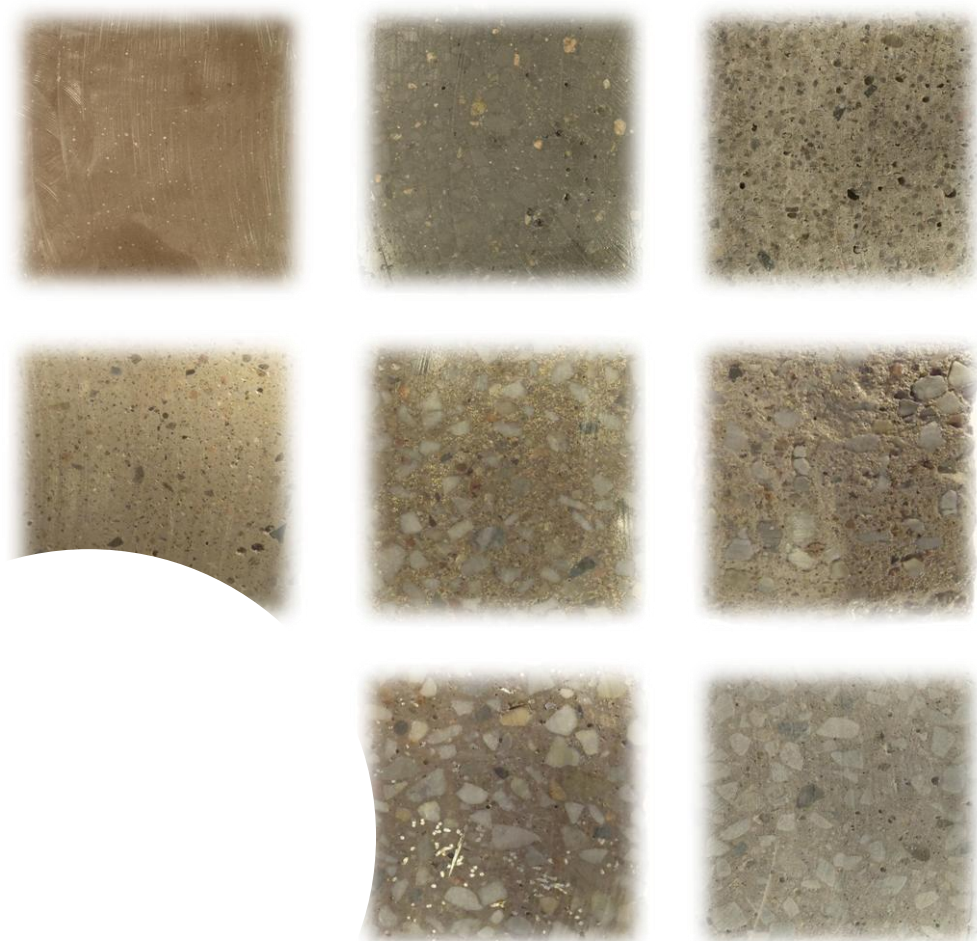


# En studie av möjligheten att öka den värmelagrande förmågan hos betong

Alexander Herlin  
Gabriel Johansson



# **En studie av möjligheten att öka den värmelagrande förmågan hos betong**

Alexander Herlin  
Gabriel Johansson

ISRN: LUTVDG/TVBM--11/5080--SE(1-65)

ISSN: 0348-7911 TVBM

Herlin A, Johansson G ©

Lunds Tekniska Högskola  
Avdelningen för Byggnadsmaterial  
Box 118

Tel: 046-2227415  
Fax: 046-2224427  
[www.byggnadsmaterial.lth.se](http://www.byggnadsmaterial.lth.se)

221 00 Lund

## Förord

Examensarbetet har utförts på Lunds Tekniska Högskola i samarbete med CBI Betonginstitutet och är den avslutande delen i civilingenjörsutbildningen Väg- och Vattenbyggnad.

Vi vill tacka Bo Johansson, Bengt Nilsson och Stefan Backe för hjälp med det praktiska arbetet. Vi vill även rikta ett tack åt våra handledare Kristian Tammo och Jonathan Karlsson samt vår examinator Lars Wadsö, som har varit till stor hjälp under hela examensarbetet.

Lund, 2011-04-28



Alexander Herlin



Gabriel Johansson



En studie av möjligheten att öka den värmelagrande förmågan hos betong

---

<b>Titel:</b>	En studie av möjligheten att öka den värmelagrande förmågan hos betong
<b>Författare:</b>	Alexander Herlin Gabriel Johansson
<b>Handledare:</b>	Kristian Tammo, Tekn.Dr CBI Betonginstitutet  Jonathan Karlsson, Doktorand Avdelningen för Byggnadsmaterial, Lunds Tekniska Högskola
<b>Examinator:</b>	Lars Wadsö, Professor Avdelningen för Byggnadsmaterial, Lunds Tekniska Högskola

## Sammanfattning

Tunga byggnadsmaterial som betong har hög värmekapacitet och bidrar till att ge byggnader en termisk tröghet. Byggnadernas temperatur ändras inte så snabbt när utetemperaturen förändras eftersom betong kan innehålla stora mängder lagrad värme. Detta kan ofta ge positiva effekter på energiförbrukning, termisk komfort och effektbehov. I denna studie undersöktes möjligheten att ytterligare förbättra betongs termiska egenskaper med olika tillsatsmaterial. Betong med olika tillsatsmaterial har gjutits och utvärderats med fokus på de termiska egenskaperna: värmeledningsförmåga och värmekapacitet. Mätningarna har utförts på både fuktig och torr betong. Två metoder har använts: HotDisk och IR-försök. HotDisk är en mätutrustning som mäter de termiska egenskaperna på material. IR-försöket utfördes med en infraröd lampa som värmde upp ytan på betongprovkroppar under en given tid. Temperaturen på ytan och inne i provkropparna registrerades under hela förloppet för att se hur betongen beter sig vid upptagning och avgivning av värme. Även betongernas tryckhållfasthet, krympning, lufthalt och sättmått undersöktes för att få en förståelse för hur de fungerar betongtekniskt.

De undersökta tillsatsmaterialen är magnetit, expanderad grafit, makroinkapslad PCM, mikroinkapslad PCM, PCM i påsform, PCM som emulsion, stålfiber, kopparfiber samt mässingsspån. Betonger med både ökad och minskad värmeledningsförmåga har tagits fram. De utvärderade betongerna har i de flesta fall en högre värmekapacitet än referensbetongen.

Fasomvandlingsmaterial sänker i regel värmeledningsförmågan och ökar värmekapaciteten. Betong med expanderad grafit, mässing eller mycket stålfiber har däremot både högre värmeledningsförmåga och högre värmekapacitet jämfört med referensbetongen. Resultaten påvisar att mer cementpasta minskar värmeledningsförmågan men ökar värmekapaciteten. Resultaten visar också på att hög fuktighet bidrar till ökad värmeledning i de flesta betonger.

**Nyckelord:** Värmelagring, Värmeledningsförmåga, Värmekapacitet, Värmediffusivitet, Värmeeffusivitet, Fasomvandlingsmaterial (PCM)

## Abstract

Heavy materials such as concrete have a high heat storage capacity. Their temperature does not change quickly when the outdoor temperature changes because they have the ability to contain large amounts of stored heat. This can often have positive impacts on energy consumption, thermal comfort and temperature peaks. This study investigated the possibility to further improve the thermal properties of concrete with different filler materials. Concrete with different filler materials was molded and evaluated with a focus on the thermal properties: thermal conductivity and heat capacity. The measurements were made in both wet and dry concrete. Two methods were used: HotDisk and IR-experiments. HotDisk measures the thermal properties of materials. IR-experiment was performed with an infrared lamp to warm up the surface of the concrete specimens during a given time. The temperatures at the surface and inside the specimens were registered during the whole procedure to see how the concrete behaves in the absorption and emission of heat. Although the concrete compressive strength, shrinkage, air content and slump were examined to get enough knowledge of the concretes for production.

The investigated filler materials are magnetite, expanded graphite, macro-encapsulated PCM, micro-encapsulated PCM, PCM in bag, PCM as emulsion, steel fiber, copper fiber and brass shavings. Concrete with both increased and decreased thermal conductivity has been developed. The evaluated concretes have in most cases shown a higher heat capacity than the reference concrete.

Phase change materials normally reduce the heat conductivity and the heat capacity increases in concrete. Concrete with expanded graphite, brass, or a lot of steel fiber have both higher thermal conductivity and higher heat capacity compared to the reference concrete. The results indicate that more cement paste reduces the thermal conductivity but increases the heat capacity. The results also show that high humidity contributes to increased thermal conductivity in most concretes.

**Keywords:** Heat storage, Heat Conductivity, Heat Capacity, Thermal Diffusivity, Thermal Effusivity, Phase Change Material (PCM)

## Innehållsförteckning

1	Inledning .....	9
1.1	Bakgrund.....	9
1.2	Syfte .....	9
1.3	Avgränsningar.....	10
1.4	Frågeställning.....	10
2	Termiska egenskaper.....	11
2.1	Värmeledningsförmåga.....	11
2.2	Värmekapacitet .....	12
2.3	Värmediffusivitet och värmeeffusivitet .....	12
3	Värmetransport.....	13
3.1	Värmeledning.....	13
3.2	Konvektion.....	13
3.3	Värmestrålning.....	13
4	Energibalans.....	14
5	Värmelagring .....	15
5.1	Allmänt .....	15
5.2	Passiv värmelagring .....	15
5.3	Aktiv värmelagring .....	16
5.4	Termisk koppling .....	16
5.5	Phase Change Materials .....	16
6	Försök .....	17
6.1	Arbetbarhet .....	17
6.2	Densitet .....	17
6.3	Termiska egenskaper.....	18
6.3.1	IR-försök .....	18
6.3.2	HotDisk .....	19
6.4	Tryckhållfasthet .....	20
6.5	Krympning .....	21
6.6	Kompletterande mätningar.....	22
6.7	Material .....	23
6.7.1	Ballast och cement .....	23
6.7.2	Tillsatsmaterial.....	24
7	Beräkning.....	26
7.1	Värmeledningsförmåga.....	26



7.2	Värmekapacitet .....	27
8	Resultat .....	28
8.1	Arbetbarhet .....	28
8.2	Betongrecept .....	29
8.3	IR-försök .....	30
8.4	HotDisk .....	30
8.5	Övriga egenskaper.....	33
8.6	Beräknade termiska egenskaper.....	37
9	Analys .....	38
9.1	Termiska egenskaper.....	38
9.2	Krympning .....	43
10	Diskussion och slutsats .....	44
11	Referenser .....	45
12	Appendix A - IR-mätning .....	47
13	Appendix B – Sammanställning av HotDisk-resultat .....	51
14	Appendix C – Betongytor torr/fuktig.....	57
15	Appendix D - Tillsatsmaterial .....	61
16	Appendix E - Kornfördelningskurva Grus .....	64
17	Appendix F – Krympning .....	65

# 1 Inledning

## 1.1 Bakgrund

Bygg- och fastighetssektorn står för en stor del av energiförbrukningen i Sverige. Den största energiposten för byggnader, sett till ett livscykelperspektiv, är driftskedet. Energi för uppvärmning och kylning av byggnader står för en stor del av utsläppen av växthusgaser. Går det att hitta lösningar som sänker energiförbrukningen i driftskedet kan det med dagens energipris göras stora ekonomiska vinster samtidigt som miljöpåverkan blir mindre.

EU-kommissionen har tagit fram ett övergripande mål om att sänka energikonsumtionen med 20 % fram till år 2020 och nationellt har riksdagen fastslagit 16 miljömål för att minska klimatpåverkan [1] [2]. En av strategierna för att uppnå dessa högt ställda mål är en bättre effektivitet för energianvändning.

Den största anledningen till att energieffektivisera byggnader är huvudsakligen att minska totalkostnaden och en låg miljöpåverkan av en byggnad sett ur ett helhetsperspektiv. Det går att värma upp helt oisolerade byggnader till ett behagligt inomhusklimat, dock till väldigt höga värmekostnader. Det är även möjligt att isolera hus till väldigt låga U-värden, men till en hög investeringskostnad.

Enligt mätningar i England har en typisk kontorsbyggnad från 60-talet med självdragsventilation en inomhustemperatur på över 28 °C ungefär 15 % av kontorstiden år 2050 [3]. Den siffran kan jämföras med nuvarande riktlinjer som säger att temperaturen inte bör överstiga 28 °C mer än 1 % av kontorstiden för att åstadkomma en måttlig komfort. Betongkonstruktioner kan minska topptemperaturer genom sin värmelagrande förmåga och med rätt tillsatsmaterial kan denna effekt förstärkas.

## 1.2 Syfte

Syftet med examensarbetet är att mäta och utvärdera de termiska egenskaperna för olika betongsammansättningar. Med kunskaper om betongens värmelagrande egenskaper kan man i ett tidigt projekteringsstadium förutse vilka installationer som behöver göras för att uppnå god komfort med lägsta möjliga energiåtgång.

### 1.3 Avgränsningar

Mätningarna har gjorts under en relativt kort tid efter gjutning eftersom ett examensarbete inte varar längre än 20 veckor. En långtidsuppföljning kommer dock att göras utanför examensarbetet. En extra provkropp från varje betongrecept har därför tillverkats och kommer att sparas för framtida försök. Krympningsmätningen avslutas dock efter 43 dygn.

### 1.4 Frågeställning

Examensarbetet ger svar på följande frågeställningar:

- Vilka produkter är lämpliga som tillsatsmaterial i betong för att förbättra dess termiska egenskaper?
- Hur blir betongens arbetbarhet, krympning och hållfasthet vid inblandning av de olika tillsatsmaterialen?

## 2 Termiska egenskaper

### 2.1 Värmeledningsförmåga

Värmeledningsförmåga ( $\lambda$ , [W/(mK)]) är en materialegenskap som anger hur lätt värme transporteras i ett material [4]. När ett material utsätts för en temperaturvariation kommer det att ske en värmetransport genom materialet. I porösa material förekommer det förutom ledning även konvektion och strålning, men samtliga värmetransportsmekanismer utgör tillsammans en värmeledningsförmåga i materialet. I Tabell 1 visas värmeledningsförmågan för vanliga byggnadsmaterial.

**Tabell 1 – Ungefärlig värmeledningsförmåga hos vanliga byggnadsmaterial [4]**

Material	$\lambda$ , [W/(mK)]
Mineralull	0,04
Trä ( $\perp/\parallel$ )	0,13/0,30
Betong	1,2
Lättbetong	0,15
Stål	60

U-värde beskriver värmeflödet genom ett materialskikt och kan beräknas med ekvation 1 och 2 nedan:

$$U^{-1} = \sum \frac{d_i}{\lambda_i} + \sum \alpha_s^{-1} \quad [W/(m^2K)] \quad (1)$$

$d$  – Tjocklek i skikt  $i$   
 $\lambda$  – Värmeledningsförmåga i skikt  $i$   
 $\alpha$  – Värmeövergångskoefficient för ytor

$$\alpha = \frac{1}{R_{se} + R_{si}} \quad [(m^2K)/W] \quad (2)$$

$R_{se}$  – Övergångsmotstånd på utsidan; 0,04  
 $R_{si}$  – Övergångsmotstånd på insidan; 0,13

Värmeövergångsmotstånden  $R_{se}$  och  $R_{si}$  är motstånden i övergångarna mellan luft och fast material. Index  $se$  står för *surface exterior* och  $si$  står för *surface interior*.

## 2.2 Värmekapacitet

Värmekapacitet definieras som den mängd energi det krävs för att ändra temperaturen en Kelvin (eller en grad) på ett material [4]. Värmekapaciteten kan uttryckas per volymenhet (volumetrisk värmekapacitet) eller per viktenhet (specifik värmekapacitet). Ekvation 3 nedan beskriver sambandet mellan volumetrisk och specifik värmekapacitet:

$$c_v = c_p \cdot \rho \quad [J/m^3K]$$

$$\begin{aligned} c_v & - \text{Volumetrisk värmekapacitet} \\ c_p & - \text{Specifik värmekapacitet, } J/kgK \quad (3) \\ \rho & - \text{Densitet, } kg/m^3 \end{aligned}$$

Tabell 2 ger värmekapaciteten för ett par vanliga byggnadsmaterial.

Tabell 2 - Värmekapacitet för vanliga byggnadsmaterial [4]

Material	$c_p$ , [J/(kgK)]	$\rho$ , [kg/m <sup>3</sup> ]	$c_v$ , [J/(m <sup>3</sup> K)]
Trä	1880	~500	~0,94
Stenmaterial	840	~2400	~2,02
Stål	460	~7850	~3,61

## 2.3 Värmediffusivitet och värmeeffusivitet

Värmediffusivitet är en materialegenskap som anger hur snabbt temperaturen i ett material närmar sig jämvikt med omgivningens temperatur. Den beräknas enligt ekvation 4 [4]:

$$a = \lambda / (\rho \cdot c_p) \quad [m^2/s] \quad a - \text{Värmediffusivitet} \quad (4)$$

Värmeeffusivitet, även kallat termisk tröghet, är ett mått som beskriver hur snabbt material tar upp och behåller värmen, beräknas enligt ekvation 5 [5].

$$\epsilon = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c_p} \quad [Ws^{-0.5}/m^2K] \quad \epsilon - \text{Värmeeffusivitet} \quad (5)$$

## 3 Värmetransport

### 3.1 Värmeledning

Värmeledning är en värmetransportmekanism som uppstår i material vid temperaturskillnader [6]. Mekanismen strävar efter att jämna ut temperaturgradienten. Alla molekyler som har en temperatur över absoluta nollpunkten befinner sig i rörelse, högre temperatur ger större rörelser. Molekylernas vibrering sätter grannmolekylerna i rörelse och på så sätt transporteras värmen. För massiva material är värmeledning den dominerande värmetransportmekanismen.

