

Kalkutfällningar på för- tillverkade betongelement

Analys av klimatpåverkan
och åtgärdsstudie för betong-
element lagrade utomhus

Daniel Andersson
Ola Lindborg

ISRN: LUTVDG/TVBM--10/5076--SE (1-93)

ISSN: 0348-7911 TVBM

Lunds tekniska högskola
Byggnadsmaterial
Box 118

Tel: 046-2227415
Fax: 046-2224427
www.byggnadsmaterial.lth.se

Förord

Denna rapport är resultatet av ett examensarbete utfört på Avdelningen för Byggnadsmaterial vid Lund Tekniska Högskola. Examensarbetet är utfört i samarbete Cementa AB under perioden september 2009 till februari 2010.

Vi vill framföra ett stort tack till våra handledare Peter Johansson och Sven-Erik Johansson från Cementa AB för all hjälp under arbetes gång. Ett stort tack även till Bo Johansson för all hjälp i betonglabbet och Stefan Backe för hjälp med mätutrustningen. Vi vill även tacka Bengt Nilsson för hjälpen med betongblandaren och Per-Olof Rosenkvist på Avdelningen för Konstruktionsteknik för all hjälp med klimatkammaren.

Daniel Andersson

Ola Lindborg

Lund januari 2010

Sammanfattning

Detta examensarbete behandlar förekomsten av kalkutfällningar på förtillverkade betongelement och hur dessa skall kunna undvikas genom åtgärder i ett tidigt skede av tillverkningsprocessen.

Som en inledande förstudie undersöktes och utvärderades provkroppar som varit placerade i ett klimat med hög relativ fuktighet under en längre tid. Provkropparna hade lagrats under varierande förutsättningar vilket skapat olika resultat. Analyser av provkropparna gjordes visuellt på håll och genom ett mikroskop. Vidare gjordes röntgendiffraktionsanalyser på skrapprov från betongproverna för att bestämma utfällningarnas kemiska sammansättning.

Trots att förtillverkade betongelement ofta lagras utomhus under tak och är på så vis skyddade från direkt nederbörd så är kalkutfällningar vanligt förekommande. I huvudstudien har två klimatfall studerats som skulle kunna orsaka kalkutfällningar trots skydd från direkt nederbörd. Det första fallet som undersöktes var en inre fuktvandring som uppstår då ett nygjutet element placeras ett mycket kallt klimat efter härdning inomhus. Det andra fallet som behandlades var då ett element under lagring utomhus utsattes för ett väderomslag från kallt till varmt. Väderomslaget medförde kondensbildning på betongytan. Klimaten simulerades i en klimatkammare som styrde både temperatur och relativ fuktighet. Betongreceptet som användes under huvudstudien erhöles från Stängbetong i Långviksmon.

Resultaten från försöken med en inre fuktvandring visade inte på några kalkutfällningar. En inre fuktvandring som uppstår när ett element placeras i ett kallt klimat bedöms alltså inte kunna framkalla kalkutfällningar på en betongyta. Provkropparna som utsattes för ett väderomslag fick däremot kraftiga kalkutfällningar som missfärgade ytorna.

Utifrån resultaten från huvudstudien utformades en åtgärd som skulle förhindra alternativt minska mängden tidiga kalkutfällningar. Åtgärden baserades på att betongelementen skulle härda i en hög relativ fuktighet i ett alternativt två dygn. Vid varje försök göts två provkroppar som fick härda i 55 % respektive 85 % relativ fuktighet.

Resultaten visade på kraftiga kalkutfällningar hos de provkroppar som fick härda i 55 % relativ fuktighet. Provkropparna som fick härda i 85 % relativ fuktighet under ett dygn var däremot helt fria från kalkutfällningar efter klimatsimuleringen.

Vidare utfördes försök för att hitta en enkel åtgärd som förhindrar kalkutfällningar på förtillverkade betongelement. Försöken baserades på att betongelementen täcktes med en presenning under härdningen inomhus. Tanken var att betongen skulle fukta upp luften under presenningen till gynnsam relativ fuktighet. Ett annat försök gjordes då betongelementen täcktes med en presenning under väderomslaget. Presenningen var tänkt att skydda betongelementen genom att skapa ett trögare klimatsystem.

Resultatet från åtgärdsstudien visade på att täcka betongelementet med en presenning inte är en tillräcklig åtgärd. Orsakerna till detta var sannolikt att presenningen varit för otät och på så vis skapat för stor luftomsättning under presenningen. Den höga relativa fuktigheten har således uteblivit.

Ytterligare åtgärdsförsök var att tillverka ett enkelt tält som lätt skulle kunna föras över elementen under härdningsprocessen. Två alternativ togs fram där det ena tältet byggdes med

stor noggrannhet och alla skarvar tätades med tejp för att inget luftombyte med omgivande luft skulle ske. Det andra tättet byggdes med mindre noggrannhet där skarvarna inte tätades fullt ut. Detta skulle resultera i både en förhöjd relativ fuktighet och en förhöjning av härdningstemperaturen. Mätningar av relativ fuktighet i tälten visade att väldigt gynnsamma nivåer på den relativa fuktigheten (runt 85 – 95 % RF) erhöles i båda tälten. Mätningar av luftens koldioxidhalt i tälten visade dock på att koldioxidhalten efter ett tag hade sjunkit till oacceptabelt låga nivåer, vilket förhindrat karbonatiseringen.

Slutsatsen är att kalkutfällningar inte kan förhindras endast genom att betongelementen kläs in i en enkel presenning vid tidig härdning. Lösningen ligger i att tillföra klimatiserad luft till tättet under ett dygn så att den relativa fuktigheten kan hållas på en konstant hög nivå. Luften som klimatiseras bör vara inomhusluft för att hålla koldioxidhalten på en normal nivå.

Summary

To summarise, this master's thesis work treats the occurrence of efflorescence on prefabricated concrete elements, as well as how these can be avoided through measures in an early stage of the production process

As an introductory study some sample bodies, which have lain in a climate with high relative humidity during a longer time, were examined and evaluated. The sample bodies have been stored during different conditions which has created varied results. Analyses of the sample bodies were done partly visually from a distance and partly through a microscope. Furthermore, some XRD-analysis was done on scrape samples from the concrete bodies in order to decide the chemical composition of efflorescence.

Despite the fact that prefabricated concrete elements often are to be stored outdoors under ceilings, and thereby protected from direct precipitation, efflorescence is commonly occurring. In the central study, two climate cases have been analyzed with the possibility to cause efflorescence despite protection from direct precipitation. The first case that was studied treated internal moisture transport that arises when a new founded concrete element after initial hardening in an indoor climate is placed in a very cold climate. The other case that was studied was when a concrete element during its storage outdoors is exposed for a weather change from cold to hot. The different climates were pretended in a climate chamber that governed both temperature and relative humidity. The concrete recipe that was used during the central study was received from Strängbetong in Långviksmon.

The results from the sample bodies that were set for an internal moisture transport indicated a very small amount of efflorescence, which can be linked to condensation during the time when the sample bodies were taken out from the freezer. An interior moisture transport that occurs when an element is placed in a cold climate is therefore not assessed with the development of efflorescence on a concrete surface. The sample bodies that were set for the weather change from cold to hot might on the other hand, showed considerable efflorescence on their surfaces.

On the basis of the results from the central study; a measure that would prevent or decrease the occurrence of efflorescence was to be found. The measure of the study was based on the fact that the concrete elements would be able to harden in a high relative humidity for one or two days. At each attempt two sample bodies were founded. One was stored in 55% relative humidity in order to constitute reference against the other one that were stored in 85% relative humidity.

The results showed a considerable efflorescence on the sample bodies that were stored in 55% relative humidity. The sample bodies that were stored in 85% relative humidity during a day and night on the other hand, were entirely free from efflorescence after the condensation experiment.

Further experiments were performed in order to find a more simplified measure that prevents efflorescence on prefabricated concrete elements. The experiments were based on covering the concrete elements with a tarpaulin during hardening indoors. The target was to get the concrete to dampen the air under the tarpaulin to 80 - 90% relative humidity. Another experiment was done where the concrete elements were covered with a tarpaulin during the

weather change in the climate box. The tarpaulin was meant to protect the concrete elements by creating a more resistant climate system.

Results from the measure study showed that to just cover the elements with a tarpaulin is not sufficient in order to achieve a sufficient carbonate layer that protects against future efflorescence. The reasons for this were most likely that the tarpaulin was letting too much moisture out and thereby created a big air turnover under the tarpaulin. This resulted in a lack of high relative humidity.

The final measure experiment was created to produce a simple tent that can be pursued over the elements during the hardening process. Two alternatives were analyzed where the first tent was built with high precision and the joints were sealed with tape in order to prevent any change of air with the ambient climate. The other tent was built with less precision leading to a higher exchange of air with the ambient climate. The target in both cases was to achieve an increased relative humidity and hardening temperature. Measurements of relative humidity in the tents showed that very favourable levels of the relative humidity were received in both tents. Measurements of the carbon dioxide concentration of the air in the tents, however, showed that the carbon dioxide concentration after a while had fallen to unacceptably low levels which prevented the carbonate process to proceed.

The final conclusion is that efflorescence can not be prevented only by covering the concrete elements in a simple tarpaulin or tent in an early hardening. The solution lies in allocating indoor air with controlled relative humidity to the tent during a day and night. The use of indoor air is enough to keep a sufficient level of carbon dioxide in the tent.

Innehållsföreteckning

1	Inledning	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Frågeställning	1
1.3	Syfte	2
1.4	Metod	2
1.5	Avgränsningar.....	3
2	Övergripande teori.....	4
2.1	Cementets uppbyggnad och betongens mognadsutveckling	4
2.2	Fuktens inverkan i betong	5
2.3	Karbonatisering i betong	7
2.4	Orsaker till en missfärgad yta.....	8
2.5	Förebyggande åtgärder mot kalkutfällningar	10
2.6	Åtgärder vid kalkutfällningar	13
3	Kalkutfällningar i praktiken	14
3.1	Nilsbybron i Värmland.....	14
3.2	Ingvar Kamprads Design Centrum, IKDC i Lund	15
3.3	Parkeringshus i en halländsk kuststad.....	16
3.4	Studiebesök.....	17
4	Material, utrustning och provningsmetod	19
4.1	Material	19
4.2	Utrustning	20
4.3	Pölprovsmetoden.....	21
5	Förstudie – Provkroppar härdade i hög relativ fuktighet	22
5.1	Inledning.....	22
5.2	Tillvägagångssätt	22
5.3	Pölprov	23
5.4	Resultat.....	24
5.5	Sammanställning av resultat.....	31
5.6	Diskussion	31
6	Huvudstudie – Klimatsimulering.....	34
6.1	Inledning.....	34
6.2	Inre fuktvandring	34
6.3	Kondens på betongyta.....	34
6.4	Teoretiska beräkningar	35
6.5	Tillvägagångssätt	40
6.6	Simulering av klimat.....	43
6.7	Resultat.....	45
6.8	Sammanställning av resultat.....	54
6.9	Diskussion	55
7	Åtgärdsstudie.....	57
7.1	Inledning.....	57
7.2	Åtgärder.....	57
7.3	Tillvägagångssätt	58
7.4	Resultat.....	59
7.5	Sammanställning av resultat.....	72

7.6	Diskussion	73
8	Slutsats	75
8.1	Fukttekniska egenskaper	75
8.2	Långtidsaspekt	76
8.3	En klimatstyrd lösning	76
8.4	Sammanfattande slutsatser	77
8.5	Framtida forskning.....	77
9	Referenser.....	79
10	Bilaga 1 – Beräkning av temperaturen och ånghalten i olika djup vid fem tidpunkter	81
11	Bilaga 2 – Beräkning av yttemperatur med 5 minuters intervall.....	83
12	Bilaga 3 – Loggning av yttemperatur, relativ fuktighet och koldioxidhalt.....	84
13	Bilaga 4 – Röntgendiffraktionsanalys: Förstudie	85
14	Bilaga 5 – Röntgendiffraktionsanalys: Huvudstudie	88
15	Bilaga 6 – Röntgendiffraktionsanalys: Åtgärdsstudie	90

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Användning av pigmenterad betong vid tillverkning av fasadelement har blivit allt vanligare de senaste åren. I takt med detta ökar problemet kring kalkutfällningar då beställaren ofta ställer högre krav på betongens yta vad gäller kulörens jämnhet och beständighet än tidigare. Det finns otaliga fall där kalkutfällningar förändrat den tänkta estetiken. Objekt som kan nämnas är bland annat Ingvar Kamprads Designcentrum och Nova köpcentrum i Lund.

Vid problem med kalkutfällningar vänder sig beställaren oftast till tillverkaren som vanligtvis åtgärdar detta med någon typ av efterbehandling i form av tvättning med syra eller blästring. Dessa metoder medför dock ibland icke önskvärda förändringar på fasadytan. Exempel på sådana kan vara att ytan ruggas upp och då bli känslig för smuts eller att cementpastan löses upp av syran så att ballasten friläggs.

Tidigare forskning kring problemet med kalkutfällningar har utförts där bland annat faktorer som har en inverkan på förekomsten av kalkutfällningar definierats. Trots goda resultat från tidigare undersökningar har ingen praktisk lösning som förtillverkningsindustrin kunnat använda sig av presenterats. Intresset för en enkel åtgärd som skulle kunna förhindra kalkutfällningars närvaro på fasadelement är stort för både tillverkare och beställare.

1.2 Frågeställning

För att kalkutfällningar skall kunna ske krävs tillgång på fritt vatten, koldioxid och kalciumhydroxid (Neville, 2002). Ett vanligt sätt för elementtillverkarna att skydda betongen mot fritt vatten, och därmed undvika kalkutfällningar under lagring, är att placera elementen utomhus under tak. Problemen har dock visat sig kvarstå trots denna åtgärd och det finns därför stor anledning att tro att fritt vatten kan tillföras på elementen genom andra sätt än just nederbörd. Två fenomen som med stor sannolikhet tros kunna tillföra betongytan den mängd vatten som krävs för att kalkutfällningar ska uppstå är genom kondens eller en inre fuktvandring i betongen. Dessa fenomen kan uppstå vid övergång från en kall natt till en varm dag eller då ett element som precis avformats placeras i ett kallt klimat utomhus för lagring.

För att erhålla ett bestående skydd mot framtida kalkutfällningar hos ett element under dess livslängd krävs ett gynnsamt härdningsklimat i ett tidigt skede. Elementtillverkningsfabrikerna har ofta ett pressat schema vid sin tillverkning och det finns sällan utrymme för några större förändringar i tillverkningsprocessen. En eventuell åtgärd som skulle kunna göra elementen bestående mot kalkutfällningar måste därför vara enkel och inte ha för stor inverkan på tillverkningsprocessen.

1.3 Syfte

Syftet med examensarbetet är att undersöka två alternativa klimat bortsett från direkt nederbörd som skulle kunna ge upphov till kalkutfällningar. Det första fallet baseras på att omgivande klimat växlar från kallt till varmt under ett antal gånger vilket skulle kunna jämföras med en övergång från natt till dag. Det andra är ett element som ”temperaturchockas” genom en kraftig temperatursänkning som då ger upphov till en inre fuktvandring mot ytan.

Vidare är syftet att ta fram en eller flera åtgärder som förtillverkningsindustrin skall kunna använda sig av för att förhindra risken för tidiga kalkutfällningar på betongytor.

1.4 Metod

Arbetet startade med en litteraturstudie där betong som material och de kemiska processer som berör kalkutfällningar insamlades från tidigare litteratur och vetenskapliga artiklar. Efter den litterära studien gjordes ett studiebesök på en förtillverkningsfabrik för att se hur tillverkningsprocessen och deras lagringsförhållanden av förtillverkade betongelement såg ut. Den besökta förtillverkningsfabriken var Strängbetong i Herrljunga där de arbetar mycket med ytorna på sina fasadelement.

I förstudien utfördes en utvärdering av provkroppar i betong som har förvarats i klimat med mycket höga relativa fuktigheter. Provkropparna var gjutna och placerade i klimatrums av Bo Johansson och Peter Johansson från avdelningen för byggnadsmaterial vid Lunds Tekniska Högskola sommaren 2009. Hälften av provkropparna simulerades innehålla en oändlig mängd vatten för att skapa en stor och jämn fukttransport mot ytan. Parallellt med studien utfördes ett pölprovsvärförök på en liknande betong för att med säkerhet skapa rena kalkutfällningar. Genom att studera resultaten från pölprovsvärföröket kunde kalkutfällningarnas utseende undersökas. Undersökningen låg sedan till grund för vidare analys av utfällningarna på provkropparna som lagrats i höga relativa fuktigheter.

I huvudstudien undersöktes olika klimat som kan orsaka ytliga kalkutfällningar. Undersökningarna i betonglaboratoriet i Lund utfördes utefter de metoder och rutiner som råder på fabriken i Herrljunga för att efterlikna industrin. Eftersom elementen med känsliga betongytor förvaras under tak gjordes undersökningar för att förklara uppkomsten av kalkutfällningar på sådana element. Två teorier togs fram och klimatet simulerades i en klimatkammare för att bekräfta teorierna. Resultaten från dessa simuleringar granskades sedan och låg som grund för vidare undersökningar.

Utifrån resultaten och tidigare forskning undersöktes olika alternativ i en åtgärdsstudie för att förhindra alternativt minska mängden tidiga kalkutfällningar. Provkropparna utsattes för ett väderomslag vilket enligt huvudstudien varit det klimat som orsakat mest kalkutfällningar. Åtgärden som utformades skulle vara direkt fysisk och anpassad för industrin. En åtgärd togs fram där betongelementen fick härda under klimatstyrda förhållanden. En annan åtgärd var att elementen fick härda under presenning samt skyddas med presenning under klimatsimuleringen.

Provkropparna undersöktes till mesta dels visuellt och med hjälp av ett sprickmikroskop. Resultaten var ofta svåra att bedöma eftersom de är av subjektiv art. I en del fall utfördes skrapprov på betongytorna som sedan skickades till Cementa Research AB på Gotland för att bekräfta utfällningarnas kemiska sammansättning. De praktiska momenten har utförts på avdelningen för byggnadsmaterial vid Lunds Tekniska Högskola i samarbete med Cementa AB och Strängbetong.

1.5 Avgränsningar

Examensarbetet har avgränsats till att omfatta förtillverkade fasadelement i betong. På grund av tidsmässiga begränsningar har ett specifikt betongrecept undersökts erhållet från Strängbetong i Långviksmon. När provkroppar gjutits för att erhålla stora ytliga porer har ytterligare ett betongrecept använts.

Kalkutfällningarna har undersökts visuellt och bestämts kemiskt genom röntgendiffraktionsanalys. Åtgärdsförslagen har begränsats till att enkelt beskrivas teoretiskt och undersökas i en klimatkammare. Inga fullständiga modeller av åtgärdsförslagen har byggts upp i denna rapport.

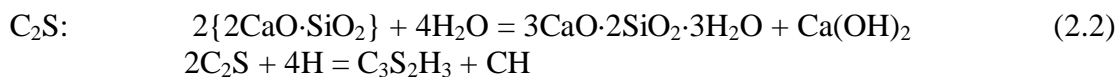
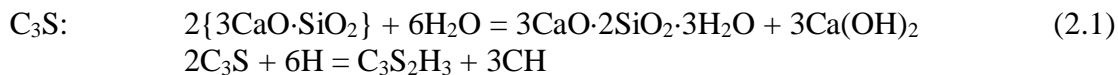
2 Övergripande teori

2.1 Cementets uppbyggnad och betongens mognadsutveckling

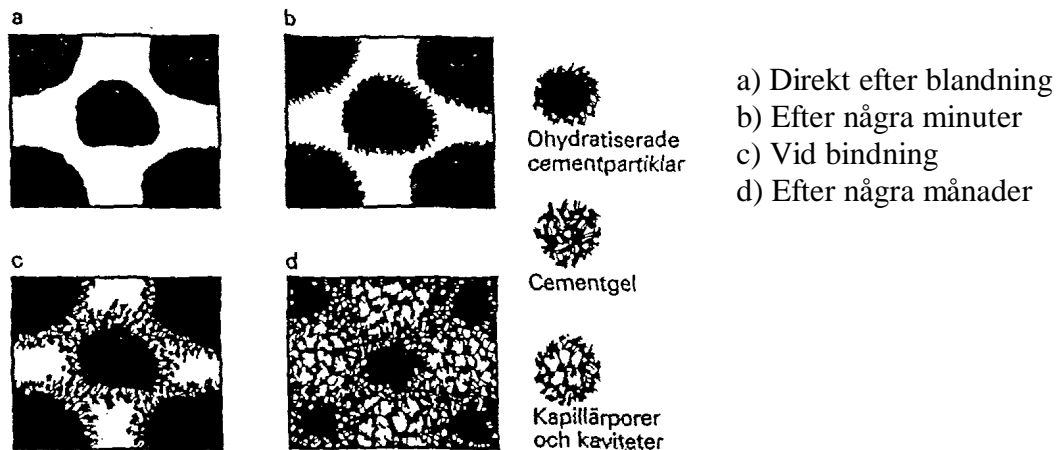
Cement som används i Sverige består av finmald portlandsklinker som i sin tur till största delen består av lera och kalksten. En mängd olika tillsatsmaterial kan även tillsättas för att ge betongen olika egenskaper. Exempel på sådana material är gips, kalkstensfiller eller puzzolaner (kiselstoft, flygaska eller masugnsslagg). Procenten finmald portlandsklinker styr vilken kvalitet cementet får tillsammans med klinkermineralernas innehåll. Portlandscement består av ett antal kemiska komponenter som bildas under tillverkningen där de viktigaste listas nedan. (Johansson, 1994)

- Trikalciumsilikat, C_3S
- Dikalciumsilikat, C_2S
- Trikalcialuminat, C_3A
- Tetrakalciumaluminat, C_4AF

Andelen av dessa komponenter styr vilka egenskaper cementet får. Närmare beskrivning om komponenternas inverkan på cementets egenskaper behandlas inte i rapporten. De komponenter som är intressanta med tanke på kalkutfällningar är de två översta, trikalciumsilikat, C_3S , och dikalciumsilikat, C_2S . Det är dessa som i huvudsak står för bildandet av kalciumhydroxid vid reaktion med vatten. När kalciumsilikaterna kommer i kontakt med vatten reagerar dessa och bildar kalciumsilikathydrat, även kallad CSH-gel, och kalciumhydroxid, CH. Reaktionerna för bildandet av CSH-gel och CH redogörs i 2.1 och 2.2. (Johansson, 1994)



När cementet kommer i kontakt med blandningsvattnet startar hydratationen omedelbart, se figur 2.1. Cementreaktionerna kommer att pågå så länge det finns oreagerat cement kvar och tillgång på vatten. Ytan på cementkornet binder till sig blandningsvattnet och bildar en mantel av cementgel runt cementkornet. När vattnet binds kemiskt till cementkornet och bildar cementgel minskar dess volymandel med 25 % i förhållande dess ursprungliga volym. Då tjockleken på manteln hos varje cementkorn ökar avtar hydratationshastigheten eftersom det tar längre tid för vattnet att diffundera in till ej hydratiserat cementet. När dessa gelpartiklar binds samman med angränsande gelpartiklar hårdnar cementpastan. Mellan partiklarna bildas små och fina porer, så kallade gelporer. Det utrymme som fortfarande återstår mellan cementkornen kallas kapillärporer och är betydligt grövre än gelporererna. Kapillärporerna kan vara slutna eller öppna, dvs. porerna kan vara fristående eller sammankopplade i större nätverk i betongen. Om porerna är öppna möjliggörs transport genom betongen av ämnen, antingen lösta i vatten (joner) eller i gasform. (Fagerlund, 1994)

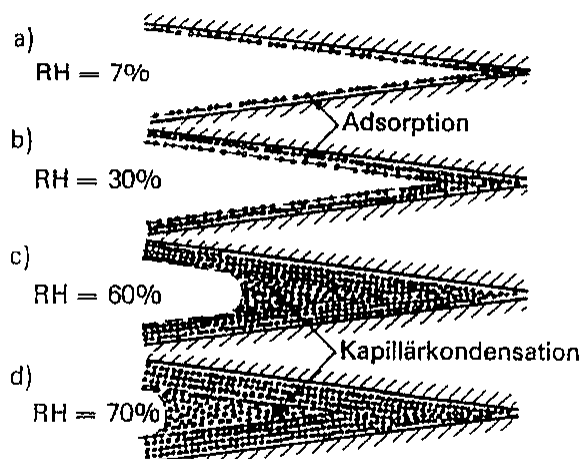


Figur 2.1 – Figurerna a - d redogör för fyra olika stadier av hydratationsgrad för cement. (Powers, 1962)

Hydratationshastigheten är beroende av vattencementtalet eftersom den anger koncentrationen av cement i blandningsvattnet. Initialt är hastigheten högre i en betong med lågt vattencementtal men avtar med tiden eftersom vattnet hela tiden får längre sträcka att diffundera för att kunna nå det oreagerade cementet. En betong med högre vattencementtal får däremot en högre hydratationsgrad efter något dygn på grund av den högre andelen blandningsvatten. Ett lägre vattencementtal ger en minskad porositet hos betongen vilket resulterar i mindre och smalare kapillärporer. Detta resulterar i att betongen får en lägre permeabilitet och därav blir tätare. (Fagerlund, 1994)

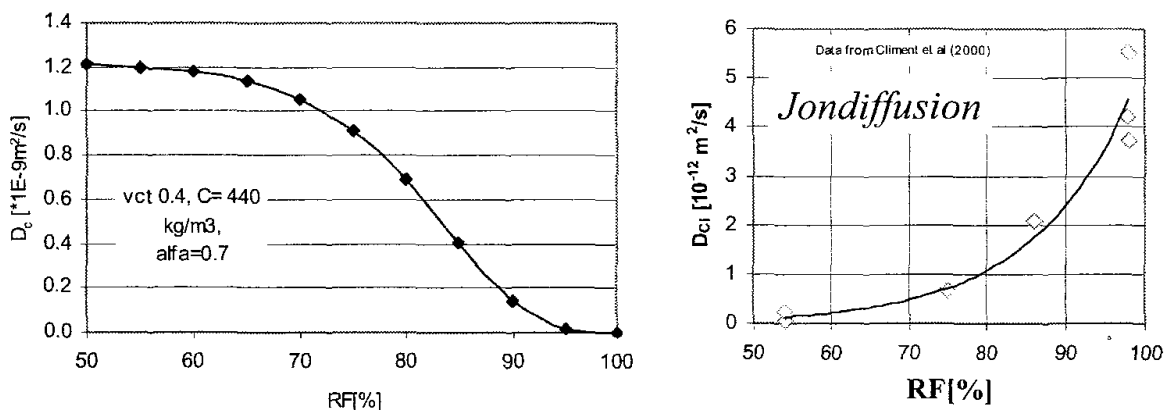
2.2 Fuktens inverkan i betong

Mängden fukt i betongens porer styrs av det omgivande klimatet. Så länge det råder en skillnad i ånghalt mellan betongen och det omgivande klimatet kommer det att ske en fukttransport i betongen. Betongens fukthalt styrs av vilken relativ fuktighet det finns i den omgivande miljön, såvida inte fritt vatten är i kontakt med betongen och då kan sugas in kapillärt i porerna. Vattenånga kan antingen adsorberas eller kapillärkondenseras i betongens porer. Adsorption innebär att vattenmolekyler adderas till en yta tills en jämvikt mellan ytkrafter och rådande relativ fuktighet uppnås. Om den relativa fuktigheten ökar binds molekylerna lättare till ytan vilket innebär att fukthalten och den relativa fuktigheten i betongen ökar vid ökad relativ fuktighet i det omgivande klimatet. När adsorbatlagret blir tillräckligt tjockt kan det i små porer bildas en krökt vattenmenisk för en viss relativ fuktighet. Den krökta vattenmenisken ger ett undertryck som tillåter vattenmolekyler att kondensera vid lägre relativ fuktighet jämfört med hos en plan yta. Denna fuktfixering benämns kapillärkondensation. Radien på porerna styr vid vilken relativ fuktighet som en vattenmenisk kan uppstå. (Nilsson, 1994)



Figur 2.2 - Figuren visar fyra principiella figurer på hur fuktfixeringen kan se ut för fyra olika relativa fuktigheter. (Ahlgren m.fl., 1976)

Transport av ämnen i betong kan ske i antingen ång- eller vätskefas. Ämnen som är lösta i vatten kan endast transporteras i de porer som är vätskefyllda. Ämnen i ångfas kan genom diffusion transporteras både i luft- och vätskefyllda porer. Transport av ämnen i ångfas i vätskefyllda porer sker mycket långsammare jämfört med transport i luftfyllda porer. Figur 2.3 nedan är en principiell bild som illustrerar detta resonemang. (Nilsson, 1994)



Figur 2.3 - Figuren visar två diagram som redogör för fuktens inverkan på diffusionskoefficienter där grafen till vänster gäller för gas och den till höger för kloridjoner. (Nilsson, 1994)

2.3 Karbonatisering i betong

Karbonatisering är en process som startar i samma ögonblick som den nygjutna betongen avformas och kommer i kontakt med koldioxiden i luften. När kalciumhydroxid reagerar med koldioxid sker en reaktion där kalciumkarbonat och vatten bildas. I vilken hastighet karbonatiseringen sker styrs av rådande klimat där temperatur, luftfuktighet och koldioxidhalt har störst inverkan. Även betongens vattencementtal har inverkan då det påverkar betongens permeabilitet och koncentration kalciumhydroxid. För att reaktionen ska kunna ske krävs närvaro av fritt vatten eftersom kalciumhydroxiden måste vara löst i vatten för att kunna reagera med koldioxiden. Således kan ingen karbonatisering ske då betongen är i jämvikt med ett torrt klimat. Reaktionen för hur kalciumkarbonat bildas kan ses nedan. (El-Turki et al. 2006)



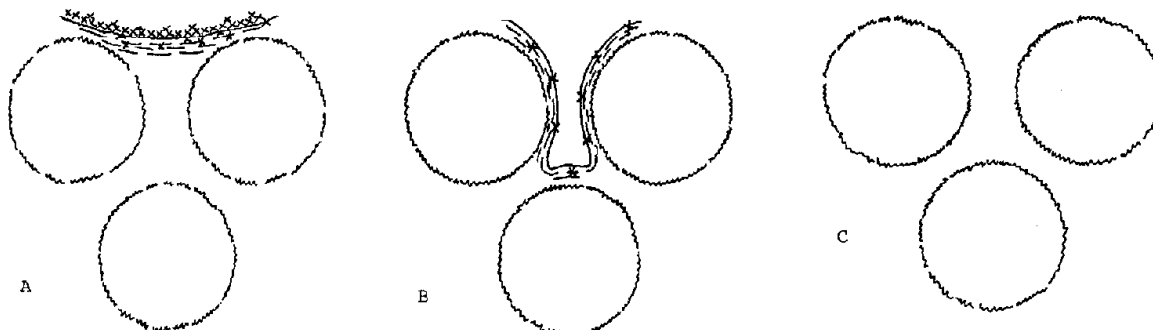
Vid en ändring av det omgivande klimatet är det ytskiktet hos betongen som först ställer sig i jämvikt. Därför är det yttre klimatet av intresse eftersom den tidiga karbonatiseringen av kalciumhydroxid sker i ytskiktet och det är då det föreligger risk för en eventuell kalkutfällning på betongens yta. Enligt resonemanget i avsnitt 2.2 vad gäller jondiffusion så kan det utläsas att transporten av joner sker betydligt snabbare med ökad relativ fuktighet. En snabbare transport av löst kalciumhydroxid bör således ge en snabbare karbonatisering i ytskiktet i ett tidigt skede. Att just en hög relativ fuktighet ger en snabb karbonatiseringshastighet har studerats och bekräftats av Samuelsson (1977) och av Nilsson et al. (2006). Det är den långsamma diffusionen av koldioxid löst i vatten kontra den betydligt snabbare jondiffusionen av kalciumhydroxid som leder till att karbonatiseringen sker vid vattenytan (Nilsson, 1994).

När det i den här rapporten talas om karbonatisering i betong gäller det för det allra yttersta lagret, storleksordningen 0.1 – 0.3 mm in i betongen. Karbonatisering av kalciumhydroxid ger en sänkning av betongens pH-värde vilket efter en mycket lång tid kan ge problem som armeringskorrosion då karbonatskiktet tränger djupare in i betongen. En forcerad karbonatisering i ytskiktet för att förhindra eventuella kalkutfällningar påverkar således inte betongens skydd mot korrosion eftersom det handlar om ett så tunt skikt. (Samuelsson, 1977)

En karbonatisering som sker ytligt och skapar en missfärgad betong benämns kalkutfällning. Det finns två olika typer av kalkutfällningar. En primär kalkutfällning sker i ett tidigt skede på grund av fukttransport inifrån och ut mot ytan (Neville, 2002). En sekundär utfällning uppkommer däremot om vatten tillförs utifrån (Neville, 2002). Transporten av kalciumhydroxid mot ytan sker genom diffusion eftersom det uppstår koncentrationskillnader mellan betongens inre och dess yta. Reaktionen kan antingen ske i en vattenfylld por under ytskiktet eller på betongens yta. Figur 2.4 visar var en karbonatisering kan ske beroende på vattenmättnadsgraden. När det regnar på betongen kan porerna i ytskiktet bli vattenmättade vilket kommer leda till att en vattenfilm bildas på ytskiktet. Löst kalciumhydroxid i porerna kan då diffundera ut till vattenfilmen och karbonatisera på betongytan. Detta kan vid tillräcklig mängd ge en synlig kalkutfällning. Enligt Samuelsson (1977) ger en koncentration på 1 g/m² en synlig utfällning.

Kalciumkarbonat är en mycket svårlöslig förening i vatten vilket gör att en kalkutfällning kan vara synlig under mycket lång tid. Eftersom kalkutfällningar är ett estetiskt problem så är

mängden som anses störande högst individuell. På en mörkare betongyta uppfattas naturligtvis en mindre mängd utfällningar som mer störande jämfört med hos en ljus yta på grund av kontrasten mellan färgnyanserna.



Figur 2.4 – Var karbonatisering beroende på vattenmättnadsgraden hos en betong kan ske (A. $S = 1$, B. $0 < S < 1$ och C. $S = 0$), karbonatisering markeras med x. (Samuelsson, 1977)

2.4 Orsaker till en missfärgad yta

Bortsett från kalkutfällningar finns det ett flertal andra faktorer som kan bidra till missfärgningar på en betongyta. Dessa skulle kunna vara val av formmaterial, formläppmedel, saltutfällningar, gjutmetoder och mycket mera. Andra faktorer som beror på den omgivande miljön och som kan påverka ytans kulörbeständighet såsom smuts från trafik eller industri, kemiska föroreningar i luften eller liknande tas inte upp i rapporten. Det är viktigt att känna till dessa orsaker så att en missfärgad yta inte alltid förväxlas med en kalkutfällning.

