ytan, resultat från Calc.1 med linoleummatta.



Figur B4.22 Sammanställning av totala emissionen från Calc.1 med linoleummatta.



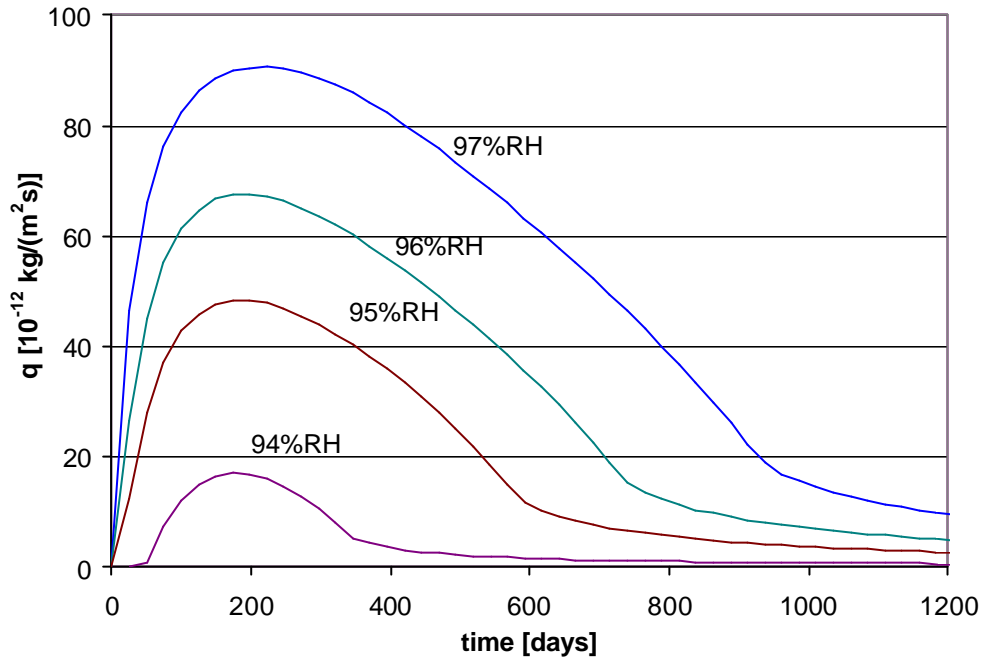
Figur B4.23 OCIC som funktion av tiden i Calc.1 med linoleummatta.



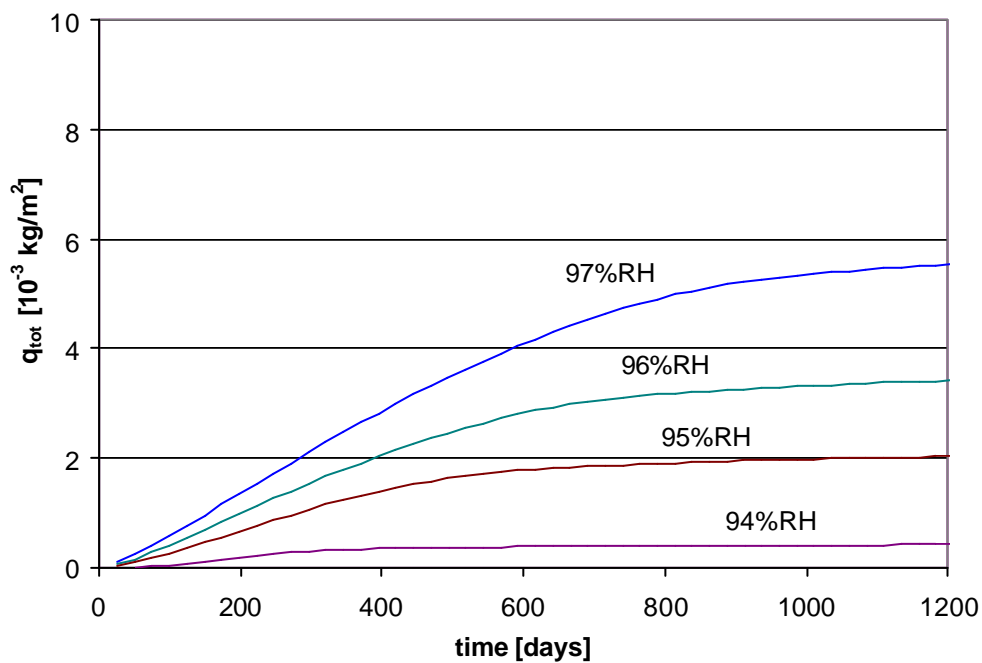
Figur B4.24 Profil av OCIC vid max c_s samt efter långtid i Calc.1 med linoleummatta.