### 3.2 Konvektion

Konvektion innebär att en fluid agerar värmebärare genom att vid förflyttning transportera värmen [6]. Varm luft som stiger är ett exempel på naturlig konvektion, där transporten sker spontant. Konvektion som uppkommer på grund av fläktar och pumpar benämns som påtvingad konvektion.

### 3.3 Värmestrålning

All materia med en temperatur över absoluta nollpunkten strålar energi [6]. Energin kommer från elektromagnetisk strålning och behöver inget medium för att överföra värme. Atomernas rörelse på grund av dess temperatur medför en utsändning av elektromagnetisk strålning. Samtidigt som en kropp strålar ut energi tar den också emot strålning från alla kroppar runt omkring sig. Strålningseffekten från en yta ( $P$ , [W]) ökar med temperaturen vilket resulterar i strålning från en yta, enligt ekvation 6.

$$P = A \cdot \sigma \cdot T^4 \quad [\text{W}]$$

$T$  – Temperaturen i K  
 $\sigma$  – Stefan Boltzmanns konstant [ $\text{W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$ ] (6)  
 $A$  – Strålande arean [ $\text{m}^2$ ]

Värmestrålningen är en viktig del av den termiska komforten och bidrar starkt till den upplevda temperaturen, även kallad operativ temperatur [3]. Operativ temperatur beräknas genom viktning mellan ytornas strålningstemperatur och lufttemperaturen för ett rum. Fönster har ofta lägre U-värde än ytterväggen vilket medför en lägre yttemperatur under uppvärmningssäsongen. Det är därför viktigt att ta hänsyn till värmestrålningen vid projektering av uppvärmningssystem.

## 4 Energibalans

Temperaturen i en byggnad styrs av balansen mellan värmeförluster och värmetillskott. För att upprätthålla en given temperatur inomhus i ett kallt klimat måste värmebalansen kompenseras med köpt energi. De största värmeförlusterna uppkommer på grund av värmetransport genom klimatskalet, men även från luftläckage genom otätheter och värmeförlust via frånluften i ventilationssystemet. Värmotillskott i en byggnad kommer från källor som alstrar värme till omgivningen: köpt värmeenergi eller fri värme från t.ex. personer, solinstrålning och maskiner [7]. Solinstrålning genom fönster påverkar temperaturen inomhus varpå fönstrens orientering har stor inverkan på värmotillskottet. Värmeförlusterna kan minskas genom att använda tjockare isolering i klimatskalet, täta kring fönster och andra kritiska byggnadsdelar samt att använda värmeväxlare i ventilationssystemet.

Nyproducerade bostadshus har ofta tjock isolering för att minska energiförbrukningen på vintern. Byggnader isoleras för att hålla inne den värme som tillförts inomhusluften. Denna effekt är önskvärd på vintern men på sommaren kan tjock isolering skapa övertemperaturer.

Kontorshus har i regel tunnare isolering samt ett högt och varierande värmotillskott vilket medför större temperatursvängningar inomhus [7] [3]. På sommaren har dessa typer av byggnader ofta problem med övertemperaturer och inomhusluften måste kylas för att uppnå en god termisk komfort.

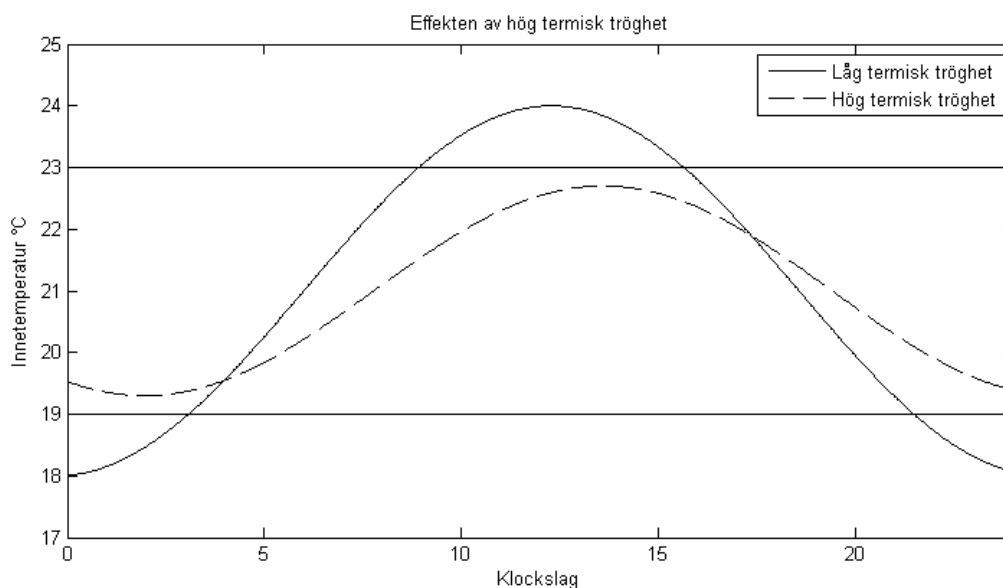
## 5 Värmelagring

### 5.1 Allmänt

Värmelagring är definierat som ett materials förmåga att leda in, fördela och magasinera värme. Storleken på den möjliga värmelagringen i byggnader beror främst på stommen och klimatskalet. Andra faktorer som påverkar byggnadens värmelagring är verksamhet, geografisk placering, fönsters orientering och val av värme/kylsystem.

### 5.2 Passiv värmelagring

Principen för passiv värmelagring är spontan värmetransport mellan inomhusluften och ett byggnadsmaterial [8]. Betongbyggnader har en temperaturutjämnande inverkan på byggnader vilket är resultatet av betongstommens värmelagring [9] [3], se Figur 1. När temperaturen i byggnaden förändras kommer betongen att uppta eller avge värme. Betong är ett värmetrögt material som kräver mycket värme för att ändra sin temperatur. Vid en höjning av inomhustemperaturen, exempelvis vid solinstrålning, absorberas värme från rumsluften för att värma betongen vilket minskar temperaturökningen hos inneluften. När inomhusluftens temperatur sjunker frigörs värme från den varmare betongstommen för att jämna ut temperaturen mellan stommen och inomhusluften.



Figur 1 - Principbild för jämförelse mellan hög och låg termisk tröghet

Enligt en undersökning gjord av tre intresseorganisationer inom cement- och betongområdet (Cembureau, BIBM och ERMCO) ger byggnader med tung stomme en minskad energiförbrukning av 2-7% jämfört med byggnader med lätt stomme [7]. Undersökningen gjordes i Europa i olika klimat på både bostäder och kontorshus. Byggnader som kräver kylning, till exempel kontorshus eller hus som är placerade på varmare breddgrader, hade en lägre energiförbrukning. Energiförbrukningen blir inte alltid lägre när man bygger med tunga byggnadsmaterial. Intermittent uppvärmda byggnader får istället högre energiförbrukning. Temperaturvariationer krävs för att kunna utnyttja den värmelagrande förmågan vilket kan vara negativt ur



komfortsynpunkt. Sammanfattningsvis finns det möjligheter att spara en mindre del av energiförbrukningen genom att utnyttja tunga byggnadsmaterials värmelagrande förmåga. Det kräver att hela byggnaden inklusive installationerna konstrueras för att utnyttja gratisenergi genom att tillåta temperatursvängningar.

### 5.3 Aktiv värmelagring

Aktiv värmelagring innebär att med hjälp av fläktar och pumpar, transportera värme och kyla för att effektivisera värmeutbytet mellan materialet och rumsluften. Ingjutna slingor fyllda med vatten eller luft som drivs av en pump eller fläkt är ett exempel på aktiv värmelagring [9]. En annan form av aktiv värmelagring är Thermodeck, som innebär att fläktar ansluts till håldäcksbjälklag för att transportera ut värme eller kyla genom kanalerna [3]. Den aktiva värmelagringen är ett sätt att effektivisera den passiva.

### 5.4 Termisk koppling

Termisk koppling är definierat som ett mått på hur effektivt konstruktioner kan interagera med rumsluften. För att betongens värmelagrande förmåga skall kunna utnyttjas krävs det att betongytan är fri från täckande värmeisolerande material. Många av de ytskikt som är vanliga i byggnader isolerar bort effekten av betongens termiska fördelar [3]. Exempel på ytskikt är undertak, förhöjt golv, gipsskivor och mattor. En betongstomme som har isolerande ytskikt på insidan kan inte utnyttja den höga termiska trögheten fullt ut.

### 5.5 Phase Change Materials

PCM (Phase Change Materials) har blivit uppmärksammade av byggbranschen för värmelagring i byggnadsmaterial, bland annat som ytskikt i form av gipsskivor och putser. När material övergår från fast till flytande fas krävs en bestämd mängd värme, smältentalpi. Sådana material har därför en mycket hög effektiv värmekapacitet i det temperaturområde där de smälter vilket innebär att materialet får en hög värmelagrande effekt [10]. Vid fasomvandling till fast fas frigörs den värme som åtgick för att få materialet i flytande form.

Det finns flera olika produkter med fasändringsmaterial med varierande smältpunkt som är möjliga att använda i betong: inkapslad paraffin, emulsion och saltfylld påse.

## 6 Försök

Betong med följande tillsatsmaterial har gjutits och analyserats med avseende på arbetbarhet, termiska egenskaper, tryckhållfasthet, densitet och krympning:

- Magnetit
- Makroinkapslad PCM
- Expanderad grafit
- PCM i påsform
- PCM som emulsion
- Stålfiber i två olika mängder
- Mikroinkapslad PCM
- Mässingsspån
- Koppartråd

En referensbetong med VCT 0,5 och ballaststorlek upp till 16 mm har varit grund för samtliga betongrecept. Recepten har korrigerats med avseende på betongernas arbetbarhet för att erhålla recept som är gjutbara.

### 6.1 Arbetbarhet

Betongernas arbetbarhet kontrollerades med sättmått, lufthalt och egenskaper så som vibreringsbehov, benägenhet för vattenseparation och i form av formbarhet, kletighet mm. Mätning av sättmått utfördes med sättkon och lufthalten i betongen kontrollerades med lufthaltsmätare.

### 6.2 Densitet

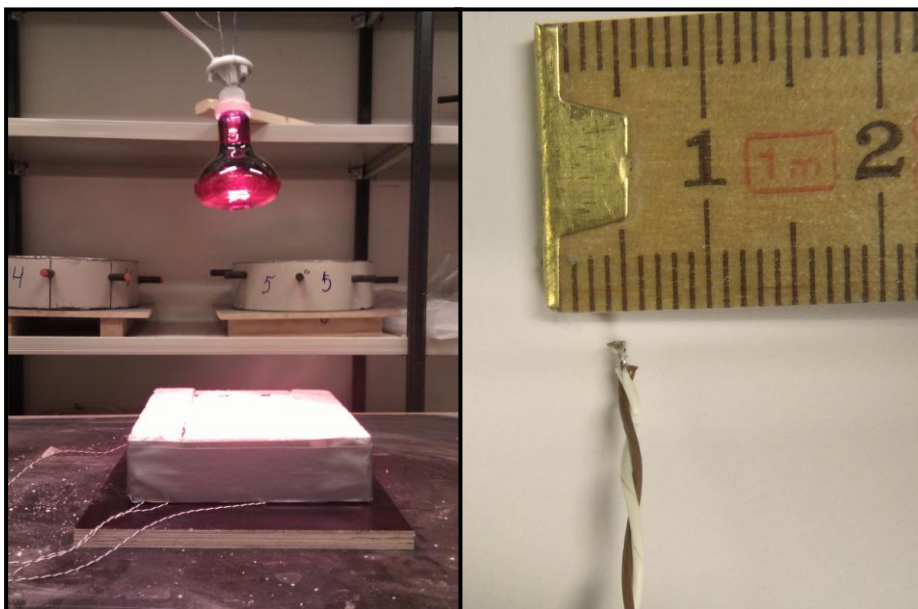
Densiteten av den färska betongmassan fastställdes genom vägning av lufthaltsmätarens behållare fylld med betong. Den härdade betongens densitet utvärderades från krympkropparnas vikt och volym.

## 6.3 Termiska egenskaper

### 6.3.1 IR-försök

För att studera värmetrögheten hos de olika betongerna gjordes försök där betongkroppar med ingjutna termoelement belystes med en IR-lampa. Till försöken tillverkades 120 mm x 60 mm x 120 mm stora betongkroppar med ingjutna termoelement på 1 respektive 30 mm djup. Dessa belystes sedan av en 100 W infraröd lampa på en höjd av 23 cm, se Figur 2. Syftet med IR-försöket var att simulera en verklig situation för de gjutna betongerna. Försöken utfördes både i ett varmt och i ett kallt rum ( $\sim 20^{\circ}\text{C}$  resp.  $\sim 8^{\circ}\text{C}$ ). I båda fallen belystes betongen i fyra timmar för att sedan avsvälva till rumstemperatur. Temperaturen registrerades med 10 sekunders mellanrum, på båda djupen, i syfte att jämföra skillnaden i temperatur vid olika tidpunkter. Den lägre rumstemperaturen användes för de betonger med fasomvandlingsmaterial som har låg smältpunkt. Dessa tillsatsmaterial var PCM som emulsion, mikroinkapslad PCM och PCM i påsform. För makroinkapslad PCM krävdes det istället en högre maxtemperatur varpå IR-lampan sänktes till en höjd av 11 cm.

Provkropparna vattenhärdades fram till 2 dagar före mätning, för att sedan placeras i mätningsrummet och erhålla samma temperatur som omgivningen. IR-försöken utfördes 30 dagar efter gjutning. Provkropparnas ovansida målades med en vit icke-diffusionstät färg för att erhålla samma värmeabsorption och tillåta fukttransport genom ytskiktet. Provkropparna isolerades för att försöket skulle efterlikna en utskärning ur en vägg eller ett bjälklag, se Figur 2. En vägg eller ett bjälklag har betydligt större area jämfört med provkropparna. Om värmekällan är jämnt fördelad över hela ytan sker ingen större värmetransport i sidled.



Figur 2 - Försöksuppställning av IR-försök (vänster) och ett termoelement (höger)

### 6.3.2 HotDisk

HotDisk är en mätutrustning som mäter värmeledningsförmåga, volumetrisk värmekapacitet och värmediffusivitet på homogena material. I försöken användes en HotDisk av modell TPS 1500, se Figur 3.

Mätningar utfördes 35 dagar efter gjutning, på vattenmättade (>95 % RF) och torra prov, för att kontrollera hur de termiska egenskaperna påverkades av fukttinnehållet. De torra proven torkades i ugn med temperaturen 105 °C, en vecka före mätning, med undantag för betongerna med fasomvandlingsmaterial som torkades i rumstemperatur. I de fall där betongprovkropparna torkades i ugn erhöles <10 % RF och för övriga torra prov erhöles en relativ fuktighet på cirka 75 % RF, enligt enklare uttorkningsberäkningar. De vattenmättade proven vattenlagrades fram till mätning. Dagen innan provning placerades provkropparna i mätrummet för att erhålla samma temperatur som mätrummet, 24 °C. De fuktiga proven placerades då i ett kärl med vatten och det torra provet placerades i rumsluften. Innan mätningen på de blöta proverna påbörjades togs kropparna upp ur vattenbadet och mätytan torkades med trasa så att inget fritt vatten fanns kvar på ytan. För att minska risken för uttorkning vid mätning av de fuktiga proven inneslötts dessa i plast tillsammans med en bägare med vatten.

Mätsensorn var kaptonkapslad och hade en radie på 29,40 mm (HotDisk nr 5599), se Figur 3. En stor sensor krävs för att uppnå en representativ mätning på betongen varpå den största tillgängliga sensorn vid provningstillfället användes. Provkropparna sågades på mitten för att blottlägga ballasten och mätsensorn placerades mellan två sågade provkroppar med storlekarna 150 mm x 150 mm x 70 mm. Mätning på den sågade ytan är att föredra då gjutytorna i regel innehåller mer cementpasta och representerar därför inte betongsammansättningen.

Mätning utfördes på 3 punkter på den sågade ytan, med 3 mätningar i varje punkt, vilket minskar risken för att lokala avvikelser i provkropparna ger ett missvisande resultat. Vid en mätning registrerades temperaturen 200 gånger under 640 sekunder med uppvärmningseffekten 2 W. Värmetillförseln medförde att temperaturen i provkroppen ökade ca 1-2 K. För att efterföljande mätningar inte skulle störa varandra krävdes att provet svalnade till rumstemperatur mellan mätningarna.



Figur 3 - HotDisk och mätsensor (vänster) samt klimatbox (höger)

Betongkropparna med fasomvandlingsmaterial placerades i en klimatbox 48 h innan mätning, se Figur 3. Mätningarna utfördes i temperaturer ovan och under tillsatsmateriallets smältpunkt, se Tabell 3. Det är inte möjligt att mäta värmeledningsförmågan och värmekapaciteten vid en temperatur där materialen fasomvandlar. Med denna metod kunde de termiska egenskaperna utvärderas i både fast och flytande fas, för betongerna med fasomvandlingsmaterial.