2.4.1 Formmaterial och formläppmedel

Nyansen på betongytan varierar kraftigt med vilket formmaterial som väljs. Ett formmaterial som är tätt (t.ex. formplywood, plåt eller cellplast) ger en ljusare ton medan ett sugande material, som till exempel obehandlat formvirke, ger en mörkare ton. Om partier i formmaterialet är olika sugande kan detta ge en flammig yta. Vilken typ av formläppmedel som används påverkar även ytans färgnyans, se bild 2.1. En form som suger vatten från betongen medför att ytskiktets vattencementtal sänks då vattenmängden lokalt minskar. (Retelius & Ström, 2001)

Missfärgningarna på ytan kan även kopplas till hur formläppmedlet är applicerat. En ojämn mängd formläppmedel över ytan kan orsaka nyansskillnader och det är därför viktigt att appliceringen av formläppmedlet utförs med noggrannhet så inte detta skall kunna uppstå. En absorberande form medför även en ökad koncentration av cementpartiklar vid ytan där de skapar ett tunt lager med låg permeabilitet vilket hindrar kalciumhydroxid från att komma upp till ytan och därmed kan kalkutfällningarna reduceras. (Russel, 1987)

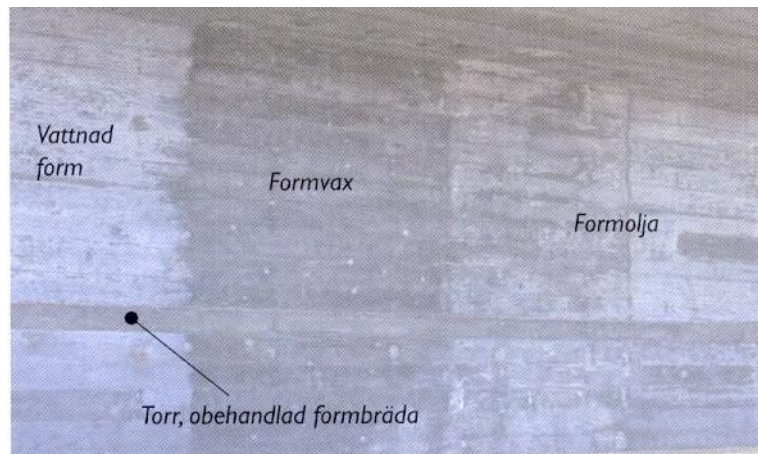


Bild 2.1 - Formsläppmedels påverkan på ytans nyans. (Retelius och Ström, 2001)

2.4.2 Saltutfällningar

Det finns ett flertal andra ämnen i cementen som skulle kunna ge en missfärgning på betongytan. Olika salter kan lösta i vatten transporteras i betongens porsystem och när de träffar en avdunstande yta bilda en utfällning (Neville, 2002). Dessa salter är dock vattenlösliga och kan därför enkelt spolras av med vatten. När det diskuteras om saltangrepp är det vanligare att dessa förknippas med sprängning då salterna kristalliseras i betongens porer, vilket medför en volymökning (Rombén, 94). Det är fullt möjligt att dessa kristalliseras på betongens yta. Typiska sådana saltutfällningar skulle kunna vara natrium-, kaliumkarbonat eller diverse sulfatföreningar såsom kalcium-, natrium-, eller kaliumsulfat. Enligt teknisk data från Cementa AB finns alla dessa alkaliska metaller och sulfater i modernt bygg- och anläggningscement (Cementa AB, 2009).

2.4.3 Gjutmetoder

Andra orsaker som kan ge en missfärgad yta kan vara en ojämn och dålig vibrering, vibrering i sent skede, för snabb härdning av redan gjuten betong mellan gjutpallarna, skillnader i konsistens mellan olika gjutpallar och mycket mer (Retelius & Ström, 2001). Det är viktigt att formen är väl utförd så att det inte finns några glipor där det finns risk att betongen blir exponerad för luft. Om detta förekommer finns det risk att det sker en snabbare lokal uttorkning vid området för glipan vilket kan resultera att härdningsprocessen blir ojämn över ytan. Detta kan i sin tur orsaka missfärgningar på betongytan. En mörkare ton fås även ofta om gjutning sker vid låga temperaturer. Detta kan dock förhindras genom isolering av gjutformen (Russel, 1987).

2.5 Förebyggande åtgärder mot kalkutfällningar

Omfattande studier och tester har tidigare gjorts, inte minst av Samuelsson (1977), för att fastställa vilka faktorer som påverkar bildandet av kalkutfällningar på betongytor. Resultaten från dessa studier visar att det finns en rad olika parametrar som måste beaktas.

2.5.1 Relativ fuktighet

Tidigare forskning visar att en gynnsam härdning i förhöjd relativ fuktighet är den absolut effektivaste metoden för att minska risken för kalkutfällningar på en betongyta. Vid en hög relativ fuktighet, cirka 80-95 %, vattenfylls de yttersta porerna vilket tillåter en snabb karbonatisering i dessa. När det fria vattnet i de yttersta porerna sedan avdunstar stannar kalciumkarbonatet kvar i porerna och fungerar sedan som ett skyddande skikt mot ytterligare reaktioner mellan kalciumhydroxid och luftens koldioxid. Detta beror både på att koncentrationen av kalciumhydroxid minskar i ytskiktet och att det samtidigt får en längre och svårare transportväg. En förutsättning för att denna metod ska fungera är tillgång på koldioxid i luften. En förhållandevis låg relativ fuktighet, <60 %, gör att endast mycket små vattenporer fylls vid ytan. Detta gör att härdningen avstannar och inget skyddande karbonatskikt byggs upp. När större porer sedan fylls med vatten och det bildas en vattenfilm på betongytan vid till exempel regn, löser detta vatten kalciumhydroxiden i betongen och karbonatiseringen mellan luftens koldioxid och den lösta kalciumhydroxiden kan istället ske ute på vattenfilmens yta. När sedan vattenfilmen avdunstar lägger sig karbonatet ute på betongytan som då blir missfärgad. (Samuelsson, 1977)

Provresultat från undersökningar gjorda av El-Turki et al. (2007) angående den relativa fuktighetens inverkan på karbonatiseringshastigheten visar på nästan en fördubbling av denna från 0,5 mg/dag till 0,97 mg/dag vid en ökning av relativ fuktighet från 65 % till 97 % för hydrauliskt kalk.

2.5.2 Vattencementtal

Förhållandet mellan mängden blandningsvatten och cementshalt har även en viss inverkan på karbonatiseringsförloppet. Samuelsson (1977) genomförde omfattande pölprovsförsök för betongprover med ett vattencementtal på 0.4 respektive 0.7 härdade i olika relativa fuktigheter. För att inverkan av vattencementtal ska bli som störst bör betongen härdas i en hög relativ fuktighet. Annars blir skillnaderna mycket små. Resultatet från dessa undersökningar visar på att en betong med högt vattencementtal har efter gynnsam härdning lägre risk för att ge en kalkutfällning jämfört med en betong med lägre vattencementtal. (Samuelsson, 1977)

Vid härdning i låg relativ fuktighet (<60 %) avstannar hydratiseringen för de båda vattencementtalen i det yttersta lagret. En betong med högt vattencementtal innehåller mer blandningsvatten och därav mer porvatten vilket gör att den har hunnit längre i sitt härdningsförlopp vid avformningen. Mängden kalciumhydroxid som har gått i lösning innan porerna hunnit torka är därför större. När betongen sedan torkar ut efter avformningen tillåter det mer öppna porsystemet koldioxid att transporteras längre in i betongen och på så sätt kan karbonatiseringen ske på ett större djup. Detta gör att koncentrationen av kalciumhydroxid vid

ytskiktet blir lägre och därav går mindre kalciumhydroxid i lösning när betongytan sedan vattenbelastas. (Samuelsson, 1977)

Resultat från pölprovsvärsök visar att det tar längre tid för fritt vatten att försvinna från en betongyta med lågt vattencementtal jämfört med en betongyta med högt vattencementtal. Orsaken till att vattenpölen försvinner snabbare hos betongen med högt vattencementtal beror på att denna är mer permeabel vilket gör att vattnet kan tränga in i betongen mycket snabbare. Eftersom betongen med lågt vattencementtal vattenbelastas under en längre tid kommer mer kalciumhydroxid diffundera ut till ytan. (Samuelsson, 1977)

Vid vattencementtal lägre än 0.39 kan fullhydratation inte ske eftersom det inte finns tillräckligt med utrymme för cementgelen att expandera. (Fagerlund, 1994)

2.5.3 Temperatur

I produktionen upplever man att det uppkommer fler och grövre kalkutfällningar på betongytor under vinterhalvåret (Russel, 1987). Detta beror till stor del på att klimatet då är fuktigare, kallare och vädret är ostadigare. En annan trolig anledning till mer problem vintertid kan bero på att det råder lägre relativ fuktighet i lagringshallen inomhus jämfört med sommartid. Den lägre relativa fuktigheten medför att hydratiseringen avstannar i ytskiktet (Fagerlund, 1994). Samuelsson (1977) utförde mätningar där han mätte mängden löst kalciumhydroxid för olika betongprover genom urlakningsförsök. Dessa mätningar visar på att kalkurlakningen var större för en betong som härdats i 5°C jämfört med en betong som härdats i 20°C. Detta beror till stor del på att betongens hydratationshastighet är starkt temperaturberoende. Om betongen härdar i en låg temperatur har mindre cement reagerat och därav kommer kalciumhydroxid bildas under en längre tid. För att betongen ska bli mer resistent mot kalkutfällningar vid kallare klimat krävs därför en längre härdning än för en betong härdad i ett varmare klimat.

Genom en förhöjd temperatur påskyndas uppbyggnaden av ett skyddande karbonatskikt och på så sätt reduceras kalkutfällningarna ytterligare. En ökning av temperaturen gav bäst resultat i kombination med en gynnsam relativ fuktighet, 80 % eller högre. Mätningarna bekräftar att det finns ett tydligt samband mellan temperatur och risk för kalkutfällningar, vilket man tydligt upplever i produktionen. (Samuelsson, 1977)

2.5.4 Förhöjd koldioxidhalt

Resultat från Samuelssons (1977) rapport visar på att en ökad koldioxidhalt (5 – 10 %) i luften, tillsammans med hög luftfuktighet (80 %) samt en hög temperatur (60°C) verkar gynnsamt och påskyndar skapandet av ett skyddande karbonatskikt mot kalkutfällningar. Detta gällde både för betong med lågt respektive högt vattencementtal. Resultat från mätningar visar att en härdning i ett sådant klimat kan efter cirka tre timmar motstå en vattenbelastning i upp till tio timmar. (Samuelsson, 1977)

Genom att ha en förhöjd koldioxidhalt i en härdkammare kan även uppvärmning och omsättning av ny luft i kammaren begränsas. Ur miljösynpunkt är metoden tveksam på grund av att koldioxid är en växthusgas. Detta beror dock naturligtvis på varifrån koldioxiden kommer ifrån. Om koldioxid tas tillvara från en förbränningsprocess där den är en rest, kan det tvärtom vara bra ur miljösynpunkt. En så hög koncentration av koldioxid är direkt giftig

för människor vilket ställer mycket höga krav på utrustningen för de personer som ska arbeta i en sådan miljö. Dessa faktorer gör att en metod med förhöjd koldioxid är svår att tillämpa i produktionen men det finns helt klart möjligheter.

2.5.5 Puzzolaner

Puzzolaner är tillsatsämnen som blandas i cementet för att modifiera betongens egenskaper. Sådana tillsatsämnen är till exempel flygaska och silikastoft. Puzzolaner kräver närvaro av cement och vatten för att reagera då ämnet anses vara icke hydrauliskt. När cementet reagerar med vatten bildas enligt tidigare cementgel och kalciumhydroxid. Puzzolanerna reagerar i sin tur med kalciumhydroxiden samt vattnet och bildar då ytterligare cementgel. Utifrån detta har teorier satts upp om att en tillförsel av puzzolaner skulle minska risken för kalkutfällningar med tanke på att koncentrationen av kalciumhydroxid minskar i betongen. Tillsats av kiselstoft kommer även att medföra en tätare betong vilket bör ge mindre urlakning av kalciumhydroxid. (Ljungkrantz m.fl., 1994). Schematiskt kan reaktionen ske enligt 2.4



Studier och laboratorieförsök gjorda av Samuelsson (1977) samt Nilsson et al. (2006) visar att en tillsats av puzzolana ämnen minskade mängden kalkutfällningar, men att denna minskning ändå ansågs som otillräcklig. Tillsats av puzzolana ämnen i syfte att minska synliga kalkutfällningar innebär inte bara en sänkning av kalciumhydroxid i ytskiktet utan i hela betongen. Detta medför ett lägre skydd mot armeringskorrosion hos betongen.

2.5.6 Hydrofoberingsmedel

Kalkutfällningar uppstår när fritt vatten kommer i kontakt med betongens yta och tränger in i porerna så kalciumhydroxid kan diffundera ut och karbonatisera. En brytning av denna kontakt borde därför minska mängden kalkutfällningar. Nilsson et al. (2006) gjorde sådana försök där de tillsatte ett hydrofoberande ämne i betongen. Det verksamma ämnet i tillsatsen var stearat som gör betongytan vattenavvisande. Deras prover visade dock att mängden kalkutfällningar ökade jämfört med en betong utan detta tillsatsämne, vilket måste tolkas som att en tillsats av hydrofoberingsmedel är en högst osäker åtgärd.

2.5.7 Ytbehandling

Ytterligare en metod för att motverka kalkutfällningar på en betongyta är att efterbehandla betongytan med någon typ av ytbehandlingsmedel. Syftet med ytbehandlingen är att öka accelerationen av karbonatiseringen, vilket sker genom att det applicerade ämnet ökar koldioxidupptagningen. Ytbehandling kan även ske med ämnen som förhindrar att karbonatisering överhuvudtaget kan ske. (Samuelsson, 1977)

Omfattande tester gjorda av Samuelsson (1977) visar på att en ytbehandling av ämnen som antingen accelererar karbonatiseringsförloppet eller hindrar att karbonatisering sker, ofta har en gynnsam inverkan på kalkutfällningar. Problemet för många av de testade ämnena var att det förekom bieffekter som gjorde behandlingen olämplig. Exempel på sådana ämnen är sodalösning, som har egenskaper i form att accelerera karbonatiseringen. Applicering av

sodalösning gav en avsevärd reducerande kalkutfällning, men behandlingen i sig gav upphov till missfärgningar. (Samuelsson, 1977)

Nilsson et al. (2006) genomförde försök med ytbehandlig av en silanbaserad impregnering. Här var målet att hindra karbonatiseringen från att ske på ytan genom att skärma av ytan från kontakt med flytande vatten. Resultaten från dessa test visade på att inga kalkutfällningar uppstod. Ett stearinliknande lager bildades på betongen efter torkning, vilket kan ses som en missfärgning. Det framkommer inte hur beständig denna film var eller hur lätt det skulle kunna lossna från ytan. Osäkerheter fanns även i hur stor mängd impregnering som skulle appliceras och vid vilken tidpunkt. Överlag var inte försöken så omfattande att någon riktig slutsats kunde dras.

2.6 Åtgärder vid kalkutfällningar

Om utfällningarna inte är hårt sittande kan de omsorgsfullt avlägsnas mekaniskt. Relativt löst sittande utfällningar kan först fuktas upp för att sedan borstas bort eller skrapas bort med ett handverktyg. Metoden bör utföras försiktigt så inte ytans utseende förändras vilket annars skulle ge en estetisk defekt. Andra utfällningar, som diverse salter, kan avlägsnas med enbart vattenspolning. En kalkutfällning kräver däremot en mekanisk kraft då dessa inte är vattenlösliga (Russel, 1987). Enligt Nilsson et al. (2006) testresultat var vissa kalkutfällningar hårt sittande medan vissa gick lätt att avlägsna. Om ytan anses mindre känslig kan denna blästras med sand alternativt högtrycktvättas med vatten för att avlägsna kalkutfällningarna (Russel, 1987).

Den vanligaste metoden enligt Samuelsson (1977) för borttagning av kalciumkarbonat är genom syratvättning. Olika syralösningar som kan användas är bland annat saltsyra, fosforsyra, ättiksyra eller citronsyra. När syran kommer i kontakt med kalciumkarbonat kommer detta att lösas upp. Effekten av åtgärden beror på vilken syrablandning som används och i vilken koncentration. Är det en för stark syrablandning som används kommer ytskiktet att frätas bort och friläggning av ballasten kan ske. Risk finns alltså för att ytans utseende kan förändras. Det innebär även att det skyddande karbonatskiktet under ytan avlägsnas. Detta skulle kunna orsaka att nya kalkutfällningar uppkommer då fritt kalciumhydroxid återigen kan transporteras till ytan och bilda kalciumkarbonat. Vid syratvättning är det ytterst viktigt att betongytan först vattenspolas så att porsystemet vattenmättas vilket förhindrar att syran tränger in i porsystemet. Detta är viktigt eftersom saltsyra reagerar med kalcium och då bildar kalciumklorid som är starkt hydroskopiskt och kan ge upphov till permanenta och svår borttagna mörka fläckar (Johansson, 1996). Efter syrabehandlingen ska ytan spolas rikligt med vatten för att avlägsna alla rester (Russel, 1987). En annan faktor som talar för att metoden bör användas i begränsad utsträckning är att risken för armeringskorrosion ökar.

3 Kalkutfällningar i praktiken

Man behöver inte leta länge för att hitta kalkutfällningar på betongytor i en stadsmiljö. Ibland kan det vara så vanligt förekommande att man inte ens reagerar över det när man går förbi. För att visa att kalkutfällningar är ett vardagligt fenomen i vår omgivning presenteras här ett par objekt som fått kraftiga missfärgningar i form av kalkutfällningar. Utöver praktikfallen besöktes även en förtillverkningsfabrik där de olika momenten från gjutning till lagring studerades. En inblick gavs om hur industrin ser på problemet med kalkutfällningar samt vilka åtgärder som vidtages vid problem.

3.1 Nilsbybron i Värmland

I början på 1990-talet tog planerna på att bygga en bro över Nilsbysundet fart. Bron skulle utformas med tolv bågformade spann över det 324 meter breda sundet. Bron fick 1997 ett arkitektoniskt pris för sin tilltalande estetik. Brons former är enkla, rena och dess bågar fångar åskådarna på ett rytmiskt sätt. (Halvarsson, 1998)

Ursprungligen hade arkitekten planerat att bron skulle utföras med bågar och pelare i stål men genom produktionsmässigt effektiva och smarta lösningar kunde bron utföras i betong. Bygget upphandlades 1995 då lösningen i just betong valdes. Bågar och pelare göts med en rödpigmenterad betong. Träformarna utfördes på ett innovativt sätt så att de kunde återanvändas för samtliga bågar. Detta gjorde produktionstiden kortare och utförandet billigare. Betongen utfördes med hållfasthets klass K45 med ett vattencementtal på 0.45. Pigmentet som användes innehöll en järnoxid som gav en tegelröd färgton. Då bron utfördes fanns inga krav enligt bronormen vad gäller pigment i infärgad betong. Entreprenören och betongtillverkare enades om att maximalt 4 % av cementvikten fick blandas i. Det negativa med att använda sig av pigmenterad betong är att kalkutfällningarna blir mer distinkta jämfört med hos en naturfärgad betong. Detta är precis vad som har hänt på bron över Nilsbysundet som även kan ses i bilderna 3.1 och 3.2. (Halvarsson, 1998)

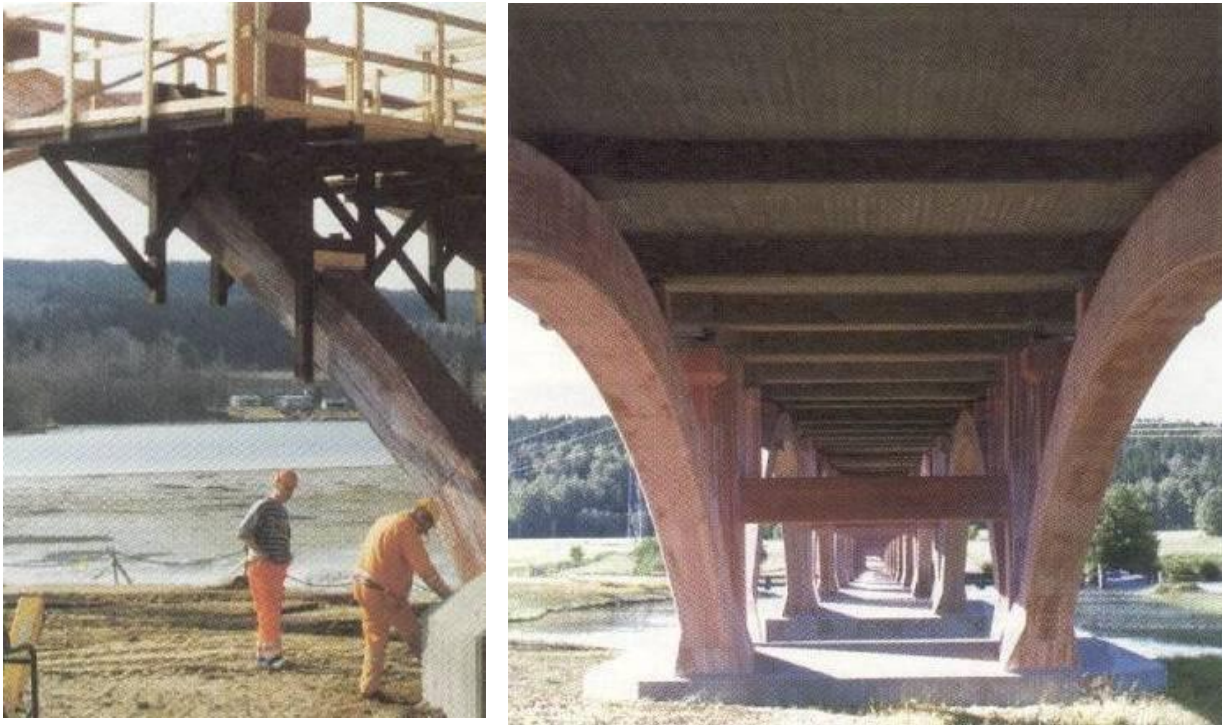


Bild 3.1 och 3.2 – Kalkutfällningar kan ske nästan direkt efter avformning, se bild till vänster. Till höger syns hur kalkutfällningar gjort både bågar och pelare vitflammiga. (Halvarsson, 1998)

3.2 Ingvar Kamprads Design Centrum, IKDC i Lund

I studentstaden Lund byggdes i slutet av 1990-talet IKDC och invigdes 2002. Byggnaden innehåller bland annat kontor, café, föreläsningssalar och övningssalar. Byggnaden ska med sitt innovativa utseende inspirera till ett kreativt och nyskapande arbete. Det mesta av arbetet som är tänkt att bedrivas i fastigheten är inom industriell design och designvetenskap. Fasaden på byggnaden är uppbyggd av förtillverkade betongelement. Elementen består av naturfärgad grå betong. Som kan ses i bilden nedan är ytan vitflammig och det finns ett par rinningsmärken som gör att fasaden inte ser särskilt trevlig ut. Ett skrapprov på de ljusare partierna har gjorts och det har där konstaterats genom en röntgendiffraktionsanalys att det är kalcit, dvs. flammigheten beror på kalkutfällningar. Resultatet från analysen kan ses i bilaga 4.



Bild 3.3 – Kalkutfällningar har gjort fasadelementen på IKDC vitflammiga.

3.3 Parkeringshus i en halländsk kuststad

Ett parkeringshus i en halländsk kuststad är byggt med förtillverkade betongelement. Betongelementen är gjutna med ett svart pigment och är efter härdning nedslipade för att få en synlig ballast. Som kan ses i bilderna 3.4 och 3.5 nedan är ytorna flammiga och ett flertal rinningsmärken förekommer. Missfärgningarna består av kalcit (kristalliserad kalciumkarbonat).



Bild 3.4 – Den pigmenterade och slipade betongytan är missfärgad av kalkutfällningar.



Bild 3.5 – Vatten har runnit längs betongytan vilket gett vita rinningsmärken bestående av kalcit.

3.4 Studiebesök

Strängbetongs förtillverkningsfabrik i Herrljunga besöktes för att titta på deras tillverkningsprocess och elementens härdningsförhållanden. Fabriken i Herrljunga tillverkar mycket fasadelement med känsliga ytor. Ytskiktet kan bestå av pigmenterad betong, speciell ballast, etc. för att ge önskad mönsterstruktur. Ofta efterbehandlas ytorna genom slipning, borstning eller liknande efter kundens önskemål. Den vanligaste typen av fasadelement som

gjuts är så kallade sandwichelement, som är uppbyggda av två betongskivor med mellanliggande cellplastisolering. När en speciell ytstruktur med pigmenterad betong och finare ballast önskas, gjuts denna typ av betong endast i det yttersta skiktet, 25 – 30 mm medan övrig vägg gjuts i vanlig betong.

När elementen är gjutna täcks dessa med ett diffusionstätt material, så kallad membranhärdning, för att förhindra fuktutbyte med omgivningen. Denna härdning pågår normalt i 15 – 20 timmar. Därefter avformas elementen och lyfts till en tillfällig mellanlagring innan de placeras i utomhusklimat på gården. Mellanlagringen pågår till elementen härdat till cirka 60 % av 28 dygns hållfasthet vilket motsvarar ungefär en 50-55 timmar enligt tendenskurvor för normal betong (Fagerlund, 1994). Lagringen sker på två olika sätt beroende på omständigheter. Det första lagringsalternativet är att elementen förvaras inomhus i samma klimat som råder i gjuthallen, och det andra är att elementen täcks med presenning för att få ett fuktigare och därmed ett mer gynnsamt härdningsklimat.

När elementen nått 60 % av 28-dygns hållfasthet lyfts de ut på gården och placeras under tak med icke vindsyddande sidor. Där får de ofta stå i ett par månader innan de fraktas vidare till byggarbetsplatsen. I denna miljö har kalkutfällningar inträffat efter en kortare tid och ibland efter 2 – 3 månader. För att avlägsna kalkutfällningar på en betongyta använder de en svag koncentration av fosforsyra alternativt citronsyra.

4 Material, utrustning och provningsmetod

I detta kapitel presenteras de material och den utrustning som använts under de olika studierna. Vid förstudien i kapitel 5 har undersökningarna till stor del gjorts med sprickmikroskop, röntgendiffraktionsanalys samt genom pölprovsförsök. Resterande instrument och utrustning har använts vid huvud- samt åtgärdsstudien, se kapitel 6 respektive 7. Avsnitt 4.1 beskriver de material som använts vid gjutning av provkroppar för de olika studierna i kapitel 5, 6 och 7.

4.1 Material

4.1.1 Cement

Plattorna göts i förstudien utifrån två olika betongrecept, med vattencementtal på 0.4 respektive 0.55. Receptet med det lägre vattencementtalet innehöll ett anläggningscement från Degerhamn och för det högre ett byggcement från Skövde, se tabell 5.1 och 5.2. Cementet som användes för provkropparna i huvudstudien och åtgärdsstudien var ett byggcement från Slite. Byggcementet från Slite hämtades ur Cementas silo i Limhamn, silo 24, den 14/10 2009.

4.1.2 Ballast

Den ballast som användes i gjutningarna bestod av tre olika fraktioner, 0-8 mm, 8-12 mm och 12-16 mm. Fraktionen 0-8 mm är ett naturgrus och de övriga två fraktionerna var krossmaterial. I förstudien och vid gjutningen av provkroppar med stor porositet användes fraktionen 0-4 mm som siktades fram från 0-8 mm gruset.

4.1.3 Flyttillsatsmedel

I förstudien göts betong med flyttillsatsmedlet Sikament Evo26 och i huvudstudien samt åtgärdsstudien sikament 20 HE. Sikament Evo26 används allmänt som tillsatsmedel i normala betongblandningar medan sikament 20 HE är mer anpassat till förtillverkningsindustrin. Flyttillsatsmedlet tillsätts för att få en smidigare och mer lättflytande betong. Det verkar även vattenreducerande. (Sika, 2007)

4.1.4 Kalkstensfiller

Kalkstensfiller består av krossad och mald kalksten, kalciumkarbonat, som produceras i diverse fraktioner för att få betong med de egenskaper som eftersträvas. Nordkalk menar på att betong med kalkstensfiller blir rörligare, stabilare eller viskösare beroende på fraktion. En finmald kalkstensfiller ger goda effekter vad gäller tidig hållfasthetstillväxt vilket är viktigt för förtillverkningsindustrin. Den kalkstensfiller som användes i betongreceptet är Limus 15 från Nordkalk producerat i Ignaberga. (Nordkalk, 2008)

4.1.5 Pigment

Tillsats av pigment i betongreceptet används för att få en annan kulör på betongen. Pigmentet som användes i rapporten var ett svart pigment från Lanxess av märket Bayferrox M270 som var en syntetisk järnoxid.

4.2 Utrustning

4.2.1 Infraröd temperaturmätare Testo 860-T2

Uppmätningen av ytemperaturen på provkropparna utfördes med en infraröd temperaturmätare från Testo. Instrumentet mäter med en noggrannhet på 1 % av mätvärdet. Utförandet gjordes för att kontrollera de teoretiska beräkningarna.

4.2.2 Koldioxidmätare AirTell 2001VTC

En viktig del av karbonatiseringsprocessen är tillgången på koldioxid. Om halten sjunker avtar reaktionshastigheten vilket inte är önskvärt i någon av de utförda undersökningarna. För att mäta koldioxidhalten under försöken användes en CO₂-mätare från AirTell.

4.2.3 Lufthastighetsmätare SwemaAir300

En annan viktig faktor som påverkar resultaten i stor grad är lufthastigheten över betongytorna under försöken. En hög lufthastighet medför en snabbare temperaturutjämning med omgivande klimat. Mätinstrumentet som användes hade en noggrannhet på 0.04 m/s i intervallet 0.1 – 1.33 m/s vid 20°C.

4.2.4 Klimatkammare CTS C - 40/1000

De klimat som simulerades i försöken åstadkoms i en klimatkammare där temperatur och relativ fuktighet kunde styras. Klimatkammarens angivna klimat kontrollerades med en temperatur och relativ fuktighets logger av märket Hobo-pro series.

4.2.5 Klimatskåp Weisstechnik 305/80 - 180DU

Simuleringen av det mycket kalla klimatet skedde i ett klimatskåp från Weisstechnik där enbart temperaturen kunde regleras till skillnad från klimatkammaren. Lufthastigheten i skåpet är relativt hög vilket medförde att provkroppen förvarades i en mindre klimatbox för att minska luftflödet längs betongytan. Locket på klimatboxen gav fuktigare och lugnare förhållanden.

4.2.6 Sprickmikroskop Graticules Maxta measuring systems

Observationer av provkropparnas yta på mikroskopisk nivå gjordes med hjälp av ett sprickmikroskop med 100 gångers förstoring.

4.2.7 Betongblandare

Tre olika betongblandare användes i försöken beroende på blandningssatsernas storlek och ballastfraktion. I förstudien användes en mindre blandare av märket Hobarth där en sats på totalt 2.8 liter kunde blandas. Blandaren är begränsad till kornfraktioner under åtta millimeter. Till mindre satser av betongreceptet från huvudstudien användes en laboratorieblandare från Zyklos, satser på 5 – 10 liter blandades i denna. De största satserna blandades i en frifallsblandare från Sandby maskin AB, minst 15 liter kunde blandas i denna.

4.3 Pölprovsmetoden

Pölprovsmetoden utförs genom att efter avformning påföra en vattenfilm på betongytan inom ett begränsat område. En rund ring ritas upp med blyerts på betongytan som då kommer att hålla samman vattnet till en pöl på grund av ytspänning. Flera vattenfilmer kan därför appliceras på samma provkropp och vid olika tidpunkter under härdningsförloppet. Vattenfilmen tillåts därefter ligga kvar tills den avdunstat bort. Testerna utförs under härdning i bestämda klimatförhållanden för att erhålla önskat resultat. När den påförda vattenfilmen avdunstat undersöks provkroppen för att fastställa kalkutfällningarnas fysikaliska egenskaper och utseende. Pölprovsmetoden är en bra metod för att fastställa olika faktorerers inverkan på kalkutfällningars förekomst i laboratoriemiljö eftersom det finns möjlighet att variera klimatet i ett klimatrums för olika provkroppar för att sedan ställa resultaten mot varandra.

5 Förstudie – Provkroppar härdade i hög relativ fuktighet

5.1 Inledning

I förstudien utvärderades resultaten från provkroppar som lagrats en längre tid under olika förhållanden. Försöken har utförts av Bo Johansson och Peter Johansson på avdelningen för byggnadsmaterial vid Lund Tekniska Högskola. Syftet med försöken var att undersöka vad en fuktvandring från betongens inre till dess yta har för inverkan på förekomsten av ytliga utfällningar.

5.2 Tillvägagångssätt

5.2.1 Provkroppar

Totalt har åtta provkroppar gjutits. Proven gjuts som plattor med dimensionerna 400x400x30 mm³.

Fyra provkroppar vardera göts med ett anläggningscement, vattencementtal på 0.4, respektive byggcement, vattencementtal på 0.55. För varje enskild provkropp blandades en separat sats i blandaren på 2,8 liter. Betongsammansättningen för proverna med anläggningscement redovisas nedan.

Tabell 5.1 – Betongrecept med anläggningscement

Komponent	Viktandel [kg/sats]
Anläggningscement	1.4
Vatten	0.56
Ballast 0 - 4	4.443
SIKA Evo 26	0.0045

För proverna med byggcement användes samma cementmängd som för anläggningscementen. Då blandningsvolymen var 2.8 liter enligt ovan, ändrades vatten- och ballastmängden för att åstadkomma ett vattencementtal på 0.55 och samtidigt få samma blandningsvolym. Betongsammansättningen för proverna med byggcement redovisas nedan.

Tabell 5.2 – Betongrecept med byggcement

Komponent	Viktandel [kg/sats]
Byggcement	1.4
Vatten	0.77
Ballast 0 - 4	3.918
SIKA Evo 26	0.0045

Gjutning skedde i formar av plywood. Provkropparna membranhärdades de första timmarna efter gjutning för att förhindra fuktutbyte med omgivningen. Detta skedde genom att betongytan täcktes med en plastfolie. Därefter placerades vattendränkta wettexdukar på ytorna

för att skapa en gynnsam härdning. Efter ett dygns härdning placerades provkropparna i respektive klimat.

5.2.2 Klimatkammare

Två provkroppar från respektive betongrecept placerades i ett klimatrum med 95 % relativ fuktighet med formytan vänd uppåt. Två av dessa provkroppar, en för respektive vattencementtal, placerades på en bädd av vattendränkta wettexdukar för att tillåta en stor konstant inre fukttransport, se tabell 5.3.