B4.7 Calc.2, resultat med Linoleummatta

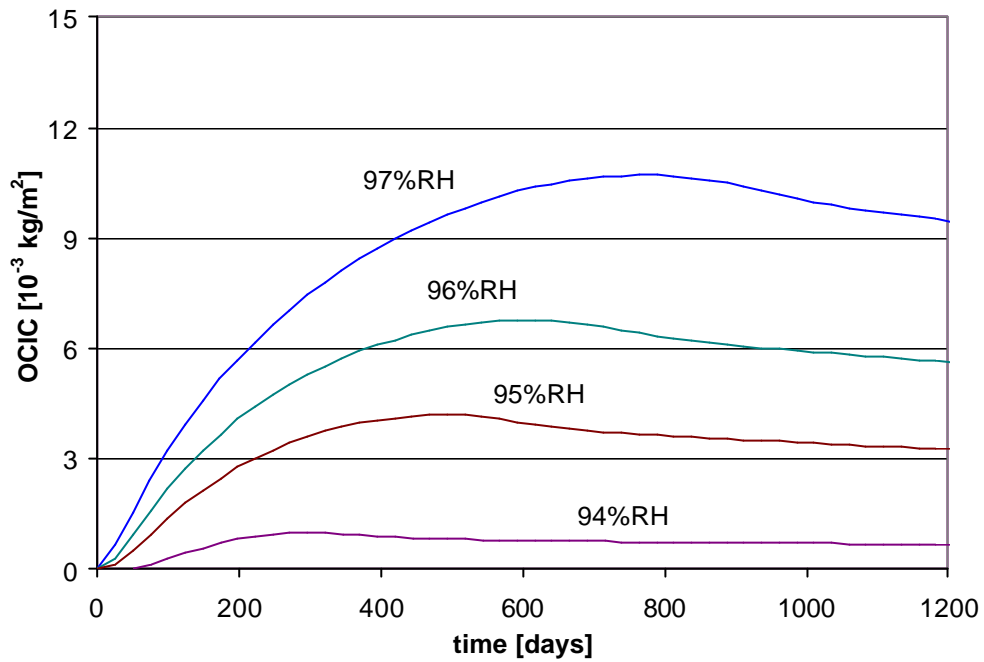
Beräkningar utförda med maximal bildningshastighet $q_{R,max} = 0,26 \cdot 10^{-9}$ [kg/(m²·s)]. Betongens diffusionskoefficient för OC i gasfas $D_{OC} = 2,5 \cdot 10^{-9}$ [m²/s]. Bindningsantagande enligt ekv 8.5, $C_{bound,0} = k_0 \cdot w \cdot c_{air}$ där $k_0 = 0,077$ [m³/kg].



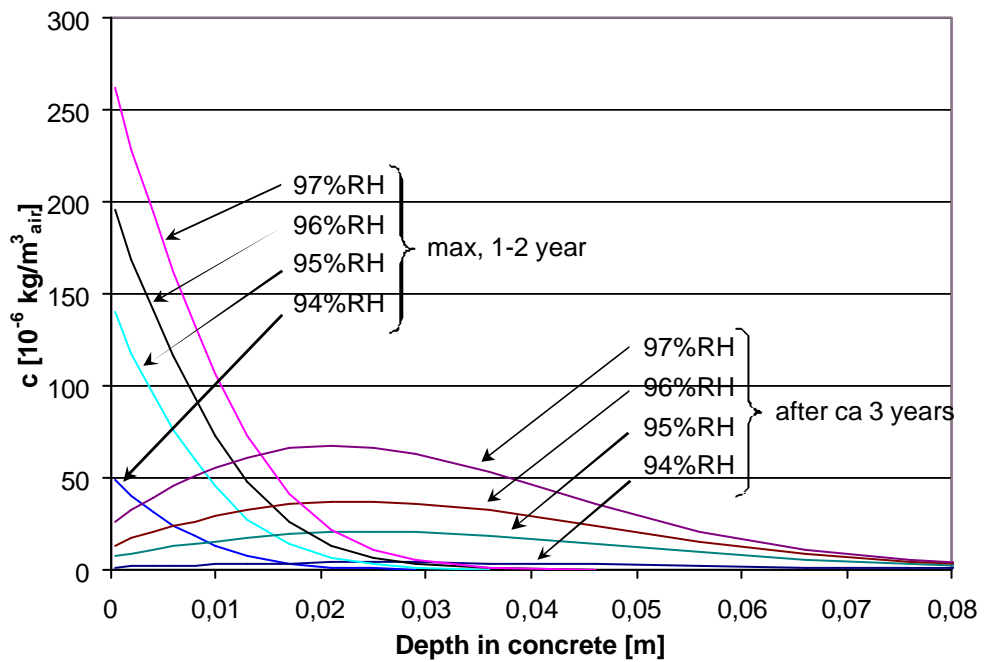
Figur B4.25 Emission från ytan, resultat från Calc.2 med linoleummatta.