**Tabell 3 - Mättemperaturer för betong med fasomvandlingsmaterial**

	T <sub>Låg</sub> [°C]	T <sub>Hög</sub> [°C]
<b>Makroinkapslad PCM</b>	10	50
<b>PCM i påsform</b>	10	40
<b>PCM som emulsion</b>	10	40
<b>Mikroinkapslad PCM</b>	10	40

#### 6.4 Tryckhållfasthet

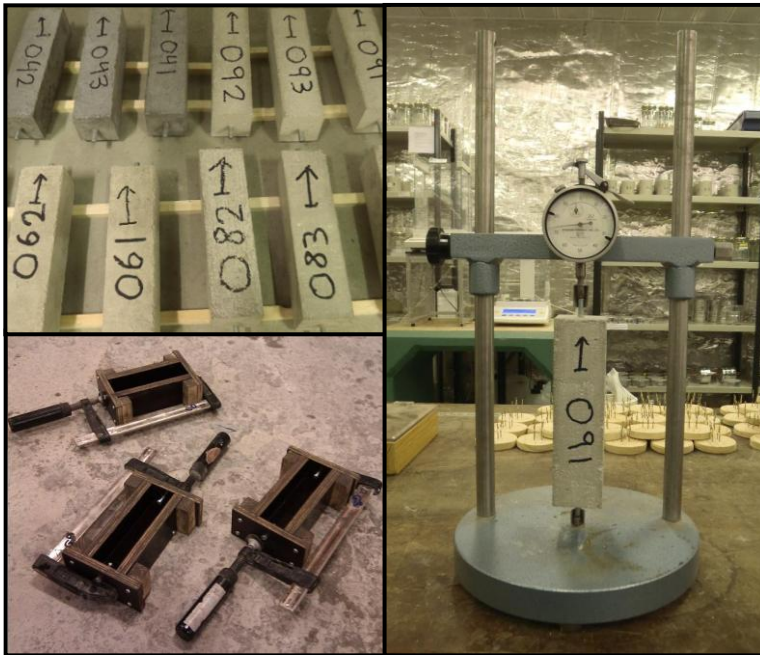
Tryckhållfastheten undersöktes på utsågade kuber från de vattenlagrade HotDisk-proverna. 6 stycken 70 mm x 70 mm x 70 mm kuber trycktes av varje betongrecept, med undantag från betongen med PCM i påsform. Försöket genomfördes för att ge en fingervisning om hållfastheten hos betongerna. Uppmätta resultat räknades om till 28-dagars hållfasthet för att på lämpligt sätt kunna jämföras med varandra.

Omräkning till 28-dagars hållfasthet gjordes med faktorn för relativ tryckhållfasthetsutveckling för betong [11]. Tryckkuber är vanligtvis 150 mm x 150 mm x 150 mm. För stora kuber är sannolikheten att defekter finns större än för små kuber och därför har mindre provkroppar högre tryckhållfasthet. Newman anger en omräkningsfaktor för olika provkroppars storlek. Provkroppar med sidlängd på cirka 70 mm erhåller faktorn 1,06 där standardkuben har index 1,00. Det är även skillnad på torra och blöta kubers tryckhållfasthet. Ekvation 7 beskriver omräkning från en fuktig provkropp till en torr provkropp, framtagen av Dornauer & Wöhlh.

$$f_{c,cube}^{wet} = 0,91f_{c,cube}^{dry} + 0,74 \quad [MPa] \quad (7)$$

## 6.5 Krympning

Betongens krympning uppmättes för 3 stycken provkroppar (40 mm x 40 mm x 150 mm) per betongblandning de första 43 dagarna. För att möjliggöra mätning med mätklocka gjöts mätdubb in i provkropparna, se Figur 4. Mätningen påbörjades 1 dag efter gjutning och mättes med hög frekvens de första veckorna på grund av att krympningen är exponentiellt avtagande med tiden. Kropparna lagrades i ett klimatrums med temperaturen 20 °C och 50 % relativ fuktighet för att förhindra ojämn krympning på grund av varierande rumsklimat.



Figur 4 – Bilderna till vänster visar krympformar med infästa mätdubb och de färdiga krympkropparna. Bilden till höger visar pågående mätning av krympning med mätklocka

## 6.6 Kompletterande mätningar

### **Kornfördelningskurva för grus**

Gruset siktades i en siktmaskin och kornfördelningskurvan togs fram, se *Appendix E – Kornfördelningskurva Grus*. Grusets kornfördelning har stor inverkan på betongens arbetbarhet.

### **Densitet för ballast**

För att erhålla en korrekt densitet för den använda ballasten mättes dess vikt och volym.

### **Fukthalt hos ballast**

För att mäta fukthalten vägdes ballasten innan och efter torkning i 105°C. Ballasten förvarades under tät plast för att behålla samma fukthalt som den uppmätta. Vid behov kontrollerades fukthalten av ballasten med förbränning, där ballasten vägdes innan och efter förångning av vattnet.

## 6.7 Material

### 6.7.1 Ballast och cement

#### Cement

Till samtliga betongrecept användes Byggcement (CEM II/A-LL 42.5R) från Cementa. Detta är ett portlandcement med ca 15\% kalkfillerinblandning som är vanlig vid husbyggnad.

#### Sten

Stenen som använts i betongblandningarna bestod av två olika kornfraktioner kvartsit: 8-12 mm och 12-16 mm, se Figur 10. Kvartsit har större värmeledningsförmåga än exempelvis granit och fältspat som också är vanliga ballastmaterial, se Tabell 4.

#### Grus

Gruset som använts till betonggjutningarna består främst av tre olika bergarter: granit, kvarts och fältspat, se Figur 9. Gruset består av kornstorleken 0-8 mm och kornfördelningskurvan ges i *Appendix E – Kornfördelningskurva Grus*. Den exakta bergartsfördelningen hos gruset är inte känd utan antagits vara lika fördelad mellan granit, fältspat och kvartsit.

Tabell 4 - Densitet, specifik värmekapacitet och värmeledningsförmåga för cementpasta och olika bergarter [12]

	$\rho$ [ kg/m <sup>3</sup> ]	$C_p$ [ J/(kgK) ]	$\lambda$ [ W/mK ]
Kvartsit	2640 [12]	699-1013 [12]	8,6 [12]
Fältspat	2450-2600 [12]	628-800 [12]	2,4 [13]
Granit	2620-2650 [12]	600-1172 [12]	3,5 [14]
Cementpasta vct 0,5 fuktig	1860** [12]	1849 [15]	0,8 [15]
Cementpasta vct 0,5 torr	1650** [12]	1372* [15]	1,2 [15]

\*Värdet avser membranhärdad cementpasta.

\*\*Uppmätta värden från provkroppar.



## 6.7.2 Tillsatsmaterial

Figurhänvisningar i detta kapitel är kopplade till *Appendix D – Bilder på tillsatsmaterial*. En sammanställning av tillsatsmaterialens termiska egenskaper ges i Tabell 5.

### Magnetit

Magnetiten kommer från Minelco och består av järnmalm med produktnamnet MagnaDense. Magnetit används i betongkonstruktioner för dess höga densitet och strålningsavskärmande förmåga [16]. Produkterna som användes i betongrecepten var MagnaDense 8S och 20S, se Figur 11 och Figur 12 i *Appendix D – Bilder på tillsatsmaterial*. Magnetit finns i flera olika kornstorlekar och kan helt ersätta annan ballast.

### Makroinkapslad PCM

Rubitherm PK är produkten som använts och är ett makroinkapslat PCM som består av paraffin och tillverkas av Rubitherm. Produkten har en smältpunkt på 42 °C och en kornstorlek på ca 5 mm, se Figur 13. Enligt tillverkarna har Rubitherm PK goda värmelagringsegenskaper och har liten volymändring vid fasomvandling. PCM-tillsatsmaterialen som undersöks är inte framtagna för betonginblandning.

### Expanderad grafit

Expanderad grafit är en kolförening som tillverkas av grafit. Grafit är en halvmetall och har därför god ledningsförmåga. Genom speciell behandling och upphettning expanderar vanlig grafit och bildar expanderad grafit med högre värmeledningsförmåga och lägre skrymdensitet. Produkten som använts är ES 250 B5 och levereras av företaget Grafit Kropfmühl AG. Materialet har en gråglimrande färg och formen av små flingor, se Figur 14.

### PCM i påsform

PCM i påsform kommer från Climator Sweden AB och innehåller en saltlösning med smältpunkten ~24 °C. Påsarna har storleken 140 mm x 70 mm x 10 mm och i försöken läggs påsarna fritt i betongen där ett värmetrögare skikt önskas, se Figur 15.

### PCM som emulsion

Emulsion är definierat som små partiklar svävandes i en vätska. Partiklarna är så små att de håller sig i detta tillstånd utan att sedimentera. Produkten som utvärderats är Micronal DS 5007 X och ska enligt tillverkaren BASF öka värmekapaciteten i konventionella byggnadsmaterial vid inblandning [17]. PCM-emulsionen består av små paraffinkulor svävandes i vatten (45 vikt-% vatten) och har en smältpunkt kring 26°C. Produktens konsistens påminner om målarfärg, se Figur 16.

### Stålfiber

Stålfiber används idag till armering i betong huvudsakligen för att reducera sprickbredder, till exempel i betongplattor på mark. Stålfibrerna kommer från Swerock AB, är 50 mm långa och krökta i varje ände för bättre vidhäftning i betongen, se Figur 17.

### Mikroinkapslad PCM

Produkten som använts är Micronal och levereras av BASF. Micronal är mikroinkapslad PCM som består av små paraffinkulor med en diameter mindre än 0,5 mm, se Figur 18. Paraffinet har en smältpunkt kring 23 °C och ska enligt tillverkarna förstärka den värmelagrande effekten i byggnadsmaterial.

### Mässing

Mässing är en legering mellan zink och koppar. Mässingen som använts är borrarspån från en fabrik, se Figur 19.

### Koppar

Koppar är känd för sin goda ledningsförmåga. De använda koppartrådarna är 30 mm långa ( $\pm 10$  mm) med en diameter på cirka 2 mm, se Figur 20.

Tabell 5 – Densitet och termiska egenskaper för olika tillsatsmaterial

	$\rho$ [ kg/m <sup>3</sup> ]	$C_p$ [ J/(kgK) ]	$\lambda$ [ W/mK ]
Magnetit	5100 [16]	586 [12]	4,9 [18]
Makroinkapslad PCM	900 [19]	2900 [20]	0,25 [21]
Expanderad grafit	2260 [22]	711 [23]	1 till 8 [23]
PCM som emulsion	985 [17]	3480*	0,4*
Stålfiber	7850 [21]	420 [24]	50 [21]
Mikroinkapslad PCM	900 [19]	2900 [20]	0,25 [21]
Mässingsspån	8600 [21]	380 [19]	109 [21]
Koppar	8890 [21]	390 [19]	400 [21]
Vatten	1000	4185 [20]	0,6 [21]

\* Värmeledningsförmåga och värmekapacitet för PCM som emulsion har beräknats med antagandet, 45 vikt-% vatten och 55 vikt-% paraffin.

## 7 Beräkning

### 7.1 Värmeledningsförmåga

Betong är ett kompositmaterial bestående av flera olika faser. Med kännedom om de olika fasernas egenskaper kan man med hjälp av kompositberäkningsmodeller räkna fram den sammansatta egenskapen hos ett kompositmaterial [25].

Förväntad värmeledning kan beräknas med hjälp av Hashins kompositmodell, ekvation 8:

$$\lambda = \frac{2\lambda_k + \lambda_p - 2V_p(\lambda_k - \lambda_p)}{2\lambda_k + \lambda_p + V_p(\lambda_k - \lambda_p)} \lambda_k \quad [W/mK] \quad (8)$$

$\lambda_p$  – Värmeledningsförmåga partikelfas  
 $\lambda_k$  – Värmeledningsförmåga kontinuerlig fas  
 $V_p$  – Volymandel partikelfas  
 $V_k$  – Volymandel kontinuerlig fas

Beräkningar med Hashins kompositmodell innebär en del förenklingar av verkligheten. Betongen antas bestå av en grundmassa som innehåller sfäriska partiklar. Grundmassan kan exempelvis utgöras av cementbruket (cement, vatten, sand) och ballasten bildar då partiklarna. Detta antagande lämpar sig bäst för vanlig betong där ballasten närmast kan antas vara sfäriska partiklar men flertalet tillsatsmaterial som undersökts i examensarbetet har varierande former.

Kompositmodellen tillåter endast en kontinuerlig och en partikelfas vid beräkning. Beräkningen måste därför delas upp i flera steg för att beräkna samtliga ingående material. Fasuppdelning görs enligt Tabell 6.

**Tabell 6 - Fasuppdelning vid beräkning med Hashins kompositmodell**

Kontinuerlig fas	Partikelfas
Cementpasta (Cement + Vatten)	Luftporer
Cementpasta, Luftporer	Grus
Cementpasta, Luftporer, Grus	Ballast
Cementpasta, Luftporer, Grus, Ballast	Tillsatsmaterial

Porositeten i cementpastan kan beskrivas med följande formel, ekvation 9 [24]:

$$n = \frac{1}{1 + \frac{\rho_v}{vct \cdot \rho_c}} \quad (9)$$

$n$  – porositet i cemenpastan  
 $vct$  – vattencementtal  
 $\rho_v$  – densitet för vatten  
 $\rho_c$  – kompakt densitet cement

## 7.2 Värmekapacitet

Värmekapaciteten för betong och andra kompositmaterial kan beräknas med en enkel kompositmodell, en så kallad blandningsmodell, ekvation 10:

$$c_v = \sum V_{\text{material}} \cdot c_{v,\text{material}} \quad [J/m^3K] \quad \begin{array}{l} V_{\text{material}} - \text{Materialens volymandelar} \\ c_{v,\text{material}} - \text{Volymetrisk värmekapacitet} \end{array} \quad (10)$$

## 8 Resultat

### 8.1 Arbetbarhet

Resultatet av utvärderingen av betongernas arbetbarhet ges i Tabell 7.

Tabell 7 - Sammanställning av betongegenskaper

Betong	Tillsatsmaterial [volym-%]	Cementpasta [volym-%]	Sättmått [mm]	Densitet [kg/m <sup>3</sup> ]	Lufthalt [%]	Vibreringsbehov [s]	Tryckhållfasthet [Mpa]	Krympning 7 dagar [%]	Krympning 28 dagar [%]	Arbetbarhet
Referensbetong	-	31,4	36	2369	2,2	5	49	0,38	0,54	Standard
Magnetit	61,1	28,1	10	3836	1	10	50	0,26	0,36	Standard
Makro. PCM	23,7	35,6	26	1909	1,2	5	11	0,44	0,74	Lättbearbetad
Exp. grafit	13,2	48,8	16	2100	3,4	10	16	0,57	0,88	Glansig/Smidig
PCM påsform	-	-	-	-	-	5	-	-	-	Standard
PCM emulsion	32,7	29,7	40	1992	3,2	15	8	-	-	Gelé/Seg
Stålfiber	1,3	31,2	15	2430	1	10	59	0,32	0,41	Svårbearbetad
Mycket stålfiber	2,5	30,8	0	2496	0,8	10	61	0,26	0,34	Mycket svårbearbetad
Mikro. PCM	19,6	50,1	70	1752	4,8	5	12	1,08	1,98	Smidig
Mässingspån	4,9	30,1	5	2599	1	10	63	0,27	0,40	Svårbearbetad
Kopparfiber	2,5	30,8	2	2558	1,6	5	56	0,47	0,52	Svårbearbetad
Exp.grafit & Magnetit	13,1 & 37,8	49,0	16	2999	2,4	10	15	0,37	0,77	Glansig/Smidig
Cementpasta VCT 0,5	-	100	-	-	-	-	-	1,64	2,60	-

## 8.2 Betongrecept

Nedan visas recepten för de gjutna betongerna. Betongrecepten är framtagna med prioritering av volymandelen tillatsmaterial med bibehållen arbetbarhet. Densiteterna som använts ges i Tabell 4 och Tabell 5.