De två resterande provkropparna för båda betongtyperna lades i en klimatbox med cirka 100 % relativ fuktighet. Klimatboxen placerades i ett klimatrum med en relativ fuktighet på 95 %. För att inte hindra tillgången på koldioxid tilläts viss luftomväxling i klimatboxen. Inuti klimatboxen placerades en av provkropparna för respektive betong på en bädd av vattenmättade wettexdukar. Proverna följdes upp kontinuerligt under lagring och dokumenterades genom fotografering.

Tabell 5.3. Förutsättningar för respektive provkropp.

Prov	Vct	RF [%]	Kontakt med fritt vatten
1	0.4	95	Nej
2	0.4	95	Ja
3	0.4	100	Nej
4	0.4	100	Ja
1	0.55	95	Nej
2	0.55	95	Ja
3	0.55	100	Nej
4	0.55	100	Ja

5.3 Pölprov

En gjutform med dimensionerna 300x300x25 mm konstruerades av formplywood. Därefter blandades en sats på 2,7 liter enligt betongreceptet i tabell 5.4. För att göra kalkutfällningarna tydliga på provkroppen tillsattes svart pigment.

Tabell 5.4 – Betongrecept vid pölprovsförsök

Komponent	Viktandel [kg/sats]
Byggcement	1.62
Vatten	0.648
Ballast 0 - 8	3.888
Pigment	0.162

För att erhålla en jämn fördelning av de torra ingredienserna blandades dessa först tillsammans i blandaren. Därefter tillsattes blandningsvattnet i ett jämnt flöde under omrörning. Då betongblandningen ansågs var något torr tillsattes 0.7 dl vatten, vilket gav betongen ett slutligt vattencementtal på cirka 0.45.

Efter gjutningen vibrerades betongen så att en jämn fördelning i formen erhöles. Därefter placerades en plastfolie över formen för att låta betongen membranhärda i ett dygn. Inget formsläppmedel användes då formplywooden ansågs ha tillräckligt fin yta för att inte förstöra provkroppen vid avformning.

Efter ett dygns membranhärdning avformades provkroppen och den placerades i ett klimatrums med 55 % relativ fuktighet. På provkroppen ritades cirklar med en blyertsenna. Cirklarna ritades med en diameter på 50 mm. I varje cirkel droppades 4 ml avjoniserat vatten med en pipett. Höjden på vattenfilmen blev 2 mm. I hälften av cirklarna appliceras vattnet direkt efter avformning och på resterande appliceras vattnet efter en timme. I klimatrums isolerades provkroppen för att skapa halvoändliga förhållanden, dvs. uttorkning får endast ske från formytan (provet vändes upp och ner i formen). Detta gjorde att provkroppen kan liknas vid ett "oändligt stort" element i sidled samt fick en större tjocklek. Provkroppen förvarades sedan i klimatrums tills dess att vattenfilmerna avdunstat.

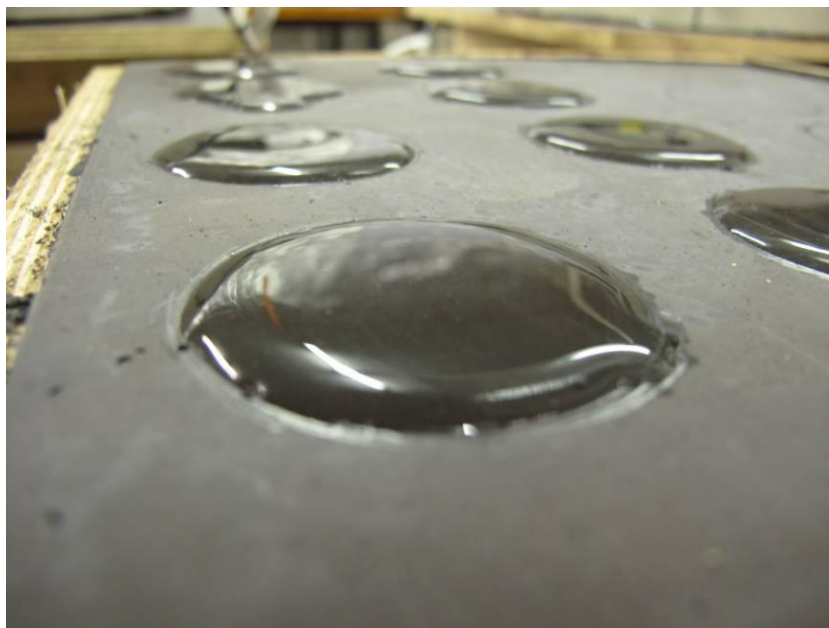


Bild 5.1 – Blyertssträcket håller kvar vattenpölen inom försöksområdet med hjälp av ytspänning.

5.4 Resultat

5.4.1 Flammighet

Provkropparna med ett lågt vattencementtal visade genomgående på en högre grad flammighet än provkropparna med ett högre vattencementtal. På prov 1, vct 0.4, växlande mörka och ljusa partier, vilket skapade en stor kontrast. Kontrasten mellan dessa partier gjorde provkroppens yta mycket flammig. Flammigheten upplevdes som kraftigare hos prov 1, vct 0.4, jämfört med prov 2, vct 0.4. Ytan på prov 2, vct 0.4 var mer missfärgad då kalkutfällningarna var grövre. På bild 5.2 kan skillnaden i flammighet mellan de båda

proverna urskiljas. Längs kanterna fanns en jämn vit rand hos de båda provkropparna. Utmed ytporernas kanter fanns genomgående en tunn vit beläggning.

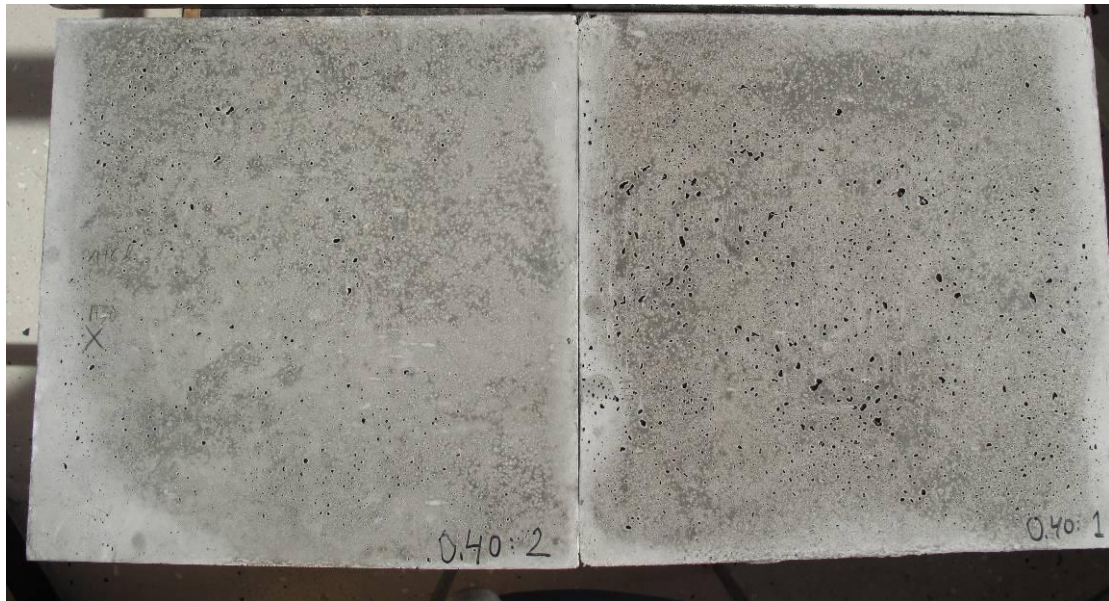


Bild 5.2 – Betongprov 2 respektive betongprov 1 med vattencementtal 0.4

För provkropparna som förvarats i 100 % relativ fuktighet var flammigheten inte lika framträdande. Ytan hos prov 3 och 4, vct 0.4, var aningen ljusare med mindre och färre mörka partier än de tidigare proverna. Den vita randen längs kanten på provet var kraftigare och bredare än för proverna som härdats i 95 % relativ fuktighet. Små vita prickar kunde ses vid kanterna och mitt på ytan. Bild 5.3 visar de båda provkropparna lagrade i 100 % relativ fuktighet.

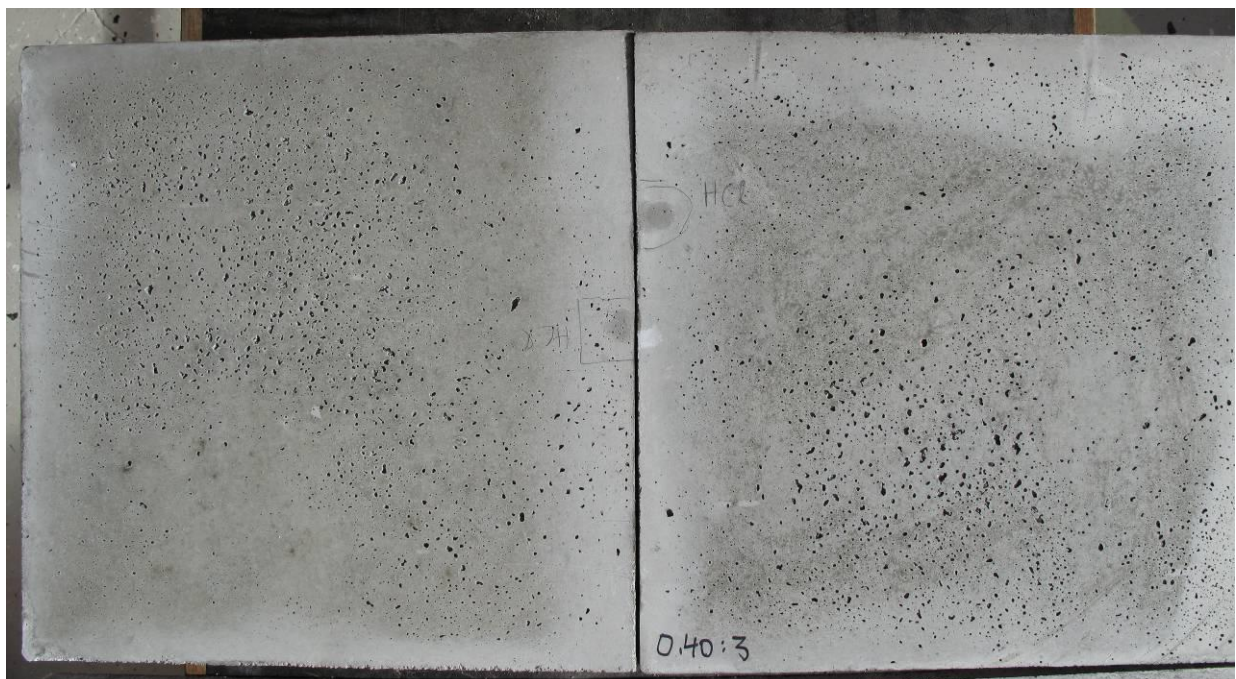


Bild 5.3 – Betongprov 4 respektive betongprov 3 med vattencementtal 0.4

Provkropp 1, vct 0.55, hade en svag ljus yta. Ytan dominerades av små vita prickar. Längs med kanterna fanns en svag jämn utfällning. Ingen direkt flammighet kunde urskiljas på provkroppen. Eventuella utfällningar sammanföll med betongens ljusa färg vilket gjorde att dessa inte blev lika tydliga som för provkropparna med vct 0.4. För prov 2, vct 0.55, kunde på avstånd ingen flammighet urskiljas. Längs provkroppens kanter kunde en ytterst svag och jämn ljus utfällning antyd.



Bild 5.4 – Betongprov 2 respektive betongprov 1 med vattencementtal 0.55

På prov 3, vct 0.55, fanns ingen synlig flammighet mitt på betongytan. Färgnyansen var ljus och jämn. Vita prickar kunde ses jämnt fördelade över hela betongytan. Precis som tidigare bestod de vita prickarna av små porer med vit utfällning utmed dess kanter. Den vita beläggningen utmed kanterna var väldigt svag. Ytan på prov 4, vct 0.55, hade en del mörkare partier, vilket resulterade i en mer definierad ljus kant hos provkroppen. På ett antal ställen utmed kanterna uppenbarade sig små vita prickar, se bild 5.5.

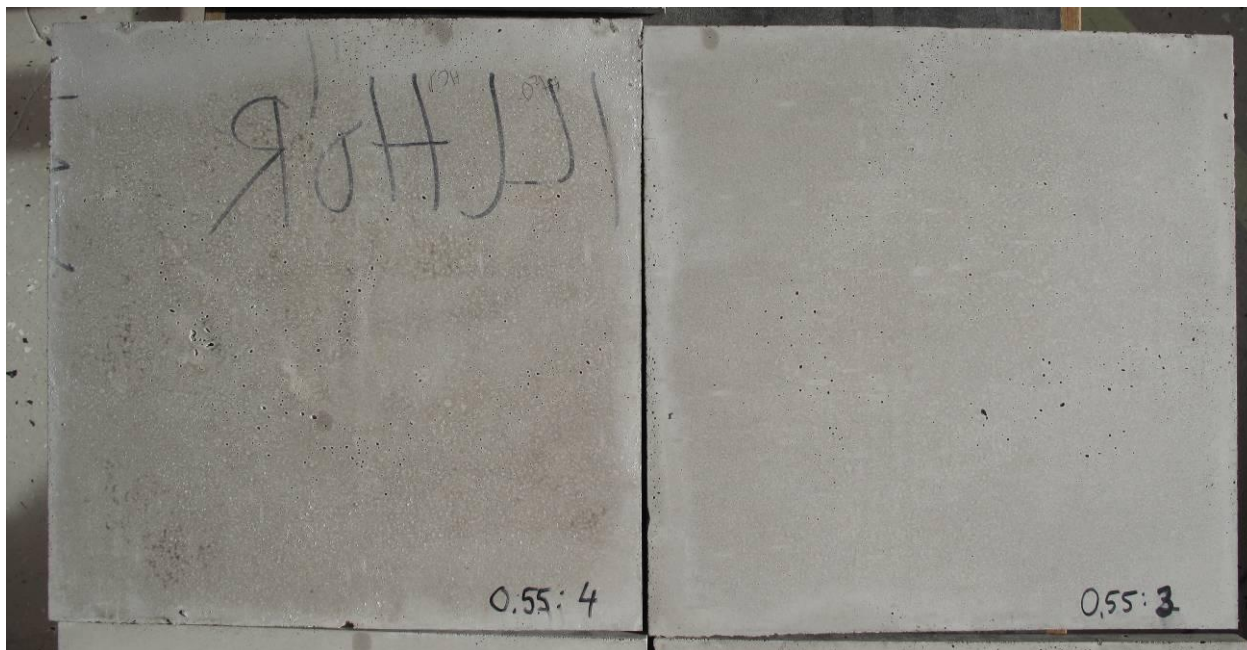


Bild 5.5 – Betongprov 4 respektive betongprov 3 med vattencementtal 0.55

5.4.2 Utfällningarnas strukturella uppbyggnad

Genom att undersöka provkropparna med mikroskop visade det sig att utfällningarnas kristallbildning såg olika ut från provkropp till provkropp. Prov 1, vct 0.4, och prov 3, vct 0.4, hade en tydlig kristalliserad yta längs med sina kanter. Kristallerna var mjölkiga, runda och flata i oregelbundna mönster, se bild 5.6. Hos de ljusa partierna mitt på provkroppen och vid poröppningarna kunde ingen utvecklad kristallstruktur tydas. Utfällningarna bestod där istället av ett mer homogent jämnt vitt lager.

Prov 2, vct 0.4, och prov 4, vct 0.4, hade samma strukturella uppbyggnad men var mycket grövre och satt tätare ihop. Det finns alltså en kraftigare kristallbildning hos provkropparna som varit i kontakt med fritt vatten än hos dem som inte varit i kontakt med fritt vatten. Liknande kristaller återfanns även på ett fåtal ställen i de små ljusare partierna mitt på provkropparna. Precis som hos föregående prover bestod dessa ljusa partier dock till största delen av ett jämnt vitt lager utan utvecklad kristallstruktur. Hos provkropp 4, vct 0.4, kunde även små vita prickar observeras som bestod av många långa, vita och fina spröt som tillsammans bildade tussar. Tussarna kan liknas vid bomullstussar, se bild 5.7.

Provkropparna gjutna med vattencementtal 0.55 visade genomgående på en mindre mängd kristaller och en svagare kristalluppbyggnad än de med lägre vattencementtal. Gemensamt för prov 1, 2 och 3 var att utmed kanterna fanns små mjölkiga kristallflingor. Denna kristallstruktur kan beskrivas som små och odefinierade kristaller som sitter samman och bildar ett jämnt lager av kristaller på ytan. Provkropp 4 hade däremot en mer utvecklad kristallstruktur där kristallerna var friliggande. På detta prov hittades även ett större antal vita tussar som till största delen låg utmed kanterna.

Provkropparna dokumenterades i makroläge för att åskådliggöra kristallstrukturen, se bild 5.6 och 5.7. I den vänstra bilden syns kristallstrukturen tydligt där de flata, runda och mjölkiga kristallerna bildar ett oregelbundet fast jämnt fördelat mönster. Kristallerna ser precis ut som

saltkorn. Bilden till höger visar förekomsten av tussar, som ser ut precis som bomull med sin trådaktiga struktur. I samma bild kan även två större korn ses som skiljer sig från de övriga mindre kristallerna. Dessa är troligen korn som byggts på varandra.

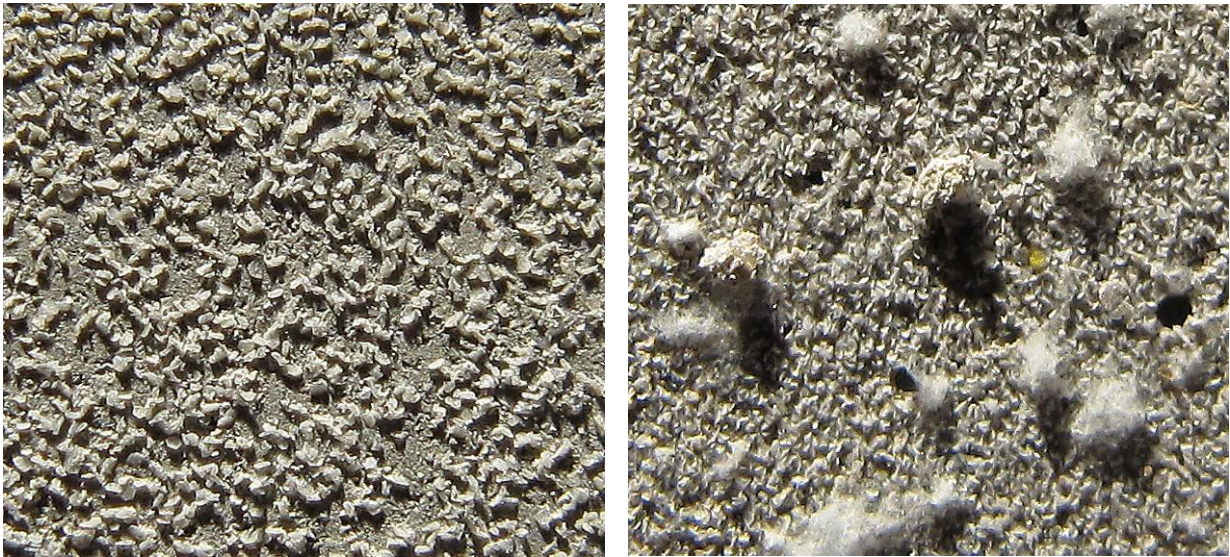


Bild 5.6 och 5.7 – Bilden till vänster visar kristallstrukturen hos betongprov 4 för vattencementtal 0.4. Bilden till höger visar tussar och två mer utvecklade kristaller hos betongprov 4 för vattencementtal 0.55.

5.4.3 Hårdhet hos utfällningarna

Utfällningarnas hårdhet undersöktes genom att försöka skrapa bort dem med en bomullspinne. Om utfällningarna inte gick att avlägsna med denna metod bedömdes dem som hårt sittande. De mjölkiga, runda och flata kristallerna som påträffades hos provkropparna med vattencementtal 0.4 gick inte att avlägsna. Dessa satt mycket hårt, och kunde avlägsnas först med ett rakblad. Även kristallerna längs kanterna på proverna med vattencementtal 0.55 satt hårt och behövde skrapas av för att lossna. De vita tussarna som främst förekom på prov 4 för både vattencementtal 0.4 och 0.55 gick utan svårigheter att avlägsna med bomullspinne.

5.4.4 Vattenlöslighet

Vattenlösligheten hos utfällningarna undersöktes genom att droppa på vatten så att en pöl bildades på områden där utfällningarna var omfattande. Vattenpölen avlägsnades sedan efter cirka 30 sekunder med en bit papper. Detta test hade ingen påverkan på kristallerna längs kanterna hos samtliga prover. Kristallernas uppbyggnad och omfattning var densamma som före tillförsel av vatten. Kristallerna bedöms därför vara olösliga alternativt svårlösliga i vatten. Det jämna vita lager som fanns på flertalet prover gick inte heller att avlägsna med vatten.

5.4.5 Syralöslighet

Syralösligheten hos utfällningarna undersöktes genom att först vattenmätta en liten yta med vatten och därefter droppa på en saltsyralösning. Saltsyralösningen hade en koncentration på

ca 5 %. Efter ett tag avlägsnades saltsyran genom att skölja ytan med vatten. När saltsyran påfördes skedde en omedelbar reaktion och gas frigjordes, troligen koldioxid. Alla typer av utfällningar som beskrivits ovan avlägsnades vid detta test. Kvar fanns bara en ren och slät betongyta, se bild 5.8.

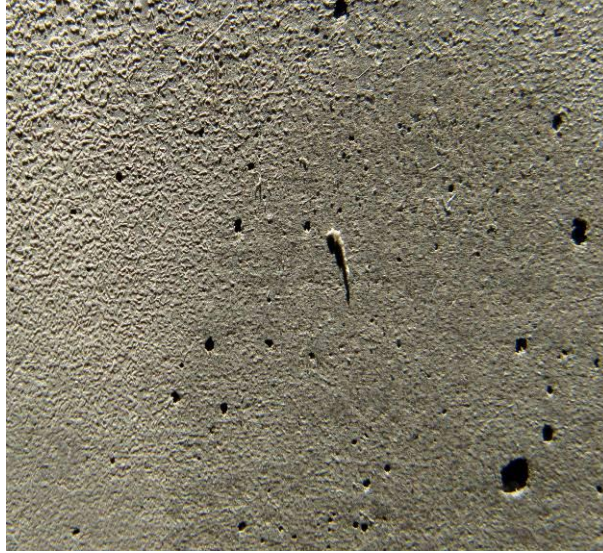


Bild 5.8 – En syrabehandling av provkroppen avlägsnar samtliga kristaller.

5.4.6 Resultat av pölprov

Eftersom provkroppen utsattes för vattenbelastning direkt efter avformning i kombination med ett lågt vattencementtal hos betongen, samt innehöll ett svart pigment erhöles kraftiga och väl synliga utfällningar.

Utfällningarna hade en väl utvecklad kristalliserad struktur som kan liknas vid väldigt små sockerkorn. Kristallerna var klara, glansiga och runda till formen. På vissa områden hade kristallerna byggts på varandra och bildat små högar. Det yttersta lagret kristaller satt väldigt löst och kunde lätt torkas bort med en torr bomullspinne. Efter att de löst sittande kristallerna var avlägsnade återstod ett jämnt lager med små vita mindre klara kristaller av samma form som de löst sittande. Detta lager försvann inte vid tillförsel av vatten, kristallerna var således inte vattenlösliga. Vid applicering av saltsyra löstes däremot kristallerna upp helt och ytan blev fri från utfällningar. Runt varje pölprov uppstod en svag pigmentring som orsakats på grund av den skillnad i fukthalt som uppstod i betongen då vattnet sögs upp i betongen. Från pölen startades sedan en fuktvandring mot torrare delar. Enligt avsnitt 2.2 är betongens fukttransport beroende av fukthalt. På grund av de halvoändliga förhållandena framkom ingen anrikning av utfällningar utmed provkroppens kanter. Det fanns ingen synlig skillnad mellan de pölprovsförsök som utfördes direkt efter avformning och de som utfördes en timme efter avformning.



Bild 5.9 – Utfällningar på betongytan efter pölprovsförsöket.

5.4.7 Röntgendiffraktionsanalys

Genom att med mikroskop studera utfällningarna som erhållits vid förstudien konstaterades det att utfällningarnas kristallstrukturer varierade i en sådan grad att det inte gick att dra några slutsatser om vilken typ av utfällningar det rörde sig om. För att kunna bestämma kristallernas kemiska innehåll utfördes en röntgendiffraktionsanalys på ett antal representativa skrapprov från de olika provkropparna.

En röntgendiffraktionsanalys fungerar genom att röntgenstrålar skickas mot provet och när ämnet träffas av röntgenstrålarna sprids dessa åt olika håll. Dessa strålar bildar ett diffraktionsmönster som ser olika ut för varje kemiskt ämne. Genom att jämföra det diffraktionsmönster som erhålls vid analysen med kända diffraktionsmönster i en databas, kan det kemiska innehållet bestämmas. (Johansson, 2009)

För att bekräfta de visuella och mikroskopiska resultaten togs skrapprover på utvalda provkroppar, se tabell 5.5. Skrapproverna undersöktes sedan med hjälp av röntgendiffraktionsanalys så den kemiska uppsättningen kunde bestämmas.

Tabell 5.5 – Benämning av skrapprov som analyserades.

Benämning	Prov
Prov 1	Klara, flata och välutvecklade kristaller på prov 4 för vct 0.4, se bild 5.6
Prov 2	Vit beläggning på betongprov 4 för vct 0.55, se bild 5.5
Prov 3	Vita tussar och kristaller på betongprov 4 för vct 0.55, se bild 5.7
Prov 4	Runda och klara kristaller efter pölprovsförsök, se bild 5.9
Prov 5	Vit beläggning från fasadelement på IKDC

Samtliga prover innehöll väldigt mycket kalcit vilket indikerade på att missfärgningarna på provkropparna var kalkutfällningar. Prov 1 och 3 innehöll även en hel del portlandit som är kristalliserad kalciumhydroxid. Detta kan jämföras med resultaten från de kristaller som bildades vid pölprovsförsöken som uteslutande innehöll kalcit och ingen portlandit. Kristallerna i prov 1 har troligen först varit portlandit för att sedan bilda kalcit. I en del av

proverna fanns fältspater och kvarts som är mineraler från ballasten. Röntgendiffraktionsanalysen kan ses i sin helhet i bilaga 4.

5.5 Sammanställning av resultat

En sammanställning med avseende på olika parametrar har gjorts för att få en tydlig bild av ytornas utseende. Parametrar som undersöktes var flammighet, utfällning kring kanten, tussar och synliga kristaller (i mikroskop). Bedömningen utfördes genom att rangordna proverna i förhållande till varandra mellan 0 - 4 där 4 är störst. Till exempel får prov 1 för vattencementtal 0.4 en fyra i tabellen för flammighet eftersom den anses som den flammigaste av de åtta proverna. Provkropparna bedömdes i förhållande till varandra. Bedömningen utfördes visuellt på håll och genom ett mikroskop. Bedömningen av provkropparna är sammanfattade i tabell 5.6.

Tabell 5.6 – Sammanställd bedömning av provkropparna från förstudien.

Prov	Vct	RF	Kontakt med fritt vatten	Flammighet	Utfällning kant	Tussar	Synliga kristaller	Summa
1	0.4	95	Nej	4	2	0	2	8
2	0.4	95	Ja	3	3	0	4	10
3	0.4	100	Nej	3	4	0	2	9
4	0.4	100	Ja	2	3	2	4	11
1	0.55	95	Nej	1	1	0	1	3
2	0.55	95	Ja	1	1	0	2	4
3	0.55	100	Nej	1	1	1	1	4
4	0.55	100	Ja	2	2	4	3	11

Röntgendiffraktionsanalysen visade på att alla de undersökta proverna innehöll till största delen calcit som är kristalliserad kalciumkarbonat. Både de mer synliga och välutvecklade kristallerna samt den jämna vita beläggningen var således kalkutfällningar.

5.6 Diskussion

Sammanställningen i tabell 5.6 visar på att det finns en stor korrelation mellan de olika parametrarnas inverkan på betongytans utseende. De tre olika parametrarna som varierades var betongens vattencementtal, den relativa fuktigheten samt betongprovernas kontakt med fritt vatten.

Generellt uppfattades flammigheten som mycket mer omfattande hos de provkropparna med lågt vattencementtal. Anledningen till detta är sannolikt att en betong med lågt vattencementtal är naturligt mörkare vilket skapar en större kontrast mot den ljusare utfällningen. Detta är troligen den största faktorn till varför skillnaden i resultatet är så stor mellan de olika vattencementtalen.

Den relativa fuktigheten verkar inte ha varit någon bidragande faktor till skillnader i resultaten för någon av cementtyperna eftersom skillnaden mellan de två klimaten är marginell. Detta beror sannolikt på att 100 % relativ fuktighet inte uppnåtts i klimatboxen. För att inte begränsa tillgången på koldioxid hade en glipa vid locket lämnats öppen. Detta medförde att den relativa fuktigheten sjunker under 100 %. Skillnaden mellan de två fallen av relativ fuktighet är därför begränsad och bedöms därför inte vara en drivande faktor till skillnader i resultaten.

Den faktor som enligt utvärderingen varit mest avgörande för mängden utfällningar är betongens vatteninnehåll. I de provkroppar som varit i kontakt med fritt vatten har det skett en kapillärsugning som vattenmättat porsystemet. Avdunstningen från betongytan har sedan gett upphov till en inre fuktvandring. Eftersom tillgången på fukt i betongen har varit oändlig har denna vandring kunna vara konstant under hela försökstiden. Även om transporten har varit stor förklarar den inte varför det har skett ytliga kalkutfällningar eftersom karbonatiseringen enbart skulle ha skett i porerna. Detta beror på att det är undertryck i porerna som håller tillbaka vattnet. De synliga kristallerna för dessa prover har varit betydligt mer utvecklade än hos de prover som inte varit i kontakt med fritt vatten.

På provkropparna från förstudien har bildandet av kristallerna skett successivt under en lång tid samtidigt som de kemiska reaktionerna har skett direkt på betongytan vilket resulterat i att kristallerna var välutvecklade och satt mycket hårt på ytan. Kristallerna från pölprovsförsöket har däremot bildats under en kortare tid och därför inte blivit lika välutvecklade, jämför bild 5.6 och 5.7 med 5.9. Den svaga förankringen hos kristallerna på betongytan beror sannolikt på att reaktionen mellan luftens koldioxid och löst kalciumhydroxid har skett på vattenfilmens yta. När vattnet sedan successivt har avdunstat har kalciten kvarstannat på betongytan och därför inte fått någon stark fysisk förankring till ytan.

Yttre omständigheter är alltså avgörande för hur kalcitens kristallina uppbyggnad kommer att se ut. De provkroppar som varit placerade i klimatboxarna har sannolikt befunnit sig i en miljö med mycket låg koldioxidhalt. Då tillgången på kalciumhydroxid varit stor vid ytan har luftens koldioxid inte räckt till för allt skall kunna reagera och bilda kalcit. Bristen på koldioxid har således gjort att portlandit, kristalliserad kalciumhydroxid, har bildats på ytan för att sedan när kristallen kommit i kontakt med koldioxid reagera och bilda kalcit. Under pölprovsförsöket har det funnits stor tillgång på koldioxid vilket då gjort att kalcit bildats direkt. Detta förlopp förklarar varför kristallerna från provkropparna i klimatboxarna skiljer sig från de från pölprovsförsöket i utseende.

Vid kontroll av temperaturen och den relativa fuktigheten i klimatrumsrummet under försökstiden observerades temperaturen variera mellan 19.8°C och 21°C med en timmes intervall. Variationen har stor betydelse eftersom den aktuella ånghalten i klimatrumsrummet ligger mycket nära mätnadsånghalten. Små variationer i temperatur räcker därför för att daggpunkten ska nås vid betongytan. Betong har en mycket högre värmekapacitet per volymenhet än luft vilket gör att yttemperaturen hos betongen inte svänger lika snabbt som en temperaturändring i luften. Genom att dividera mätnadsånghalten för 19.8°C med mätnadsånghalten för 21°C fås den maximala relativa fuktighet som den varmare luften får ha för att det inte ska finnas risk för kondensutfällning på provkroppen, se ekvation 5.1.

$$1 = \frac{v_{s,19.8} \cdot RF_{betgyta}}{v_{s,21} \cdot RF_{luft}} \quad (5.1)$$

Beräkningen gav en relativ fuktighet på 93.2 %, vilket har överstigits ett flertal gånger under försökstiden. Risken för att det har fällt ut kondens på betongelementen bedöms finnas vilket gör att de ytliga kalkutfällningarna kan bero på kondensutfällning.

Röntgendiffraktionsanalysen av skrapproverna visade på att samtliga prover innehöll mycket kalcit. Resultatet visade även på att det fanns mineraler från ballasten vilket indikerar på att skrapproverna inte enbart innehöll den ytliga utfällningen. Vid höga relativa fuktigheter sker karbonatiseringen mycket ytligt. Innehållet av dessa mineraler från ballasten tydde således på att kalciumkarbonat i de ytliga porerna har kommit med i resultatet.

De provkroppar som har studerats i förstudien har varit placerade i en mycket hög relativ fuktighet. Detta borde ge en yttlig karbonatisering men dock inte uppe på ytan. Inte heller den inre fuktvandringen bör ha gett upphov till några kalkutfällningar på ytan eftersom vattnet hålls kvar på grund av undertryck i porerna. Om de ytliga kalkutfällningarna däremot skulle bero på kondens så förklarar det inte varför det är större koncentrationer av kristaller längs kanterna. Koncentrationen av utfällningar längs kanterna pekar snarare mot ett avdunstningsfenomen. Ytterligare provkroppar borde ha gjutits och lagrats i lägre relativ fuktighet för att utvärdera den relativa fuktighetens betydelse.

6 Huvudstudie – Klimatsimulering

6.1 Inledning

Problem med kalkutfällningar upplevs i förtillverkningsindustrin som störst under årets kalla månader och speciellt vid kraftiga väderomslag. Kalkutfällningar på en betongyta kan uppstå då antingen fritt vatten tillförs utifrån, se avsnitt 6.3, eller då fukt tillförs ytan genom en inre fuktvandring i betongen, se avsnitt 6.2. Dessa fenomen skall återskapas i laboratoriemiljö för att undersöka förekomsten av kalkutfällningar.