Figur B4.26 Sammanställning av totala emissionen från Calc.2 med linoleummatta.



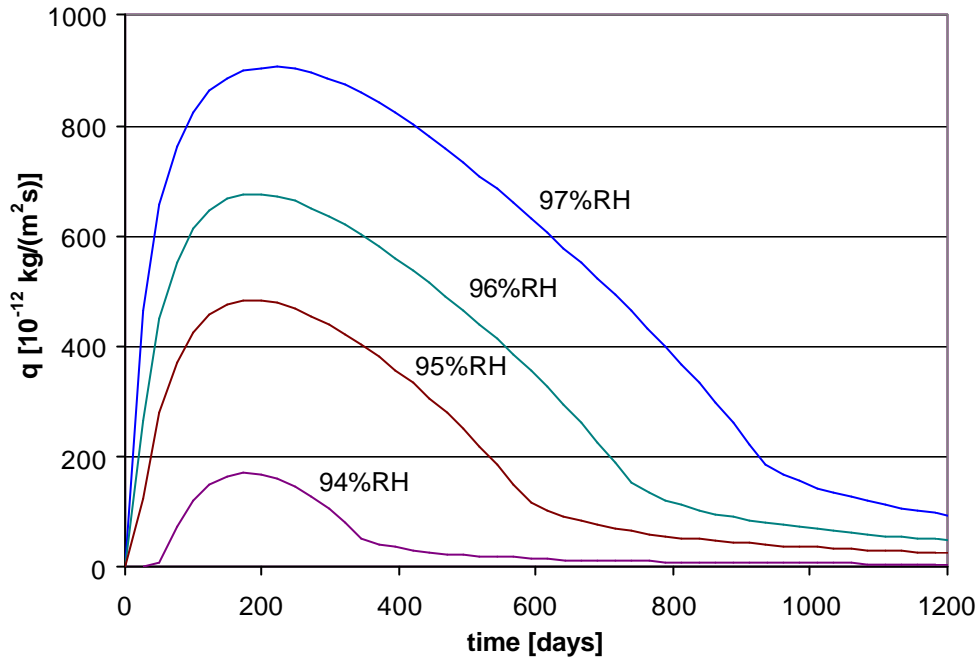
Figur B4.27 OCIC som funktion av tiden i Calc.2 med linoleummatta.



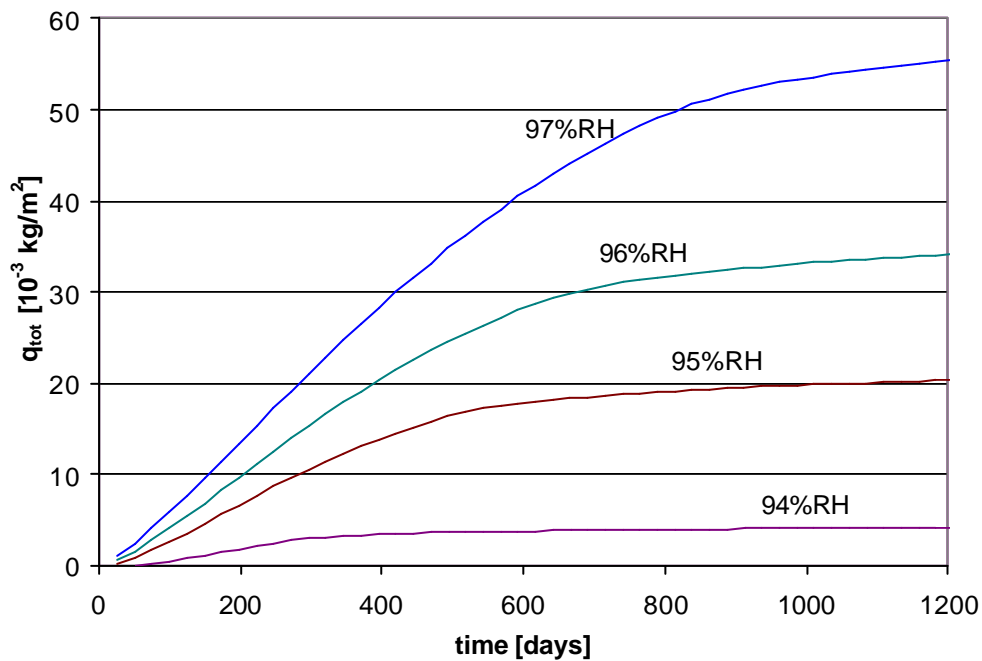
Figur B4.28 Profil av OCIC vid max c_s samt efter långtid i Calc.2 med linoleummatta.