<b>Referensbetong VCT 0,5</b>	<b>[kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Magnetit VCT 0,5</b>	<b>[kg/m<sup>3</sup>]</b>
Cement	380,85	Cement	342,50
Vatten	190,42	Vatten	170,04
Grus 0-8	886,98	Grus 0-8	281,20
Sten 8-12	442,99	MagnaDense 8S	1516,77
Sten 12-16	442,99	MagnaDense 20S	1599,44
<b>Makroinkapslad PCM VCT 0,5</b>	<b>[kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Expanderad grafit VCT 0,6</b>	<b>[kg/m<sup>3</sup>]</b>
Cement	424,83	Cement	532,89
Vatten	218,33	Vatten	314,82
Grus 0-8	1062,60	Grus 0-8	491,83
Makroinkapslad PCM	212,95	Sten 8-12	245,64
		Sten 12-16	245,64
		Expanderad grafit	297,91
<b>Emulsion VCT 0,7</b>	<b>[kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Stålfiber VCT 0,5</b>	<b>[kg/m<sup>3</sup>]</b>
Cement	289,54	Cement	378,61
Vatten	57,91	Vatten	189,30
Grus 0-8	674,33	Grus 0-8	875,98
Sten 8-12	336,78	Sten 8-12	434,50
Sten 12-16	336,78	Sten 12-16	434,50
Emulsion	321,71	Stålfiber	99,63

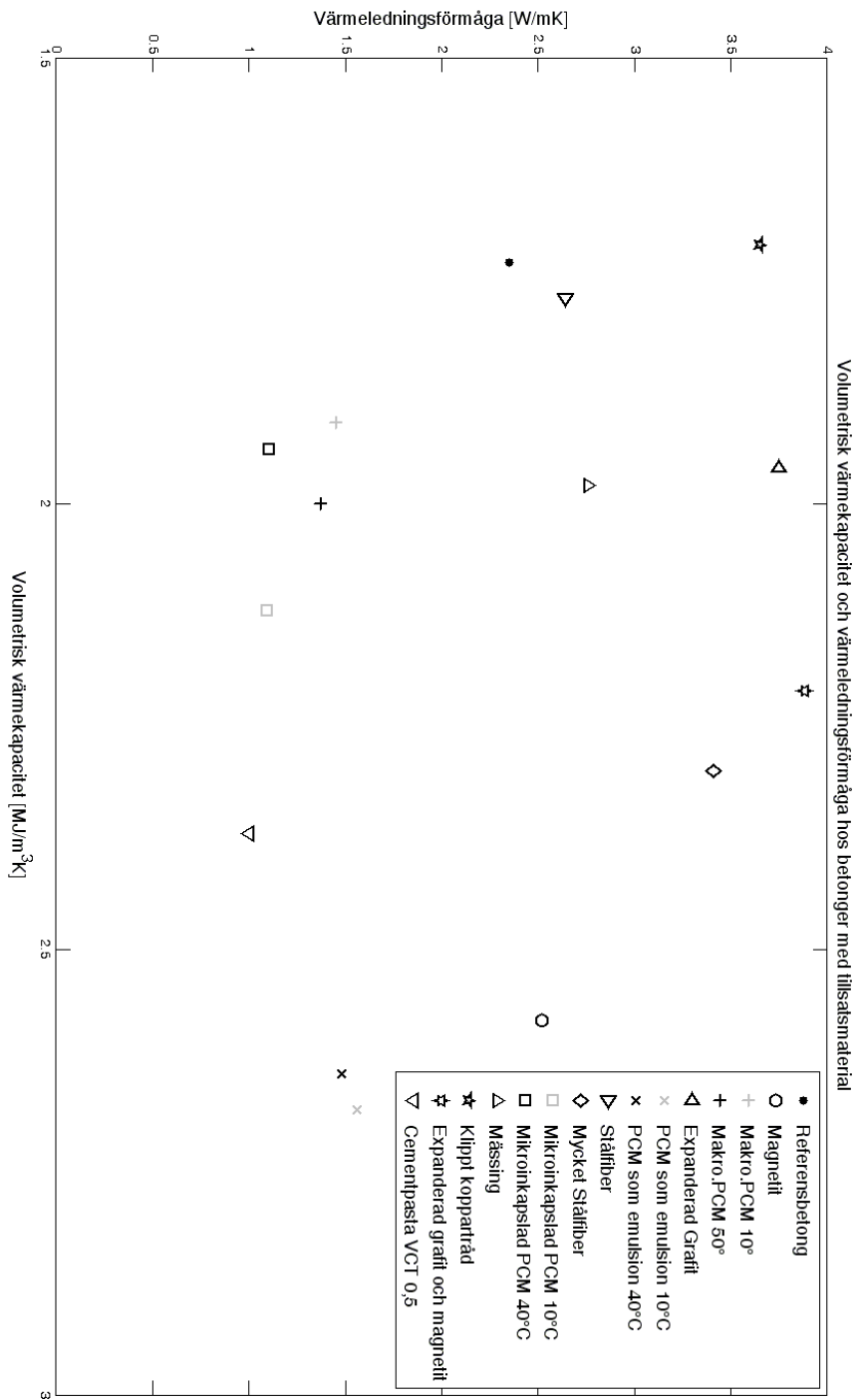
<b>Mycket Stålfiber VCT 0,5</b>	<b>[kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Mikroinkapslad PCM VCT 0,7</b>	<b>[kg/m<sup>3</sup>]</b>
Cement	373,81	Cement	489,25
Vatten	186,90	Vatten	342,27
Grus 0-8	865,20	Grus 0,5-8	790,58
Sten 8-12	429,02	Mikroinkapslad PCM	176,38
Sten 12-16	429,02		
Stålfiber	196,74		
<b>Mässing VCT 0,5</b>	<b>[kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Kopparfiber VCT 0,5</b>	<b>[kg/m<sup>3</sup>]</b>
Cement	364,65	Cement	373,85
Vatten	182,32	Vatten	186,92
Grus 0-8	843,68	Grus 0-8	864,96
Sten 8-12	418,48	Sten 8-12	429,07
Sten 12-16	418,48	Sten 12-16	429,07
Mässingspån	422,22	Kopparfiber	223,00
<b>Expanderad grafit &amp; Magnetit VCT 0,6</b>	<b>[kg/m<sup>3</sup>]</b>		
Cement	530,29		
Vatten	318,17		
MagnaDense 8S	956,34		
MagnaDense 20S	973,92		
Expanderad grafit	296,45		

### 8.3 IR-försök

Se Appendix A – IR-mätning för mätresultaten av IR-försöken.

### 8.4 HotDisk

Sammanställning av mätresultaten från HotDisk ges i Figur 5 och Tabell 8.



Figur 5 - Sammanställning av HotDisk-resultat för torra betongprov



Tabell 8 - Värmeledningsförmåga, värmekapacitet, värmediffusivitet och värmeeffusivitet för de olika betongerna (torra och fuktiga), uppmätt med HotDisk-instrumentet

Betong med tillsatsmaterial	$\lambda$ [W/(mk)]				$C_v$ [MJ/(m <sup>3</sup> K)]				$a$ [mm <sup>2</sup> /s]				$\varepsilon$ [Ws <sup>-0,5</sup> m <sup>2</sup> K <sup>-1</sup> ]			
	<10% RF*		>95% RF		<10% RF*		>95% RF		<10% RF*		>95% RF		<10% RF*		>95% RF	
Referensbetong	2,4		3,3		1,7		1,8		1,4		1,9		2,0		2,5	
Magnetit	2,5		3,2		2,6		2,1		1,0		1,6		2,5		2,6	
Makro. PCM 10°C/50°C	1,5	1,4	1,6	1,3	1,9	2,0	2,1	3,7	0,8	0,7	0,8	0,4	1,7	1,7	1,8	2,2
Exp. grafit	3,8		5,6		2,0		3,1		2,0		1,8		2,7		4,1	
PCM påsform 10°C/40°C	3,1	2,7	2,4	2,8	2,9	2,8	4,8	2,7	1,1	1,0	0,5	1,1	3,0	2,7	3,4	2,7
PCM emulsion 10°C/40°C	1,6	1,5	1,9	1,6	2,7	2,6	1,8	1,6	0,6	0,6	1,0	1,0	2,0	2,0	1,8	1,6
Stålfiber	2,6		2,9		1,8		1,2		1,5		2,5		2,2		1,8	
Mycket stålfiber	3,4		3,5		2,3		2,5		1,5		1,5		2,8		3,0	
Mikro. PCM 10°C/40°C	1,1	1,1	1,1	1,2	2,1	1,9	2,6	2,5	0,5	0,6	0,5	0,5	1,5	1,5	1,7	1,7
Mässingspån	2,8		3,6		2,0		2,7		1,5		1,4		2,3		3,1	
Kopparfiber	3,7		4,8		1,7		2,3		2,2		2,1		2,5		3,3	
Exp.grafit & Magnetit	3,9		-		2,1		-		1,8		-		2,9		-	
Cementpasta VCT 0,5	1,0		1,1		2,4		2,6		0,4		0,4		1,5		1,6	

\*Betonger med PCM-matetrial är endast torkade ner till ~75% RF

## 8.5 Övriga egenskaper

### Referensbetong

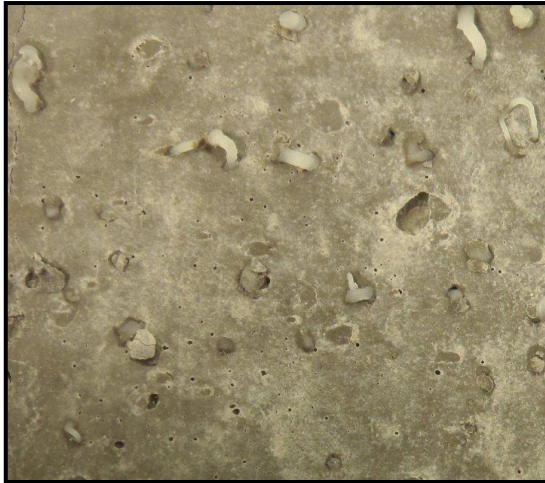
Betongen är referens till utvärderingen av de andra betongblandningarna. Arbetbarheten och gjutbarheten är lik C40/50 betong.

### Betong med magnetit

Kornformen hos MagnaDense är rundare än vanlig krossballast av kvartsit och den färska betongen kändes smidigare än referensbetongen. Kornfördelningen för den första leveransen av MagnaDense 8S saknade de lägre kornfraktionerna och 0-8mm grus tillsattes för att få en god arbetbarhet. På grund av den höga densiteten för magnetit blev betongen betydligt tyngre än referensbetongen, vilket kan försvåra hanteringen. Den sågade ytan hos betong med magnetit fick en mörk kulör, se *Appendix C – Betongytor torr/fuktig*.

### Betong med makroinkapslad PCM

Betong med makroinkapslad PCM var lättbearbetad och kändes kornig på grund av den höga andelen paraffin. Betongreceptet är utformat som ett bruk och saknar därav de största kornfraktionerna. Avsaknaden av stenar i kombination med den låga densiteten för paraffinkulorna bidrar till en lätt betong. Vid uppvärmning över cirka 40-50°C expanderar paraffinet och trycks ut genom betongytorna, se Figur 6. Paraffinkulorna syntes tydligt i den sågade ytan och en jämn fördelning kunde noteras.



Figur 6 - Expandering av makroinkapslad PCM vid 50°C

### **Betong med expanderad grafit**

Den expanderade grafiten har enligt leverantören en smörjande förmåga. Denna egenskap visar sig även på den färska betongen som blev smidig och lättarbetad med expanderad grafit som del av ballast. Den färska betongen får en gråsvart och glansig yta, vilket kan vara ett tecken på lätt vattenseparation. Detta kunde noteras redan efter några sekunders vibrering. Den expanderade grafiten absorberade en del av det tillsatta vattnet och det är oklart om cementen kan utnyttja detta vid härdningen eller om det blir en sänkning av betongens VCT. Den sågade ytan fick en gråglittrig yta som vid beröring färgar av sig, se *Appendix C – Betongytor torr/fuktig*.

Torr betong med expanderad grafit gav utslag vid en resistansmätning med en multimeter vilket indikerar på att betongen leder elektricitet, men storleken på ledningsförmågan är oklar. Stålförmarna rostade i samband med gjutning och härdning. Det är dock oklart om detta har någon koppling till den elektriska ledningsförmågan.

### **Betong med PCM i påsform**

Betong med PCM-fyllda påsar gjöts med samma grundrecept som referensbetongen och beter sig således på liknande sätt. Fördelen med tillsatsmaterialet är att oavsett vilken betong som gjuts, så kan PCM i påsform användas. PCM påsarna medförde flera problem i samband med gjutning och härdning av betongen. Påsarna har, med sin glatta metalliska yta, i princip ingen vidhäftning mot betongen. Betongen sprack i snittet där påsarna låg, troligtvis på grund av ojämn krympning. Påsen fick även frätskador vilka kan bero på det höga pH som råder i cementpastan.

### **Betong med PCM som emulsion**

Färsk betong med PCM som emulsion hade en seg konsistens som påminde om lera. Den färska betongen fick även en god inre vidhäftning och det gick att forma betongen som en boll, vilket inte har varit möjligt med någon annan av de testade betongerna. Betongen härdade dock dåligt med PCM som emulsion och kunde avformas först efter 2 dygn. Vid sågning lossnade ballastkorn från cementpastan vilket tyder på dålig vidhäftning mellan ballastkornen och cementpastan, se *Appendix C – Betongytor torr/fuktig*.

Vattencementtalet ökades till 0,7 då betongen inte var gjutbar vid VCT 0,5. Emulsionen innehöll 45 vikt-% vatten men detta kunde troligtvis inte utnyttjas fullt ut av cementen.

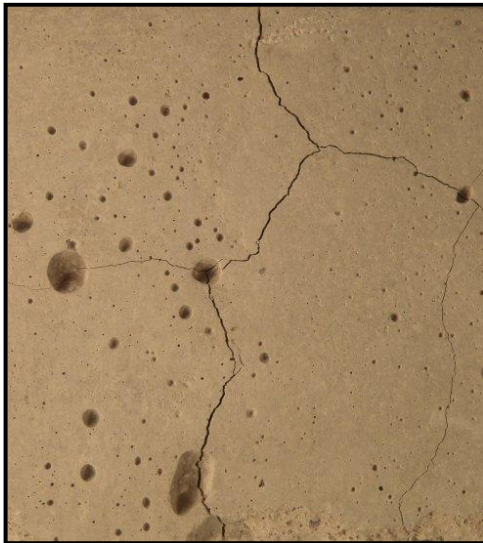
### **Betong med stålfiber**

Stålfiberna bildade tussar som hindrade ballasten att fördela sig jämt i betongen. Det resulterade i bildandet av håligheter och gjorde betongen svårvibrerad. Den färska betongen var svårbehandlad på grund av de utstickande stålfibrerna. Vid vibrering placerades fibrerna främst i det horisontella planet, vilket kunde noteras när betongen var sågad längs alla snitt. Under försöksperioden noterades kraftig rostbildning på den sågade ytan.

### **Betong med mikroinkapslad PCM**

Den färska betongen med Micronal var smidig att arbeta med och konsistensen liknade färsk betong med PCM som emulsion. Betongen är utformad som ett bruk och saknar därav de största kornfraktionerna. Avsaknaden av stenar i kombination med den låga densiteten för paraffinkulorna bidrar till en relativt lätt betong. Kornfraktionerna mindre än 0,5 mm avskiljdes från gruset för att andelen finmaterial, inklusive paraffinkulorna, inte skulle dominera kornfördelningen.

Ytporer bildades på den härdade betongen vilket kan bero på bristfällig vibrering eller brist på finmaterial [26], se Figur 7. Troligen beror ytporerna på att andelen finmaterial blev för låg efter siktning av gruset. Vid upphettning till 40 °C sprack även betongen, se Figur 7. Sprickbildningen kan bero på den kraftiga uttorkningen vid hög temperatur i kombination med låg andel ballast.



**Figur 7 - Sprickor och ytporer hos betong med mikroinkapslad PCM**

### **Betong med mässingspån**

Arbetbarheten för den färska betongen kan beskrivas som relativt god men mässingspånets vasshet bidrog till en stickig betongmassa. Vibreringsbehovet var något högre än för referensbetongen, vilket kan grunda sig i mässingspånets form. Mässingspånets form gjorde det däremot möjligt att blanda i större volymprocent mässing än stålfiber och fortfarande erhålla en gjutbar betong. På grund av den höga andelen mässing blev den färska betongen väldigt styv. Krympkropparna fick fläckvis mörk nyans som kan bero på överflöd av formolja i gjutformarna [26]. Den sågade ytan var glansig guldm metallisk.

### **Betong med klippt koppartråd**

Betong med klippt koppartråd arbetbarhet påminde mycket om betong med stålfiber men var mer lättbearbetad och mindre benägen att bilda tussar. Troligtvis beror den smidigare arbetbarheten på att koppartrådarna var både tjockare och mjukare än stålfiber. Kopparfiberna syntes tydligt på betongens sågade yta, se *Appendix C – Betongytor torr/fuktig*.

### **Betong med magnetit och expanderad grafit**

Arbetbarheten för betongen var lik expanderad grafit men den färska betongen var tyngre. Även denna betong fick en glansig yta med flingor av expanderad grafit som flöt upp. Betongen hade en mörk kulör då både magnetit och expanderad grafit är svart.

## 8.6 Beräknade termiska egenskaper

Vid beräkning av de termiska egenskaperna har ingen hänsyn tagits till hydratationsgraden. Porositeten i cementpastan har beräknats med ekvation 9. De termiska egenskaperna för cementpasta ges av Tabell 4. Tabell 9 visar en jämförelse mellan de uppmätta värdena med HotDisk och de beräknade termiska egenskaperna för betongerna.