6.2 Inre fuktvandring

När ett varmt och nygjutet element placeras i en mycket kall miljö kan en inre fuktvandring uppstå på grund av temperaturskillnad mellan betongen och omgivningen. Teorierna grundar sig på att den nygjutna betongen, cirka 50 till 55 timmar efter gjutning, har en relativ fuktighet på nästan 100 % vilket ger en ånghalt på nästan 17.28 g/m^3 om den lagrats i ett klimat på 20°C (Nevander, 2007). En rimlig temperatur utomhus en kall vinterdag kan ligga runt -10°C eller kallare vilket ger en ånghalt på 2 g/m^3 eller lägre förutsatt att den relativa fuktigheten ligger runt 90 – 100 %. När betongelementet placeras i detta klimat blir skillnaden i ånghalt mycket stor mellan ytskiktet och de inre delarna vilket kommer leda till att fukten diffunderar från betongens inre och ut mot ytan. Denna fuktvandring skulle kunna vara så stor att luften inte kan ta upp all fukt utan det bildas en dimma intill betongytan som då fuktas upp.

Enligt litteratur som behandlar fukt i porer hos betong skulle det vara en omöjlighet att något sådant skulle kunna hända då fukten på grund av undertryck kommer att hållas kvar i porerna och inte kunna fällas ut på ytskiktet.

6.3 Kondens på betongyta

Det andra fallet bygger på ett väderomslag från kallt till varmt klimat. Den relativa fuktigheten är vid båda temperaturerna hög. Vid den låga temperaturen kan luften dock endast bära en liten mängd fukt per m^3 jämfört med hos den höga temperaturen. När väderomslaget sker kommer temperaturen på betongytan svänga betydligt långsammare än luften på grund av dess höga värmekapacitet per volymenhet. Detta leder till att fukt kommer kondensera på den kallare betongytan. Kondenseringen kommer att fortskrida till dess att yttemperaturen på betongen nått daggpunkten. Daggpunkten är den temperatur när rådande ånghalt ger en relativ fuktighet på 100 %.

6.4 Teoretiska beräkningar

Innan några praktiska försök utfördes gjordes beräkningar för att bekräfta teorierna om att en inre fuktvandring kommer att ske då elementet placeras i en kall miljö. I fallet då ett väderomslag studerades gjordes beräkningar på betongens ytemperatur vid olika tider för att bekräfta risken för kondens. I de teoretiska beräkningarna antogs betongtemperaturen vara 21°C.

6.4.1 Beräkning av inre fuktvandring

Betong är ett värmetrögt material vilket gör att det tar lång tid för det att nå temperaturjämvikt med omgivande klimat när detta förändras. Detta beror på att betongen har en hög värmekapacitet som innebär att det krävs mycket energi för att öka temperaturen i materialet. Om temperaturen sjunker finns således mycket lagrad energi i betongen som måste avgå för att ett stationärt tillstånd skall infinna sig. Denna egenskap innebär att den inre fuktvandringen kommer pågå under en lång tid. Som nämnts tidigare är den relativa fuktigheten i betongen nästan 100 % efter avformning vilket ger en ånghalt strax under mätnadsånghalten. När temperaturen sjunker i materialet sjunker även mätnadsånghalten och därmed ånghalten. När ånghalten sjunker i det kallare ytskiktet skapas en skillnad mot ånghalten i mitten av betongen vilket skapar en fuktvandring. Den relativa fuktigheten i ett material är i princip bara beroende av fukthalten men även i mycket liten grad av temperaturen (Nilsson, 1994). Temperaturberoendet försummas dock i denna rapport.

Temperaturen på olika djup längs betongtvärsnittet vid olika tider beräknades. Beräkningar av temperaturprofilen i tvärsnittet för olika tider gjordes med analytiska metoder vilket krävde ett antal antaganden. Betongelementet antogs vara en halvoändlig skiva. Antagandet gäller så länge randen $x = L$ inte berörs av temperaturändringen. Eftersom denna rand är isolerad med cellplast antas värmeflödet där vara försumbart. Vidare antogs ytmotståndet som bildas av stillastående luft som försumbart. Luftrörelserna i klimatboxen mättes med en lufthastighetsmätare till 0.15 – 0.2 m/s. När elementen som har en högre temperatur ställs i det kalla klimatet uppstår även egenkonvektion då den kalla luften värms upp vid elementet och stiger. Dessa två luftrörelser kommer att samverka då luftrörelserna i boxen kommer underifrån och blåser uppåt vilket gör att ytmotståndet kan försummas. Antagandet kommer dock att ge en för låg ytemperatur. Betongelementen antogs ha en temperatur på 22°C genom hela tvärsnittet.

För att beräkna temperaturerna vid olika djup användes nedanstående ekvation (Claesson et al., 1984).

$$T(x,t) = T_0 + (T_1 - T_0) \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{\sqrt{4at}}\right) \quad (6.1)$$

där

T_0	Begynnelsestemperatur, [°C]
T_1	Ny randtemperatur, [°C]
x	Djup, [m]
a	Värmediffusivitet, [m ² /s]
t	Tid, [s].

Ekvation 6.1 beskriver hur temperaturen på olika djup påverkas från ostört värde, T_0 , då randtemperaturen, T_1 , ändras. Värdet på värmediffusiviteten antas till $0.9 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. Lösningen beräknades med Laplacetransformationer med en error funktion, erfc . Värdena för lösningen av denna funktion gavs från Claesson et al. (1984). Temperaturerna vid de olika djupen beräknades i tidssteg och kan ses i bilaga 1.

När temperaturerna var kända bestämdes ånghalterna och därefter fuktvandringen. För att beräkna ånghalterna krävs en beräkning av den relativa fuktigheten i betongen. Den relativa fuktigheten i betongen kommer att påverkas då vattnet binds kemiskt i betongen samt då den torkar mot omgivningen, under de första 20 timmarna sker dock ingen uttorkning mot omgivningen på grund av membranhärdning. Hur mycket vatten som bundits kemiskt beror på hur mycket cement som hydratiserats. Ekvivalent härdningstid beräknades för 55 timmars härdning i 22°C till 62.6 h enligt ekvation 6.2 (Fagerlund, 1994).

$$t_{20} = \left(\frac{\theta + 10}{30} \right)^2 \cdot t \quad (6.2)$$

där

t_{20} ekvivalent tid vid härdning i 20, [h]
 θ betongtemperatur, [$^\circ\text{C}$].

Med insättning av ekvivalent tid i ekvation 6.3 beräknades hydratationsgraden till 0.56 (Fagerlund, 1994).

$$\ln \alpha = a \cdot \ln(t)^b \Rightarrow \alpha = 0.56 \quad (6.3)$$

där

a konstant beroende på cementtyp
 b konstant beroende på cementtyp
 α hydratationsgrad.

Parametrarna i formeln ovan antogs till $a = -10$ och $b = -2$ vilket gäller för svenskt standard portlandcement. Den beräknade hydratationsgraden är inte helt korrekt då ingen hänsyn har tagits till inblandning av kalkfiller. Med känd hydratationsgrad bestämdes mängden förångningsbart vatten i betongen enligt ekvation 6.4 (Fagerlund, 1994).

$$W_e = W - 0.25\alpha C \quad (6.4)$$

där

W_e förångningsbart vatten, [kg/m^3]
 W vattenhalt, [kg/m^3]
 C cementhalt, [kg/m^3].

Beräkningen gav en fukthalt på $119 \text{ kg}/\text{m}^3$. Efter 20 timmar avlägsnades membranskyddet och fuktombyte med omgivningen kunde ske. Tiden mellan membranhärdningens slut och den totala härdningens slut var cirka 35 timmar vilket i uttorkningssynpunkt är en mycket kort tid. Därför försumrades den fukt som avgick från betongen vilket gav en för hög relativ fuktighet

i betongen. En fukthalt på 119 kg/m^3 gav enligt desorptionskurva en relativ fuktighet på 98 % (Fagerlund, 1994). Mättnadsånghalten beräknades genom ekvation 6.5 där de tre parametrarna, a, b och n, varierar enligt tabell 6.1 och molvikten för en vattenmolekyl är 18.02 kg/kmol samt den allmänna gaskonstanten är $8314.3 \text{ J/(kmol}\cdot\text{K)}$ (Nevander, 2007).

$$v_s = a \left(b + \frac{T}{100} \right)^n \cdot \frac{M_v}{R(273.15 + T)} \quad (6.5)$$

där

v_s mättnadsånghalt, [kg/m^3]
 M_v molvikt, [kg/kmol]
 R allmänna gaskonstanten, [$\text{J/kmol}\cdot\text{K}$]

Tabell 6.1 – Indata för beräkning av mättnadsånghalten v_s .

	$0 < T < 30^\circ\text{C}$	$-20 < T < 0^\circ\text{C}$
a	288.68 Pa	4.689 Pa
b	1.098	1.486
n	8.02	12.3

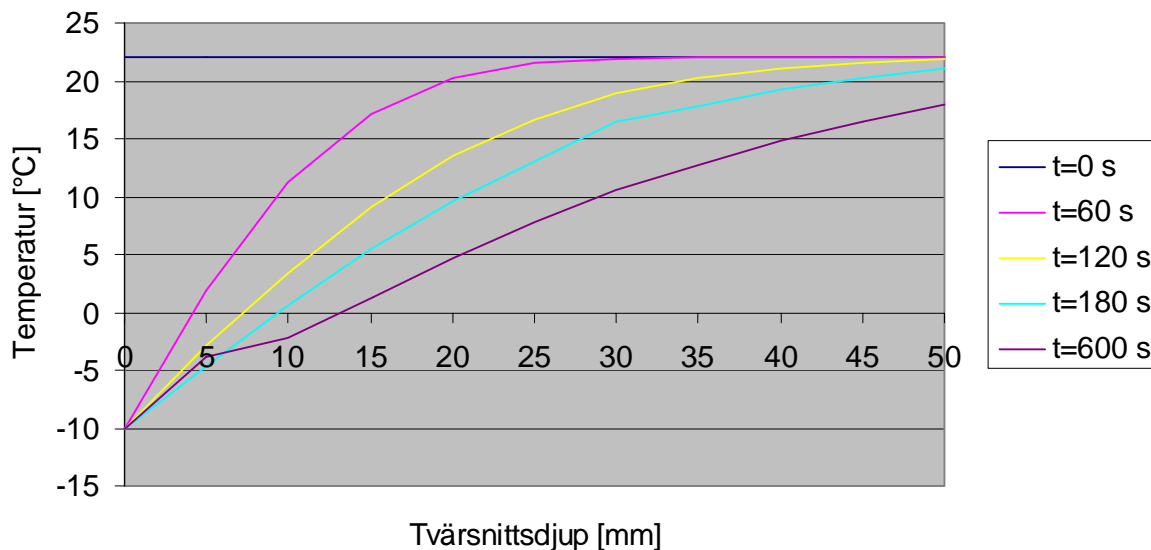
Med en bestämd mättnadsånghalt och den relativa fuktigheten i betongens olika skikt beräknades ånghalten. Om det finns en skillnad i ånghalt mellan skikten kommer en fuktvandring ske. Storleken på fukttransporten bestämdes genom ekvation 6.6 (Nevander, 2007).

$$g = -\delta_v \frac{dv}{dx} \quad (6.6)$$

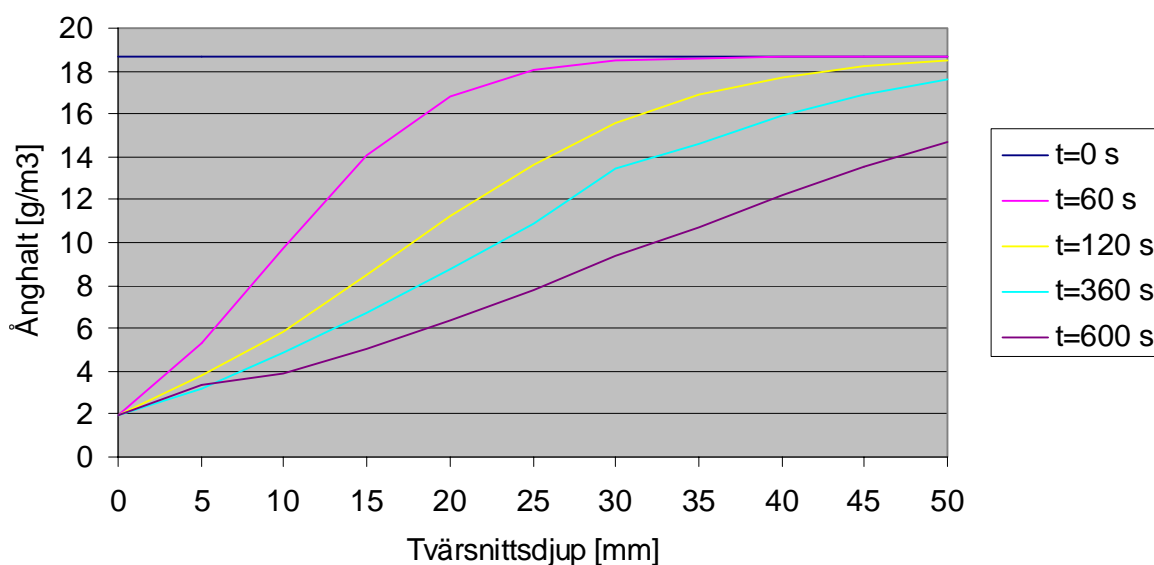
där

g fukttransport, [$\text{kg/m}^2\cdot\text{s}$]
 δ_v ångpermeabilitet, [kg/kmol]
 R allmänna gaskonstanten, [$\text{J/kmol}\cdot\text{K}$]

Temperaturen, mättnadsånghalten, ånghalten, relativ fuktighet och fuktflödet i de olika skikten för fem olika tider redovisas i bilaga 1. Temperaturprofilen och ånghaltsfördelningen i tvärsnittet vid de fem olika tiderna kan ses i figur 6.1 och 6.2 nedan.



Figur 6.1 – Temperaturprofilen i tvärsnittet vid fem olika tider.



Figur 6.2 – Ånghaltsfördelningen i tvärsnittet vid de fem olika tiderna.

De teoretiska beräkningarna visade på att det kommer ske en fuktvandring från betongens inre och ut mot ytan. I praktiken kommer fuktvandringens storlek att minska samt pågå under en längre tid än beräknat. Detta beror till största delen på att luftmotståndet intill betongytan försumrats. En högre temperatur vid $x = 0$ kommer att ge en lägre differens i ånghalt vilket ger ett mindre fuktflöde. Enligt beräkningarna påverkades temperaturen vid $x = L$ för $t = 600$ s vilket föranledde till fel i beräkningarna för just denna tid. Felets storlek antogs dock inte påverka fuktvandringens riktning utan endast dess storlek.

6.4.2 Beräkning av kondens på betongyta

Om temperaturen på en yta sjunker under daggpunkten finns det risk för kondensbildning på ytan. Mängden fukt som kan kondensera på denna yta styrs av vilken temperatur och relativ fuktighet det omgivande klimatet har och vilken temperatur den kalla ytan har. En annan avgörande faktor är hur stort luftombytet är, det vill säga hur snabbt ny varm och fuktig luft kan transporteras till den kallare ytan. Betongens permeabilitet och relativ fuktighet spelar även en stor roll.

I klimatboxen ska ett klimat ändras från 0°C med 70 % relativ fuktighet till ett klimat med 15°C med 98 % relativ fuktighet. Daggpunkten i ett sådant klimat beräknades med ekvation 6.7.

$$v = v_s \cdot RF \quad (6.7)$$

Ånghalten beräknades till 12.6 g/m³, för 15°C med 98 % relativ fuktighet, vilket gav en daggpunkt på cirka 14.7°C (Nevander, 2007). Den tid yttemperaturen kommer att understiga denna temperatur kommer det således att kondensera. För att beräkna yttemperaturen användes en liknande funktion som beräkning av den inre fuktvandringen men där det nu togs hänsyn till ytmotståndet, se ekvationer 6.8 (Claesson et al., 1984).

$$T(0,t) = T_0 + (T_1 - T_0) \cdot \left(1 - e_1 \left(\frac{\alpha_{cv} \sqrt{4a_{btg} t}}{\lambda_{btg}} \right) \right) \quad (6.8)$$

där

λ_{btg} Värmeledningsförmåga för betong, [W/m·K]
 α_{cv} Konvektiv värmeövergångskoefficient, [W/m²·K].

Värdet på betongens värmeledningsförmåga antogs till 1.7 W/m·K. Funktionen e_1 approximerades enligt ekvation 6.9 (Claesson et al., 1984).

$$e_1(x) \approx \frac{2+x}{2+(1+4/\sqrt{\pi})x+\sqrt{\pi} \cdot x^2} \quad (6.9)$$

Den konvektiva värmeövergångskoefficienten α_{cv} berodde i detta fall både på påtvingad konvektion och egenkonvektion. För att beräkna den påtvingade konvektionens storlek uppmättes lufthastigheten i klimatkammaren till 0.2 m/s. Den påtvingade konvektionen beräknades med ekvation 6.10 (Nevander, 2007).

$$\alpha_{cv,vind} = 6 + 4u \quad (6.10)$$

där

u vindhastighet, [m/s].

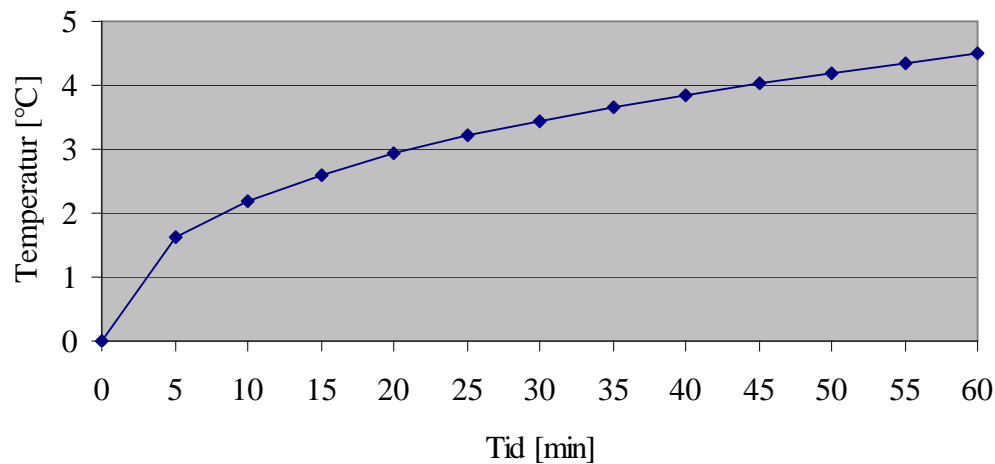
Egenkonvektionen beror på att den kalla betongytan kommer skapa densitetsskillnader i luften vilket skapar en luftström. Egenkonvektionen beräknades med ekvation 6.11 (Nevander, 2007).

$$\alpha_{cv,egenkonv.} = C \cdot dT^{0.25} \quad (6.11)$$

där

C koefficient med värdet 2.

Eftersom värmeövergångskoefficienten för egenkonvektionen beror på temperaturskillnaden beräknades denna i tidssteg då yttemperaturen successivt ökade, se bilaga 2. Den totala konvektiva värmeövergångskoefficienten beräknades genom att summera ekvation 6.10 och 6.11. Yttemperaturen vid olika tider redovisas i figur 6.3.



Figur 6.3 – Yttemperaturen ökar långsamt med tiden vilket gör att det kan kondensera under en lång tid.

Mängden fukt som kondenserar beräknades inte eftersom det fanns för många osäkra faktorer som skulle påverka resultatet. Beräkningarna som gjordes visade på att det kommer kondensera och det kommer ske under en lång tid vilket rimligen kommer ge upphov till en kalkutfällning.

6.5 Tillvägagångssätt

6.5.1 Betongrecept

Betongproverna göts utifrån ett betongrecept som tidigare använts vid tillverkning av väggelement och som råkat ut för störande utfällningar (Pettersson, 2009). Alla provkroppar som undersöktes göts enligt detta recept, se tabell 6.2.

Tabell 6.2 – Betongrecept från Strängbetong (Petersson, 2009).

Komponent	Viktandel [kg/m ³]
Byggcement	410
Vattenhalt	176
Kalkfiller	35
Grus 0-4	846
Kross 4-16	914
SIKA 20HE	3,69

6.5.2 Formar

Fyra formar byggdes med de invändiga måtten 300x300x50 mm³. Formarna bestod av formplywood för att undvika användningen av formsläppmedel. Formsläppmedel kan ge viss flammighet hos betongytan om den appliceras ojämnt och kan vid överdosering även ge vattenseparation. Formarna användes enbart för en gjutning för att erhålla en så fin yta som möjligt hos provet. Vid härdningen kläddes träformarna med en 30 mm tjock expanderad polystyren för att reducera temperaturgradienten och på så vis simulera ett större element. Viss uttorkning, karbonatisering och värmeledning i sidled samt underifrån begränsades på så sätt.

6.5.3 Gjutning

För varje försök göts två provkroppar. Varje form rymde 4.5 liter och med hänsyn till spill samt att en viss mängd fastnar i blandaren gjordes en sats på 5 liter per provkropp. Det behövdes alltså 10 liter betong vid varje försök. För att få en ordentlig blandning av komponenterna i frifallsblandaren gjordes en sats på 15 liter för varje försök.

För att få en starkare kontrast mellan betongytan och de eventuella kalkutfällningarna tillsattes ett svart pigment till betongreceptet. Det betongrecept som användes innehöll ballast med fraktionerna 0-4 mm och 4-16 mm. Eftersom dessa kornfördelningar inte fanns att tillgå i betonglaboratoriet utfördes en modifiering. Istället för sand, 0-4 mm, användes grus, 0-8 mm, där cirka 90 % av 0-8 mm fraktionen hade storleken 0-4 mm. Detta bestämdes genom att granska fraktionskurvan för gruset. För att få rätt mängd 0-4 mm sand ökades mängden 0-8 mm grus i receptet till 940 kg/m³ (enligt recept 846 kg 0-4 mm sand per m³). För den andra kornfraktionen 4-16 mm fördelades den resterande totala ballastvikten lika mellan ballast 8-12 mm respektive 12-16 mm. Omfördelningen gav att ballastfördelningen blev väldigt nära det ursprungliga betongreceptet. Förändringen skulle för övrigt inte på något sätt påverka resultatet med avseende på kalkutfällningar vilket gjorde modifieringen godtagbar. Det modifierade betongreceptet kan ses i tabell 6.3.

Tabell 6.3 – Modifierat betongrecept.

Komponent	Viktandel [kg/m ³]
Byggcement	410
Vatten	176
Kalkfiller	35
Grus 0-8	940
Kross 8-12	410
Kross 12-16	410
SIKA 20HE	3,69

Fuktkvoten i 0-8 mm ballasten bestämdes genom att ett prov på ett kilogram vägdes upp som därefter brändes med T-sprit på ett fat. Den uttorkade ballasten vägdes och med skillnaden i vikt före och efter bränning bestämdes fuktkvoten. Efter förbränningen vägde provet 0.996 kg som då innebär att gruset innehåller 0.004 kg vatten/kg ballast. Mängden blandningsvatten justerades därefter för att tillgodoräkna fukten i ballasten. För de övriga ballastfraktionerna ansågs kornstorleken vara så grov att mängden vatten i dessa var försumbart. Tillsats av pigment gjordes utan att övriga komponenter berördes. Precis som tidigare bedömdes denna modifiering inte ge mer eller mindre kalkutfällningar utan enbart skapa större kontrast.

Först blandades de torra komponenterna i frifallsblandaren för att få dessa jämt fördelade. Därefter tillfördes blandningsvattnet i ett jämt flöde under konstant omrörning. Till slut tillfördes flyttillsatsmedlet. Efter gjutning placerades formarna på ett vibreringsbord för att en jämn fördelning i formen skulle erhållas.

6.5.4 Härdning

I betongindustrin härddas betongelementen inomhus under tak för att skydda mot vind och kyla de första dygnen så att en tillräcklig hållfasthet uppnås innan de placeras på gården. Det används under härdningen ingen tillförd värme för att höja temperaturen i gjuthallarna utan temperaturen styrs enbart av värmeutvecklingen i betongen. Temperaturen i gjuthallarna varierar i intervallet 15 – 20°C. Betongelementen placeras nära varandra och tillfälliga väggar av draperier placeras runt dem för att minska luftrörelser samt öka den relativa fuktigheten. När de sedan nått en tillräckligt hög hållfasthet placeras de utomhus på gården.

För att efterlikna förhållandena i förtillverkningsindustrin så väl som möjligt täcktes formarna direkt efter vibrering med en plastfolie för att förhindra fuktutbyte med omgivningen. Dessa fick därefter stå och membranhärda ett dygn i inomhusmiljö med en temperatur på 20°C. Efter ett dygn avformades provkropparna och placerades därefter tillbaka i formen med formsidan uppåt. Formen kläddes sedan in i en 30 mm tjock expanderad polystyren. Provkropparna placerades därefter i ett klimatrum med en relativ fuktighet på 55 % och 20°C för att låta proverna härda till 60 % av slutlig hållfasthet enligt europastandard EN 13369:2004(Sv). Härdningstiden för att uppnå 60 % hållfasthet beräknades till 55 timmar och provkropparna fick därför härda i klimatrummet i nästan tre dygn. Eftersom en härdning i sådan relativ fuktighet anses ogynnsam med avseende på kalkutfällningar kommer några extra timmars härdning inte påverka hydratationen eller karbonatiseringen i ytskiktet något nämnvärt. Efter härdning förflyttades provkropparna till en klimatkammare.

6.6 Simulering av klimat

För att skapa en stor fuktvandring i betongen ut mot ytan måste en differens mellan luftens och betongens ånghalt skapas. Luftens ånghalt måste då vara lägre än betongens. Detta uppnåddes genom att en stor temperaturskillnad skapades mellan betongen och den omgivande luften. Försöken där en stor fuktvandring simulerades utfördes för två olika temperaturskillnader, se avsnitt 6.6.1 och 6.6.2.

Det andra klimatet som simulerades var ett väderomslag från kallt till ett varmt och fuktigt klimat. Väderomslaget simulerades för två olika temperaturskillnader i tre cykler, se avsnitt 6.6.4 och 6.6.5.

Direkt efter det att proverna placerats i klimatkammaren mättes yttemperaturen med en IR termometer för att se om de teoretiska beräkningarna stämde. Lufttemperaturen och den relativa fuktigheten samt koldioxidhalten i klimatkammaren kontrollerades för att bekräfta det simulerade klimatet.

6.6.1 Inre fuktvandring från 20 till -10°C

Efter det att provkropparna härdat till 60 % av hållfastheten i ett klimat med 21°C och en relativ fuktighet på 55 % placerades de i en klimatkammare som var förinställd på -10°C och en relativ fuktighet på 80 %. Den stora skillnaden i ånghalt mellan de båda klimaterna borde generera en fuktvandring ut mot ytan, se de teoretiska beräkningarna i avsnitt 6.4.

Den ena provkroppen placerades med en viss lutning och den andra placerades helt vertikalt för att efterlikna hur elementen lagras i fabrik, se bild 6.1.



Bild 6.1 - Provkroppar placerade i klimatkammare

Lufthastigheten i klimatkammaren uppmättes till 0.5 m/s. Denna lufthastighet bedömdes vara för stor i förhållande till verklig lagring på en fabrik. Fukt som transporterats ut till ytan skulle avdunsta snabbare med ett högt luftflöde, samt att temperaturen på provkroppens yta skulle sjunka snabbare till jämvikt med omgivningen och därmed begränsa fuktvandringen ut mot ytan. För att reglera lufthastigheten vid provkropparnas yta placerades dessa på en plastfolie,

se bild 6.1. Eftersom luftflödet in i klimatkammaren kom underifrån, minskade lufthastigheten vid ytan till 0.15 m/s med denna åtgärd. För att försöka åstadkomma en gynnsam fuktvandring och göra provkropparnas acklimatisering långsammare, fick isoleringen sitta kvar runt formarna. Provkropparna stod därefter i klimatkammaren i 12 timmar. Efter försöket hade betongens yttemperatur sjunkit till nästan -10°C och försöket ansågs vara avslutat då ingen vidare fukttransport mot ytan kunde ske. Efter avslutat försök förvarades provkropparna i en lufttät klimatbox för att förhindra kondensbildning på betongytan.

6.6.2 Inre fuktvandring från 20 till -20°C

Härdningsförloppet vid detta försök såg likadant ut som för tidigare provkropp, se avsnitt 6.5.4. Provkroppen placerades i en låda innan den ställdes i en frys med en förinställd temperatur på -20°C . Detta gjordes dels för att undvika kondensbildning på provkroppens yta när den skulle tas ut från frysen samt dels för att lådan skyddade provkroppen från luftströmmar som då skulle ha påverkat resultatet. För att inte begränsa tillgången på koldioxid placerades locket så att en springa bildades och då tillät ett visst luftombyte. På grund av den låga temperaturen var den relativa fuktigheten hög, uppskattningsvis runt 90 %. Försöket pågick i 24 timmar, därefter höjdes temperaturen gradvis i frysen så att provkroppen kunde acklimatisera sig med omgivande temperatur innan lådan plockades ut.

6.6.3 Inre fuktvandring – betong med hög porositet

Eftersom betongreceptet som användes i tidigare försök, se avsnitt 6.5.3, gav en tät betong med få synliga porer i ytskiktet, gjordes även ett försök med en betong där fraktionsstorleken hos ballasten endast var 0-4 mm samt att ett annat flyttillsatsmedel användes. Betongreceptet som användes var samma som i förstudien för betongen med ett vattencementtal på 0.4, se kapitel 5.2.1. Detta resulterade i större och synligare porer på provkroppens yta. Tanken var att karbonatiseringen skulle ske i de yttersta porerna och är dessa tillräckligt många och stora så kan ytan uppfattas som missfärgad. Temperaturdifferensen är densamma som vid avsnitt 6.6.2. Provkroppen placerades efter härdning i en frys på samma sätt som i avsnitt 6.6.2. Inga ändringar gjordes förutom betongreceptet. Parallellt med försöket göts även ett referensprov som förvarades i klimatrummet med 20°C och 55 % relativ fuktighet.

6.6.4 Kondensation på betongyta – tre cykler från 0 till 15°C

Efter härdning till 60 % av 28 dygns hållfasthet förflyttades provkropparna till en klimatkammare på samma sätt som vid fuktvandringförsöket, se bild 6.1. Även i detta försök behölls isoleringen på för att minska fukt- och värmetransport i sidled samt underifrån. De isolerade ränderna medförde långsammare kylning och uppvärmning av elementet. För att erhålla kondens på betongytan utsattes provkropparna för klimatcykler där temperaturen varierade mellan 0 och 15°C i 12 timmars intervall, se tabell 6.4. Vid 0 och 15°C sattes den relativa fuktigheten till 70 respektive 98 %. Det simulerade klimatomslaget ska efterlikna en kallare period med en normal relativ fuktighet utomhus som sedan växlar om till ett varmare klimat med nederbörd. Nederbörden kommer då att fukta upp luften och vid marknivå kan den relativa fuktigheten hamna mycket nära 100 %. Eftersom betongelementen står skyddade under tak kommer inget regn träffa betongytan.

Tabell 6.4 – Klimatcykler för kondensfallet 0 - 15°C

Tid [h]	Temperatur [°C]	Relativ fuktighet [%]
12	0	70
12	15	98

Både klimatet och antalet cykler är valda utefter värsta scenario för att skapa mycket ogynnsamma förhållanden med avseende på kondensation. För att inte chocka provkropparna och riskera ett svettningfenomen, ställdes klimatkammaren först in på 10°C och en relativ fuktighet på 50 %. Efter cirka två timmar startades cykeln med 12 timmars intervall mellan 0 till 15°C och 70 till 98 % relativ fuktighet. Betongens yttemperatur, relativ fuktighet samt koldioxidhalt i klimatkammare mättes och loggades kontinuerligt, se bilaga 3.

6.6.5 Kondensation på betongyta – tre cykler från 0 till 10°C

Provkroppen göts enligt tidigare recept och härdade utifrån samma förutsättningar som provkropparna i kapitel 6.6.4. Efter härdning placerades provkroppen i klimatkammaren som var förinställd på ett klimat med 0°C och 70 % relativ fuktighet. Skillnaden mot föregående kondensationsförsök är att det varmare klimatet sänktes från 15°C till 10°C. Även i detta försök utsattes provkroppen för 3 cykler med 12 timmars intervall mellan det kallare och det varmare klimatet, se även tabell 6.5.

Tabell 6.5 – Klimatcykler för kondensfallet 0 - 10°C

Tid [h]	Temperatur [°C]	Relativ fuktighet [%]
12	0	70
12	10	98

6.7 Resultat

Sammanlagt utsattes sex betongprover för fyra olika klimat. Provkropparnas ytor utvärderades visuellt på håll och genom ett mikroskop. På en del av provkropparna utfördes även skrapprov för att bekräfta de visuella observationerna. Resultaten från analyserna beskrivs separat för att sedan sammanställas i en matris liknande den i förstudien, se tabell 5.6. Resultaten för de sex proverna jämfördes mot resultatet för referensprovet. Referensprovets yta var mycket jämn, blank och saknar helt flammighet. Inga utfällningar eller kristaller kunde heller ses på mikroskopisk nivå. Referensprovet saknade precis som de andra sex proverna synliga luftporer på ytan, se bild 6.2 och 6.3.

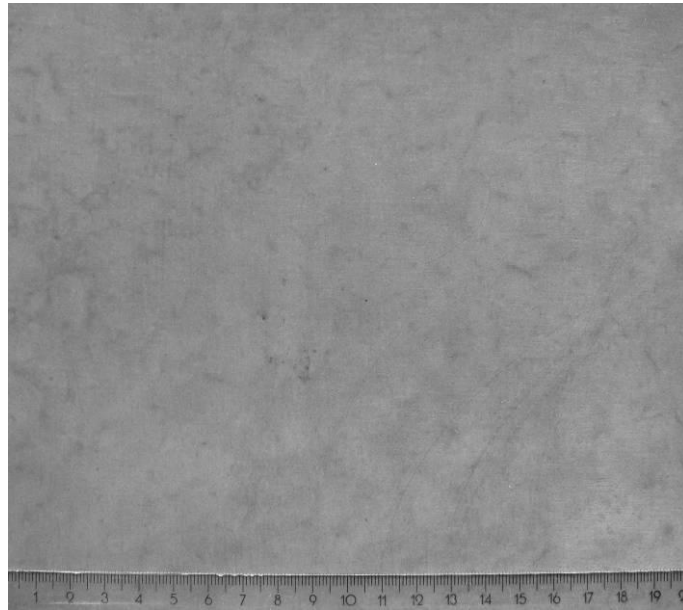


Bild 6.2 – Referensprovkropp härdad och lagrad i 55 % relativ fuktighet.

Bilden nedan visade att referensprovkroppen var fri från synliga utfällningar på ytan även på nära håll.