B4.8 Calc.3, resultat med Linoleummatta

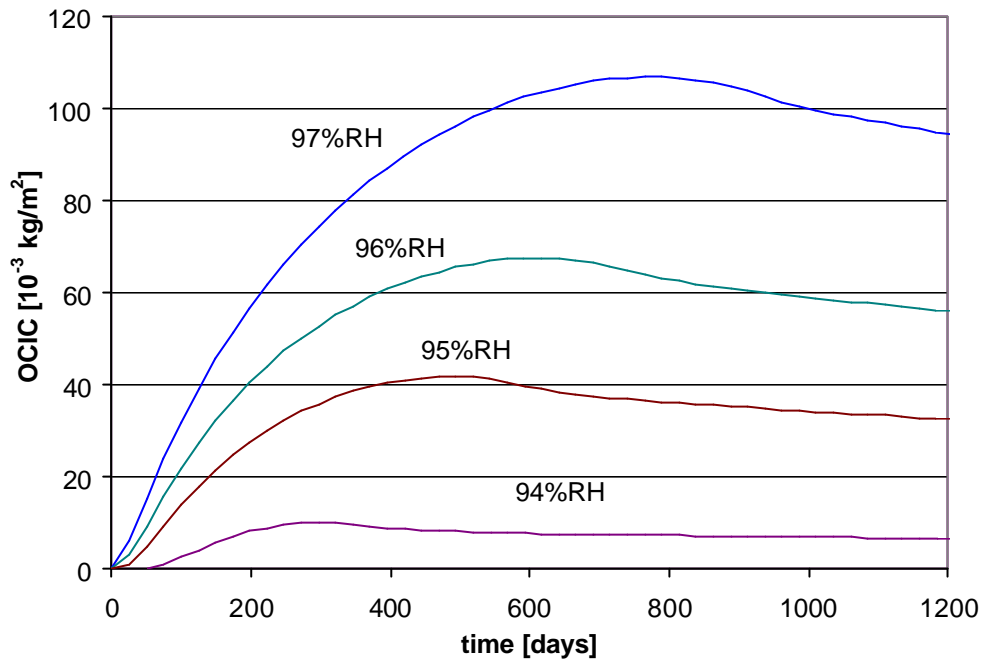
Beräkningar utförda med maximal bildningshastighet $q_{R,max} = 2,6 \cdot 10^{-9}$ [kg/(m²·s)]. Betongens diffusionskoefficient för OC i gasfas $D_{OC} = 2,5 \cdot 10^{-9}$ [m²/s]. Bindningsantagande enligt ekv 8.5, $C_{bound,0} = k_0 \cdot w \cdot c_{air}$ där $k_0 = 0,077$ [m³/kg].



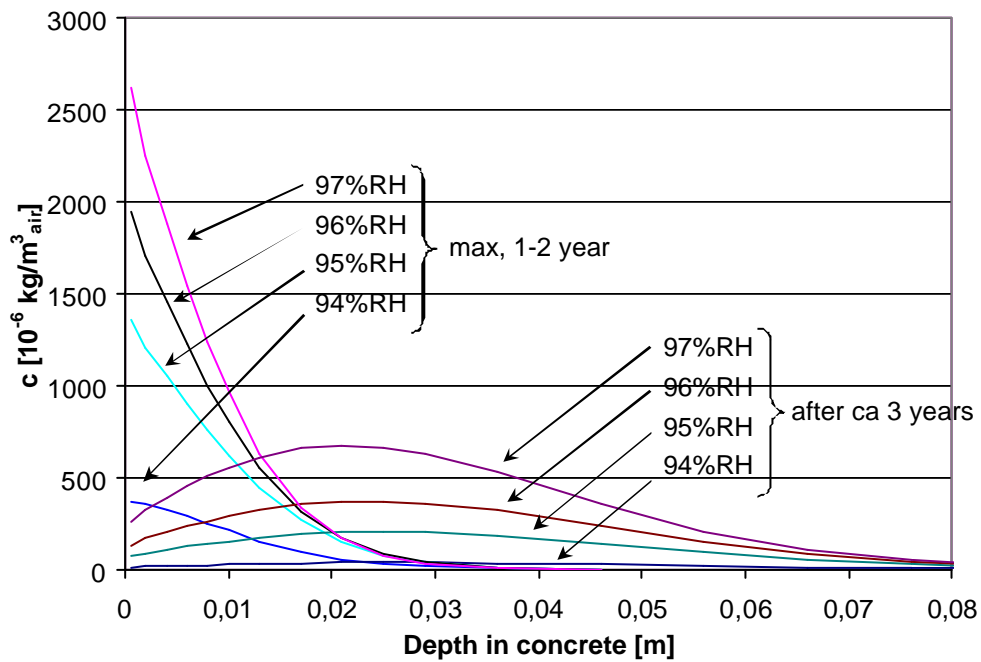
Figur B4.29 Emission från ytan, resultat från Calc.3 med linoleummatta.



Figur B4.30 Sammanställning av totala emissionen från Calc.3 med linoleummatta.