Tabell 9 - Beräknade och uppmätta termiska egenskaper för betonger med olika tillsatsmaterial. Beräknade värden är markerade med vit bakgrund

	Referensbtg	Magnetit	Makro.PCM	Exp.Graf.	PCM Emul.	Stålfiber	M. Stålfiber	Mikro. PCM	Miässing	Koppar	Exp.Graf. & Magn.
$\lambda$ torr [W/mK]	3,1	2,9	1,4	2,4	2,2	3,3	3,3	1,4	3,6	3,4	2,2
	2,4	2,5	1,5	3,8	1,6	2,6	3,4	1,1	2,8	3,7	3,9
$\lambda$ fuktig [W/mK]	3,7	3,3	1,8	3,0	2,7	3,9	3,9	1,8	4,2	4,0	2,7
	3,3	3,2	1,6	5,6	1,9	2,9	3,5	1,1	3,6	4,8	-
$c_v$ torr [MJ/m <sup>3</sup> K]	1,8	2,3	1,8	1,4	2,5	1,8	1,8	1,5	1,8	1,8	1,7
	1,7	2,6	1,9	2	2,7	1,8	2,3	2,1	2,0	1,7	2,1
$c_v$ fuktig [MJ/m <sup>3</sup> K]	1,9	2,4	2,0	1,6	2,6	1,9	1,9	1,7	2,0	1,9	1,9
	1,8	2,1	2,1	3,1	1,8	1,2	2,5	2,6	2,7	2,3	-
$a$ torr [mm <sup>2</sup> /s]	1,8	1,3	0,8	1,7	0,9	1,9	1,8	0,9	2,0	1,9	1,3
	1,4	1,0	0,8	2	0,6	1,5	1,5	0,5	1,5	2,2	1,8
$a$ fuktig [mm <sup>2</sup> /s]	1,9	1,4	0,9	1,8	1,1	2,0	2,0	1,1	2,1	2,1	1,4
	1,9	1,6	0,8	1,8	1,0	2,5	1,5	0,5	1,4	2,1	-
$\epsilon$ torr [Ws <sup>-0,5</sup> m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> ]	2,3	2,6	1,6	1,9	2,3	2,4	2,4	1,5	2,6	2,5	2,0
	2,0	2,5	1,7	2,7	2,0	2,2	2,8	1,5	2,3	2,5	2,9
$\epsilon$ fuktig [Ws <sup>-0,5</sup> m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> ]	2,7	2,8	1,9	2,2	2,6	2,7	2,8	1,8	2,9	2,8	2,3
	2,5	2,6	1,8	4,1	1,8	1,8	3,0	1,7	3,1	3,3	-

## 9 Analys

### 9.1 Termiska egenskaper

#### Referensbetong

Enligt HotDisk-resultaten har referensbetongen förhållandevis hög värmeledningsförmåga vilket beror på att ballasten i betongen består av kvartsit. Kvartsit har betydligt högre värmeledningsförmåga än många andra mineraler som är vanliga ballastmaterial, se Tabell 4.

Det fuktiga provet av referensbetong har en kraftigt ökad värmeledningsförmåga jämfört med det torra provet. Betongens porer antas vara vattenfyllda vid mätning och eftersom vattnets värmeledningsförmåga är högre än luftens, så bör den fuktiga betongen ha högre värmeledningsförmåga. Värmekapaciteten är marginellt större för det fuktiga provet av referensbetongen men enligt enklare kompositmodellberäkningar bör värmekapaciteten vara högre eftersom vatten har en betydligt högre värmekapacitet än luft.

Referensbetongens värmelagrande förmåga visas i IR-försöket, där gips och mineralull jämförts med referensbetongen. Det tar längre tid för betongkroppen att anpassa sin temperatur jämfört med gips och mineralull vilket beror på att betongen har en högre termisk tröghet.

#### Magnetit

Den uppmätta värmeledningsförmågan hos betong med magnetit är i storleksordningen samma som för referensbetongen men den har däremot en kraftigt förhöjd värmekapacitet. Magnetit har en lägre specifik värmekapacitet än kvartsit men på grund av dess mycket höga densitet har magnetiten en högre volumetrisk värmekapacitet. Det är därför naturligt med en ökning av värmekapaciteten. Den fuktiga magnetitbetongen påvisade en högre värmeledningsförmåga, men var en av flera provkroppar som visade en sänkt värmekapacitet vid hög relativ fuktighet. Orsaken till sänkningen verkar bero på att HotDisk-instrumentet har svårt att mäta värmekapaciteten på fuktig betong, då spridningen av mätresultaten är större för de fuktiga proven, se *Appendix B – Sammanställning av HotDisk-resultat*. Det är dock oklart varför det är så. Den högre värmekapaciteten medför en tydlig ökning av den värmelagrande effekten jämfört med referensbetongen, se resultat för betong med magnetit i *Appendix A – IR-mätning*.

### **Makroinkapslad PCM**

Betong med makroinkapslad PCM får enligt HotDisk-mätningarna betydligt lägre värmeledningsförmåga men något ökad värmekapacitet jämfört med referensbetongen, utan hänsyn tagen till fasomvandlingen. Berörda termiska egenskaper påverkas inte nämnvärt före och efter fasomvandling för de torra proven. Försöket vid 50 °C påvisade däremot en fördubbling av värmekapaciteten vid fuktmättat prov, jämfört med torrt prov i samma temperatur. Denna kraftiga ökning uppstod inte vid mätning i 10 °C vilket kan bero på maskning av paraffinet. Paraffinet blöder ut och bildar ett skikt på mätsensorn som då inte mäter korrekt.

Vid IR-försök beter sig betongen med makroinkapslad PCM som betong med mikroinkapslad PCM. Skillnaden är den högre smältpunkten som kräver högre temperatur för att fasomvandla och avge dess latent energi. Detta resulterar i att värmepuckeln uppstår vid en högre temperatur. För utförligare förklaring se analys av betong med mikroinkapslad PCM längre fram. Till skillnad från de övriga betonger med PCM får betong med makroinkapslad PCM en högre topptemperatur än referensbetongen. Värt att notera är att mätningen utfördes med IR-lampan 11 cm över betongen för både referensbetongen och betongen med PCM. Om beteendet är speciellt för makroinkapslad PCM är oklart då det inte gjorts fler mätningar.

### **Expanderad grafit**

Enligt HotDisk-mätningarna har betong med expanderad grafit mycket högre värmeledningsförmåga än referensbetongen, främst vid ökad fukthalt. Den sågade ytan visar att tillsatsmaterialet är jämt fördelat i cementpastan vilket sedermera bidrar till en jämn och hög värmeledningsförmåga i betongen. Värmekapaciteten ökar något för det torra provet jämfört med referensbetongen men ökar kraftigt när provet är fuktigt. Orsaken till den kraftiga påverkan av fukt kan bero på att porositeten för betongen är hög och kan således lagra mycket vatten.

Under IR-försöket uppförde sig betong med expanderad grafit nästan identiskt med referensbetongen, både i uppvärmningsfasen och i avsvlningsfasen. Skillnaden mellan betongerna är att betongen med expanderad grafit har en högre värmeeffusivitet och har därmed ett större energiinnehåll. Ingen tidsförskjutning av värmeavgivningen kunde utläsas ur diagrammet i *Appendix A – IR-mätning*.

### **PCM i påsform**

HotDisk-instrumentet kan mäta på homogena material. Betong med PCM i påsform är inte ett homogent material och kunde därför inte mätas med tillräcklig tillförlitlighet.

Den stora mängden salt som finns i påsarna kräver stor mängd energi för att fasomvandlas vilket sänker topptemperaturen i betongen under IR-försöket. I avsvlningsfasen kunde en tydlig fasomvandling urskiljas i diagrammet *Appendix A – IR-mätning*.



### **PCM som emulsion**

Emulsion med paraffin i betong minskade värmeledningsförmågan och bidrog till en kraftig ökning av värmekapaciteten jämfört med referensbetongen, enligt HotDisk-mätningarna av torrt material. Den stora minskningen av värmekapaciteten för det fuktiga provet är uppseendeväckande. Denna minskning stämmer inte överens med beräknad värmekapacitet, se Tabell 8. Betongen beter sig dock likvärdigt vid båda försökstemperaturerna.

Den värmelagrande effekten, för betong med PCM som emulsion, påminner om betong med mikroinkapslad PCM. Den fasomvandlande effekten är dock inte lika påtaglig, *Appendix A – IR-mätning*. Betongen innehåller större kornfraktioner av ballast till skillnad från betongerna med paraffinkulorna och har dessutom något högre värmeledningsförmåga och högre värmekapacitet. Tillsammans ger dessa egenskaper en större värmeeffusivitet, enligt ekvation 5, och därmed ett högre energiinnehåll jämfört med de övriga PCM-betongerna.

### **Stålfiber**

Den torra betongkroppen med stålfiber fick enligt HotDisk-resultaten en högre värmeledningsförmåga men samma värmekapacitet som referensbetongen vilket även är resultatet av kompositmodellberäkningarna. För det fuktiga provet uppmättes en betydligt lägre värmekapacitet än för det torra provet vilket inte stämmer överens med beräkningarna givna i Tabell 9. Anledningen till att resultaten blir konstiga för stålfiber är att dessa fiber inte ligger slumpvis ordnade eftersom de inte kan gå genom ytan. Precis under ytan bör det ligga många fiber parallellt och detta kanske kan göra så att HotDisken inte mäter rätt.

Vid uppvärmning i IR-försöket uppnådde betongen cirka 3 K högre topptemperatur än referensbetongen, *Appendix A – IR-mätning*. Den ökade topptemperaturen beror på den högre värmeledningsförmågan som leder in värmen fortare i betongen.

### **Betong med mycket stålfiber**

Betong med mycket stålfiber har både högre värmekapacitet och värmeledningsförmåga jämfört med referensbetongen, enligt de uppmätta resultaten i HotDisk-instrumentet. De uppmätta resultaten stämmer överens med de beräknade värden, se Tabell 9.

Resultatet av IR-försöket är likt resultatet för betong med stålfiber, men betongen med den större mängden stålfiber har en lägre topptemperatur, se *Appendix A – IR-mätning*. Värmediffusiviteten för referensbetongen och betongerna med stålfiber är i princip lika stor, men IR-försöket indikerar istället på olika värmediffusivitet. Orsaken till detta kan vara fördelningen av stålfiberna i betongen. Mängden stålfiber som är placerade mellan termoelementen är kopplat till värmeledningsförmågan för området.

### **Mikroinkapslad PCM**

Betong med mikroinkapslad PCM har liknande påverkan på de termiska egenskaperna som makroinkapslad PCM, enligt HotDisk-resultaten. Betongen har mycket lägre värmeledningsförmåga än referensbetongen men ökad värmekapacitet. Enligt beräkningarna ökar värmeledningen för fuktig betong men HotDisk-resultaten visar ingen ökning. Det fuktiga betongprovet har högre värmekapacitet vilket däremot stämmer överens med beräkningarna.

I IR-försöket fick betongen med mikroinkapslad PCM ca 5 K lägre topptemperatur än referensbetongen vilket tyder på en lägre värmeledningsförmåga eller en hög värmekapacitet. En låg värmeledningsförmåga medför en långsammare inlagring och en högre värmekapacitet kräver mer energi för att betongen ska öka sin temperatur. Båda egenskaperna hjälper till att hålla nere topptemperaturen vid uppvärmning av betongen. Paraffinet kräver dessutom energi för att fasomvandla till flytande fas vilket förstärker effekten ytterligare. Den låga värmeeffusiviteten medför att betongen inte hinner lagra så mycket energi under försöket. Vid avsvälning avger betongen den latent energi som lagrades vid uppvärmningen. Effekten syns i form av en temperaturpuckel i IR-diagrammen och ger en tydlig värmelagring jämfört med referensbetongen. Kurvan given i *Appendix A – IR-mätning*, stämmer överens med resultaten givna av HotDisk-försöken.

### **Mässingspån**

Mässing har nästan en dubbelt så stor värmeledningsförmåga jämfört med stål. Trots detta visar HotDisk-resultaten på att den torra betongen med mässingspån har en lägre värmeledningsförmåga än betong med stålfiber, trots den höga volymprocenten tillsatsmaterial. Den torra betongen har lite högre värmekapacitet och värmeledningsförmåga jämfört med referensbetongen, men ökningarna är betydligt större för det fuktiga materialet. Orsaken till detta kan möjligtvis kunna förklaras med en hög porositet som bildats på grund av mässingspånens form. Betong med hög porositet kan innehålla stora mängder med vatten och får därför också större inverkan på betongen.

IR-resultatet visar en kurva som är lik den från försöket med referensbetongen. Skillnaden är att mässingen har en högre värmeeffusivitet dvs. en snabbare inlagring och därmed också ett högre energiinnehåll vid samma temperatur. Avsvälningssfasen är likadan som för referensbetongen.

### **Klippt koppartråd**

Betong med klippt koppartråd visar, enligt HotDisk-resultaten, en kraftigt ökad värmeledningsförmåga jämfört med referensbetongen. Trots koppars extremt höga förmåga att leda värme visar ändå betong med expanderad grafit och magnetit lika hög värmeledningsförmåga. Den volumetriska värmekapaciteten är densamma som för referensbetongen och beror på att det endast är en liten andel koppar i betongen.

IR-resultaten visar att kopparbetongen inte når lika hög topp- och sluttemperatur som referensbetongen men det beror på att den omgivande temperaturen skiljer sig åt, se *Appendix A – IR-mätning*.

### **Magnetit & expanderad grafit**

Betong med magnetit och expanderad grafit visar en lite högre volumetrisk värmekapacitet än referensbetongen enligt HotDisk-resultaten. Värmeledningsförmågan är hög och beror av den finfördelade expanderade grafiten.

IR-resultaten i *Appendix A – IR-mätning* visar även här en lägre topp- och sluttemperatur. Återigen är omgivande temperatur inte lika då mätningar för referensbetongen samt betong med magnetit och expanderad grafit genomfördes.

## 9.2 Krympning

Avsnittet är kopplat till krympningsresultat givna i Tabell 7 och *Appendix F – Krympning*.

Cementpasta i betong krymper vid uttorkning men krympningen hos ballasten är minimal i jämförelse, varpå mängden cementpasta är av stor betydelse. Betongkropparna torkar fortast i hörnen och på ytan vilket medför att det blir högst fukthalt i mitten av betongen. Utsidan av betongen torkar och krymper men de inre delarna torkar inte lika snabbt och krymper därför inte lika mycket. Den ojämna krympningen medför att det uppstår dragpåkänningar i betongen och det finns risk att betongen spricker. Detta fenomen inträffade för betongen med mikroinkapslad PCM, se Figur 9. En högre andel ballast minskar andelen krympande cementpasta vilket medför en mindre ojämna krympning och därmed minskas risken för krympsprickor. För att få jämnare krympning ska betongen härda i kontrollerat klimat där den relativa fuktigheten sjunker långsamt och medför en jämnare fuktnivå i betongen.

För de flesta betonger har krympningen nästan stagnerat efter cirka 20 dagar. De betonger som visar tendens på fortsatt krympning är kropparna bestående av endast cementpasta och betongerna med mikroinkapslad PCM. Det är dessutom samma krympkroppar som har störst uppmätt krympning. Betongerna med stålfiber, magnetit och mässingspån krymper mindre än referensbetongen på grund av mindre andel cementpasta och större andel styv ballast i betongen. Betongen med emulsion härdade dåligt vilket medförde att mät dubbarna inte fick tillräcklig vidhäftning mot betongen. Den stora krympningen som uppmättes de första 5 dagarna beror troligtvis på nedtryckning av mät dubbarna.

## 10 Diskussion och slutsats

Betonger med mikro- och makroinkapslad PCM har visat sig ge en förbättrad värmelagrande effekt jämfört med vanlig betong. Hållfastheten i dessa typer av betong är förhållandevis låg och lämpar sig främst som övergjutningar som inte är lastbärande. Fördelen med PCM i påsform är att placeringen av påsen är flexibel och att en vanlig betong kan användas. Påsen placeras där bättre värmelagring önskas. Nackdelen är att påsen påverkar hållfastheten i betongtvärsnittet, vilket måste tas i beaktning. Påsen har uppvisat frätskador vid ingjutning så dess hållbarhet i betong bör undersökas vidare. Betong med PCM som emulsion visade samma goda värmelagrande effekt som övriga betonger med fasomvandlingsmaterial. Problemet är att betongens hållfasthet är undermålig och kan inte användas i nuvarande recept. Tillsatsmaterialet är inte avsett att användas för betong men försöken har visat att det finns potential att utveckla denna typ av betonger.

Betong med magnetit uppvisade god värmelagrande förmåga samtidigt som hållfastheten är hög. Denna betong kan därför användas i lastbärande konstruktionsdelar och samtidigt vara värmelagrande. Den strömförande egenskapen hos betong med expanderad grafit kan innebära att den lämpar sig som golvmaterial med verksamhet som är känslig för elektrostatiske laddningar. Om betongen avses användas som golvmaterial bör slitstyrkan undersökas. Mässingspån eller stålfiber i betong ger en kraftig påverkan på de termiska egenskaperna vid låg volymandel. Dessa typer av betong har hög hållfasthet och lämpar sig till bärande konstruktioner, där en förbättrad värmeledningsförmåga önskas.

PCM i betong påvisade i samtliga fall en förbättrad värmelagrande förmåga. Det finns potential i betong med fasomvandlingsmaterial men de undersökta PCM-produkterna behöver utvecklas för att ge en tillräckligt god beständighet. Betong med tung ballast och hög värmekapacitet kan absorbera mycket värme utan större temperaturökning. Konstruktionsdelar som är utsatta för hög momentan värmebelastning kan utnyttja termisk tröghet, exempelvis golv och väggar med stark solinstrålning.