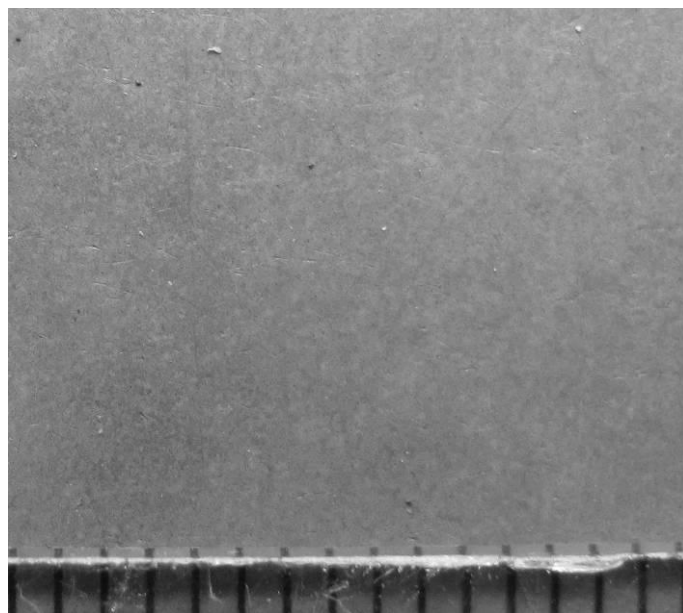
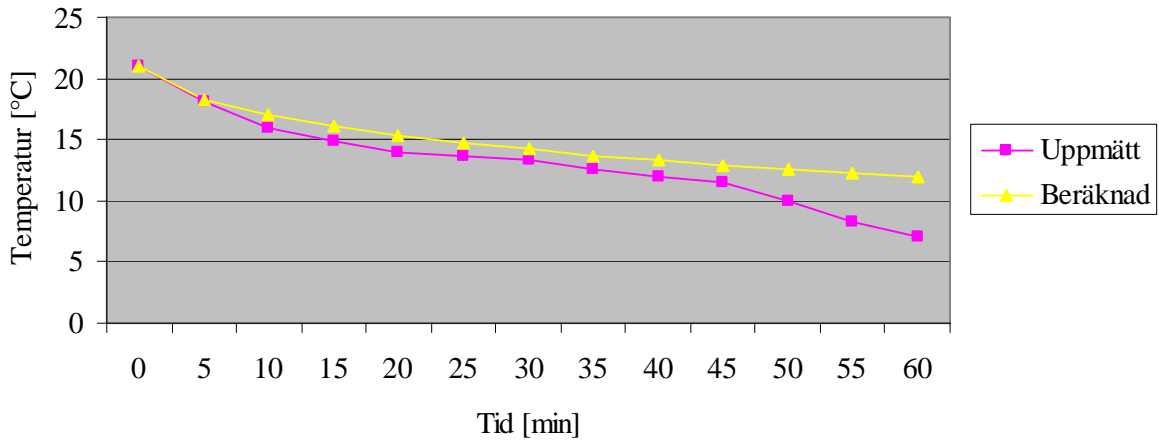


Bild 6.3 – Närbild av referensprovkroppen härdad och lagrad i 55 % relativ fuktighet.

6.7.1 Inre fuktvandring från 20 till -10°C

Den ena provkroppen placerades med en viss lutning medan den andra fick stå helt vertikalt. Yttemperaturen på provkropparna antogs sjunka ungefär i samma takt vilket föranledde till att mätningar endast gjordes på en av dem. De beräknade och uppmätta yttemperaturerna plottades i diagram och kan ses i figur 6.4.



Figur 6.4 – Plottning av beräknad och uppmätt yttemperatur.

Till en början stämde de teoretiska beräkningarna väldigt bra med den uppmätta yttemperaturen för att sedan skilja något efter lång tid.

Koldioxidhalten i laboratoriet uppmättes till 745 ppm vilket kan jämföras med en normal utomhushalt som ligger på 300 – 400 ppm. I klimatkammaren var koldioxidhalten till och med högre, ca 830 ppm. Detta kan tänkas bidra till en onormalt gynnsam härdning.

Ytan på provkropparna var efter försöket jämn och helt blank vilket tydde på att inga utfällningar hade skett, se bild 6.4. Ytan var dock aningen ljusare än referensprovets. Det är osäkert på om det beror på skillnad i uttorkning eller en jämn och mycket liten kalkutfällning. Det fanns ingen visuell skillnad mellan den stående och lutande provkroppen.

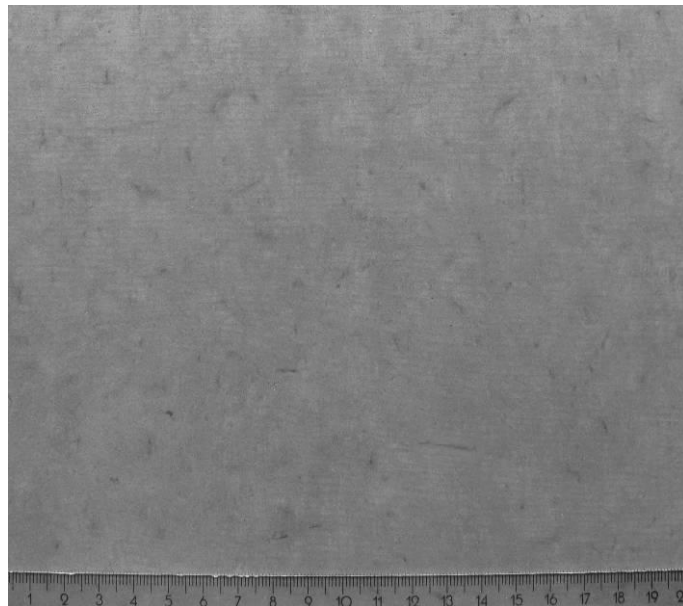


Bild 6.4 – Provkropp placerad i -10°C efter härdning i 20°C och 55 % relativ fuktighet.

På mikroskopisk nivå observerades heller ingen form av utfällning. Ytan hade en jämn och slät struktur utan några ljusare eller mörkare partier

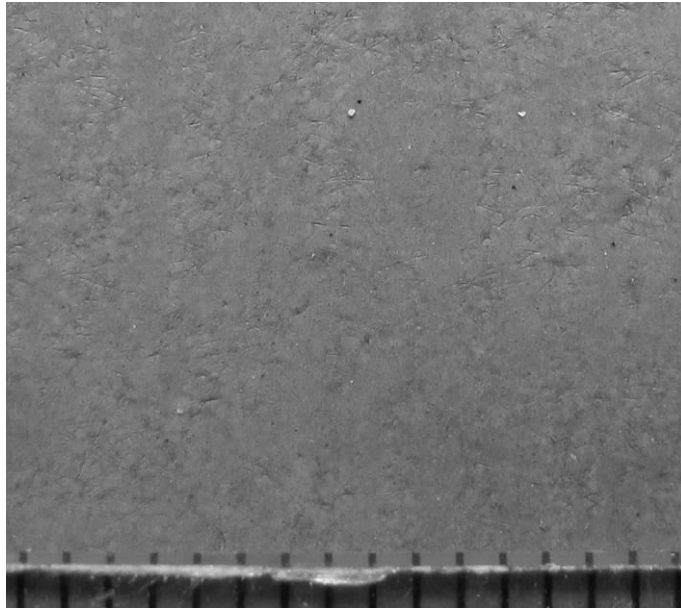


Bild 6.5 – Närbild på provkropp placerad i -10°C efter härdning i 20°C och 55 % relativ fuktighet.

6.7.2 Inre fuktvandring från 20 till -20°C

I det andra försöket där en provkropp placerades i -20°C kunde viss flammighet urskiljas. Ytan var inte lika blank och fin som referensprovet. Flammigheten var dock svag och uppfattades inte som särskilt besvärande. På ett större prov kan flammigheten tänkas vara mer störande, jämför bild 6.6 med bild 6.2. När ytan studerades ur en skarp vinkel så att ljuset reflekterade mot ytan kunde vissa små matta partier urskiljas. Sådana partier fanns inte på referensprovet eller det prov som hade placerats i -10°C . De matta partierna var troligen någon form av utfällning.

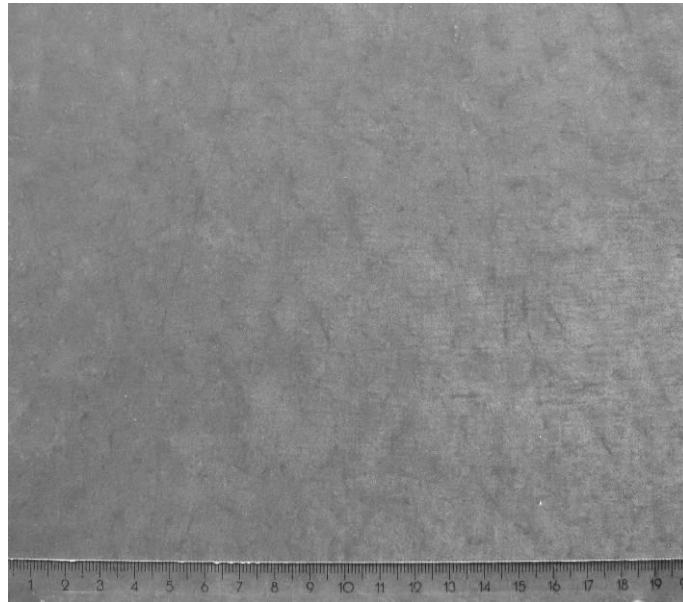


Bild 6.6 – Provkropp placerad i -20°C efter härdning i 20°C och 55 % relativ fuktighet

Observation genom ett mikroskop avslöjar små ljusare partier som förekommer oregelbundet längs ytan. Sådana partier kunde inte ses på de två tidigare provkropparna. På mikroskopisk nivå bildade dessa partier en flammig yta. På några ställen fanns även små runda och grumliga kristaller men dessa var mycket få till antalet. I makroläge kunde dessa utfällningar ses runt fåror och andra ojämnheter, se bild 6.7.

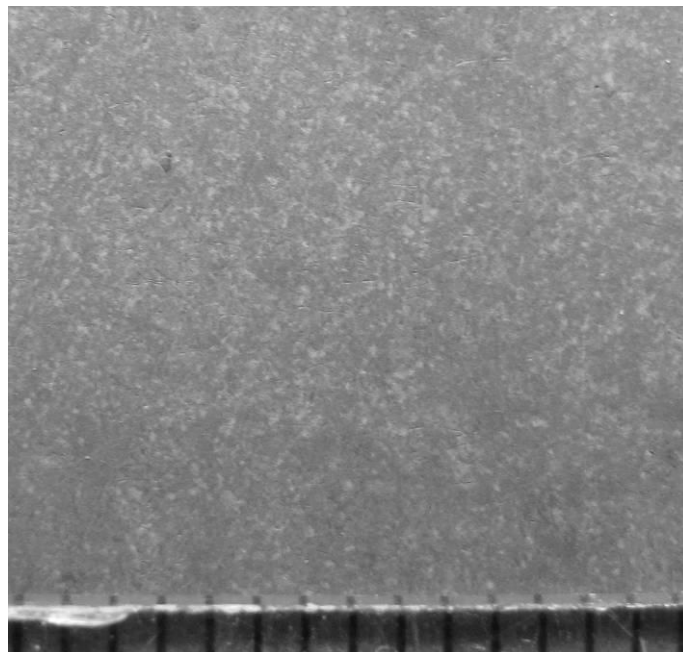


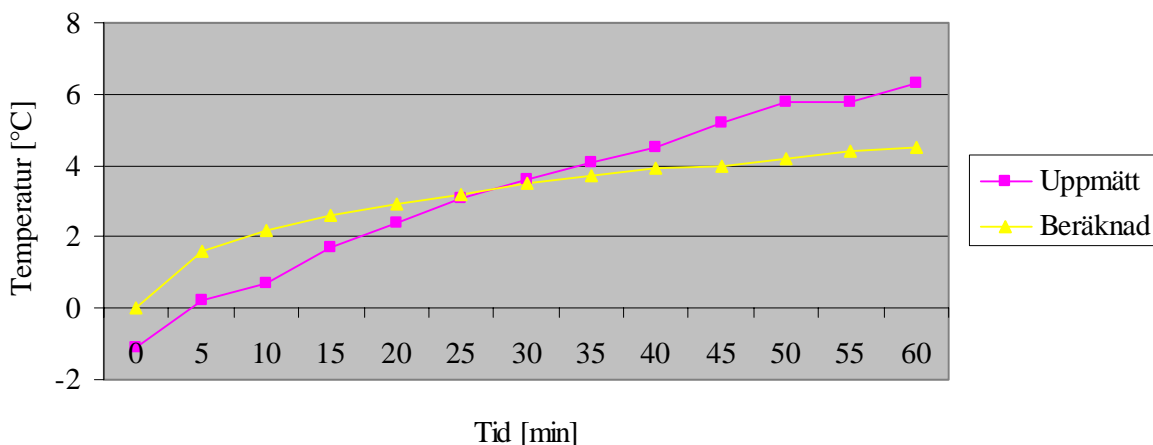
Bild 6.7 – Närbild på provkropp placerad i -20°C efter härdning i 20°C och 55 % relativ fuktighet.

6.7.3 Inre fuktvandring – betong med hög porositet

De två provkropparna i det tredje försöket hade båda ett stort antal stora och ytliga luftporer. Ytan på den provkropp som placerades i det kalla klimatet, var efter försöket mycket fin och kulören var helt jämn. Runt och i porerna fanns inga missfärgningar som skulle tyda på en kalkutfällning. I jämförelse mot referensprovet fanns inga skillnader i ljushet. I mikroskopet kunde heller inga skillnader mellan provkropparna urskiljas. Det har således troligen inte skett någon form av utfällning på ytan, alternativt att den är så pass liten att det inte uppfattas som störande. Eftersom det inte finns några skillnader mellan provkropparna utfördes ingen röntgendiffraktionsanalys.

6.7.4 Kondensation på betongyta – tre cykler från 0 till 15°C

De teoretiska beräkningarna stämde till en början bra överens med de uppmätta om förskjutningen bortsågs. Förskjutningen berodde på att betongprovets ytemperatur vid tiden noll inte var 0°C utan -1.1°C. Kurvorna för uppmätta och beräknade värden kan ses i figur 6.5. Koldioxidhalten inne i kammaren var ungefär 800 ppm vilket kan jämföras med 740 ppm i laborationshallen.



Figur 6.5 – Uppmätt och beräknad ytemperatur.

När klimatet växlade om från kallt till varmt i den andra och tredje cykeln observerades mycket fritt vatten på betongytan. Kondenseringen var så kraftig att stora droppar bildades som i vissa fall rann ner längs ytan, se bild 6.8.



Bild 6.8 - Tydliga vattendroppar av kondens kunde ses på proverna under andra och tredje cykeln.

Både den stående och den lutande provkroppens yta var mycket flammig jämfört med referensprovet. Utfällningarna varierade i intensitet över hela ytan samtidigt som det fanns ett par mörkare partier vilket skapade stor flammighet. De ljusare partierna såg ut som vita slöjor längs ytan. Den lutande provkroppen var betydligt flammigare än den vertikalt stående vilket kan förklaras med att vattendropparna förmodligen runnit av lättare från den stående provkroppen.

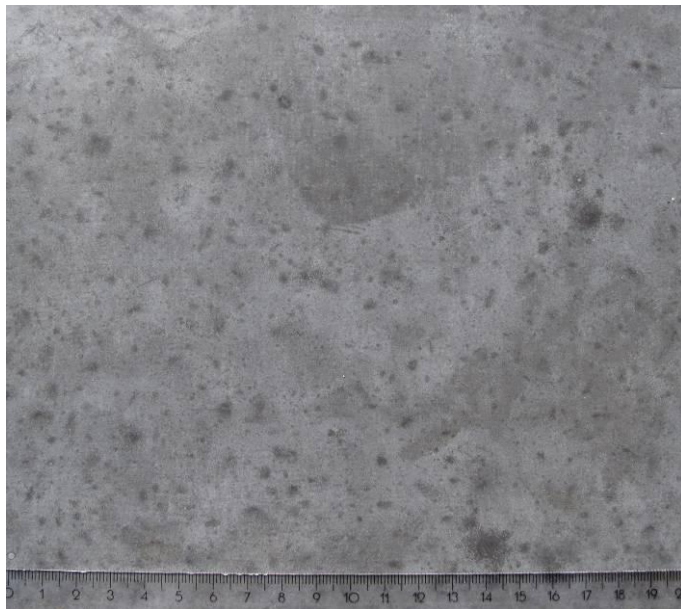


Bild 6.9 – Provkropp placerad i klimatkammare efter härdning i 20°C och 55 % relativ fuktighet, 0 till 15°C.

På mikroskopisk sågs kraftiga vita partier som varierande i storlekar. När partierna observerades noggrant kunde det tydligt ses att dessa var någon form av hinna som lagt sig på betongytan. Beläggningen var på vissa ställen så tjock att den dolde mönstringen från formplywooden. På ytan fanns även små mjölkiga och runda kristaller.

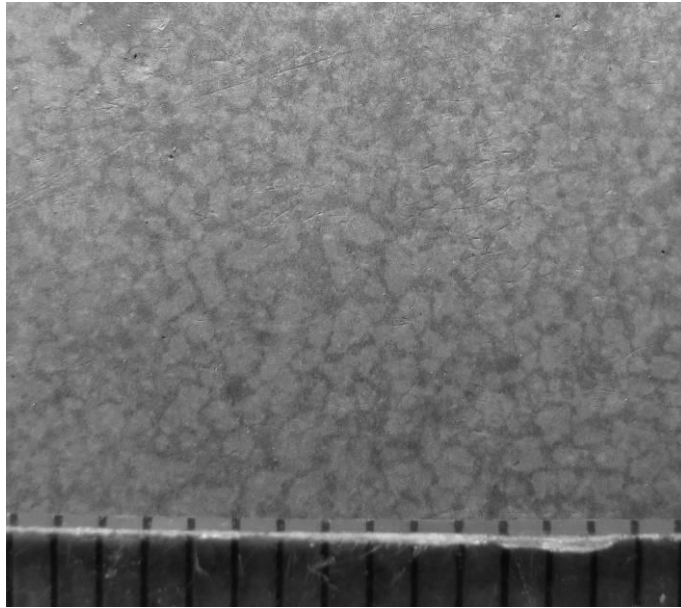


Bild 6.10 – Närbild på provkropp placerad i klimatkammare efter härdning i 20°C och 55 % relativ fuktighet, 0 till 15°C.

6.7.5 Kondensation på betongyta – tre cykler från 0 till 10°C

Under klimatsimuleringen sågs tydligt kondens på betongytan. Resultatet var dock inte lika tydligt som försöket i avsnitt 6.7.4. Det fanns ett par ljusare partier på ytan som skapade en liten flammighet. De mattare partierna sågs tydligt när ljus reflekterades på ytan, vilket pekade på att någon form av utfällning har skett. Betongytan kan ses i bild 6.11.

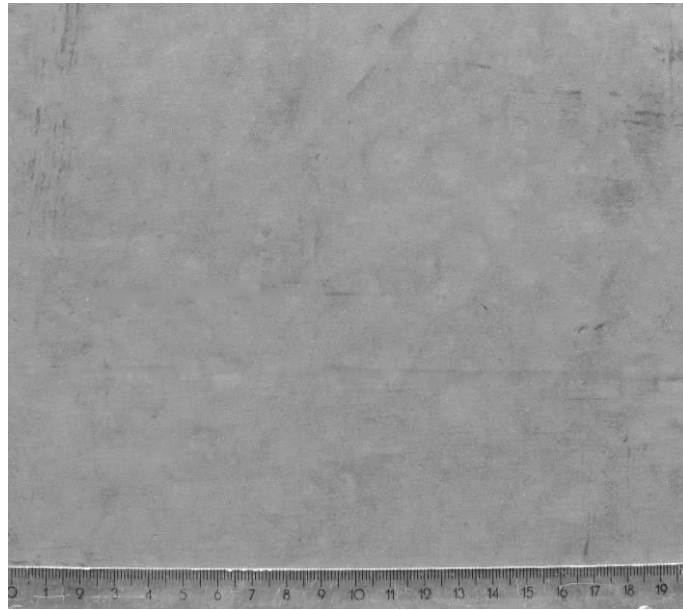


Bild 6.11 – Provkropp placerad i klimatkammare efter härdning i 20°C och 55 % relativ fuktighet, 0 till 10°C.

Observation på mikroskopisk nivå gav en annan bild av ytan. Här kunde en tunn vit beläggning ses över hela ytan med ett antal små runda och mjölkiga kristaller. Beläggningen var mer jämn än hos tidigare prover och den förekom inte i små partier.

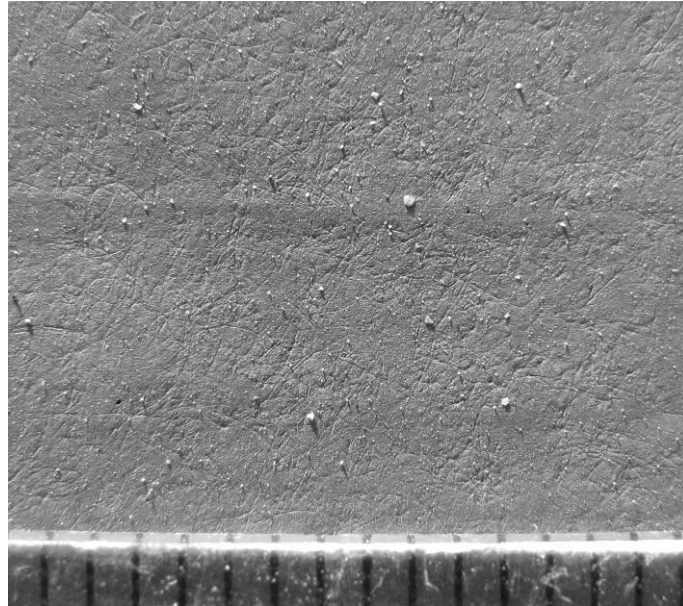


Bild 6.12 – Närbild på provkropp placerad i klimatkammare efter härdning i 20°C och 55 % relativ fuktighet, 0 till 10°C.

6.7.6 Röntgendiffraktionsanalys

För att bekräfta vad flammigheten och missfärgningen berodde på utfördes skrapprov på betongytorna. Skrapprov utfördes på tre av provkropparna som kan ses i tabell 6.6.

Tabell 6.6 – Tabellen nedan visar vilka provkroppar som undersöktes kemiskt.

Benämning	Typ av försöksmetod
Prov 1	Kondens 0 - 15°C
Prov 2	Inre fuktvandring -20°C
Prov 3	Referensprov

Resultaten från analysen visade på att alla tre proverna innehöll kalcit, järnoxid och kvarts. Anledningen till att det förekom mer kalcit i prov 3 var att en del av ytskiktet kom med vilket förekomsten av järnoxid och kvarts indikerade på. Järnoxiden var en komponent i pigmentet och kvarts var ett mineral som fanns i ballasten. Analysen har dock gett utslag på att det fanns en större mängd kalcit i skrapresterna för prov 1 och 2, se bilaga 5. Prov 2 och 3 innehöll även portlandit vilket är kristalliserad kalciumhydroxid.

6.8 Sammanställning av resultat

Totalt har fem olika fall studerats där klimatet och betongreceptet har varierats för att utreda vilka parametrar som påverkar förekomsten av kalkutfällningar. För att underlätta beskrivningen de fem olika fallen har de fått en ny benämning enligt tabell 6.7.

Tabell 6.7 – Benämning för respektive försök.

Benämning	Typ av försök
Fall 1	Inre fuktvandring från 20°C till – 10°C
Fall 2	Inre fuktvandring från 20°C till – 20°C
Fall 3	Inre fuktvandring - betong med hög porositet
Fall 4	Kondensation på betongyta - tre cykler från 0°C till 15°C
Fall 5	Kondensation på betongyta - tre cykler från 0°C till 15°C

På samma sätt som i förstudien ställdes provkropparna mot varandra och utvärderades genom en jämförelse mot referensprovet. De parametrar som användes skiljde sig en aning från dem som användes i förstudien då andra typer av bedömningspunkter är av större betydelse. Provkropparna i förstudien hade dels förvarats i en ogynnsam miljö under en betydligt längre tid samtidigt som betongreceptet skiljde sig vilket således gav olika resultat.

Parametern flammighet avsåg om det fanns partier som var antingen ljusare eller mörkare jämfört med den övriga betongytan som då skapade en kontrast. Parametern beläggning avsåg om en vit hinna eller slöja kunde urskiljas på betongytan. Mattheten var ett tecken på om något hade fällts ut på betongytan. Den sista parametern, kristaller, avsåg om det fanns några synliga kristaller på betongytan då den observerades i mikroskop. Samtliga parametrar poängsattes med noll till fyra där högt poäng representerade en stor skillnad mot referensprovet och noll då det inte fanns någon. Bedömningen kan ses i tabell 6.8.

Tabell 6.8 – Resultatsammanställning.

Prov	Flammighet	Beläggning	Matthet	Kristaller	Summa
Fall 1	0	0	0	0	0
Fall 2	1	0	1	0	2
Fall 3	0	0	0	0	0
Fall 4	4	3	4	0	11
Fall 5	1	2	2	0	5

Samtliga prover innehöll kalcit enligt röntgendiffraktionsanalysen. Resultatet visade dock på att det fanns betydligt mer kalcit i prov 1 och 2 jämfört med prov 3, se bilaga 5.

6.9 Diskussion

De teoretiska beräkningarna för yttemperaturerna hos betongproverna stämmer bra överens med de praktiskt uppmätta värdena. Anledningen till att det inte stämmer helt kan bero på fel lufthastighet vid ytan eller luftströmmarnas riktning. När klimatkammaren slog om från kallt till varmt skedde klimatförändringen inte momentant som det antagits i beräkningarna vilket följaktligen skapar skillnad i resultaten.

Ytan på referensprovet var inte helt jämn i färgen utan det fanns en viss färgvariation som får anses bero på andra orsaker än kalkutfällningar. Denna naturliga färgvariation kan till exempel bero på vilket klimat betongprovet har lagrats i.

Utifrån de visuella resultaten bedöms inte en inre fuktvandring ge upphov till synliga kalkutfällningar på betongytan när de placeras i en kall miljö. Fukt som transporteras i porer mot en avdunstande betongyta kommer aldrig att fällas ut på ytan på grund av att undertrycket i porerna håller det kvar (Nilsson, 1994). Viss nyansskillnad finns mellan försöken med inre fuktvandring och referensprovet. Det kan tänkas bero på att provkropparna uttorkat och härdat i två helt olika klimat efter membranhärdningen, se avsnitt 2.4.3.

Att placera ett betongelement i ett sådant kallt klimat som gjordes under försöken är dessutom orealistiskt eftersom risken för ytkrackelering då blir väldigt stor. Som beskrivits i resultatet i avsnitt 6.7.2 visar den provkropp som placerades i -20°C på en viss flammighet. Den kemiska analysen fastställer att det finns mer kalcit i ytskiktet jämfört med referensprovet. Detta beror sannolikt på att kondens har fällt ut då försöket avslutades och provkroppen plockades ur frysen. Loggningen av klimatet i klimatboxen visade på att risken för att kondens ska ha fällt ut på ytan var mycket stor. Temperaturen på luften i klimatboxen höjdes mycket snabbt samtidigt som den relativa fuktigheten var hög. Torrslaget har troligen inte klarat hålla fuktigheten nere i boxen.

Om ett betongelement i tidig ålder utsätts för ett väderomslag där det föreligger risk för kondensbildning är risken mycket stor att det uppstår grova kalkutfällningar. Under kondensationsförsöket fällde så mycket kondens ut att det rann på ytan vilket sköljde bort löst sittande kalciumkarbonat innan det hunnit fästa på betongytan. Klimaten som simulerades i försöken för kondens var extremvärden framtagna för att med säkerhet få en kalkutfällning på ett fåtal cykler. Väderomslag från kallt till varmt inträffar oftast på våren men är normalt inte så kraftiga som simulerats i försöken. De är ofta istället mildare men är desto mer frekventa,

dvs. fler antal cykler. De parametrar som spelar mest roll i dessa försök är vilken temperatur och relativ fuktighet det varierar mellan samt hur ofta detta sker.

7 Åtgärdsstudie

7.1 Inledning

Resultaten från huvudstudien visade på att kalkutfällningar kan inträffa på betongelement som varit lagrade utomhus under tak. Provkropparna har alltså inte utsatts för någon direkt nederbörd utan det fanns andra klimatfenomen som resulterade i en kalkutfällning. I fallet där provkropparna utsattes för ett väderomslag från kallt till varmt var utfällningarna mycket stora efter endast tre cykler. Vid försök med en inre fuktvandring var däremot mängden utfällningar betydligt mindre eller rent av obefintliga.

Resultat från tidigare forskning visade på att härdning av betongelement i ett klimat med hög relativ fuktighet är mycket gynnsamt och skapar efter en kort tid ett bra skydd mot kalkutfällningar. Resultaten gäller om betongen härdat i 20°C eller högre. En lägre temperatur ger en längre härdningstid för att uppnå samma resultat. En viktig parameter i denna metod är att koldioxidhalten inte blir för låg. En förhöjd koldioxidhalt ger ett skyddande skikt på en betydligt kortare tid, men eftersom koldioxid är kvävande undersöktes inte en förhöjd koldioxidhalt i åtgärdsstudien. En lösning med höga koncentrationer av koldioxid skulle kunna skapa problem ur arbetsmiljösynpunkt.

7.2 Åtgärder

Utifrån testresultaten modellerades en lösning som skulle kunna användas i förtillverkningsindustrin för att ge ett fullgott skydd mot kalkutfällningar. Målet var att skapa en lösning som var enkel men ändå mycket effektiv. Det fick heller inte medföra en för hög investeringskostnad eller ha för stor inverkan på tillverkningsprocessen. I den första delen av åtgärdsstudien göts fyra provkroppar som härdade i ett klimat med 20°C och en relativ fuktighet på 85 % i ett respektive två dygn för att ge betongytan ett bra skydd mot tidiga kalkutfällningar.

En annan åtgärd som undersöktes baserades på att provkropparna fick härda under presenning innan de utsattes för ett varierande klimat. Tanken var att erhålla en tillräckligt hög relativ fuktighet under presenningen genom att den avdunstande fukten stängdes inne. Detta ska i sin tur medföra en gynnsam härdning för betongelementen. I ett tredje försök placerades några av kropparna under presenning i klimatkammaren under cyklernas gång.

Utifrån studien där provkropparna fick härda under presenning utfördes en djupare analys av det klimat som uppstod därunder. Den relativa fuktigheten blev förhöjd i det förgående försöket, men inte tillräckligt, vilket då föranledde till vidare försök för att nå en tillräckligt hög nivå.

7.3 Tillvägagångssätt

7.3.1 Betongrecept

Betongproverna göts efter samma recept som under huvudstudien, se kapitel 6.5.1. Vid varje undersökning göts två provkroppar där den ena användes som referens.

7.3.2 Formar

Formarna konstruerades på samma sätt som vid huvudstudien, se kapitel 6.5.2.

7.3.3 Härdning

Provkropparna membranhärdade på samma sätt som i huvudstudien, se kapitel 6.5.3. Efter avformning härdades den ena provkroppen i ett klimat med 20°C och 55 % relativ fuktighet. Den andra provkroppen fick istället härda i 85 % relativ fuktighet. Denna process utfördes för två olika härdningstider, ett respektive två dygn efter avformning. De olika härdningsalternativen kan ses i tabell 7.1.

Tabell 7.1 – Provkropparnas härdningsförlopp.

	Membranhärdning	Härdning
Prov 1	18 timmar	24 timmar i 20°C och 85 % RF
Prov 2	18 timmar	24 timmar i 20°C och 55 % RF
Prov 3	18 timmar	48 timmar i 20°C och 85 % RF
Prov 4	18 timmar	48 timmar i 20°C och 55 % RF

I studien av den enklare åtgärden göts tre provkroppar. Provkropparna placerades under presenning i olika kombinationer för att kunna bestämma var i tillverkningsprocessen åtgärden skulle ha störst effekt. Provkropp 5 var utan presenning under härdning och med presenning under klimatcyklerna. Provkropp 6 fick ha presenning under härdningen men var utan under klimatcyklerna. Provkropp 7 placerades under presenning både under härdning samt klimatsimulering. De olika åtgärdena för provkropparna i denna studie kan ses i tabell 7.2.

Tabell 7.2 – Tabellen redogör för hur de tre provkropparna kommer härddas respektive förvaras i klimatkammaren.

	Membranhärdning	Härdning inomhus, 37 h, 21°C	0 till 15°C, 70 – 98 % RF
Prov 5	18 h	55 % relativ fuktighet	Under presenning
Prov 6	18 h	Under presenning	Exponerades fritt
Prov 7	18 h	Under presenning	Under presenning

Härdningen under presenning utfördes för att erhålla en högre relativ fuktighet samt en högre temperatur. Detta bör i sin tur ge en gynnsammare härdning. För att tillåta visst ombyte med omgivningen lämnades en lite glipa mellan plasten och golvet på någon millimeter. Luftombytet var viktigt eftersom karbonatiseringen krävde tillgång på koldioxid. Under härdningen placerades en logger i tältet mellan provkropparna så att klimatet kunde registreras. Efter härdningen placerades provkropp 5 och 7 i samma tält i klimatkammaren,

prov 6 placerades utanför presenningen. Syftet med tältet i klimatkammaren var att skapa ett värmetrögare system. När temperaturen slog om från kallt till varmt chockades inte ytan på samma sätt som tidigare.

För att ytterligare analysera klimatet under presenningen göts ytterligare fyra provkroppar. Direkt efter avformning placerades provkropparna, två och två, under två olika tält i betonglabbet för att få en låg relativ fuktighet i omgivande luft. Under de kallare månaderna är ånghalten utomhus mycket låg vilket medför att den relativa fuktigheten inomhus blir låg. Skillnaden mellan tälten var tätheten där det första tältet i princip bestod av en polyetenfolie som enkelt placerats över de två provkropparna. Plasten klämdes sedan med träreglar längs sidorna som resulterade i otäta skarvar och mindre luftkanaler vid golvvinkeln. Det andra tältet utfördes däremot med mer noggrannhet där alla skarvar tejpades med silvertejp. I respektive tält placerades en logger som mätte den relativa fuktigheten och temperaturen under härdningen. För jämförelse placerades en tredje logger utanför tälten. Under tiden uppmättes även koldioxidhalten i respektive tält samt i omgivningen. Klimatstudien pågick i 30 timmar vilket är en rimlig härdningstid innan de lyfts ut och placeras på gården. Efter mättiden utfördes ett pölprovsförsök istället för kondenssimuleringen på grund av tidsbrist så att en utvärdering av klimatet kunde utföras.