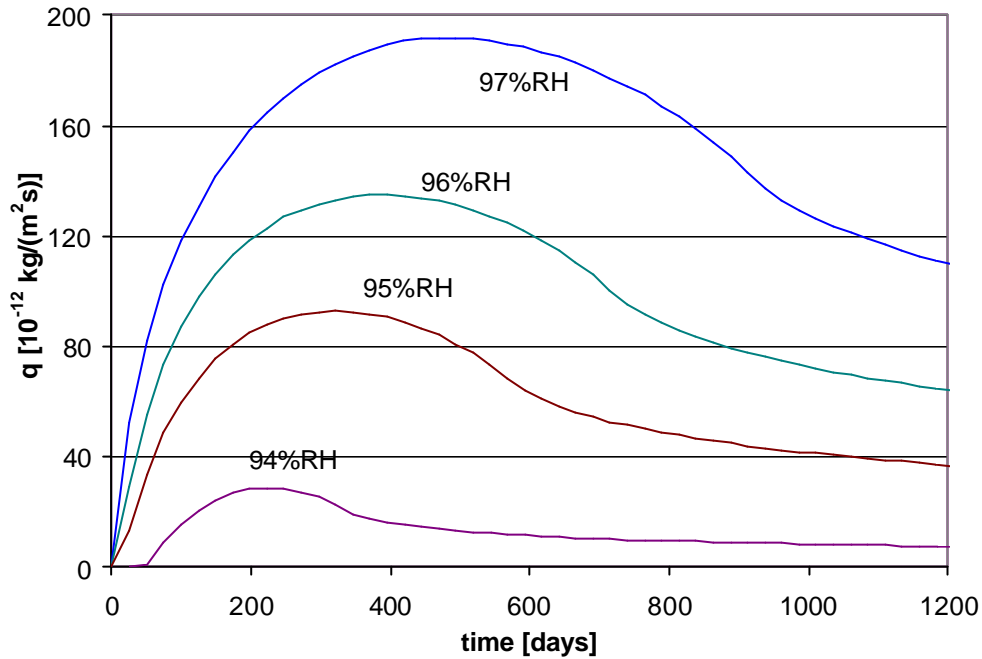
Figur B4.31 OCIC som funktion av tiden i Calc.3 med linoleummatta.



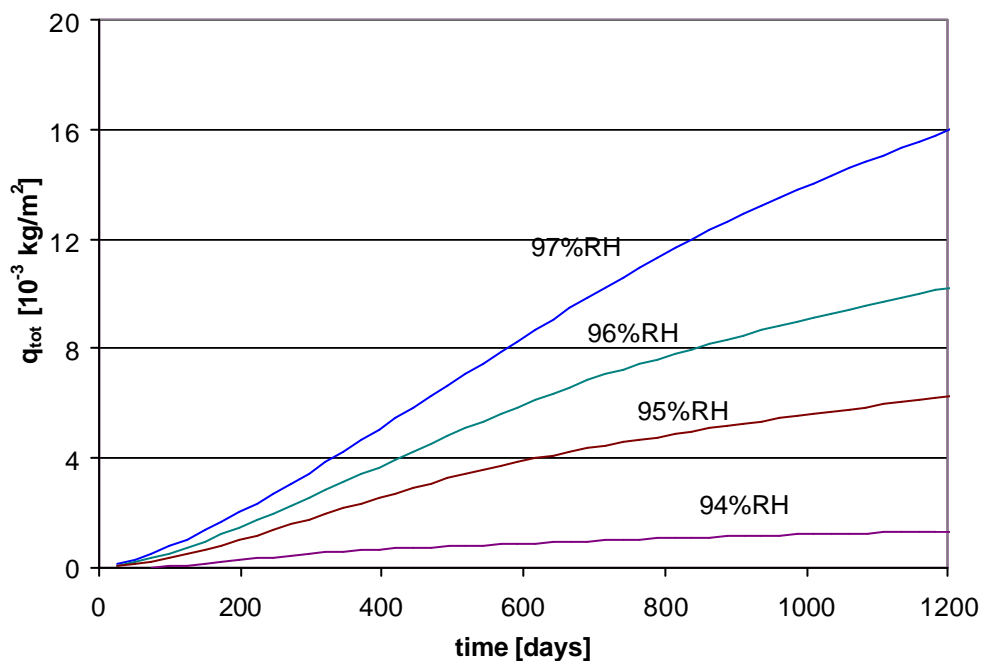
Figur B4.32 Profil av OCIC vid max c_s samt efter långtid i Calc.3 med linoleummatta.