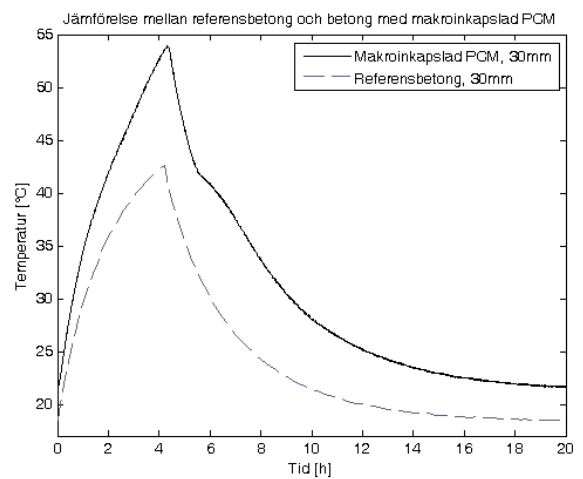
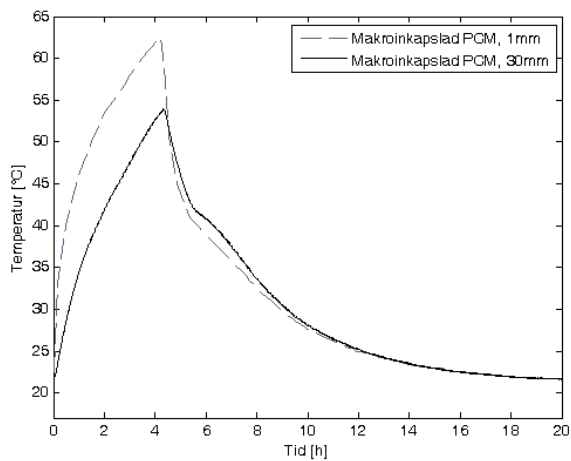
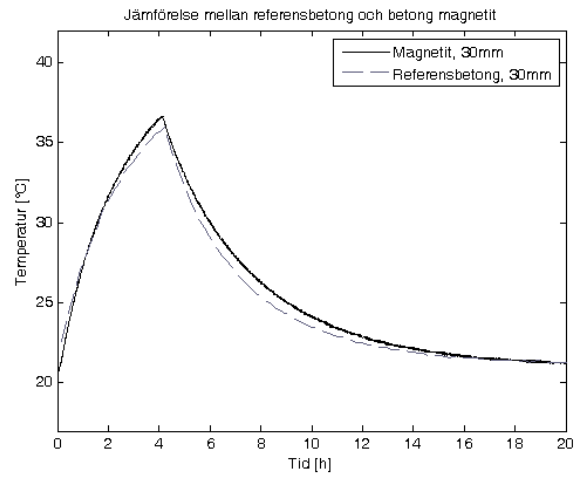
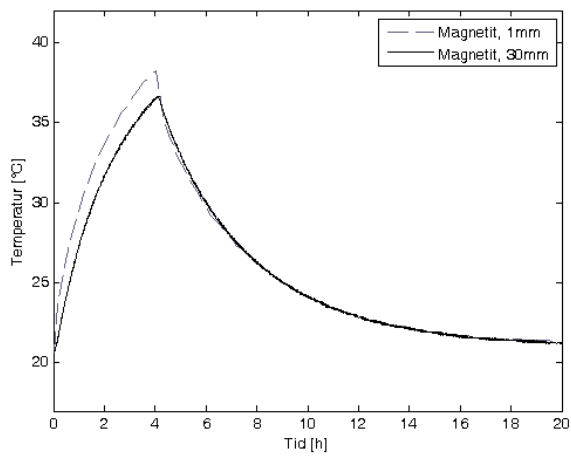
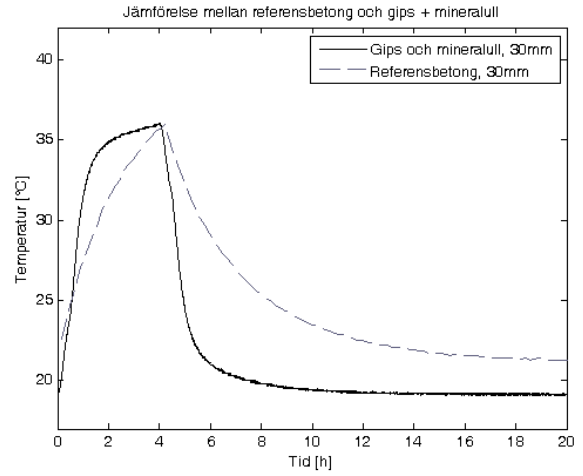
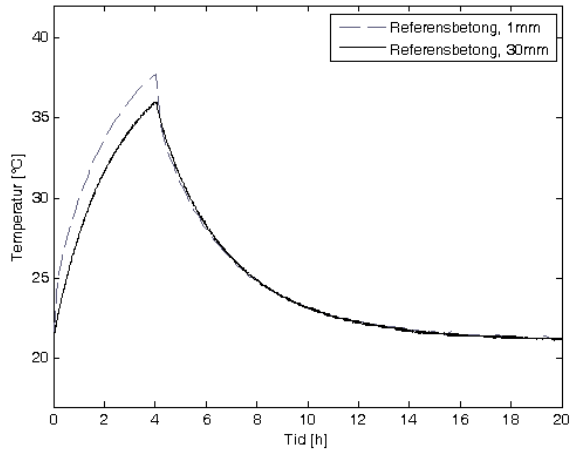
Undersökta tillsatsmaterial är i många fall dyra jämfört med vanlig betong och bör således gjutas i skikt. Det krävs dock ytterligare undersökningar för att fastställa hur tjocka betongskikt som behövs gjutas för att få bra effekt med avseende på priset. Energibehovet kan undersökas med hjälp av gjutna minihus där förutsättningarna liknar verkligheten. Uppvärmningsbehovet och temperaturen kan registreras i två olika hus, ett med referensbetong och exempelvis ett hus med tung ballast som bjälklag. Effekttopparna minskas då den tunga ballasten jämnar ut temperaturtopparna som uppstår och på så sätt behövs inte de kraftiga momentana effektbehoven.

## 11 Referenser

1. Miljödepartementet. *Sveriges miljöpolitik i EU*. 2004 2010-10-08 [använd 2010 2010-12-20]; Tillgänglig: <http://www.sweden.gov.se/sb/d/2040>.
2. Naturvårdsverket. *Miljömål*. 2010 [använd 2010 2010-12-20]; Tillgänglig: <http://www.miljomal.se/>.
3. The Concrete Center, *Thermal Mass : A concrete solution for the changing climate*. 2005.
4. Nevander, L.E., Elmarsson, B., *Fukthandbok - Praktik och teori*. 2006: Svensk byggtjänst.
5. Energilotsen. *Handledning för arkitektens energi- och inneklimatanalyser*.
6. Avd. Energiteknik, *Redogörelse Värmetransport*, Luleå tekniska högskola.
7. Biasioli, F., Öberg, M. *Concrete for energy efficient and comfortable buildings*. in *International Conference on Sustainability in the Cement and Concrete Industry*. 2007. Norway.
8. Tammo, K., *Energilagringen i betong kan förbättras med andra material, Betong*. 2010, Betongföreningen. p. 44-46.
9. Rijksena, D.O., Wissea, C.J., van Schijndelb, A.W.M., *Reducing peak requirements for cooling by using thermally activated building systems* Energy and Buildings, 2010. **42**(3): p. 298-304
10. F. Cabeza, L., Castellón, C., Nogués, M., Medrano, M., Leppers, R., Zubillaga, O., *Use of microencapsulated PCM in concrete walls for energy savings*. Energy and Buildings, 2007. **39**(2): p. 113-119.
11. AB Svensk Byggtjänst, *Betonghandbok - Material*. Vol. Utgåva 2. 1994, Stockholm.
12. Waples, W.D., Waples, S. J., *A Review and Evaluation of Specific Heat Capacities of Rocks, Minerals, and Subsurface Fluids. Part 1: Minerals and Nonporous Rocks*. Natural Resources Research, 2004. **13**(2): p. 97-122.
13. Clauser, C., Huenges, E. (1995) *Thermal Conductivity of Rocks and Minerals*.
14. Malmö Högskola, *Kapitel 4 - Värme*, Avd. Byggnadsmaterial.
15. Bentz, D.P., *Transient plane source measurements of the thermal properties of hydrating cement pastes*. Materials and structures, 2007. **40**(10): p. 1073-1080.
16. MINELCO MagnaDense, *Minelco MagnaDense 2*. 2009.
17. Company, B.T.C., *Provisional specification data sheet - Micronal DS 5007 X*. 2008.
18. Mølgaard, J., Smeltzer W. W. , *Thermal Conductivity of Magnetite and Hematite\**. Journal of applied physics, 1971. **42**(9): p. 3644-3647.
19. The Engineering ToolBox, *Solids and Metals - Specific Gravities*.
20. The Engineering ToolBox, *Liquids and Fluids - Specific Heat Capacities*.
21. The Engineering ToolBox, *Thermal Conductivity of some common Materials*.
22. Wang, C., Zhang, P., Wang R. Z., *Investigation of Solid–Gas Reaction Heat Transformer System with the Consideration of Multistep Reactions*. AIChE, 2008. **54**(9).
23. Afanasov, I.M., Savchenko, D. V., Ionov, S. G., Rusakov, D. A., Seleznev, A. N. and Avdeev V. V., *Thermal Conductivity and Mechanical Properties of Expanded Graphite*. Inorganic Materials, 2009. **45**(5): p. 486-490.

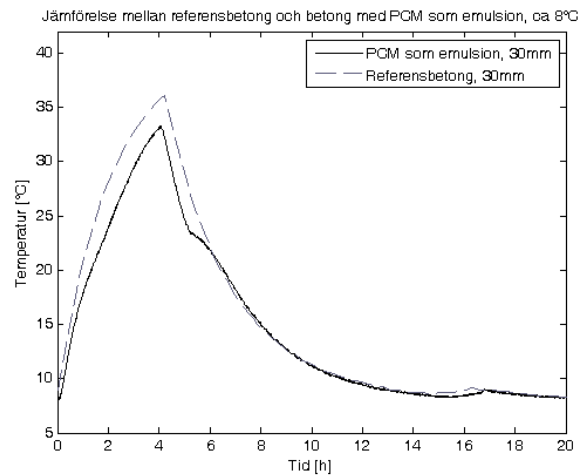
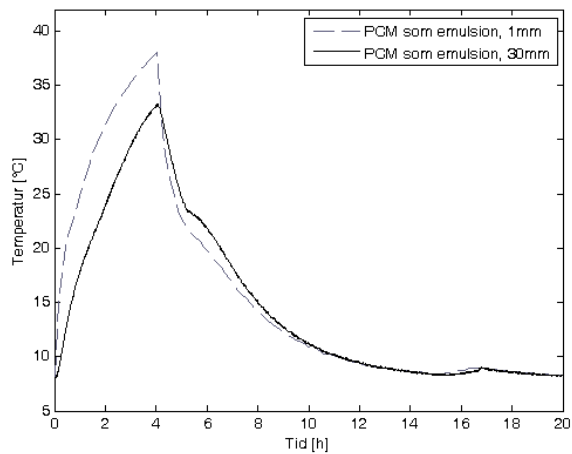
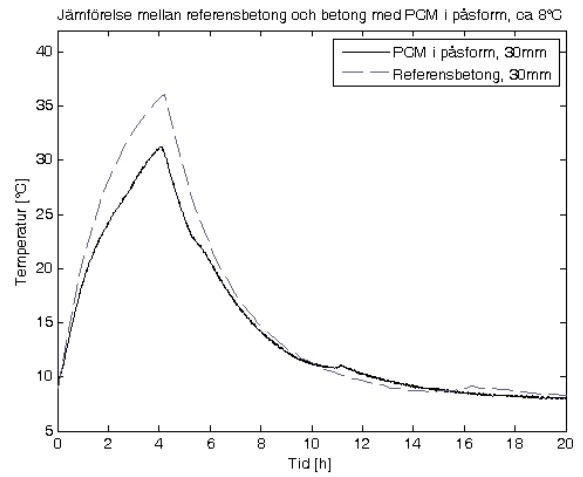
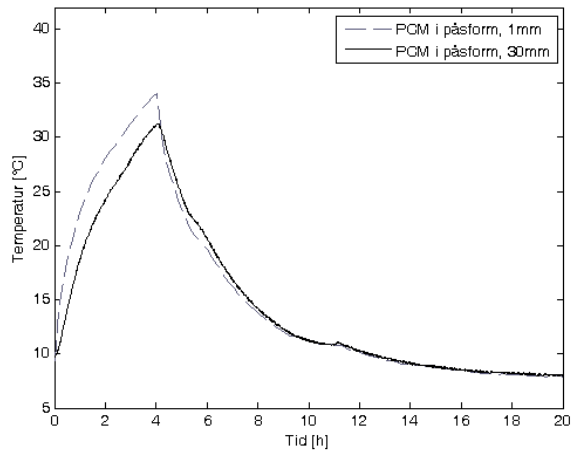
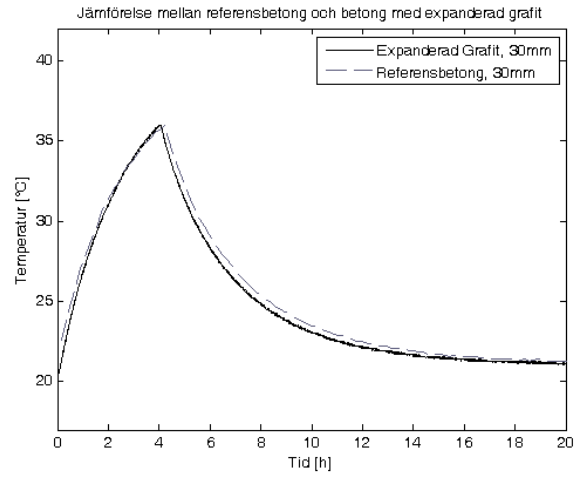
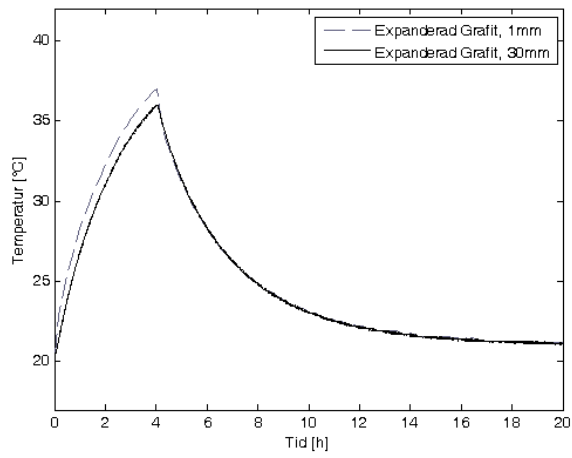
24. diracdelta.cu.uk, *Specific Heat Capacity*, i *science & engineering encyclopedia*.
25. Avd. för byggnadsmaterial LTH, *Kompedium i Byggnadsmaterialvetenskap*. 2008, Lund.
26. Statens råd för byggnadsforskning, *Betongens yta*. 1986.