7.3.4 Simulerat klimat

När provkropparna hade härdat placerades de i klimatkammaren. Klimatet som simulerades var kondensfallet då temperaturen och den relativa fuktigheten varierade mellan 0 och 15°C respektive 70 och 98 % relativ fuktighet, se tabell 6.6.4.

7.4 Resultat

Sammanlagt utsattes sju betongprover för ett och samma klimat vid två olika tillfällen. Under dessa två tillfällen utfördes olika åtgärder för att försöka minska mängden utfällningar. Provkropparnas ytor utvärderades visuellt på 1 – 2 meters avstånd och genom ett mikroskop. På en del av provkropparna utfördes även skrapprov som analyserades kemiskt för att bekräfta de visuella och mikroskopiska observationerna. Resultaten för dessa beskrevs separat för att sedan sammanställas i en matris liknande den i huvudstudien. Resultaten från de sju provkropparna jämfördes precis som i huvudstudien mot referensprovkroppen som härdat och förvarats i 55 % relativ fuktighet, se avsnitt 6.3.3.

7.4.1 Provkropp härdad i 55 % relativ fuktighet i 24 h

Ytan på provkroppen var mycket matt och jämfört med referensprovet mycket ljus. Eftersom hela ytan var täckt med en ljusare beläggning uppfattades inte ytan som väldigt flammig. Beläggningen var mycket kraftig vilket märktes tydligt när ett skrapprov utfördes på ytan. Ytan på provkroppen kan ses i bild 7.1.

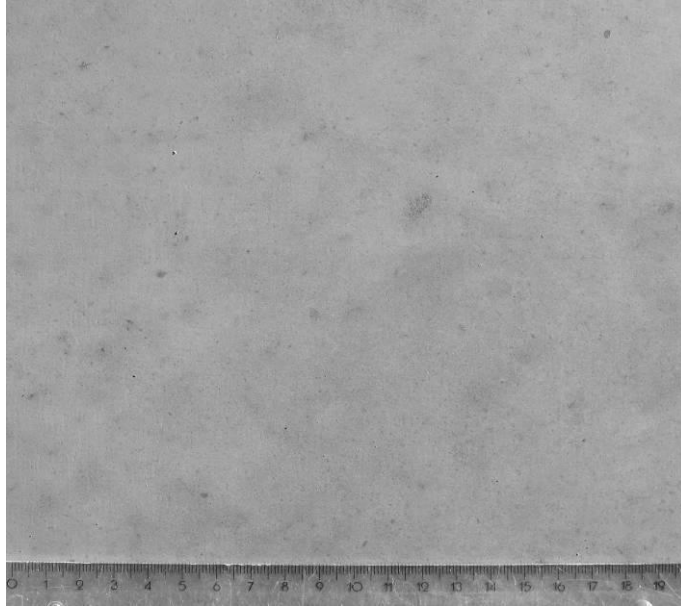


Bild 7.1 – Provkropp härdad i 55 % relativ fuktighet i 24 timmar efter klimatsimulering.

På mikroskopisk nivå kunde ojämnheter i beläggningens intensitet urskiljas. Det sågs att det var en mycket kraftig vit utfällning på betongytan. På ett par enstaka områden fanns mindre och grumliga kristaller.

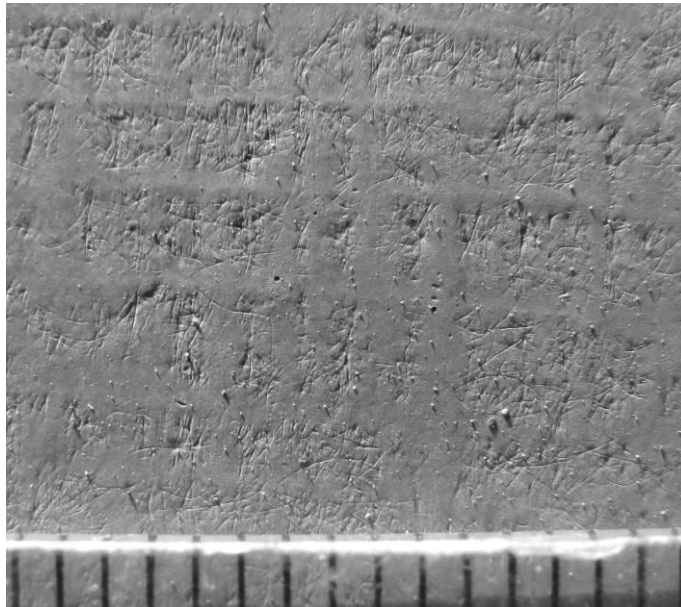


Bild 7.2 – Närbild på provkropp härdad i 55 % relativ fuktighet i 24 timmar efter klimatsimulering.

7.4.2 Provkropp härdad i 85 % relativ fuktighet i 24 h

Provkroppen hade en mörk och jämn yta som på håll inte skiljde sig från referensprovkroppen. Ytan var väldigt klar och blank då endast ett ytterst få suddiga och matta fläckar kunde urskiljas. Detta åskådliggjordes genom att rikta ljus från sidan som då reflekterades mot provkroppens yta. Dessa fläckar var dock så små och enstaka att de inte bidrog till någon störande flammighet se bild 7.3.



Bild 7.3 – Provkropp härdad i 85 % relativ fuktighet i 24 timmar efter klimatsimulering.

På mikroskopisk nivå såg provkroppen opåverkad ut då ingen form av beläggning kunde ses på ytan, se bild 7.4. De mindre matta partiernas uppbyggnad kunde inte urskiljas i mikroskopet. Ingen tydlig kristallstruktur kan urskiljas mer än ett par enstaka korn som låg utspridda över ytan.

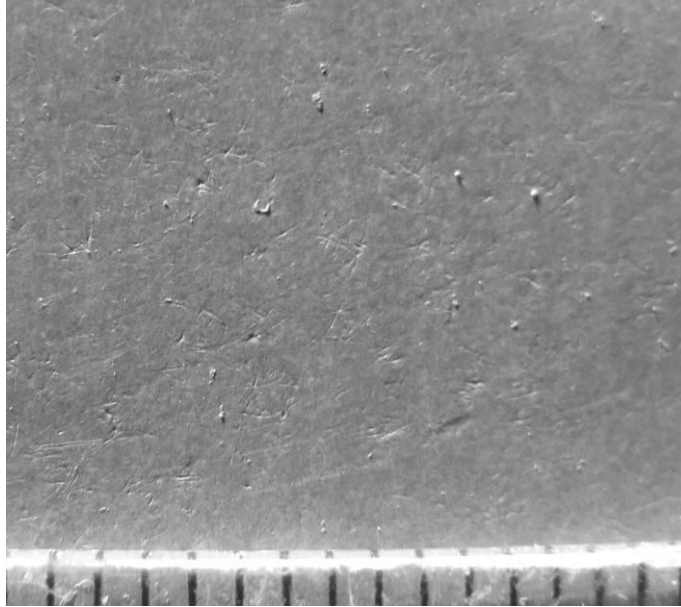


Bild 7.4 – Närbild på provkropp härdad i 85 % relativ fuktighet i 24 timmar efter klimatsimulering.

7.4.3 Provkropp härdad i 55 % relativ fuktighet i 48 h

Ytan på provkroppen var mycket matt och jämfört med referensprovkroppen väldigt flammig. Hela ytan var täckt med en ljus beläggning med små mörka områden som såg ut som rinningsmärken där vattnet sköljt bort utfällningarna innan de hunnit fastna på ytan. Ytan på provkroppen kan ses i bild 7.5.

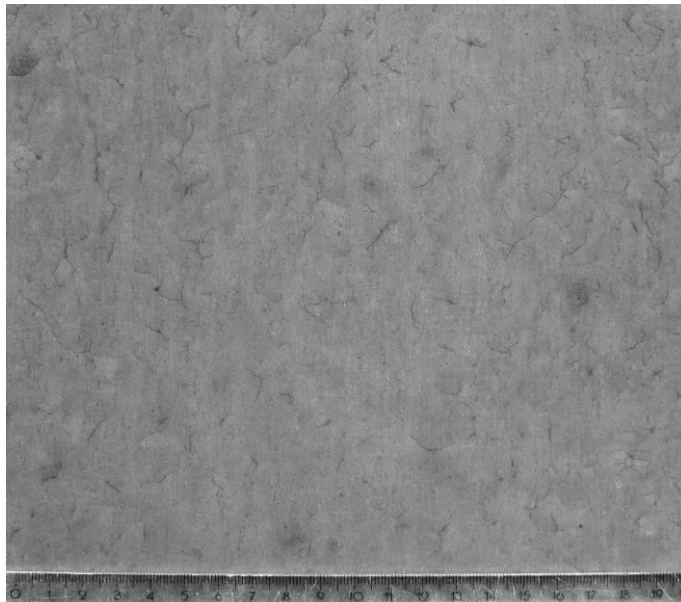


Bild 7.5 – Provkropp härdad i 48 timmar i 55 % relativ fuktighet efter klimatsimulering.

På mikroskopisk nivå var ytan mycket flammig där de mörkare partierna orsakade ett ådrigt mönster, se bild 7.6. Det kunde tydligt observeras att de ljusare områdena var någon form av utfällning.

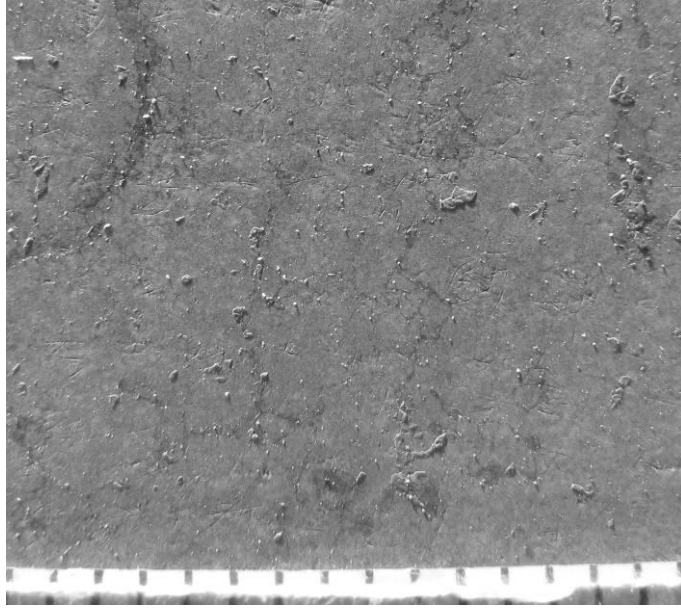


Bild 7.6 – Närbild på provkropp härdad i 48 timmar i 55 % relativ fuktighet efter klimatsimulering.

7.4.4 Provkropp härdad i 85 % RF, 48h

Ytan hos provkroppen hade en extremt klar och blank yta. Inga spår av några utfällningar kunde urskiljas, även då ytan studeras ur en skapare vinkel. Kulören och den naturliga ojämnheten hos ytan skiljde sig inte från referensprovkroppen. Det varierande klimatet har inte haft någon påverkan på provkroppens yta. Detta indikerade på att härdningen varit mycket effektiv och gett provet det skydd den behövde mot tidiga kalkutfällningar.

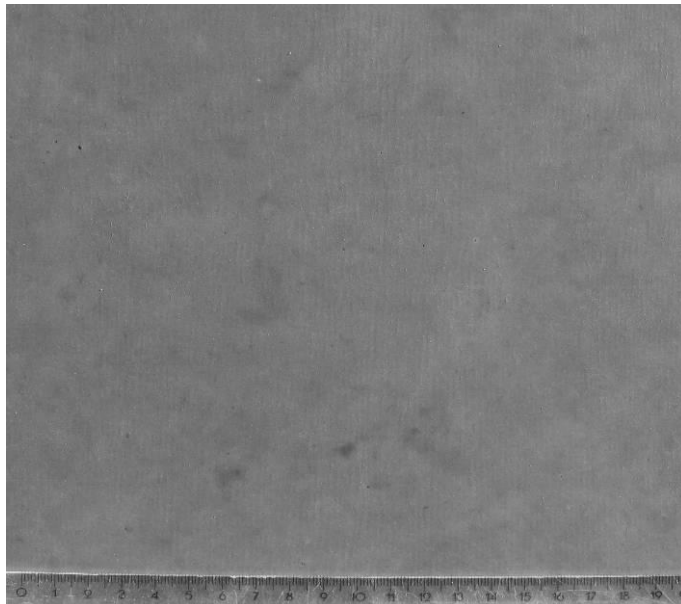


Bild 7.7 - Provkropp härdad i 85 % RF under 48 h efter klimatsimulering.

På en mikroskopisk nivå fanns inte heller spår av kalkutfällningar. Ytan var väldigt jämn och blank. Ytterst få små korn kunde ses men de kan mycket väl ha varit smuts från omgivningen, se bild 7.8.

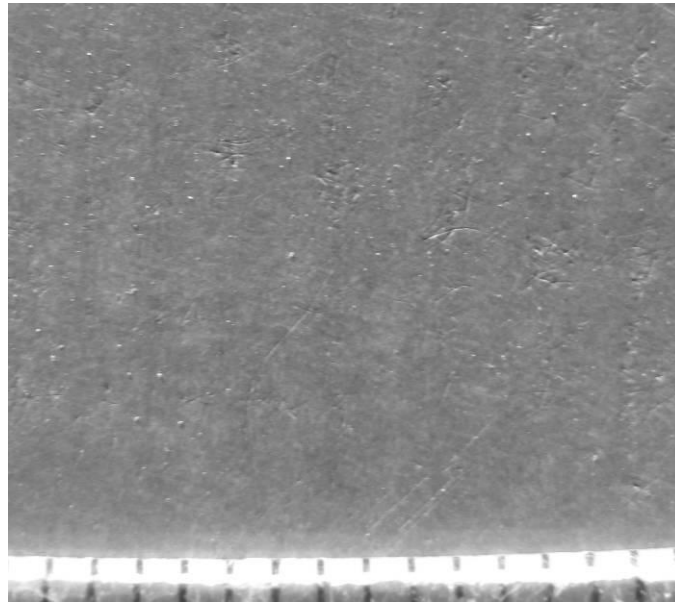


Bild 7.8 - Närbild på provkropp härdad i 85 % RF under 48 h efter klimatsimulering.

7.4.5 Betongprov placerat under presenning i klimatkammare

Vid en jämförelse med referensprovkroppen var ytan något ljusare efter att den plockats ur klimatkammaren. Hela ytan var väldigt matt vilket tydde på att den var täckt med en beläggning. Små mörka partier på ytan gav upphov till viss flammighet, se bild 7.9. Sträcken som syns på bilden beror på yttre åverkan och har ingen betydelse vid utvärderingen.

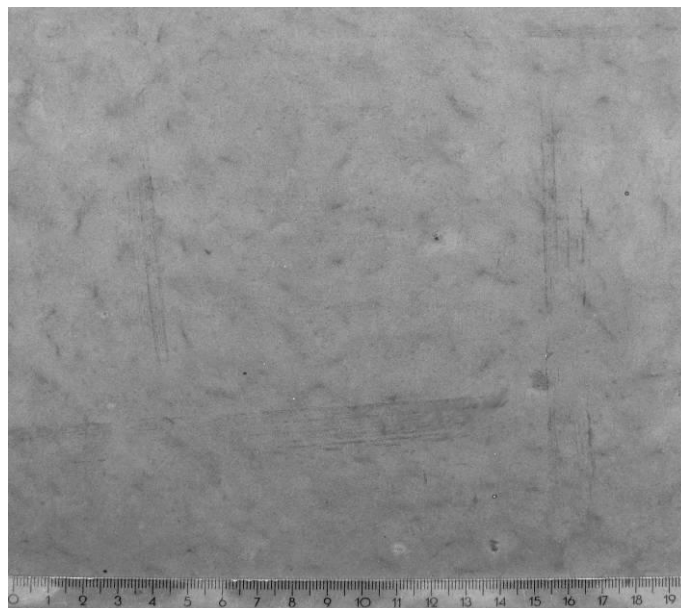


Bild 7.9 – Provkropp härdad i 55 % RF och därefter förvarad under presenning vid klimatsimulering.

På mikroskopisk nivå kunde inga mörka partier ses vilket inte skapade någon flammighet, se bild 7.10 nedan. Däremot sågs en mycket tydligt ljus beläggning över ytan. Ett par enstaka grumliga kristaller kunde ses.

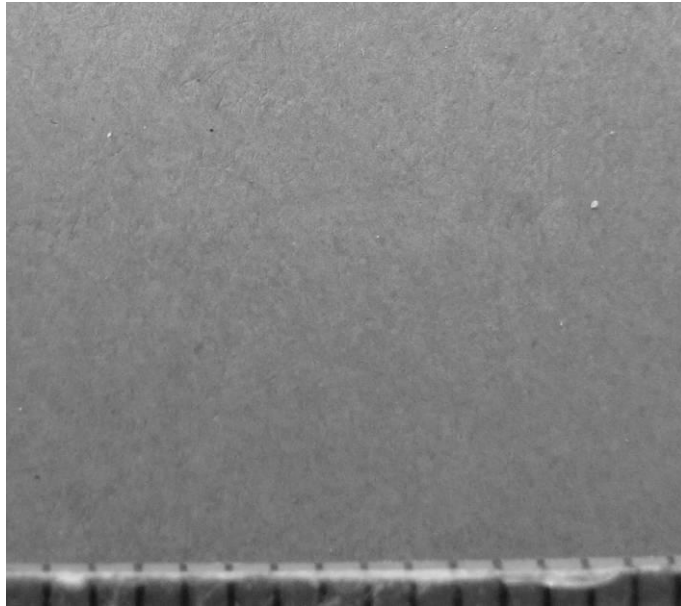


Bild 7.10 - Närbild på provkropp härdad i 55 % RF och därefter förvarad under presenning vid klimatsimulering.

7.4.6 Betongprov härdad under presenning

Provkroppen visade på en tydlig flammighet som var mest framträdande av alla provkroppar i försöket. Ytan var matt och hade fläckvis stora ljusa partier se bild 7.11. Provkroppen hade ett ådrigt mönster som tydde på att kondens hade runnit längs med ytan.

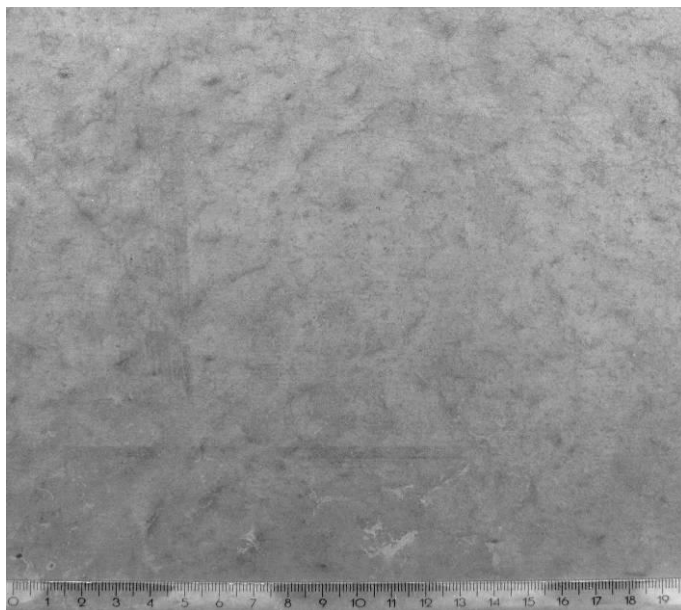


Bild 7.11 - Provkropp härdad under presenning och därefter förvarad fritt under klimatsimulering.

På mikroskopisk nivå uppenbarade sig kraftiga små vita fläckar i ett tätt mönster vilket orsakade flammigheten. Ett tydligt lager av utfällningar täckte ytan, se bild 7.12.

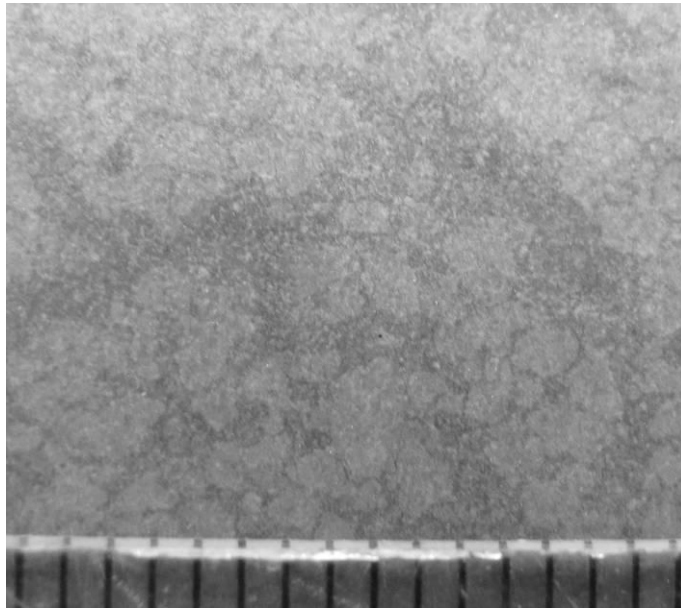


Bild 7.12 - Närbild på provkropp härdad under presenning och därefter förvarad fritt vid klimatsimulering.

7.4.7 Betongprov härdat och i klimatkammare placerat under presenning

Ytan uppvisade viss flammighet, dock inte lika stor som hos provkropp 6. Ytan var matt vilket tydde på att det fanns en beläggning och således hade det skett en utfällning, se bild 7.13.

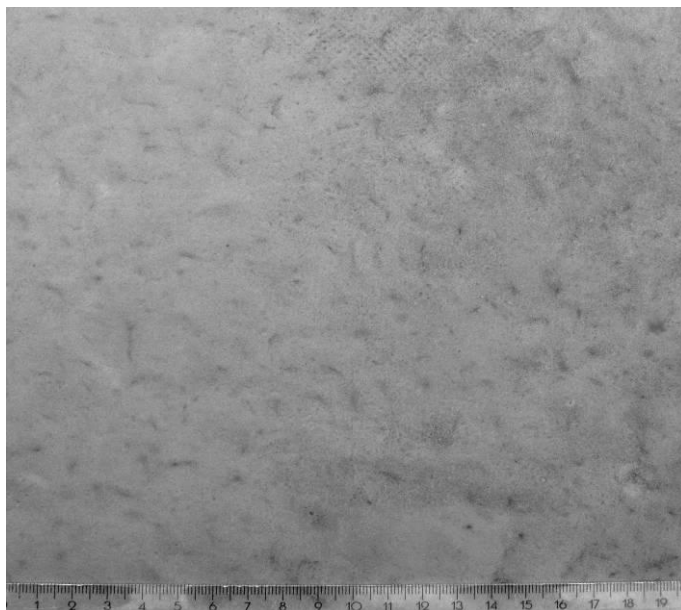


Bild 7.13 - Provkropp som täcktes med presenning under både härdning och klimatsimulering.

På mikroskopisk nivå syntes en svag vit beläggning där inga större korn kunde urskiljas. Beläggningen var, på vissa ställen, fläckvis vilket skapade en flammighet, se bild 7.14.

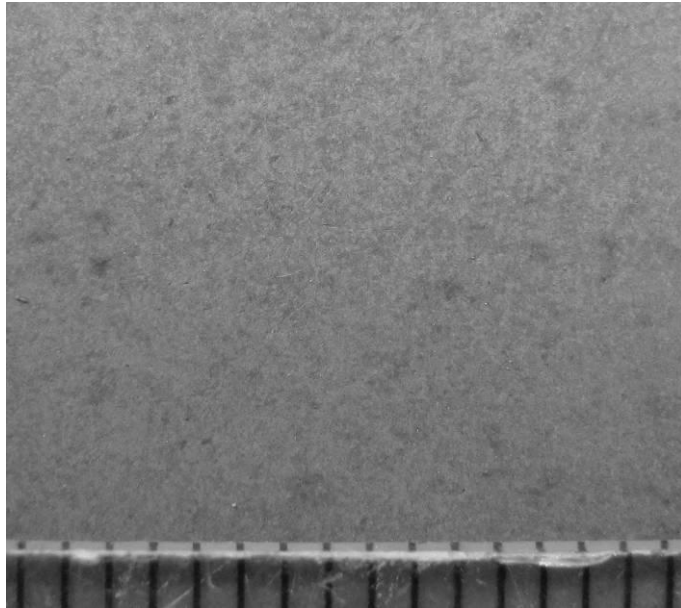
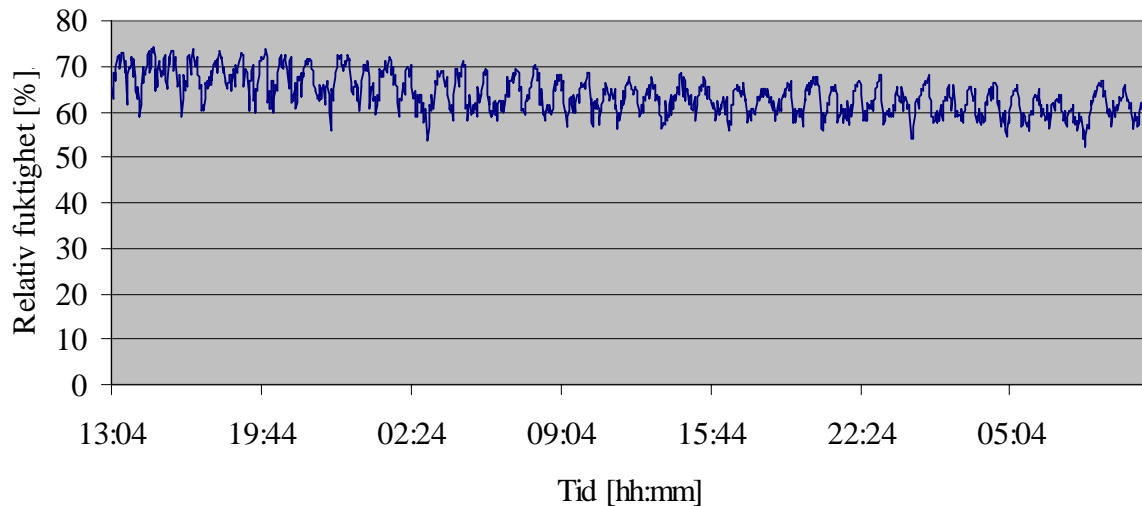


Bild 7.14 - Närbild på provkropp som täcktes med presenning under härdning och klimatsimulering.

7.4.8 Klimat under presenning

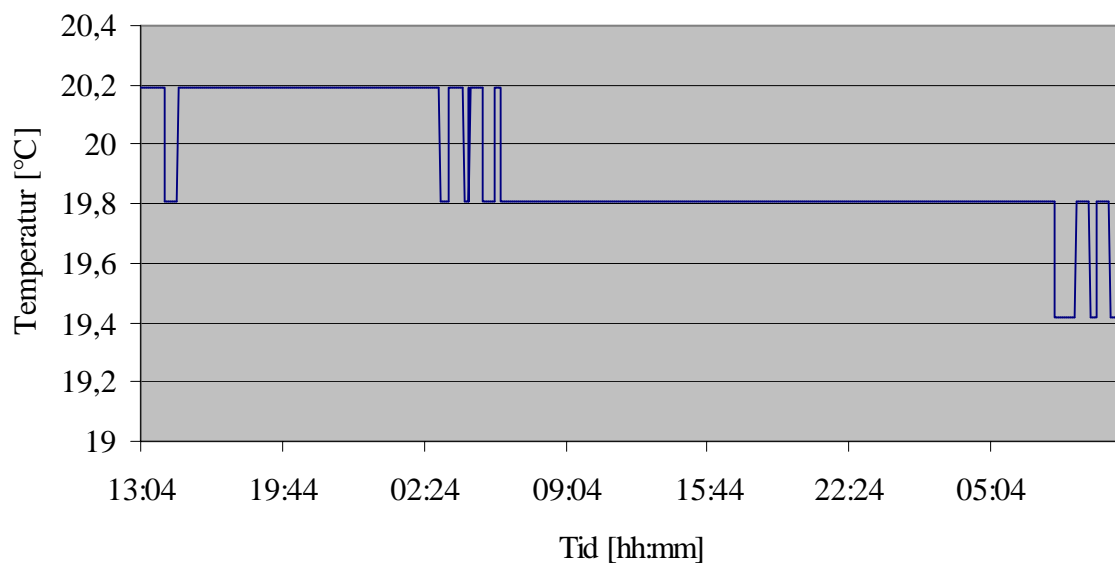
Syftet med att klä in provkropparna i presenning under härdningen, det första dygnet, var att skapa ett tillräckligt fuktigt klimat nära betongytan för att en gynnsam karbonatisering skulle kunna ske. Vattnet som avgick vid betongens uttorkning var tänkt att fukta upp luften under presenningen, så att en hög relativ fuktighet kunde erhållas. När provkropparna stod i klimatkammaren fungerade presenningen som ett värmetrögt klimatskydd som då skulle minska alternativt förhindra kondensutfällning på betongytan.

Under hela försöket loggades den relativa fuktigheten och temperaturen kontinuerligt under presenningen, både vid härdning och under klimatcyklerna.



Figur 7.1 – Loggning av den relativa fuktigheten vid härdning under presenning.

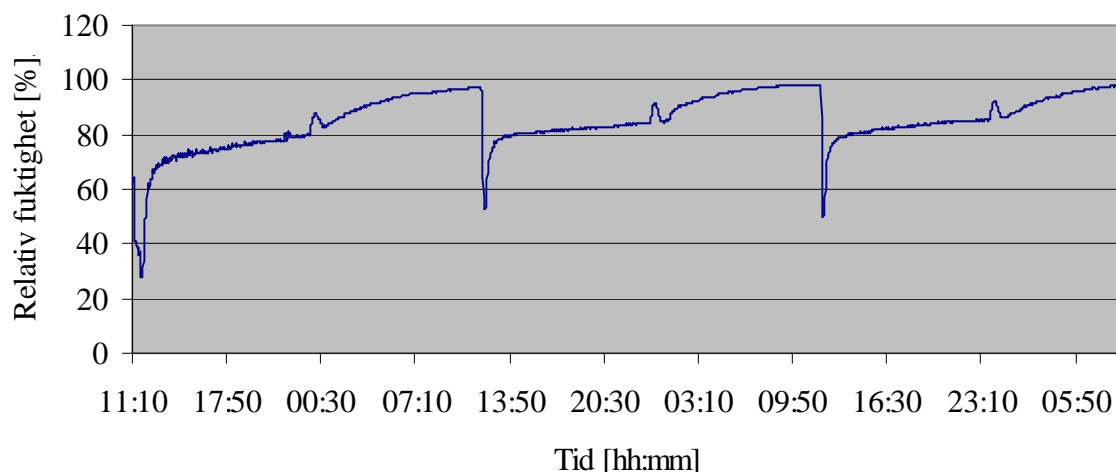
Resultatet från loggningen enligt figur 7.1 visade att den relativa fuktigheten till en början låg runt 70 % men sedan sakta sjunkit ned till cirka 60 %. Detta var i jämvikt med omgivande klimat utanför presenningen. Presenningen har alltså inte haft någon effekt med avseende på en förhöjd relativ fuktighet. Orsaker till detta diskuteras i avsnitt 7.5.



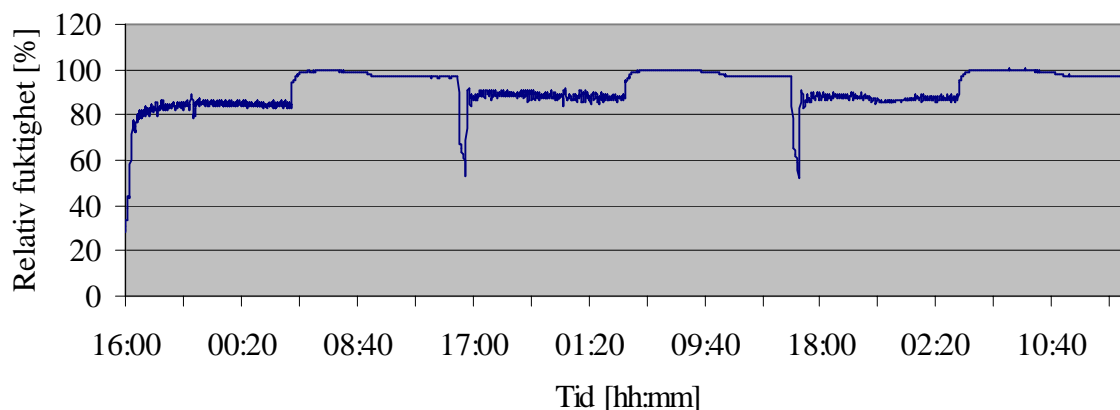
Figur 7.2 - Loggning av temperatur vid härdning under presenning.

Temperaturen under presenningen har enligt figur 7.2 legat runt 20°C under hela härdningsförloppet. Eftersom omgivande temperatur var cirka 20°C har presenningen alltså inte haft någon inverkan på härdningstemperaturen.

Figur 7.3 visar hur den relativa fuktigheten varierat inne under presenningen i klimatkammaren medan figur 7.4 visar hur den varierat utanför presenningen. Den relativa fuktigheten ställdes in på att variera mellan 70 % till 98 %. Figurerna visar tydligt att klimatkammaren inte har klarat av att uppnå rätt förhållanden, utan har istället varierat mellan 85 % till 98 %. Avsikten med loggningen var dock endast att undersöka vilken påverkan presenningen hade för den relativa fuktigheten. Tältet orsakade ett trögare system eftersom det tog längre tid för den relativa fuktigheten att utjämnas med omgivande klimat.

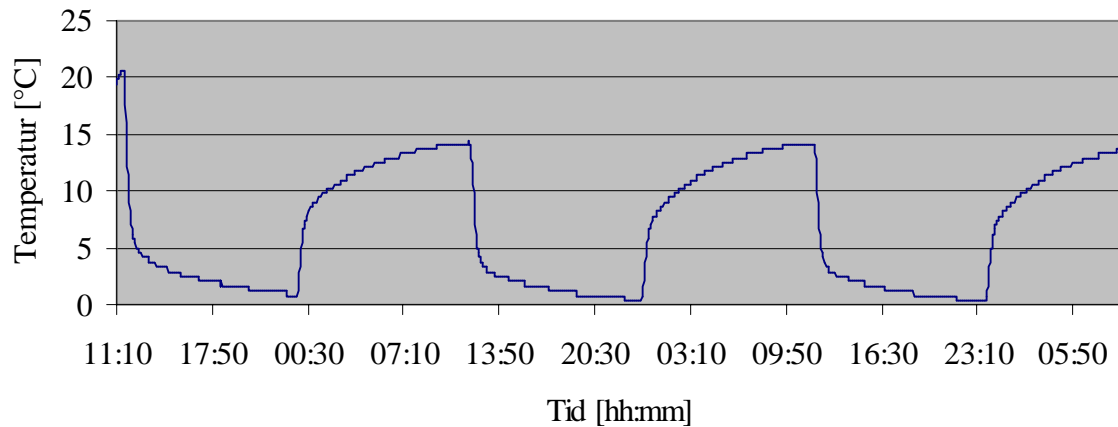


Figur 7.3 - Loggning av relativ fuktighet vid klimatsimulering under presenning.