B4.9 Calc.4, resultat med Linoleummatta

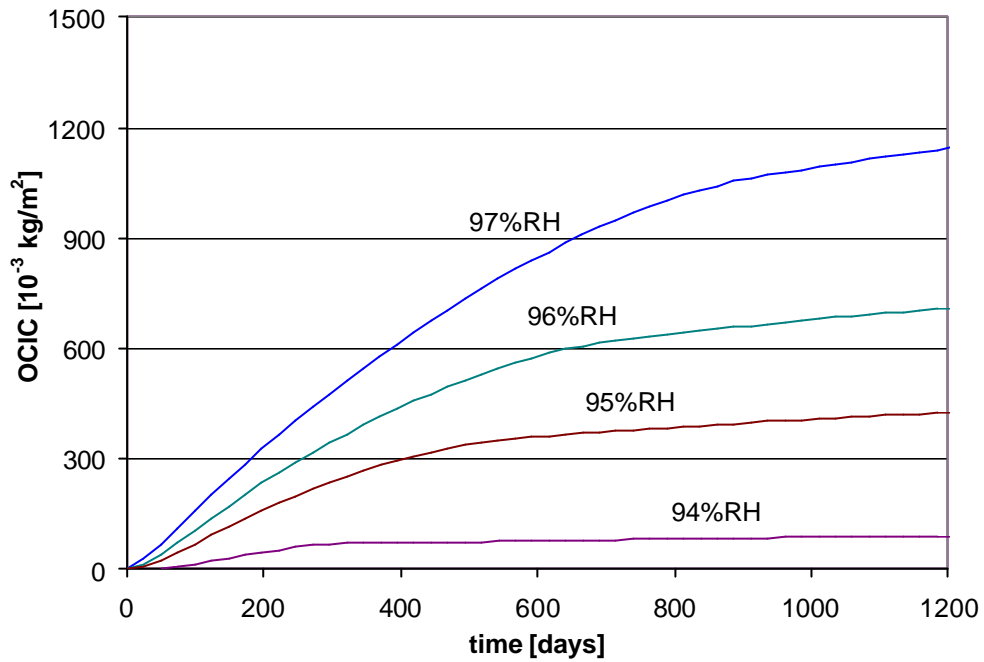
Beräkningar utförda med maximal bildningshastighet $q_{R,max} = 7,3 \cdot 10^{-9}$ [kg/(m²·s)]. Betongens diffusionskoefficient för OC i gasfas $D_{OC} = 9,3 \cdot 10^{-8}$ [m²/s]. Bindningsantagande enligt ekv 8.6, $C_{bound,0} = k_1 \cdot w \cdot c_{air}$ där $k_1 = 2,8$ [m³/kg].



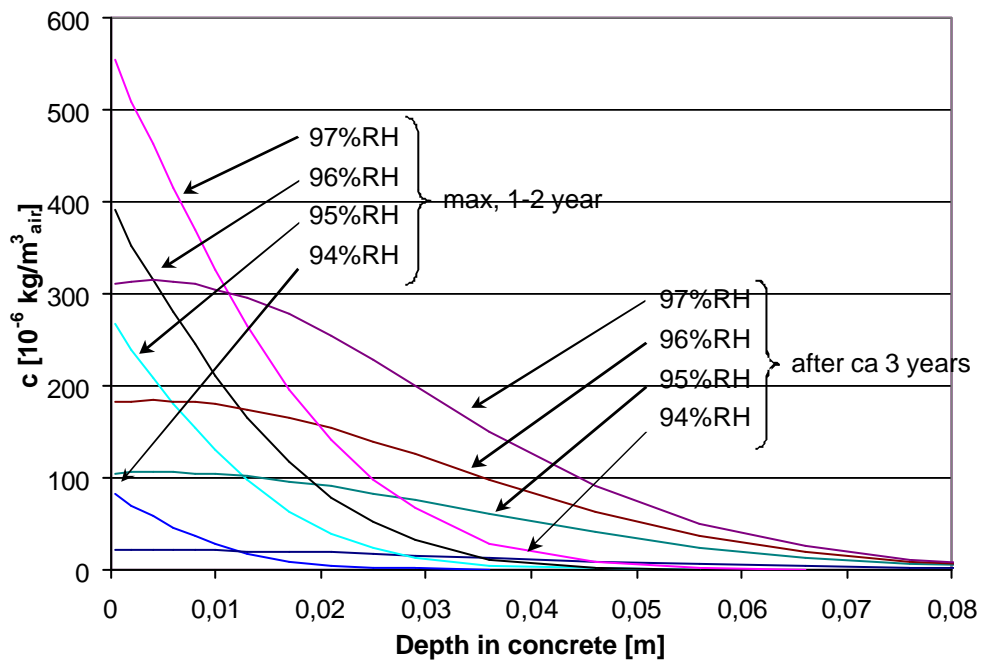
Figur B4.33 Emission från ytan, resultat från Calc.4 med linoleummatta.



Figur B4.34 Sammanställning av totala emissionen från Calc.4 med linoleummatta.