## 12 Appendix A - IR-mätning

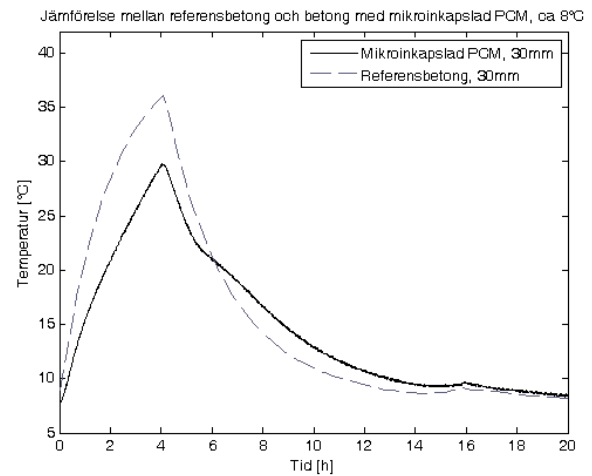
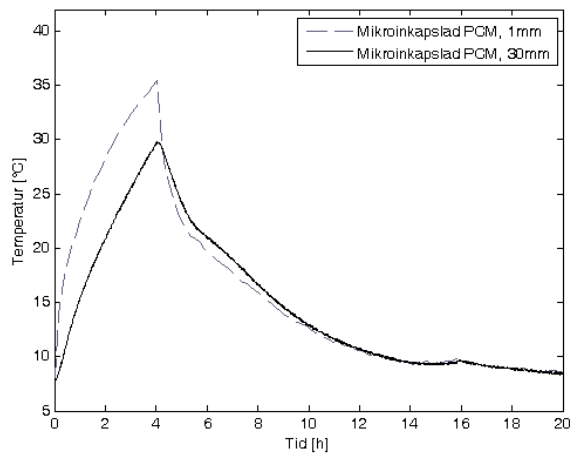
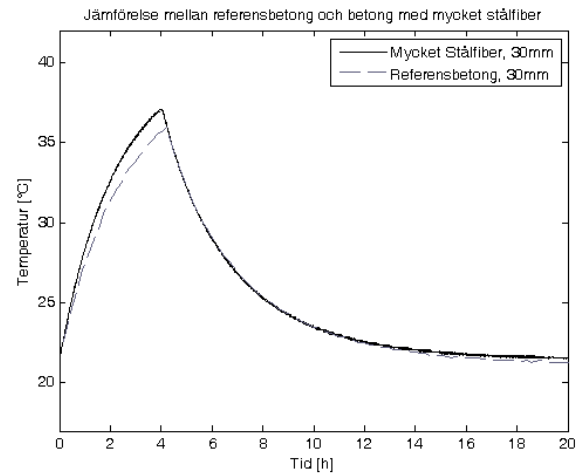
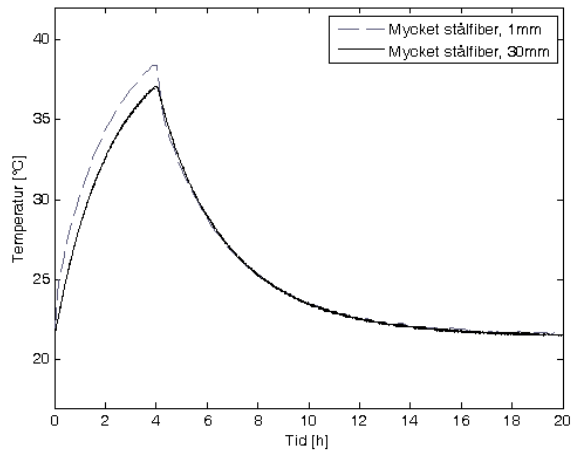
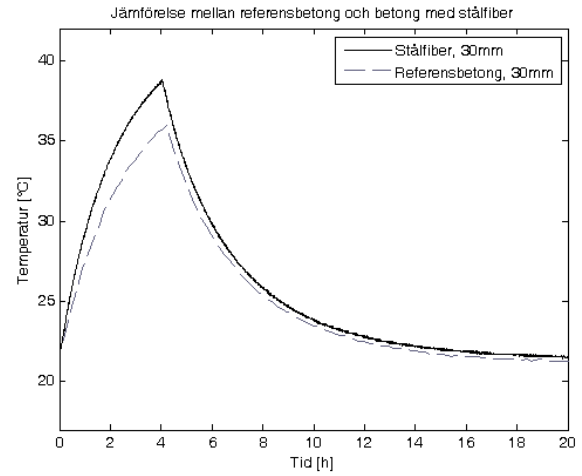
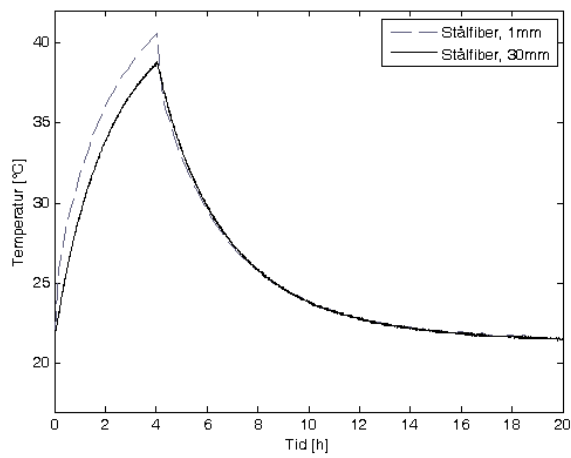




## En studie av möjligheten att öka den värmelagrande förmågan hos betong

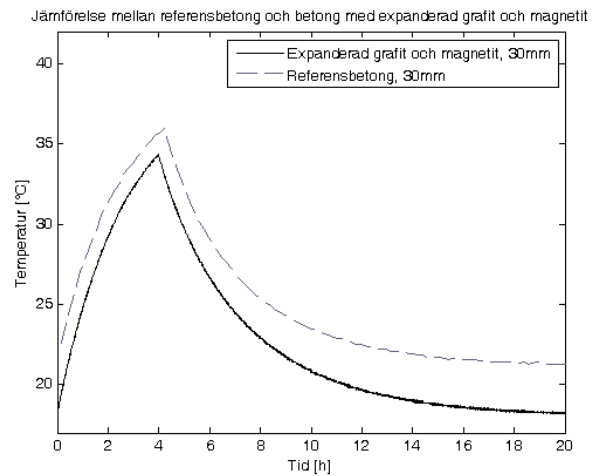
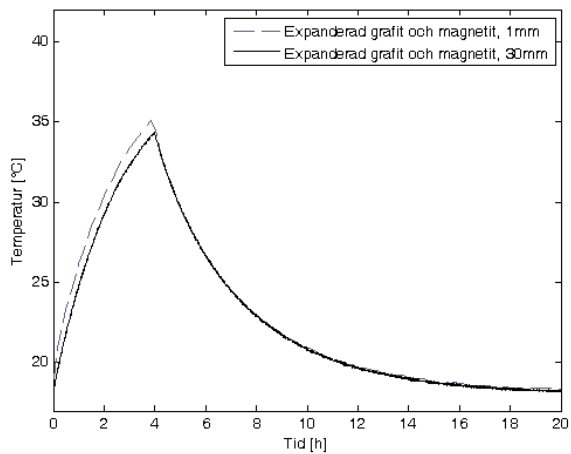
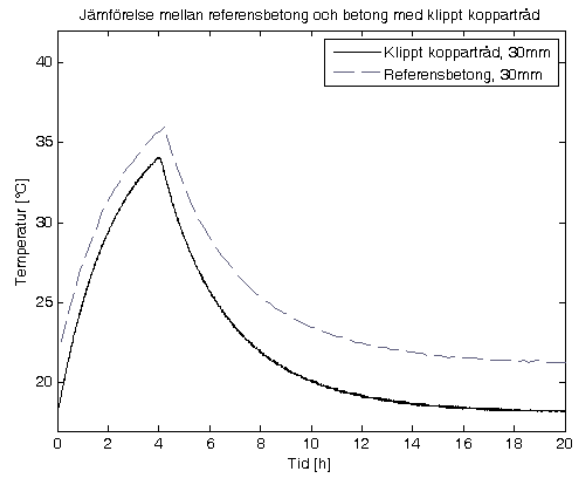
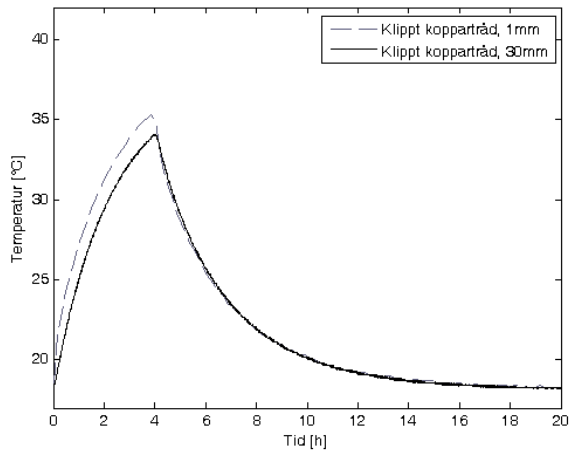
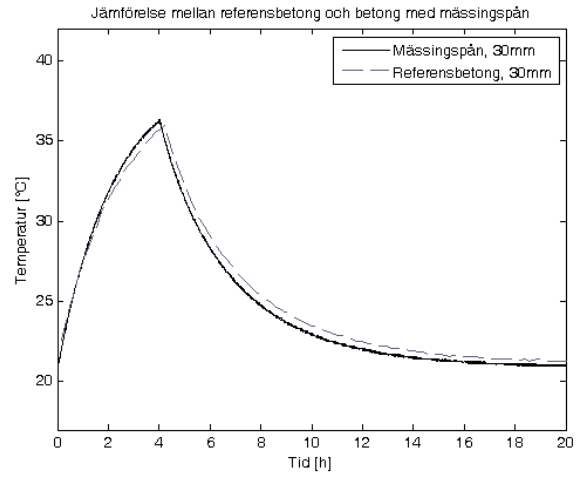
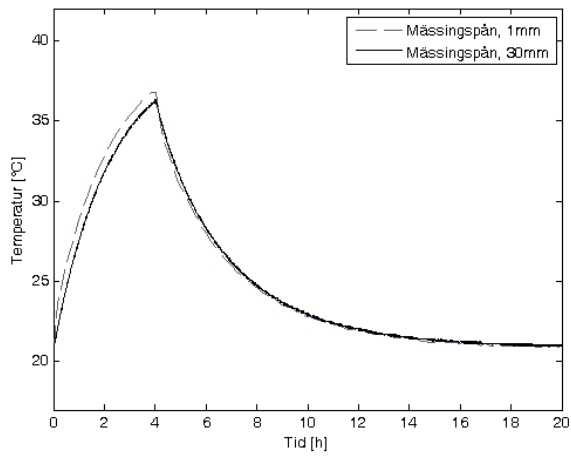


## En studie av möjligheten att öka den värmelagrande förmågan hos betong

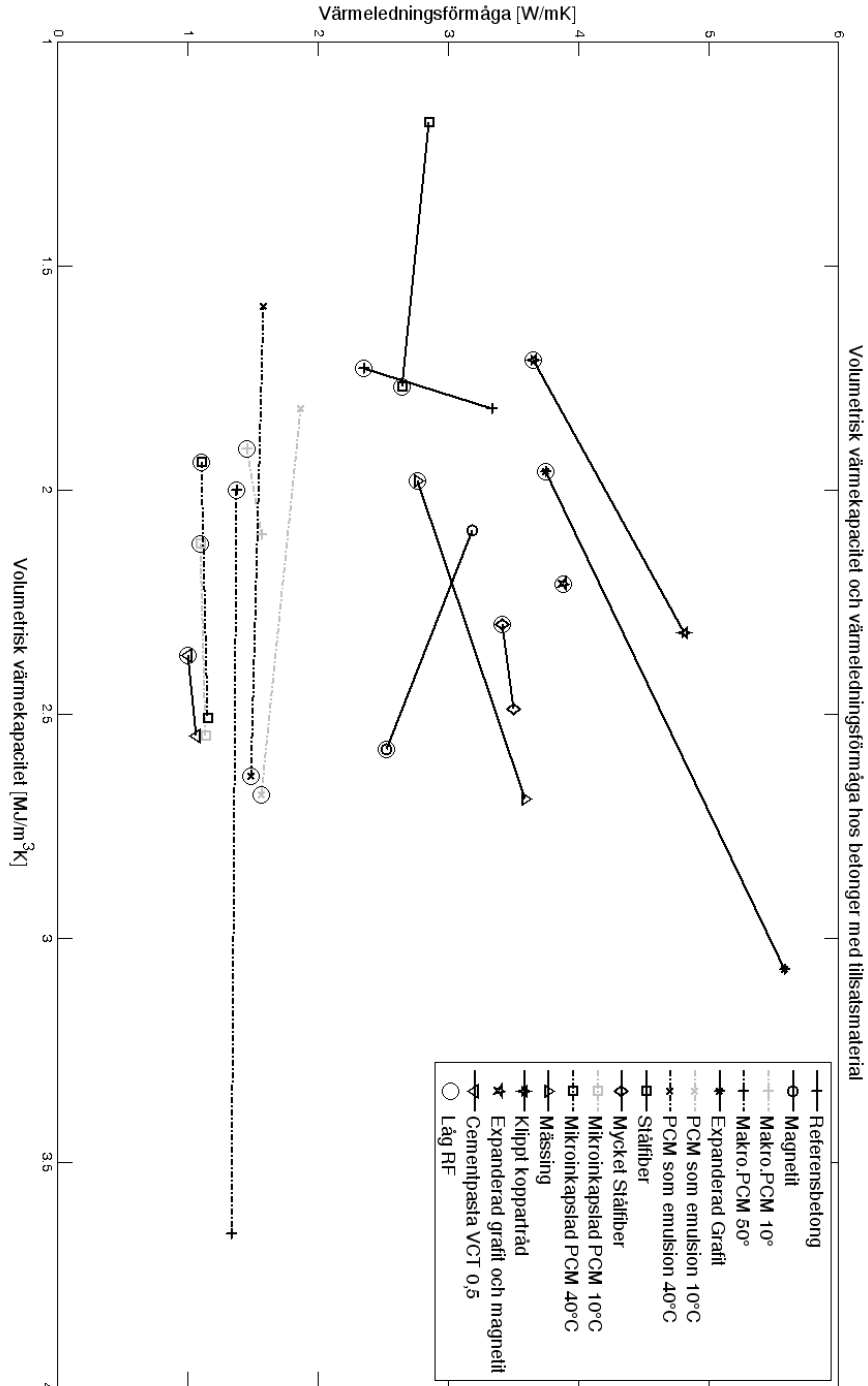


Knycken i diagrammen visar sig för mätningar utförda i det kalla rummet. Rummet hade ett kylaggregat som avfrostades varje natt vilket bidrog till en temporär temperaturhöjning.

## En studie av möjligheten att öka den värmelagrande förmågan hos betong



## 13 Appendix B – Sammanställning av HotDisk-resultat



Figur 8 - Volumetrisk värmekapacitet och värmeledningsförmåga hos betong med tillsatsmaterial. Linjerna anger sammankopplingen mellan fuktigt och torrt prov men anger inte ett linjärt samband

En studie av möjligheten att öka den värmelagrande förmågan hos betong

Referensbetong				Refrensbetong >95% RF			
	$\lambda$ [W/mK]	a [mm <sup>2</sup> /s]	cv [MJ/m <sup>3</sup> K]		$\lambda$ [W/mK]	a [mm <sup>2</sup> /s]	cv [MJ/m <sup>3</sup> K]
	2,31	1,10	2,10		3,27	1,85	1,77
	2,30	1,40	1,64		3,27	1,53	2,13
	2,37	1,34	1,77		3,25	1,42	2,30
	2,20	1,20	1,84		3,32	1,87	1,78
	2,36	1,38	1,70		3,29	1,96	1,68
	2,33	1,35	1,73		3,26	1,77	1,84
	2,49	1,53	1,62		3,40	2,04	1,66
	2,40	1,51	1,59		3,47	2,35	1,48
	2,41	1,50	1,61		3,41	1,99	1,72
<b>Medel</b>	<b>2,35</b>	<b>1,37</b>	<b>1,73</b>	<b>Medel</b>	<b>3,33</b>	<b>1,86</b>	<b>1,82</b>
$\sigma$	0,082	0,145	0,160	$\sigma$	0,079	0,276	0,250
$\sigma^2$	0,007	0,021	0,026	$\sigma^2$	0,006	0,076	0,063
Magnetit				Magnetit >95% RF			
	$\lambda$ [W/mK]	a [mm <sup>2</sup> /s]	cv [MJ/m <sup>3</sup> K]		$\lambda$ [W/mK]	a [mm <sup>2</sup> /s]	cv [MJ/m <sup>3</sup> K]
	2,41	0,91	2,65		3,19	2,54	1,26
	2,36	0,89	2,66		3,16	2,08	1,52
	2,51	1,13	2,22		3,05	1,58	1,93
	2,36	0,81	2,93		3,08	1,55	1,98
	2,54	0,98	2,59		3,10	1,61	1,92
	2,60	1,03	2,53		3,28	1,21	2,70
	2,56	0,97	2,62		3,30	1,23	2,68
	2,63	1,04	2,53		3,32	1,23	2,69
	2,67	1,07	2,49				
<b>Medel</b>	<b>2,52</b>	<b>0,98</b>	<b>2,58</b>	<b>Medel</b>	<b>3,18</b>	<b>1,63</b>	<b>2,09</b>
$\sigma$	0,115	0,101	0,186	$\sigma$	0,104	0,467	0,557
$\sigma^2$	0,013	0,010	0,035	$\sigma^2$	0,011	0,218	0,310
Makroinkapslad PCM 10°C				Makroinkapslad PCM 10°C >95% RF			
	$\lambda$ [W/mK]	a [mm <sup>2</sup> /s]	cv [MJ/m <sup>3</sup> K]		$\lambda$ [W/mK]	a [mm <sup>2</sup> /s]	cv [MJ/m <sup>3</sup> K]
	1,49	0,77	1,93		1,67	0,87	1,93
	1,48	0,80	1,86		1,64	0,79	2,08
	1,42	0,76	1,88		1,62	0,78	2,07
	1,40	0,74	1,89		1,66	0,85	1,94
	1,40	0,72	1,93		1,62	0,81	2,01
	1,41	0,75	1,88		1,61	0,80	2,02
	1,47	0,78	1,90		1,39	0,60	2,32
	1,47	0,77	1,91		1,46	0,63	2,34
	1,52	0,75	2,03		1,35	0,61	2,21
<b>Medel</b>	<b>1,45</b>	<b>0,76</b>	<b>1,91</b>	<b>Medel</b>	<b>1,56</b>	<b>0,75</b>	<b>2,10</b>
$\sigma$	0,045	0,022	0,051	$\sigma$	0,124	0,106	0,153
$\sigma^2$	0,002	0,000	0,003	$\sigma^2$	0,015	0,011	0,023
Makroinkapslad PCM 50°C				Makroinkapslad PCM 50°C >95% RF			
	$\lambda$ [W/mK]	a [mm <sup>2</sup> /s]	cv [MJ/m <sup>3</sup> K]		$\lambda$ [W/mK]	a [mm <sup>2</sup> /s]	cv [MJ/m <sup>3</sup> K]
	1,24	0,56	2,23		1,42	0,32	4,49
	1,31	0,62	2,10		1,17	0,24	4,90
	1,36	0,68	2,00		1,57	0,50	3,16
	1,38	0,69	1,98		1,18	0,24	5,01
	1,39	0,72	1,94		1,38	0,56	2,46
	1,40	0,72	1,95		1,39	0,50	2,80
	1,41	0,73	1,94		1,19	0,26	4,58
	1,41	0,72	1,95		1,39	0,51	2,74
	1,40	0,73	1,93		1,26	0,44	2,82
<b>Medel</b>	<b>1,37</b>	<b>0,68</b>	<b>2,00</b>	<b>Medel</b>	<b>1,33</b>	<b>0,40</b>	<b>3,66</b>
$\sigma$	0,057	0,058	0,098	$\sigma$	0,134	0,131	1,054
$\sigma^2$	0,003	0,003	0,010	$\sigma^2$	0,018	0,017	1,110