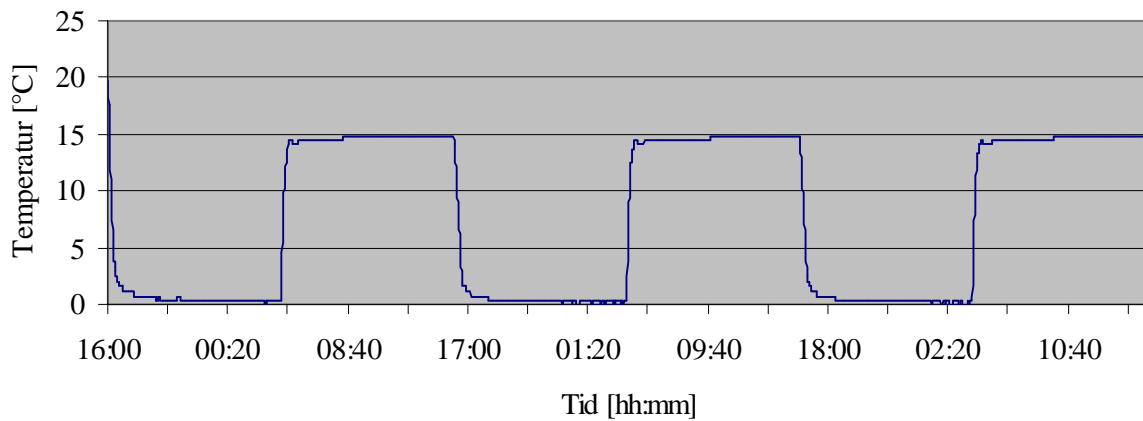


Figur 7.4 – Loggning av relativ fuktighet vid klimatsimulering i klimatkammaren.

En jämförelse mellan figur 7.5 och 7.6 visade att presenningen gjort systemet trögare även för temperaturvariationer. Olika tidsaxlar beror på att loggningarna skett under olika tider på dygnet. Tidsintervallen är dock de samma. Presenningen fördröjde temperaturförändringen så pass mycket att den inte hann upp till 15°C under klimatcykeln.

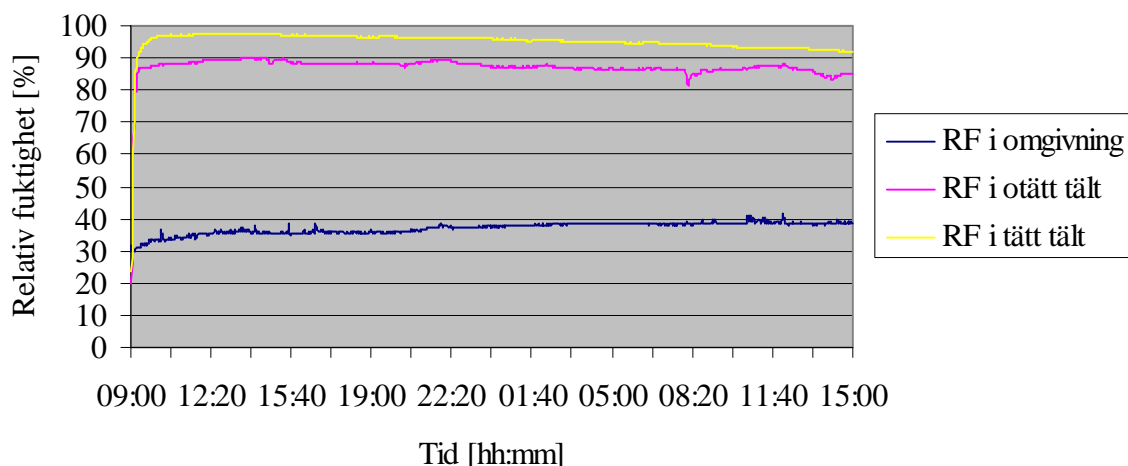


Figur 7.5 – Loggning av temperatur under presenning vid klimatsimulering.



Figur 7.6 – Loggning av temperatur i omgivande luft vid klimatsimulering.

Eftersom en hög relativ fuktighet uteblev för tidigare provkropparna, se figur 7.1, utfördes en djupare analys för att förbättra klimatet under presenningen. I de två tälten blev klimatet betydligt bättre med avseende på den relativa fuktigheten. Den relativa fuktigheten i de två tälten och i omgivande luft kan ses nedan i figur 7.7.



Figur 7.7 – Den loggade relativa fuktigheten i de två tälten och i omgivningen.

I den omgivande luften låg den relativa fuktigheten i medeltal på 37 %. För det otäta och täta tältet var den relativa fuktigheten 87 respektive 95 % i medeltal. I båda de fallen hade klimatet en mycket gynnsam relativ fuktighet. Det tätare alternativet låg aningen på gränsen för en för hög relativ fuktighet. Koldioxidhalten vid fem olika tidpunkter under härdningen kan ses i tabell 7.3. Koldioxidhalten sjönk mycket snabbt till lägre nivåer i jämförelse med omgivningen. Halten i omgivningen var mycket hög i förhållande till normala nivåer inomhus. Speciellt för en betongfabrik där den nygjutna betongen binder koldioxidhalten snabbt och därmed sänker koldioxidhalten ytterligare.

Tabell 7.3 – Koldioxidhalten vid fem olika tidpunkter i omgivande luft och i de två tälten.

tid [h]	CO ₂ , omgivning [ppm]	CO ₂ , otätt [ppm]	CO ₂ , tätt [ppm]
0	750	750	750
7	760	310	240
23	755	280	252
27	760	270	230
30	750	275	220

Pölprovsvorsöket som utfördes efter härdningen resulterade i kalkutfällningar trots att den relativa fuktigheten varit hög under en längre tid. Kalkutfällningarna var inte grova men synliga på ytan. Generellt var mängden kalkutfällningar aningen mindre på de provkroppar som härdats under det otäta tältet. Genom mikroskopet sågs välutvecklade kristaller på samtliga provkroppar. Kristallerna var runda till formen och hade en klar vit färg. På provkropparna, som härdats i det tätare tältet, var kristallerna mer utvecklade och frekventa inom försöksområdet. En annan typ av kristall sågs även här som var lite kantigare i formen med en grumligare ton.

7.4.9 Röntgendiffraktionsanalys

Precis som i förstudien utfördes skrapprov på ett antal betongprover för att bekräfta de visuella resultaten. De provkroppar som undersöktes kan ses i tabell 7.4. Samtliga provkroppar från åtgärdsstudien undersöktes, bortsett från de provkroppar som utsattes för ett pölprov.

Resultaten för proverna visade på att samtliga innehöll kalcit, järnoxid och kvarts. Analysen bekräftade de visuella resultaten för prov 1, 3, 5 och 7 då de alla innehöll mycket kalcit. Prov 6 är ett undantag då det från de visuella undersökningarna bedömdes vara mycket flammig och hade en tydlig vit beläggning på ytan. XRD-analysen visade inte på att den innehöll mycket kalcit. Prov 2 hade mycket goda resultat från den visuella undersökningen men analysen visade på att den innehöll en del kalcit. Analysresultaten för prov 4 var i princip identiska med resultaten för referensprovkroppen. I princip alla provkropparna innehöll portlandit.

7.5 Sammanställning av resultat

Totalt har sju olika provkroppar studerats i åtgärdsanalysen. För att lättare kunna beskriva de olika fallen har de fått en ny benämning enligt tabell 7.4 nedan.

Tabell 7.4 – Benämning på respektive provkropp.

Benämning	Typ av försök
Prov 1	Referensprovkropp 24 h i 55 %
Prov 2	Provkropp 24 h i 85 %
Prov 3	Referensprovkropp 48 h i 55 %
Prov 4	Provkropp 48 h i 85 %
Prov 5	Provkropp: fri härdning + presenning under klimat
Prov 6	Provkropp: härdning under tält + fritt under klimat
Prov 7	Provkropp: härdning under tält + under presenning under klimat

Provkropparna bedömdes utifrån samma parametrar som i huvudstudien. Provkropparna refererades mot referensprovkroppen, som göts i huvudstudien, så olikheterna mellan dem kunde definieras på ett korrekt sätt. Resultatet från de provkroppar som fick härda under polyetenfolie i den djupare analysen av klimatet kunde inte sammanställas i nedanstående matris eftersom försöksmetoderna skiljde sig ifrån varandra. Bedömningen kan ses i matrisform i tabell 7.5. Resultatet efter poängbedömningen visade på att den mest effektiva metoden för att minska mängden kalkutfällningar var genom att tillföra klimatiserad luft under härdningen.

Tabell 7.5 – Parameterbedömning för de sju provkropparna.

Prov	Flammighet	Beläggning	Matthet	Kristaller	Summa
Prov 1	2	4	4	0	10
Prov 2	1	1	0	0	2
Prov 3	3	3	3	0	9
Prov 4	0	0	0	0	0
Prov 5	2	3	4	0	9
Prov 6	3	2	4	0	9
Prov 7	3	3	4	0	10

Resultaten från de provkroppar som utsattes för ett pölprovsförsök visade på att trots den höga relativa fuktigheten skedde kalkutfällningar. Detta borde bero på den låga koldioxidhalten under presenningen. För att ett klimat ska vara gynnsamt krävs en hög relativ fuktighet, normal inomhustemperatur och en normal koldioxidhalt. Om någon av dessa parametrar inte är närvarande uteblir det gynnsamma klimatet

7.6 Diskussion

Resultaten från åtgärdsstudien visar att en enkel åtgärd som att täcka över elementen med en presenning inte är tillräcklig för att skapa ett skydd mot tidiga kalkutfällningar. Klimatet under presenningen blir gynnsamt med avseende på relativ fuktighet och temperatur men koldioxidhalten sjunker till en för låg nivå. Eftersom ingen koldioxid tillförs kommer karbonatiseringen av kalciumhydroxid begränsas alternativt avstanna helt, vilket då medför att inget skyddande karbonatskikt kan skapas. Om det däremot tillåts ett visst luftombyte mellan klimatet under presenningen och omgivningen sjunker den relativa fuktigheten drastiskt. Metoden rekommenderas inte som användning inom förtillverkningsindustrin eftersom den inte går att kontrollera. Klimatet kommer att variera kraftigt från tillfälle till tillfälle. Tätheten hos systemet med presenning kan variera kraftigt från gång till gång vilket kommer att skapa olika klimat när den tillämpas mellan elementpartierna. Klimatet går inte att styra på ett kontrollerat sätt. En annan viktig parameter som måste beaktas är koldioxidhalten som heller inte kan styras på ett kontrollerat sätt med denna åtgärd.

Att täcka över element med en presenning vid lagring utomhus då det finns risk för väderomslag har enligt resultaten inte påvisat någon positiv effekt på elementen. Trots att det blev ett trögare system fällde kondens ut på ytorna som sedan blev liggande länge eftersom det tog mycket lång tid för fukten att torka ut. När försöken avslutades hade de provkroppar som lagrats under presenning i klimatkammaren mycket kondens kvar på ytan medan provkroppen som stått fritt var torr.

Det krävs alltså att både den relativa fuktigheten och koldioxidhalten är kontrollerad under den tidiga härdningen för att med säkerhet erhålla ett tillräckligt karbonatskikt som skyddar mot framtida kalkutfällningar. För att skapa ett sådant klimat under kontrollerade omständigheter måste klimatet vara styrt genom att till exempel tillföra klimatiserad luft med hjälp av en klimatanläggning. Luften som blåses in i systemet bör rimligtvis vara inomhusluft med normal koldioxidhalt som befuktas alternativt avfuktas för att erhålla rätt relativ

fuktighet. När klimatiserad luft skall tillföras är det ytterst viktigt att ingen kondens får falla ut på betongytorna, dvs. den relativa fuktigheten måste vara baserad på den kallaste yttemperaturen hos betongelementet.

8 Slutsats

8.1 Fukttekniska egenskaper

Under försöken i huvud- och åtgärdsstudien har tre olika provkroppar efter membranhärdningen härdats i ett klimatrums med en temperatur och relativ fuktighet på 20°C respektive 55 % och sedan utsatts för varierande klimat enligt tabell 6.4. Resultaten på dessa provkroppar har varit väldigt olika då den första provkroppen hade mycket synliga utfällningar jämfört med de två övriga. Samtliga faktorer för recept, klimat och formmaterial har varit samma medan tiden de härdats i klimatrums med 55 % relativ fuktighet har skilt sig. Den första provkroppen låg i rummet i nästan tre dygn medan de två övriga härdades i två respektive ett dygn. Tidsskillnaden medförde att den relativa fuktigheten i ytskiktet hos de tre provkropparna skiljde sig. Detta beror på att de hunnit torka ut olika mycket.

Orsaken till dessa resultat beror till största sannolikhet av att diffusionshastigheten av vattenånga i betong avtar starkt med minskad relativ fuktighet beroende på sambandet med sorptionsisotermen och fukttransportkoefficienten (Nilsson, 1994). När klimatet slår om i klimatkammaren fuktas det yttersta skiktet upp och blir vattenmättat mycket snabbare i den provkropp som härdats i tre dygn eftersom den lägre diffusionshastigheten medför en mycket långsam fukttransport in i betongen från ytan. Den snabbare uppfuktningen av ytskiktet leder i sin tur till att kondens kommer att fällas ut tidigare på denna yta.

När väl kondens har fällt ut startar en kapillärsugning från ytan och vattenmättar betongen successivt. Kapillärsugning kommer att fortgå tills det inte finns mer fritt vatten på ytan. Till en början sker kapillärsugning relativt snabb men avtar därefter kraftigt då tiden ökar exponentiellt med inträngningsdjupet (Nilsson, 1994). Under första cykeln i försöken sögs därför en stor del av vattnet in i betongen vilket vattenmättar porsystemet. När klimatet slog om från varmt till kallt fanns det inte något fritt vatten på ytan efter första cykeln. Efter andra och tredje cykeln fanns det däremot mycket fritt vatten kvar på ytan då det slog om.

Kontentan av resonemanget ovan är att en mycket torr betongyta snabbt kommer vattenmättas när det sker ett väderomslag som kan ge upphov till kondens. Om så sker kommer en kapillärsugning i betongen snabbt suga in vatten från betongytan och successivt fylla porerna med vatten. Föreligger det sedan risk för att ny kondens kan fällas ut igen inom kort så kommer kondensen ligga kvar på ytan under en lång tid vilket ökar risken för kalkutfällningar. Resonemanget förutsätter naturligtvis att den relativa fuktigheten i luften förblir hög vilket annars snabbt skulle torka bort den utfällda kondensen och risken för kalkutfällningar skulle således avta.

8.2 Långtidsaspekt

Långtidsaspekten grundar sig i stor del på att hydratationshastigheten i ytskiktet är mycket låg vid kallt klimat. När betongen är gjuten i fabriken membranhärdar den i knappt ett dygn för att förhindra fuktombrytning med omgivningen. När betongen sedan täcks av kommer ytskiktet snabbt torka ut och ställa in sig mot omgivande klimat som under årets kalla dagar kan vara mycket torr inomhus. En vidare härdning i ett sådant klimat i ytterligare ett par dagar medför en mycket begränsad hydratation i ytskiktet eftersom processen är beroende av tillgång på vatten (Fagerlund, 1994). Efter härdning inomhus brukar betongelementen köras ut på gården och i bästa fall under tak. Den låga temperaturen utomhus medför att hydratationshastigheten är begränsad (Fagerlund, 1994). När vädret blir varmare kommer hydratationshastigheten öka och därmed frigörs kalciumhydroxid. Detta kan ske efter ett par månader och då kan elementen redan vara levererade till byggarbetsplatsen. Om betongytan därefter utsätts för till exempel regn är risken för kalkutfällningar stora. Teorin styrks då många inom industrin upplever att kalkutfällningar även kan ske efter lång tid, upp till 3 månader efter det att elementen placerats på gården.

8.3 En klimatstyrd lösning

Ett betongelement som härdar i mer än 24 timmar i hög relativ fuktighet har både i försöken gjorda i denna rapport och i tidigare forskning visat sig vara mycket effektiv (Samuelsson, 1977). Efter en sådan härdning blir betongen mycket beständig mot tidiga kalkutfällningar. Testresultat visar på att en härdning i 80 - 95 % relativ fuktighet ger ett fullgott skydd efter 24 timmar. För att på ett systematiskt och korrekt sätt härda betongelement bör klimatet vara kontrollerat med hjälp av en klimatanläggning. Ett sätt skulle vara att bygga en stationär härdkammare med förhöjd temperatur och relativ fuktighet där elementen kan placeras. Eftersom inte alla element som gjuts i en förtillverkningsfabrik har ett kulörbeständigt krav kan en sådan stationär anläggning anses överdriven och alltför kostsam.

Ett enklare alternativ, men fortfarande effektivt, skulle istället kunna tänkas vara ett mobilt tält med ett kontrollerat klimat. Tältet skulle kunna vara uppbyggt av aluminiumstänger på hjul, liknande de som används vid lättare byggnadsställningar. Ramen täcks sedan in med en presenning med öppningsbara gavlar vilket möjliggör att hela tältet kan rulla över en pall med betongelement. Till tältet kopplas sedan ett böjbart ventilationsrör som blåser in rumsluft med förhöjd relativ fuktighet. Andra änden av ventilationsröret är sedan kopplat till en mindre men stationär klimatanläggning som fuktar eller avfuktar den luft som ska blåsas in i klimattältet. Vilken relativ fuktighet den inblåsta luften bör ha beror på yttemperaturen på betongelementen då fukt inte får kondensera på ytan under härdningen. Ytttemperaturen kan enkelt kontrolleras med en infraröd kamera som kopplas ihop med klimatanläggningen som styr den relativa fuktigheten på den inblåsta luften.

8.4 Sammanfattande slutsatser

- Om elementen är placerade i en mycket fuktig miljö under lång tid finns risk för att det sker kalkutfällningar som kan ge en synlig missfärgning. Detta beror på att karbonatiseringen sker mycket ytligt i fuktiga klimat. Betongelement bör inte förvaras i klimat med en relativ fuktighet på över 95 %.
- Vid väderomslag från kallt till varmt finns det stor risk att det fälls ut kondens på betongelementen. Är mängden kondens tillräcklig sker med största sannolikhet en kalkutfällning på betongelementets yta.
- Om betongytan är i jämvikt med ett torrt klimat kommer kondens falla ut tidigare jämfört med om den varit i jämvikt med ett fuktigt klimat.
- Det räcker inte med att skydda betongelementen mot kalkutfällningar genom att enbart placera dem under tak i utomhusmiljö.
- Risken för att kalkutfällningar kommer ske när ett nygjutet betongelement placeras i en mycket kall miljö får anses som obefintliga.
- Vid tidig härdning av betongelement i en relativ fuktighet under cirka 65 % avstannar hydratationen och därmed karbonatiseringen på betongytan. När sedan fritt vatten kommer i kontakt med betongytan, till exempel genom regn eller kondensutfällning, kommer karbonatiseringen återupptas och ske på betongytan genom att kalciumhydroxid diffunderar ut och reagerar med luftens koldioxid.
- Kalkutfällningar behöver inte ske de första dygnet utan kan uppstå även efter lång tid förutsatt att det finns okarboniserad kalciumhydroxid i betongytan. Detta kan till exempel finnas på element som lagrats i ett torrt klimat under 65 % relativ fuktighet.
- Det räcker inte med att endast täcka över elementen med en presenning/tält under härdning alternativt vid väderomslag för att minska risken för kalkutfällningar. Den relativa fuktigheten blir visserligen gynnsam under presenningen/tältet, men koldioxidhalten blir alldeles för låg vilket gör att karbonatiseringen avstannar i ytskiktet. Detta gör att inget skyddande karbonatskikt mot kalkutfällningar kan bildas.
- En lösning på problemet med kalkutfällningar är att tillföra klimatiserad luft under ett till två dygn där den relativa fuktigheten kan hållas på en jämn nivå (80 - 90 %). Luften som klimatiseras bör vara inomhusluft för att hålla koldioxidhalten på en normal nivå.

8.5 Framtida forskning

Vidare studier inom området borde innefatta andra betongrecept för att dra allomfattande slutsatser kring betongreceptets betydelse. Receptet i detta arbete gav en speciell yta som inte är representativ och därmed borde andra typer av ytors beskaffenhet studeras. Det skulle även

vara intressant att undersöka lägre temperaturvariationer under fler cykler när ett väderomslag ska simuleras.

En annan aspekt som vore intressant att analysera är betongelement som förvaras i utomhusklimat under en längre tidsperiod. Utifrån analysen skulle slutsatser kunna dras hur tidens inverkan på ett framtida skydd mot kalkutfällningar.

Ett naturligt nästa steg inom området är att bygga ett tält där klimatiserad luft ska tillföras. Tältet kan utvecklas vidare för att bli ett effektivt hjälpmedel i förtillverkningsindustrin.

9 Referenser

Litteratur

Claesson J., Nevander L. E., Sandin K, *Utdrag ur Värme*, Institutionen för byggnadsteknik LTH, Lund, 1984.

Fagerlund G, *Betonghandboken material, kap 10*, Utgåva 2, AB Svensk byggtjänst, Stockholm, 1994.

Fagerlund G, *Betonghandboken material, kap 16*, Utgåva 2, AB Svensk byggtjänst, Stockholm, 1994.

Johansson L., *Rekommendationer för genomfärgad platsgjuten betong*, uppdragsrapport nr 96103, CBI, Stockholm, 1996.

Johansson, S-E, *Betonghandboken material, kap 2*, Utgåva 2, AB Svensk byggtjänst, Stockholm, 1994.

Ljungkrantz C, Möller G, Petersson N, *Betonghandboken material, kap 6.1*, Utgåva 2, AB Svensk byggtjänst, Stockholm, 1994.

Nevander L. E., Elmarsson B., *Fukthandbok*, Utgåva 3, Elanders Infologistics Väst AB, Mölnycke, 2007.

Nilsson J., Nilsson T., *Kulörbeständighet hos betongytor – kalkutfällningar*, Examensarbete på institutionen för byggnads material LTH, Lund, 2006.

Nilsson L-O, *Betonghandboken material, kap 14*, Utgåva 2, AB Svensk byggtjänst, Stockholm, 1994.

Rombén L, *Betonghandboken material, kap 23*, Utgåva 2, AB Svensk byggtjänst, Stockholm, 1994.

Russel P, *Efflorescence and the Discoloration of Concrete*, Eyre & Spottiswoode Publications Ltd, Leatherhead, Surrey, 1983.

Samuelsson P, *Kalkutfällningar på betongytor*, Statens råd för byggnadsforskning, Liber tryck, Stockholm, 1977.

Artiklar och produktblad

El-Turki A., Ball R.J., Allen G.C., *The influence of relative humidity on structural and chemical changes during carbonation of hydraulic concrete*, Cement and Concrete Research, vol. 37, nr.8, sid. 1233 – 1240, maj 2007.

Halvarsson A., *Prisad bro i Värmland*, Cementa AB, nr. 3, sid. 17 - 19, 1998.

Neville A., *Efflorescence – Surface Blemish or International Problem? Part 1: The Knowledge*, Concrete international, vol. 24, nr. 8, sid. 86 – 90, Augusti 2002.

Retelius A., Ström B., *Hur får man betongytor att se ut som man vill?*, SBUF informationsblad nr. 01:01, Bildinformation i Älvsjö AB, Älvsjö, 2001.

Bildkällor

Ahlgren L, *Fuktfixering i porösa byggnadsmaterial*, Byggnadsteknik LTH Rapport 36 1972 4:e upplagan, Lund, 1987.

Powers T C., *Physical properties of cement paste*, Chemistry of cement, monograph 43, vol. 2, Washington D.C., 1962.

Internetkällor

Cementa AB, Teknisk data för byggcement, 2009
PDF dokument nedladdat från <http://cementa.se>, 2009-05-10.

Nordkalk AB, Teknisk data för kalkfiller, 2009
PDF dokument nedladdat från <http://nordkalk.se>, 2009-01-11.

Sika Sverige AB, Tekniskt datablad för Sikament 20HE, version 2007-08-01
PDF dokument nedladdat från <http://sika.se>, 2009-01-11.

Sika Sverige AB, Tekniskt datablad för Sikament EVO 26, version 2007-08-01
PDF dokument nedladdat från <http://sika.se>, 2009-01-11.

Muntliga källor

Johansson, S-E, Ms.Sc. Chem. Eng. R&D, Cementa AB, 2009-10-14.
Petersson, Örjan, Civ.Ing. Tekn. Lic., Strängbetong, 2009-09-24.

10 Bilaga 1 – Beräkning av temperaturen och ånghalten i olika djup vid fem tidpunkter

Steg 1		t=0 s					
x [mm]	T [°C]	RF [%]	Mättnadsånghalt, vs [g/m ³]	V [g/m ³]	g [g/s*m ²]	RF [%]	
0	22	96	19,40995798	18,634	0,006611	90	
5	22	96	19,40995798	18,634	0	96	
10	22	96	19,40995798	18,634	0	96	
15	22	96	19,40995798	18,634	0	96	
20	22	96	19,40995798	18,634	0	96	
25	22	96	19,40995798	18,634	0	96	
30	22	96	19,40995798	18,634	0	96	
35	22	96	19,40995798	18,634	0	96	
40	22	96	19,40995798	18,634	0	96	
45	22	96	19,40995798	18,634	0	96	
50	22	96	19,40995798	18,634		96	

Steg 2		t=60 s					
x [mm]	x/sqrt(4at)	erfc(x/sqrt(4at))	T(x,t)	Mättnadsånghalt, vs [g/m ³]	V [g/m ³]	g [g/s*m ²]	RF [%]
0	0	1	-10	2,140393811	1,9264	0,001339	90
5	0,340207	0,630769	1,815392	5,493067674	5,2733	0,001796	96
10	0,680414	0,336508	11,23175	10,16942902	9,7627	0,001724	96
15	1,020621	0,149798	17,20646	14,65876032	14,072	0,001102	96
20	1,360828	0,055026	20,23917	17,5297943	16,829	0,000503	96
25	1,701035	0,01621	21,48128	18,83880781	18,085	0,000165	96
30	2,041241	0,003998	21,87205	19,26770529	18,497	4,37E-05	96
35	2,381448	0,000798	21,97446	19,38149499	18,606	9,23E-06	96
40	2,721655	0,000124	21,99603	19,40553279	18,629	1,4E-06	96
45	3,061862	0,000022	21,9993	19,4091728	18,633	3,02E-07	96
50	3,402069	0	22	19,40995798	18,634		96

Steg 3		t=180 s					
x [mm]	x/sqrt(4at)	erfc(x/sqrt(4at))	T(x,t)	Mättnadsånghalt, vs [g/m ³]	V [g/m ³]	g [g/s*m ²]	RF [%]
0	0	1	-10	2,140393811	1,9264	0,019104	90
5	0,196419	0,777297	-2,8735	3,960973168	3,8025	0,021038	96
10	0,392837	0,58141	3,39488	6,113233341	5,8687	0,026897	96
15	0,589256	0,404251	9,063981	8,864830578	8,5102	0,028148	96
20	0,785674	0,264088	13,54918	11,74443984	11,275	0,024105	96
25	0,982093	0,166023	16,68726	14,21041941	13,642	0,019868	96
30	1,178511	0,095708	18,93735	16,24290359	15,593	0,013164	96

Kalkutfällningar på förtillverkade betongelement

35	1,37493	0,053198	20,29766	17,58961903	16,886	0,008666	96
40	1,571348	0,026725	21,1448	18,47613398	17,737	0,004811	96
45	1,767767	0,012499	21,60002	18,96825452	18,21	0,002622	96
50	1,964186	0,004878	21,8439	19,23653253	18,467		96

Steg 4		t=300 s					
x [mm]	x/sqrt(4at)	erfc(x/sqrt(4at))	T(x,t)	Mättnadsånghalt, vs [g/m ³]	V [g/m ³]	g [g/s*m ²]	RF [%]
0	0	1	-10	2,140393811	1,9264	0,000516	96
5	0,152145	0,832004	-4,62413	3,349551957	3,2156	0,000643	96
10	0,30429	0,671373	0,516064	5,024440256	4,8235	0,000778	96
15	0,456435	0,514518	5,535424	7,049730655	6,7677	0,000808	96
20	0,608581	0,388497	9,56809	9,15452693	8,7883	0,000843	96
25	0,760726	0,281444	12,99379	11,34896563	10,895	0,001015	96
30	0,912871	0,174109	16,42851	13,99143668	13,432	0,000461	96
35	1,065016	0,131046	17,80652	15,19211075	14,584	0,000531	96
40	1,217161	0,084947	19,28169	16,57508572	15,912	0,00039	96
45	1,369306	0,053198	20,29766	17,58961903	16,886	0,000275	96
50	1,521452	0,031745	20,98416	18,3051212	17,573		96

Steg 5		t=600 s					
x [mm]	x/sqrt(4at)	erfc(x/sqrt(4at))	T(x,t)	Mättnadsånghalt, vs [g/m ³]	V [g/m ³]	g [g/s*m ²]	RF [%]
0	0	1	-10	2,140393811	1,9264	0,000591	90
5	0,107583	0,810121	-3,92388	3,546283782	3,4044	0,000205	96
10	0,215166	0,755848	-2,18713	4,080603339	3,9174	0,000451	96
15	0,322749	0,651071	1,165728	5,254238651	5,0441	0,000529	96
20	0,430331	0,543354	4,612672	6,631845801	6,3666	0,000582	96
25	0,537914	0,445242	7,752269	8,147854977	7,8219	0,000611	96
30	0,645497	0,357971	10,54493	9,739240901	9,3497	0,000555	96
35	0,75308	0,288844	12,75699	11,18388065	10,737	0,000583	96
40	0,860663	0,224084	14,82931	12,70160162	12,194	0,000534	96
45	0,968246	0,170385	16,54768	14,09192409	13,528	0,000464	96
50	1,075829	0,127296	17,92653	15,30076865	14,689		96

11 Bilaga 2 – Beräkning av yttemperatur med 5 minuters intervall

Tid [min]	α_{egen} [W/(m ² ·K)]	α_{tot} [W/(m ² ·K)]	$(\alpha(at)^{0,5})/\lambda$	e(x)	Tyta°C
0,00	3,94	10,74	0,00	1,00	0,00
5,00	3,94	10,74	0,10	0,89	1,61
10,00	3,83	10,63	0,15	0,85	2,18
15,00	3,78	10,58	0,18	0,83	2,60
20,00	3,75	10,55	0,20	0,80	2,93
25,00	3,73	10,53	0,23	0,79	3,21
30,00	3,71	10,51	0,25	0,77	3,45
35,00	3,69	10,49	0,27	0,76	3,66
40,00	3,67	10,47	0,29	0,74	3,86
45,00	3,65	10,45	0,30	0,73	4,03
50,00	3,64	10,44	0,32	0,72	4,20
55,00	3,63	10,43	0,33	0,71	4,35
60,00	3,61	10,41	0,35	0,70	4,49

12 Bilaga 3 – Loggning av yttemperatur, relativ fuktighet och koldioxidhalt

Inre fuktvandring från 20 till -10°C

Tid	T _{yta,uppmätt}	T _{yta,beräknad}	RF	CO ₂
0	21	21	78,2	819
5	18,1	18,3	79,4	810
10	16	17	78,8	817
15	14,9	16,1	79,1	824
20	14	15,4	78,8	838
25	13,7	14,8	78,9	840
30	13,3	14,2	79	842
35	12,6	13,7	78,9	834
40	12	13,3	79	836
45	11,5	12,9	78,8	805
50	9,9	12,6	78,9	794
55	8,3	12,2	77,9	807
60	7	11,9	78,2	860

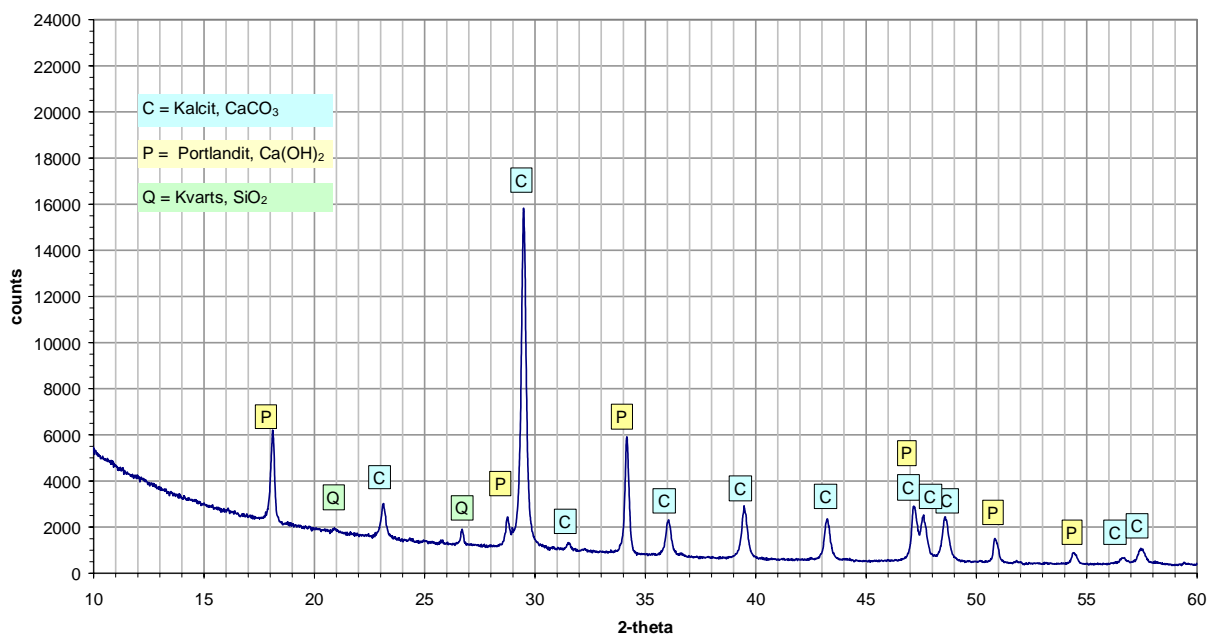
Kondensation på betongyta – tre cykler från 0 till 15°C

0	0,00	-1,1	82,2	790
5	1,6	0,2	78,1	810
10	2,2	0,7	75,2	813
15	2,6	1,7	80,9	814
20	2,9	2,4	85,4	822
25	3,2	3,1	88,1	788
30	3,5	3,6	86,5	803
35	3,7	4,1	92,3	812
40	3,9	4,5	95,7	822
45	4	5,2	96,9	801
50	4,2	5,8	97,8	799
55	4,4	5,8	98	811
60	4,5	6,3	98,1	824