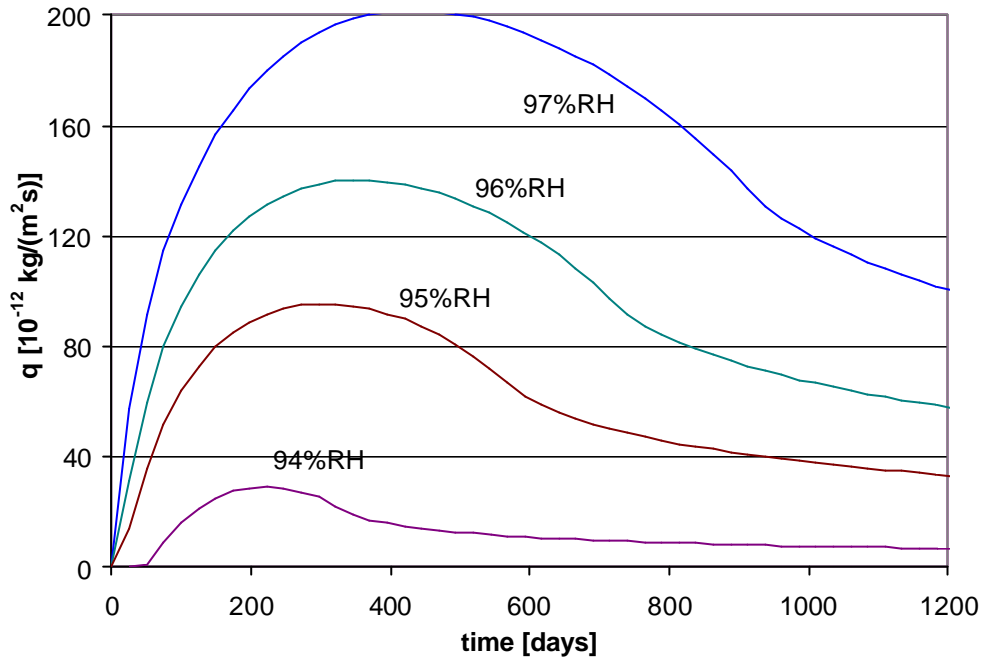
Figur B4.35 OCIC som funktion av tiden i Calc.4 med linoleummatta..



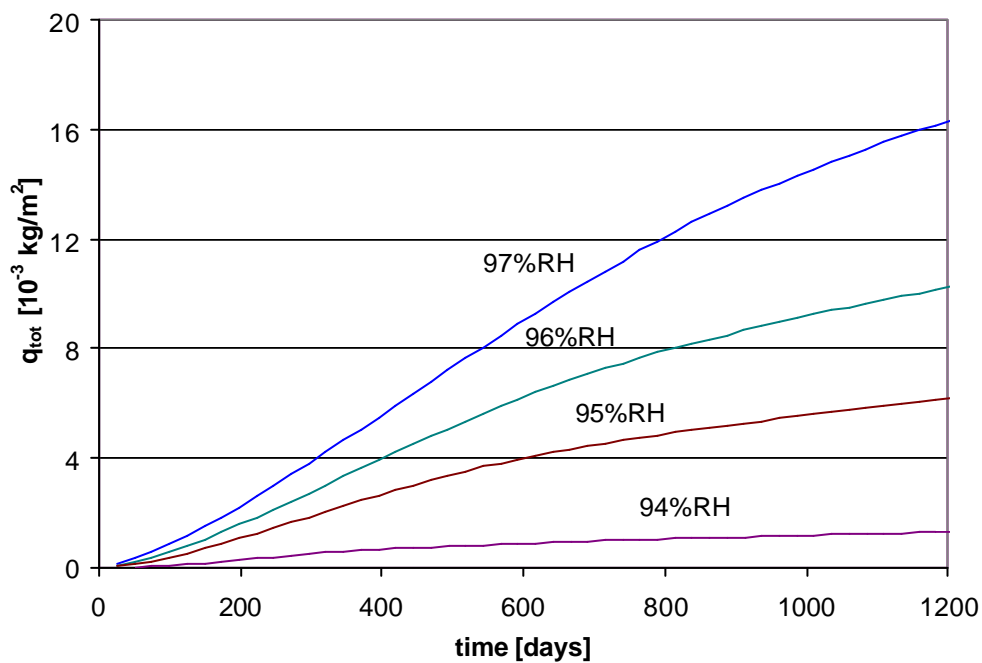
Figur B4.36 Profil av OCIC vid max c_s samt efter långtid i Calc.4 med linoleummatta.

B4.10 Calc.5, resultat med Linoleummatta

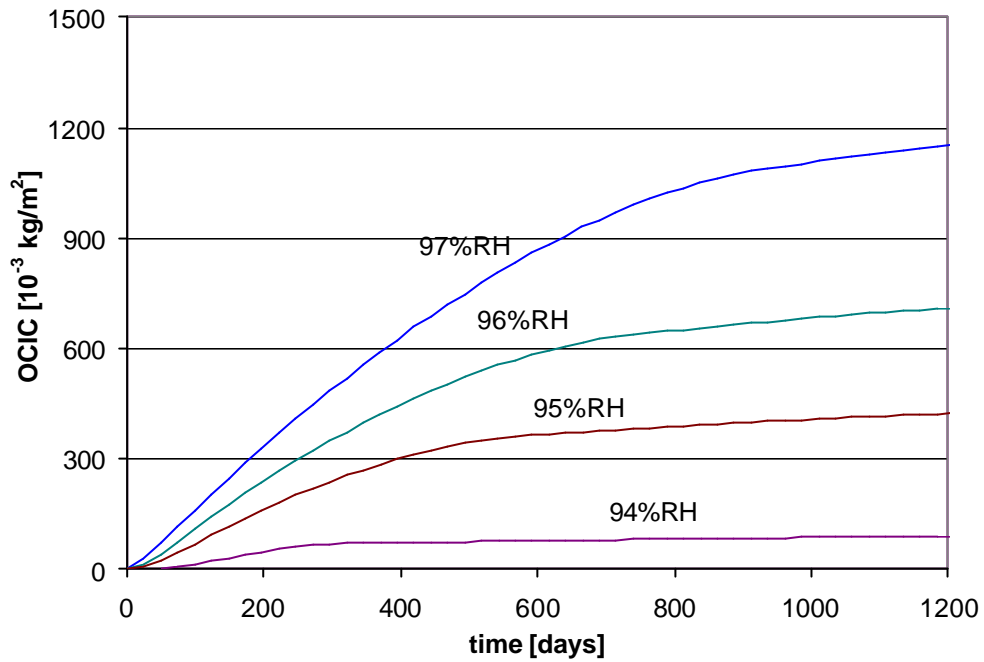
Beräkningar utförda med maximal bildningshastighet $q_{R,max} = 7,3 \cdot 10^{-9}$ [kg/(m²·s)]. Betongens diffusionskoefficient för OC i gasfas $D_{OC} = 9,3 \cdot 10^{-8}$ [m²/s]. Bindningsantagande enligt ekv 8.7, $C_{bound,0} = (k_2 \cdot w + b) \cdot c_{air}$ där $k_2 = 0,077$ [m³/kg] och $b = 16100$ [-].



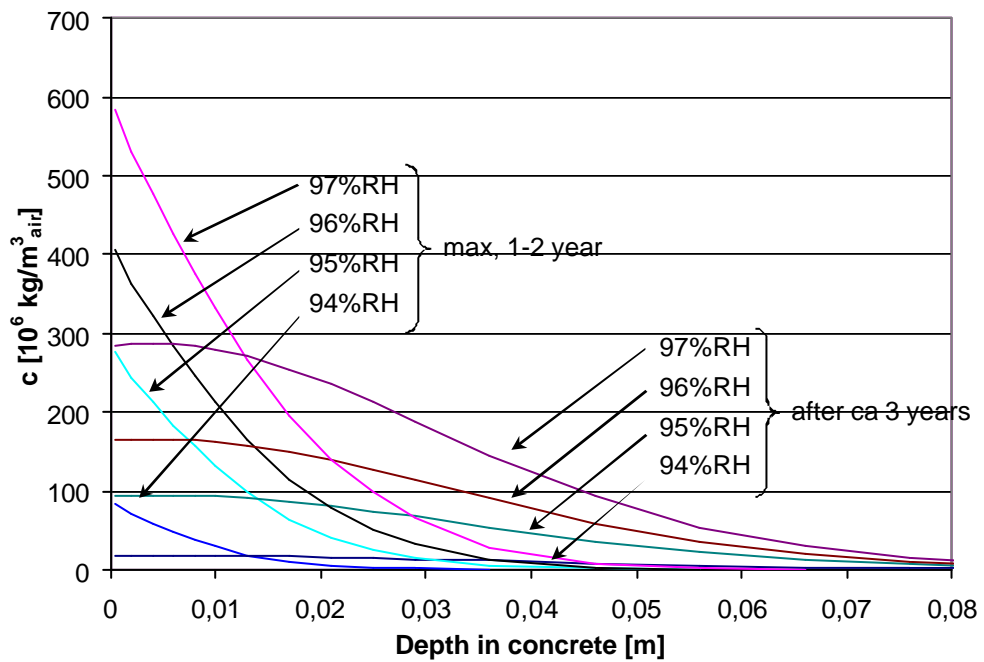
Figur B4.37 Emission från ytan, resultat från Calc.5 med linoleummatta..



Figur B4.38 Sammanställning av totala emissionen från Calc.5 med linoleummatta.



Figur B4.39 OCIC som funktion av tiden i Calc.5 med linoleummatta..



Figur B4.40 Profil av OCIC vid max c_s samt efter långtid i Calc.5 med linoleummatta.