13 Bilaga 4 – Röntgendiffraktionsanalys: Förstudie

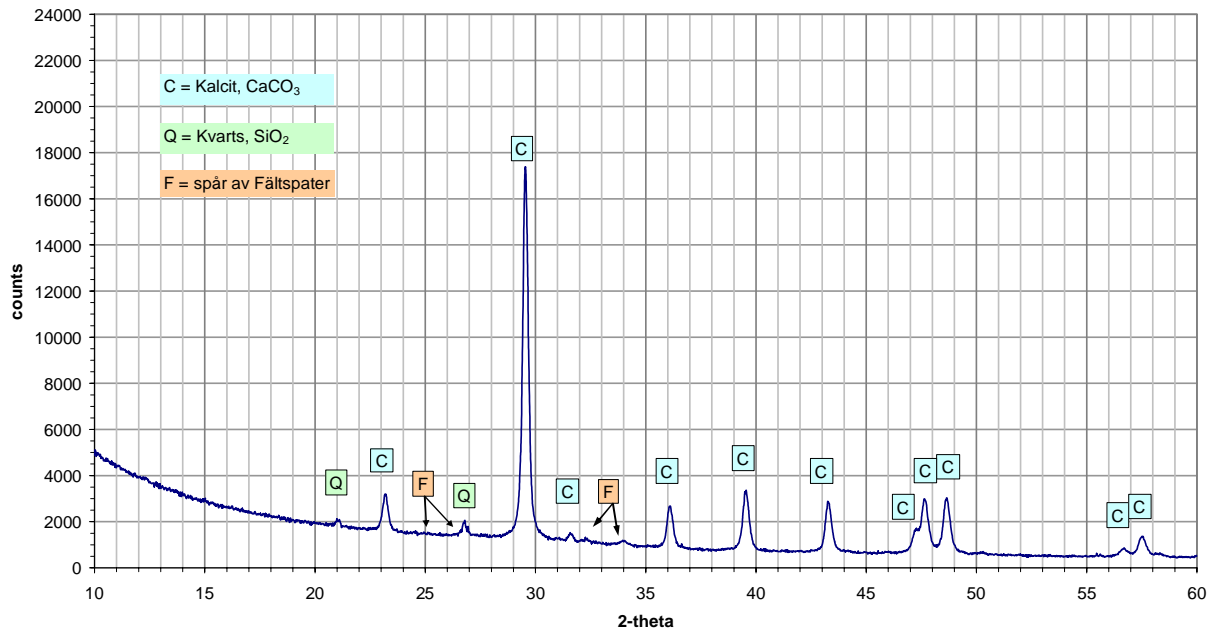
Prov 1	Klara, flata och välutvecklade kristaller på prov 4 för vct 0.4, se bild 5.8
Prov 2	Vit beläggning på betongprov 4 för vct 0.55, se bild 5.5
Prov 3	Vita tussar och kristaller på betongprov 4 för vct 0.55, se bild 5.6
Prov 4	Runda och klara kristaller efter pölprovsförsök, se bild 5.7
Prov 5	Vit beläggning från fasadelement på IKDC

Prov 1
XRD-diagram

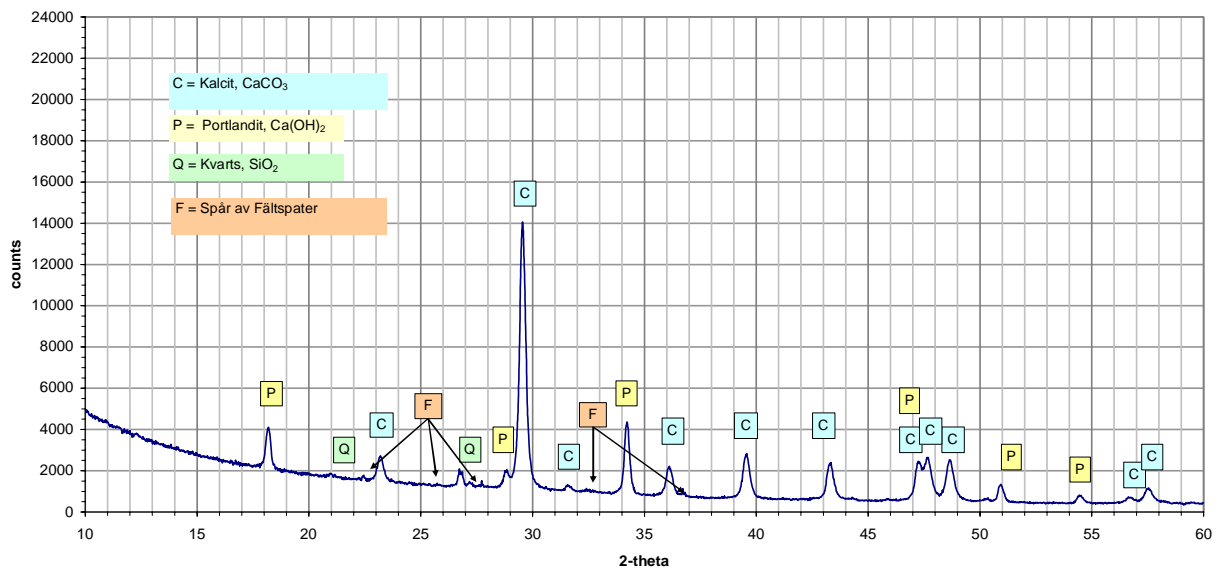


Kalkutfällningar på förtillverkade betongelement

Prov 2
XRD-diagram

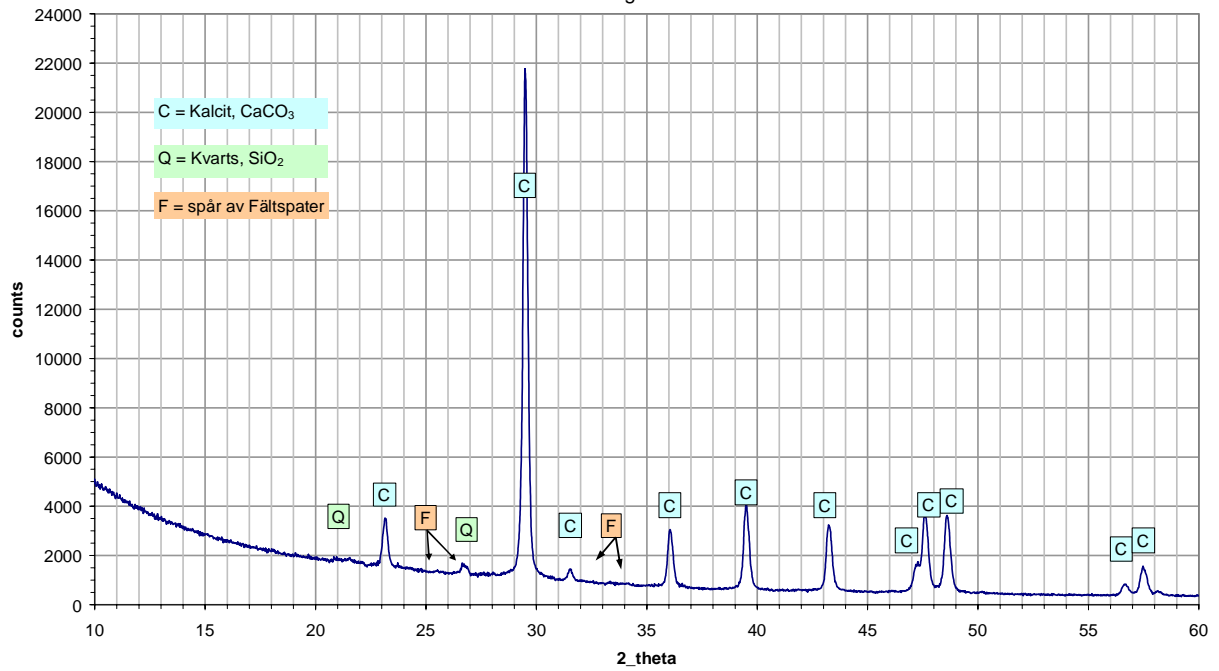


Prov 3
XRD-diagram

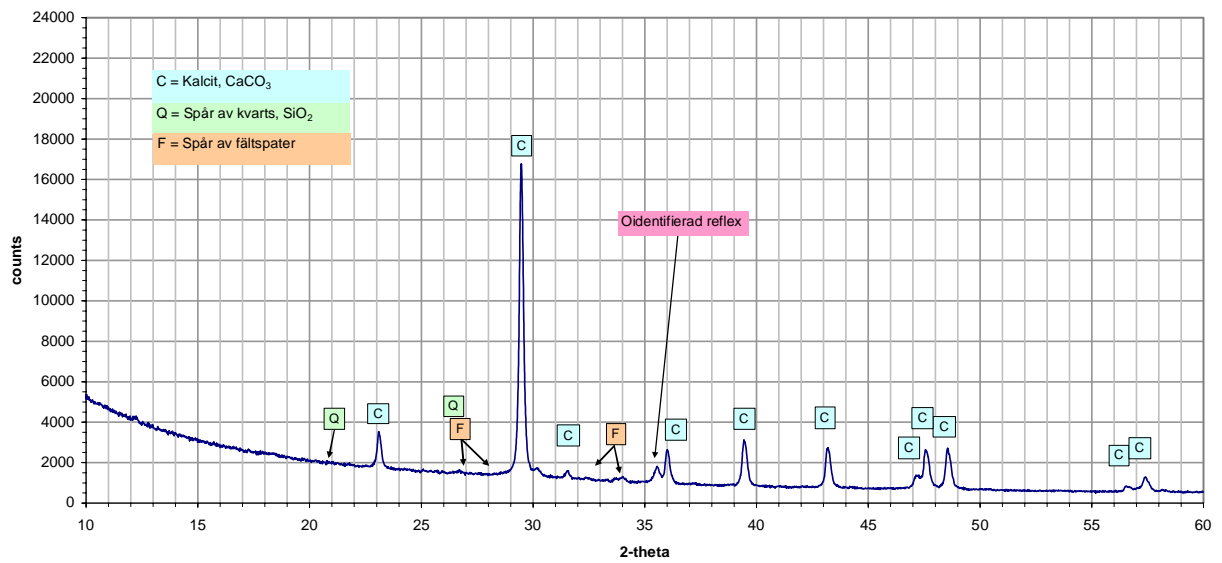


Kalkutfällningar på förtillverkade betongelement

Prov 4
XRD-diagram



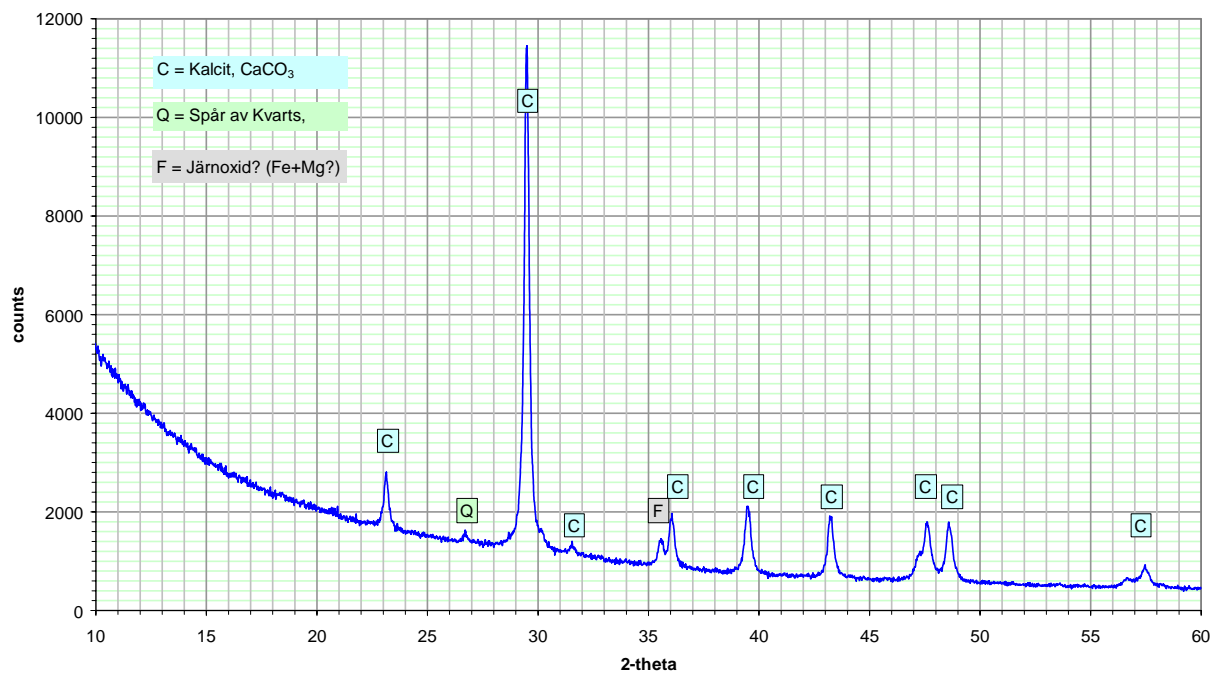
Prov 5
XRD-diagram



14 Bilaga 5 – Röntgendiffraktionsanalys: Huvudstudie

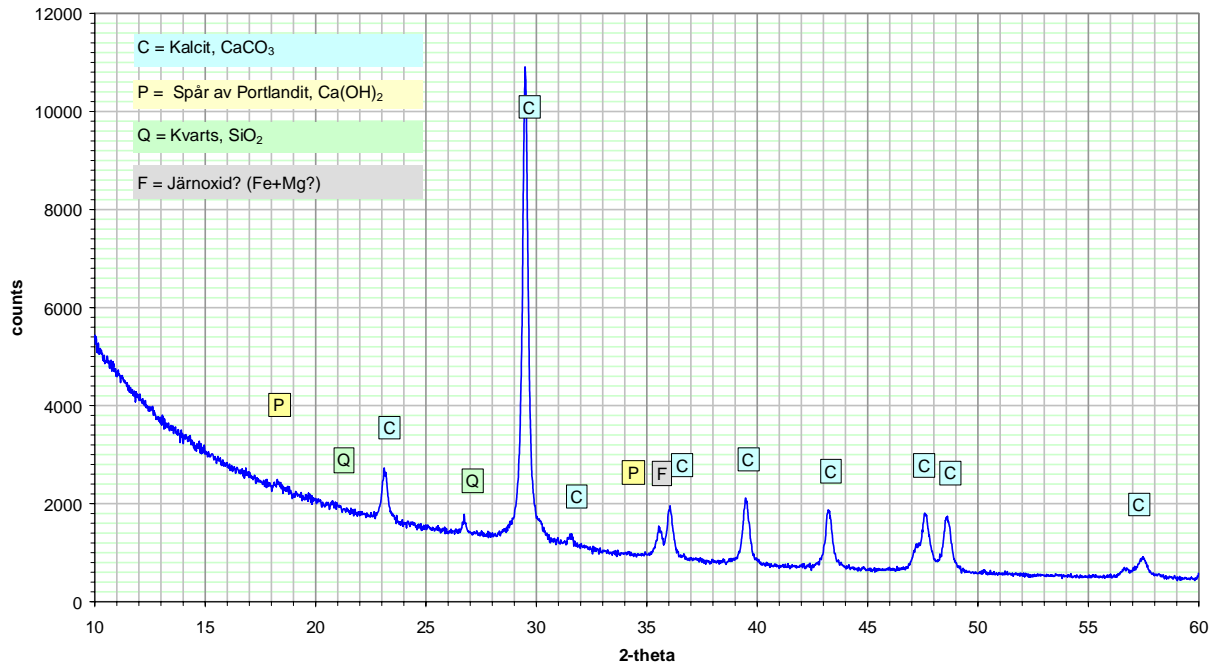
Benämning	Typ av försöksmetod
Prov 1	Kondens på betongyta 0°C & 70 % RF - 15°C & 98 % RF
Prov 2	Inre fuktvandring -20°C
Prov 3	Referensprov

LTH december - prov 1

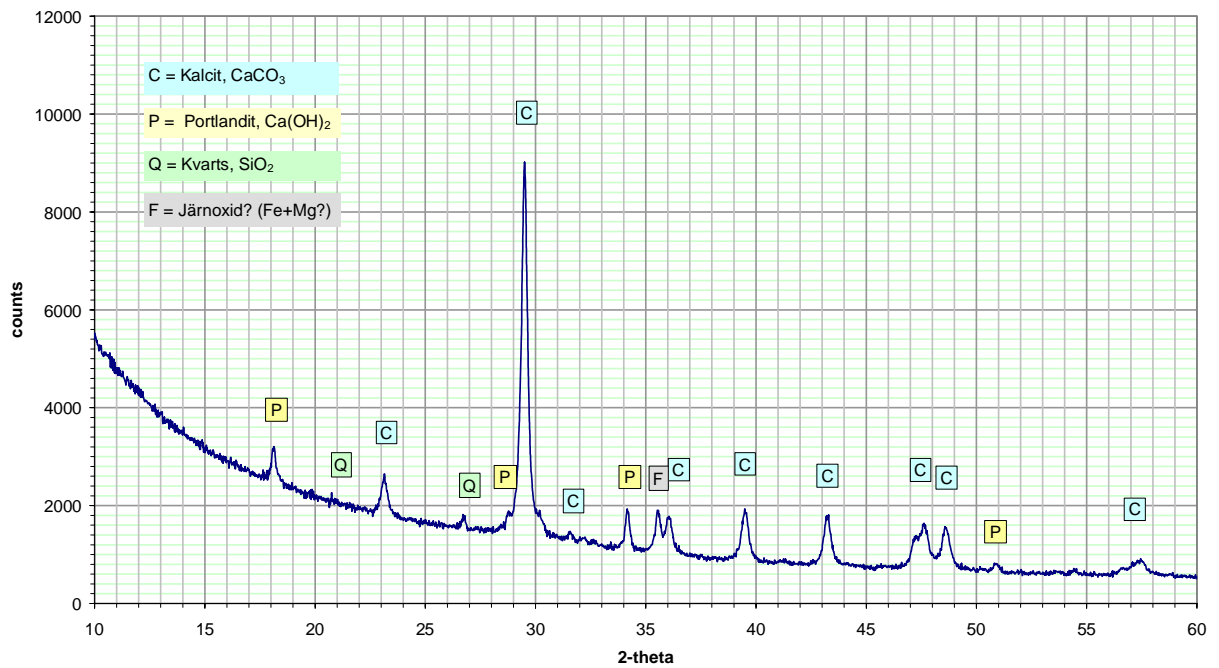


Kalkutfällningar på förtillverkade betongelement

LTH december - prov 2



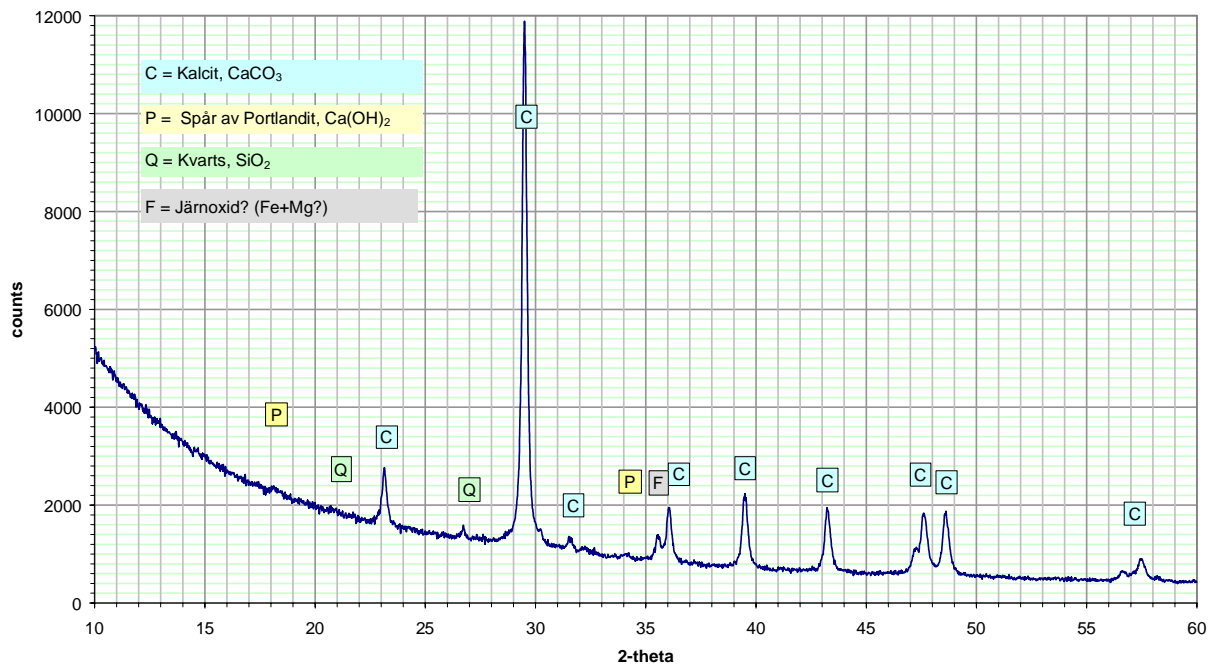
LTH december - prov 3



15 Bilaga 6 – Röntgendifraktionsanalys: Åtgärdsstudie

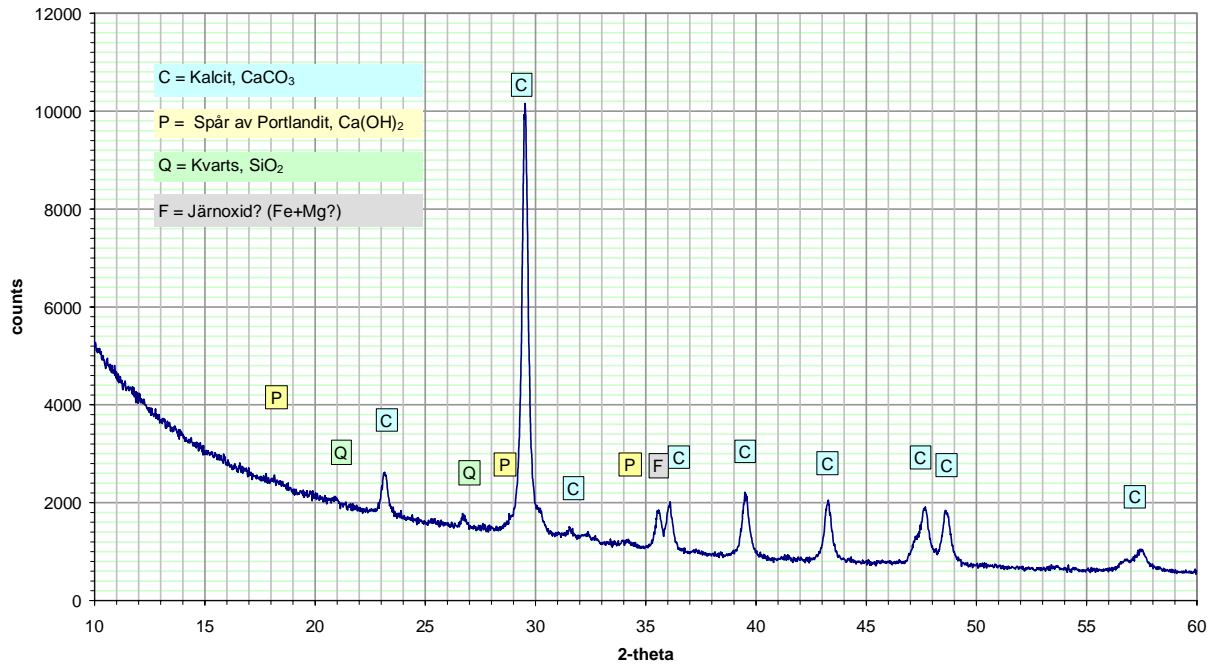
Benämning	Typ av försöksmetod
Prov 4	Provkropp: 24 h i 55 %
Prov 5	Provkropp: 24 h i 85 %
Prov 6	Provkropp: 48 h i 55 %
Prov 7	Provkropp: 48 h i 85 %
Prov 8	Provkropp: fri härdning + presenning under klimat
Prov 9	Provkropp: härdning under tält + fritt under klimat
Prov 10	Provkropp: härdning under tält + under presenning under klimat

LTH december - prov 4

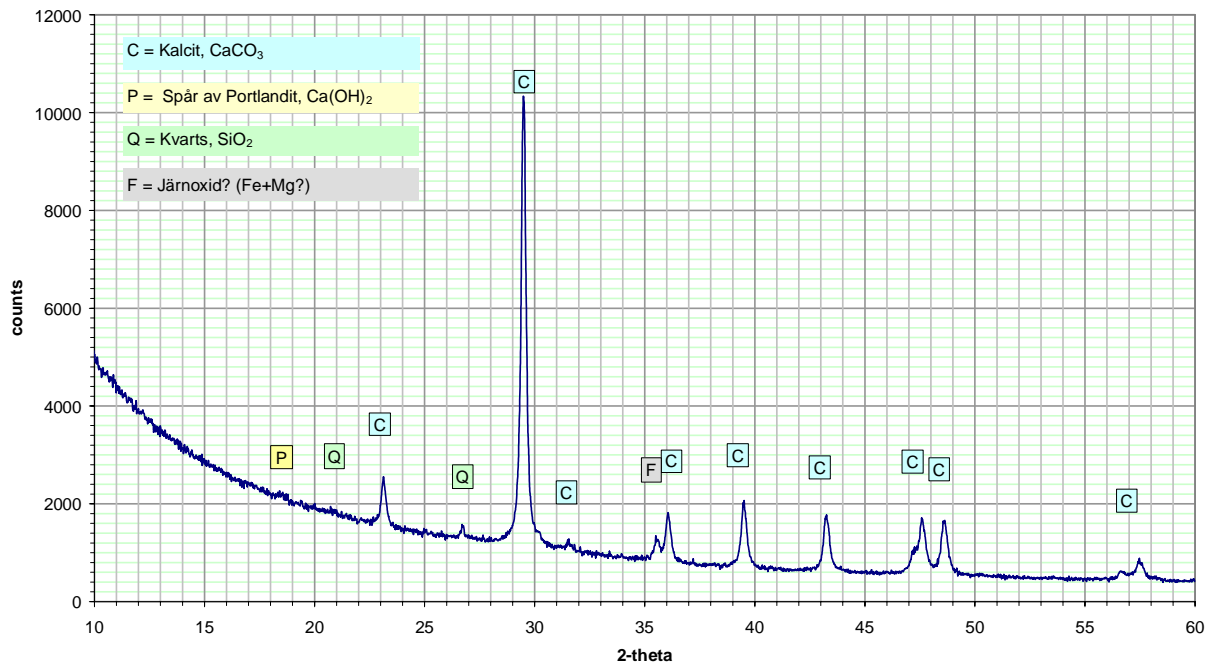


Kalkutfällningar på förtillverkade betongelement

LTH december - prov 5

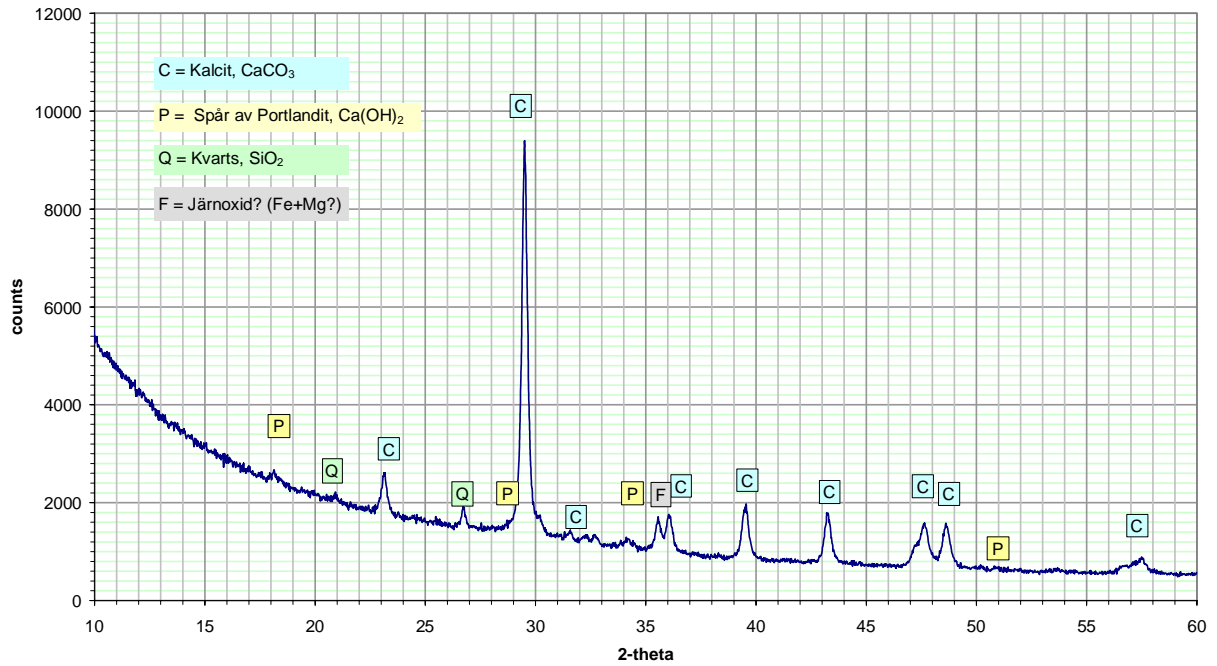


LTH december - prov 6

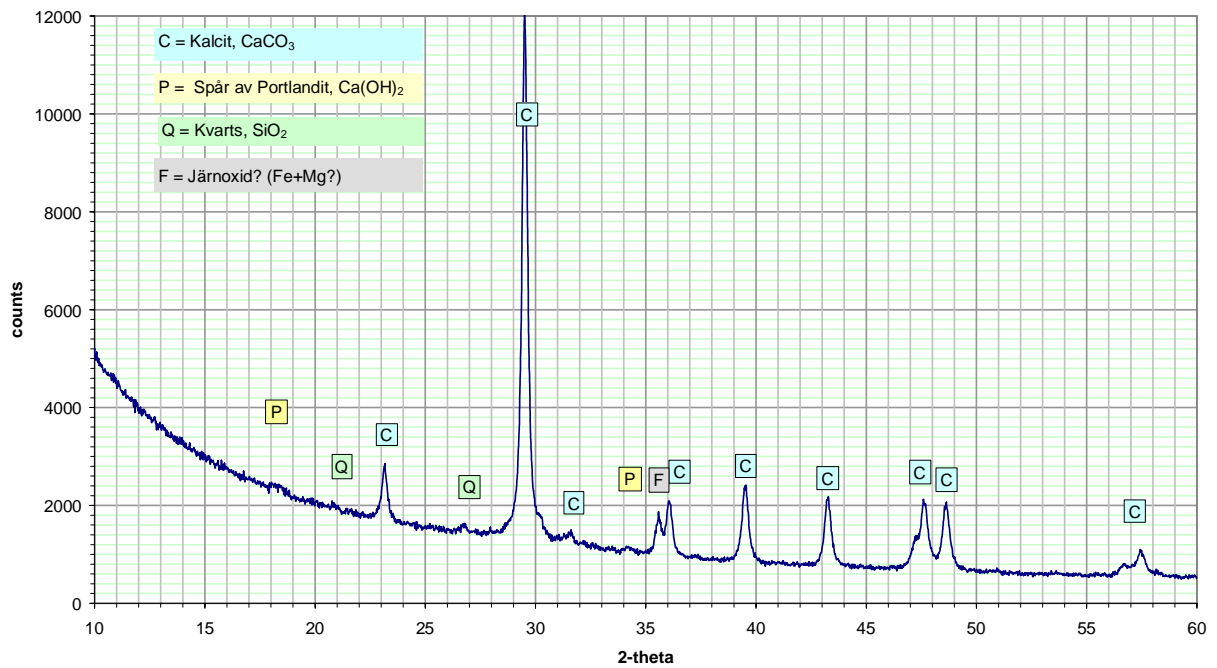


Kalkutfällningar på förtillverkade betongelement

LTH december - prov 7

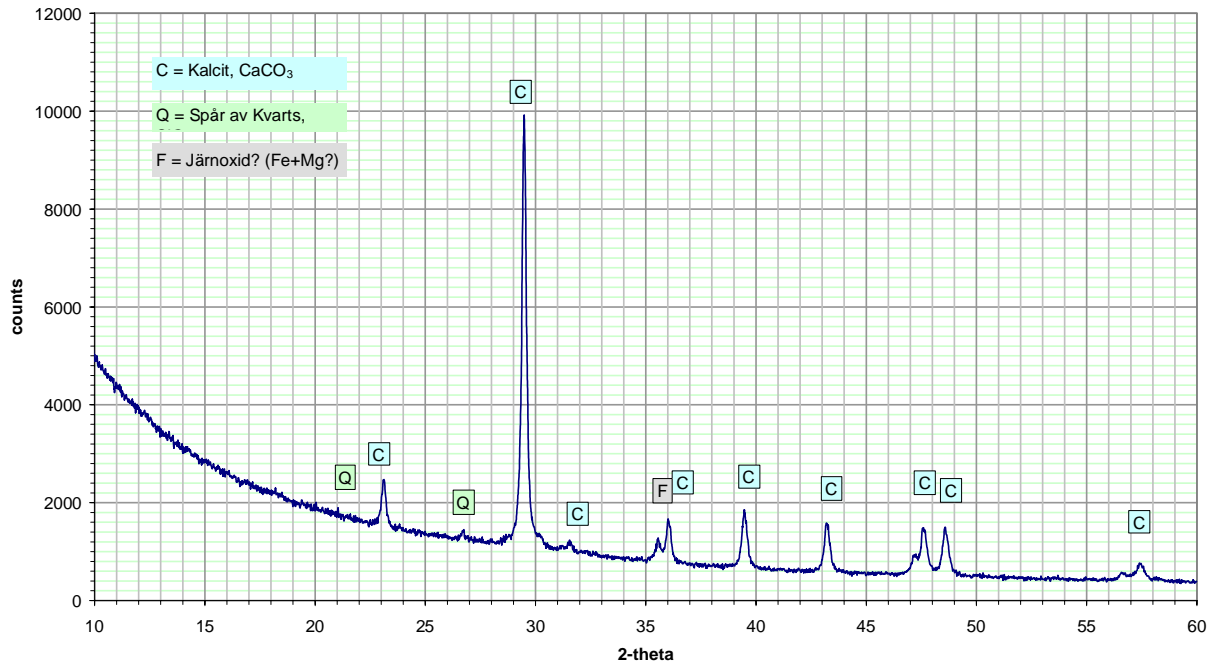


LTH december - prov 8



Kalkutfällningar på förtillverkade betongelement

LTH december - prov 9



LTH december - prov 10