En studie av möjligheten att öka den värmelagrande förmågan hos betong

Expanderad Grafit			Expanderad grafit >95% RF				
$\lambda$ [W/mK]	a [mm <sup>2</sup> /s]	cv [MJ/m <sup>3</sup> K]	$\lambda$ [W/mK]	a [mm <sup>2</sup> /s]	cv [MJ/m <sup>3</sup> K]		
3,61	1,32	2,73	5,12	1,67	3,07		
3,73	1,61	2,31	5,13	1,93	2,66		
3,80	2,01	1,89	5,91	1,48	3,99		
3,63	2,04	1,78	5,68	1,74	3,27		
3,82	2,10	1,82	5,78	1,70	3,40		
3,83	2,32	1,65	5,55	1,81	3,07		
3,72	1,95	1,91	5,92	1,99	2,97		
3,81	2,15	1,77	5,55	2,11	2,63		
3,82	2,17	1,76	5,60	2,14	2,62		
<b>Medel</b>	<b>3,75</b>	<b>1,96</b>	<b>1,96</b>	<b>5,58</b>	<b>1,84</b>	<b>3,07</b>	
$\sigma$	0,087	0,309	0,343	$\sigma$	0,293	0,218	0,441
$\sigma^2$	0,008	0,096	0,118	$\sigma^2$	0,086	0,048	0,195

Cement			Cement >95% RF				
$\lambda$ [W/mK]	a [mm <sup>2</sup> /s]	cv [MJ/m <sup>3</sup> K]	$\lambda$ [W/mK]	a [mm <sup>2</sup> /s]	cv [MJ/m <sup>3</sup> K]		
0,98	0,40	2,42	0,94	0,33	2,85		
1,00	0,43	2,35	1,02	0,37	2,73		
1,03	0,44	2,31	1,05	0,40	2,64		
1,04	0,46	2,28	1,07	0,52	2,07		
1,05	0,47	2,24	1,08	0,42	2,56		
1,07	0,49	2,20	1,09	0,43	2,54		
0,83	0,30	2,77	1,10	0,44	2,52		
1,06	0,48	2,22	1,11	0,44	2,51		
0,94	0,37	2,53	1,11	0,44	2,53		
<b>Medel</b>	<b>1,00</b>	<b>0,43</b>	<b>2,37</b>	<b>1,06</b>	<b>0,42</b>	<b>2,55</b>	
$\sigma$	0,077	0,060	0,183	$\sigma$	0,054	0,052	0,214
$\sigma^2$	0,006	0,004	0,033	$\sigma^2$	0,003	0,003	0,046

PCM som emulsion 10°C			PCM som emulsion 10°C >95% RF				
$\lambda$ [W/mK]	a [mm <sup>2</sup> /s]	cv [MJ/m <sup>3</sup> K]	$\lambda$ [W/mK]	a [mm <sup>2</sup> /s]	cv [MJ/m <sup>3</sup> K]		
1,68	0,71	2,38	2,04	1,22	1,67		
1,66	0,64	2,58	2,01	1,13	1,78		
1,63	0,61	2,68	1,98	1,10	1,79		
1,46	0,53	2,72	1,85	0,99	1,86		
1,51	0,57	2,66	1,90	1,04	1,83		
1,52	0,57	2,65	1,89	1,03	1,84		
1,44	0,50	2,90	1,71	0,89	1,91		
1,54	0,55	2,80	1,66	0,91	1,83		
1,56	0,56	2,77	1,71	0,91	1,89		
<b>Medel</b>	<b>1,56</b>	<b>0,58</b>	<b>2,68</b>	<b>1,86</b>	<b>1,02</b>	<b>1,82</b>	
$\sigma$	0,085	0,062	0,146	$\sigma$	0,140	0,113	0,070
$\sigma^2$	0,007	0,004	0,021	$\sigma^2$	0,020	0,013	0,005

PCM som emulsion 40°C			PCM som emulsion 40°C >95% RF				
$\lambda$ [W/mK]	a [mm <sup>2</sup> /s]	cv [MJ/m <sup>3</sup> K]	$\lambda$ [W/mK]	a [mm <sup>2</sup> /s]	cv [MJ/m <sup>3</sup> K]		
1,39	0,51	2,74	1,51	0,73	2,06		
1,66	0,63	2,63	1,61	0,82	1,96		
1,45	0,56	2,61	1,65	0,87	1,90		
1,44	0,58	2,46	1,58	1,38	1,14		
1,48	0,62	2,41	1,64	1,16	1,41		
1,48	0,62	2,40	1,63	1,24	1,31		
1,38	0,48	2,89	1,46	1,17	1,24		
1,48	0,52	2,84	1,56	0,97	1,60		
1,52	0,55	2,75	1,57	0,91	1,73		
<b>Medel</b>	<b>1,48</b>	<b>0,56</b>	<b>2,64</b>	<b>1,58</b>	<b>1,03</b>	<b>1,59</b>	
$\sigma$	0,084	0,054	0,183	$\sigma$	0,063	0,219	0,336
$\sigma^2$	0,007	0,003	0,034	$\sigma^2$	0,004	0,048	0,113

En studie av möjligheten att öka den värmelagrande förmågan hos betong

Stålfiber				Stålfiber >95% RF			
	$\lambda$ [W/mK]	a [mm <sup>2</sup> /s]	cv [MJ/m <sup>3</sup> K]		$\lambda$ [W/mK]	a [mm <sup>2</sup> /s]	cv [MJ/m <sup>3</sup> K]
	2,41	1,14	2,10		2,91	2,09	1,39
	2,49	1,34	1,86		2,78	2,73	1,02
	2,50	1,25	2,00		2,85	2,43	1,17
	2,63	1,45	1,81		2,87	2,50	1,15
	2,68	1,63	1,65		2,72	2,74	0,99
	2,72	1,69	1,61		2,89	2,82	1,03
	2,62	1,56	1,68		2,89	2,90	1,00
	2,85	1,78	1,60		2,94	1,92	1,53
	2,89	1,83	1,57		2,84	2,10	1,35
<b>Medel</b>	<b>2,64</b>	<b>1,52</b>	<b>1,77</b>	<b>Medel</b>	<b>2,85</b>	<b>2,47</b>	<b>1,18</b>
$\sigma$	0,161	0,240	0,191	$\sigma$	0,067	0,357	0,198
$\sigma^2$	0,026	0,057	0,036	$\sigma^2$	0,004	0,127	0,039
Mycket stålfiber				Mycket stålfiber >95% RF			
	$\lambda$ [W/mK]	a [mm <sup>2</sup> /s]	cv [MJ/m <sup>3</sup> K]		$\lambda$ [W/mK]	a [mm <sup>2</sup> /s]	cv [MJ/m <sup>3</sup> K]
	3,36	1,30	2,58		3,46	1,02	3,38
	3,35	1,43	2,34		3,37	1,28	2,64
	3,36	1,55	2,17		3,43	1,02	3,36
	3,40	1,33	2,55		3,81	2,09	1,82
	3,50	1,48	2,36		3,69	1,63	2,27
	3,50	1,60	2,19		3,72	1,52	2,45
	3,33	1,57	2,13		3,36	1,80	1,86
	3,43	1,58	2,17		3,33	1,47	2,26
	3,47	1,59	2,18		3,35	1,41	2,37
<b>Medel</b>	<b>3,41</b>	<b>1,49</b>	<b>2,30</b>	<b>Medel</b>	<b>3,50</b>	<b>1,47</b>	<b>2,49</b>
$\sigma$	0,066	0,114	0,172	$\sigma$	0,185	0,346	0,562
$\sigma^2$	0,004	0,013	0,030	$\sigma^2$	0,034	0,120	0,315
Mikroinkapslad PCM 10°				Mikroinkapslad PCM 10° >95% RF			
	$\lambda$ [W/mK]	a [mm <sup>2</sup> /s]	cv [MJ/m <sup>3</sup> K]		$\lambda$ [W/mK]	a [mm <sup>2</sup> /s]	cv [MJ/m <sup>3</sup> K]
	1,01	0,45	2,25		1,08	0,44	2,48
	1,09	0,51	2,13		1,16	0,47	2,49
	1,10	0,51	2,15		1,18	0,47	2,52
	1,14	0,56	2,05		1,05	0,40	2,63
	1,14	0,57	2,01		1,15	0,46	2,50
	1,14	0,57	2,01		1,18	0,48	2,45
	1,04	0,48	2,19		1,08	0,40	2,68
	1,07	0,49	2,17		1,14	0,44	2,60
	1,07	0,50	2,15		1,16	0,45	2,57
<b>Medel</b>	<b>1,09</b>	<b>0,51</b>	<b>2,12</b>	<b>Medel</b>	<b>1,13</b>	<b>0,45</b>	<b>2,55</b>
$\sigma$	0,046	0,042	0,084	$\sigma$	0,049	0,029	0,076
$\sigma^2$	0,002	0,002	0,007	$\sigma^2$	0,002	0,001	0,006

En studie av möjligheten att öka den värmelagrande förmågan hos betong

Mikroinkapslad PCM 40°				Mikroinkapslad PCM 40° >95% RF			
	$\lambda$ [W/mK]	a [mm <sup>2</sup> /s]	cv [MJ/m <sup>3</sup> K]		$\lambda$ [W/mK]	a [mm <sup>2</sup> /s]	cv [MJ/m <sup>3</sup> K]
	0,99	0,48	2,09		1,01	0,36	2,80
	1,12	0,58	1,93		1,13	0,44	2,57
	1,15	0,61	1,90		1,14	0,45	2,53
	1,03	0,50	2,06		1,16	0,48	2,45
	1,15	0,59	1,95		1,18	0,47	2,48
	1,18	0,63	1,88		1,20	0,50	2,40
	1,00	0,50	2,00		1,19	0,49	2,43
	1,12	0,61	1,85		1,19	0,49	2,42
	1,14	0,62	1,83		1,18	0,48	2,46
<b>Medel</b>	<b>1,10</b>	<b>0,57</b>	<b>1,94</b>	<b>Medel</b>	<b>1,15</b>	<b>0,46</b>	<b>2,51</b>
$\sigma$	0,069	0,059	0,092	$\sigma$	0,058	0,043	0,123
$\sigma^2$	0,005	0,003	0,008	$\sigma^2$	0,003	0,002	0,015
Mässing				Mässing >95% RF			
	$\lambda$ [W/mK]	a [mm <sup>2</sup> /s]	cv [MJ/m <sup>3</sup> K]		$\lambda$ [W/mK]	a [mm <sup>2</sup> /s]	cv [MJ/m <sup>3</sup> K]
	2,93	1,66	1,76		3,52	1,41	2,50
	2,94	1,66	1,77		3,55	1,66	2,13
	2,92	1,63	1,79		3,31	1,11	2,99
	2,85	1,68	1,70		3,78	1,49	2,53
	2,87	1,63	1,76		3,61	1,30	2,78
	2,83	1,61	1,75		3,57	1,22	2,93
	2,29	0,82	2,79		3,52	1,16	3,05
	2,54	1,08	2,35		3,72	1,37	2,71
	2,66	1,25	2,13		3,74	1,44	2,59
<b>Medel</b>	<b>2,76</b>	<b>1,45</b>	<b>1,98</b>	<b>Medel</b>	<b>3,59</b>	<b>1,35</b>	<b>2,69</b>
$\sigma$	0,221	0,317	0,374	$\sigma$	0,144	0,176	0,288
$\sigma^2$	0,049	0,101	0,140	$\sigma^2$	0,021	0,031	0,083
Klippt koppartråd				Klippt koppartråd >95% RF			
	$\lambda$ [W/mK]	a [mm <sup>2</sup> /s]	cv [MJ/m <sup>3</sup> K]		$\lambda$ [W/mK]	a [mm <sup>2</sup> /s]	cv [MJ/m <sup>3</sup> K]
	3,29	1,60	2,06		4,25	1,81	2,35
	3,38	1,72	1,97		4,25	1,82	2,33
	3,44	1,76	1,95		4,02	2,26	1,78
	3,51	1,85	1,89		4,01	2,34	1,72
	3,58	1,95	1,83		5,05	2,11	2,39
	3,66	2,23	1,64		4,98	2,29	2,17
	3,72	2,28	1,63		5,15	2,07	2,49
	3,74	2,30	1,62		4,93	2,08	2,37
	3,76	2,33	1,62		5,09	1,86	2,73
	3,77	2,36	1,60		5,05	2,09	2,42
	3,77	2,36	1,60		5,07	1,98	2,56
	3,68	2,27	1,62		5,05	1,92	2,63
	3,74	2,30	1,62		5,10	2,02	2,52
	3,79	2,45	1,55		5,04	1,94	2,60
	3,89	2,62	1,49		5,12	2,91	1,76
<b>Medel</b>	<b>3,65</b>	<b>2,16</b>	<b>1,71</b>	<b>Medel</b>	<b>4,81</b>	<b>2,10</b>	<b>2,32</b>
$\sigma$	0,172	0,302	0,176	$\sigma$	0,430	0,277	0,325
$\sigma^2$	0,030	0,091	0,031	$\sigma^2$	0,185	0,077	0,106



En studie av möjligheten att öka den värmelagrande förmågan hos betong

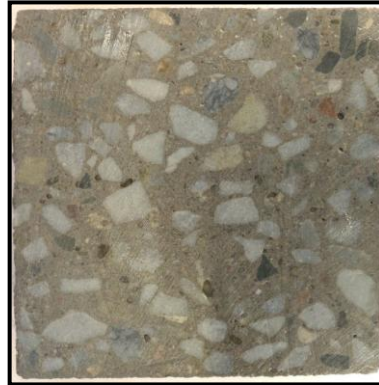
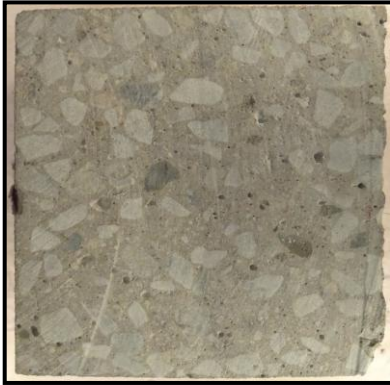
---

<b>Expanderad grafit och magnetit</b>			
	<b><math>\lambda</math> [W/mK]</b>	<b><math>a</math> [mm<sup>2</sup>/s]</b>	<b><math>c_v</math> [MJ/m<sup>3</sup>K]</b>
	3,44	1,14	3,02
	3,64	1,38	2,64
	3,79	1,55	2,44
	3,83	1,53	2,50
	3,83	1,53	2,50
	3,93	1,79	2,19
	3,82	1,52	2,51
	3,98	1,73	2,30
	4,00	1,76	2,27
	3,98	1,92	2,08
	4,04	2,12	1,91
	3,99	2,11	1,89
	3,96	1,77	2,24
	4,00	2,08	1,93
	3,52	1,28	2,75
	3,82	1,65	2,31
	3,70	1,43	2,58
<b>Medel</b>	<b>3,88</b>	<b>1,79</b>	<b>2,21</b>
<b><math>\sigma</math></b>	0,183	0,318	0,322
<b><math>\sigma^2</math></b>	0,033	0,101	0,104

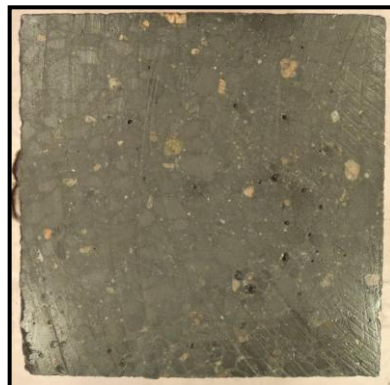
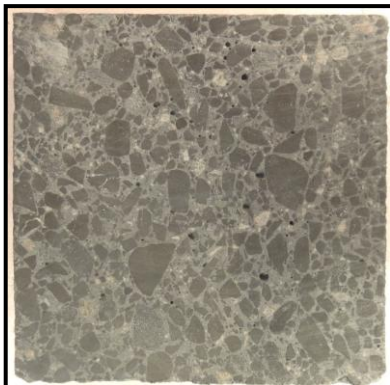
## 14 Appendix C – Betongytor torr/fuktig

Torr prov till vänster, fuktigt prov till höger.

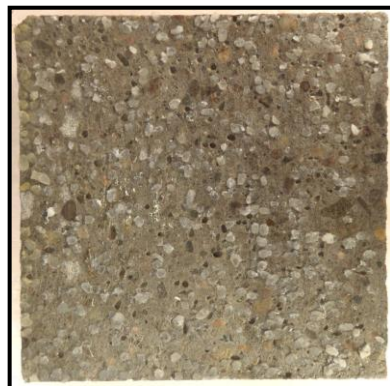
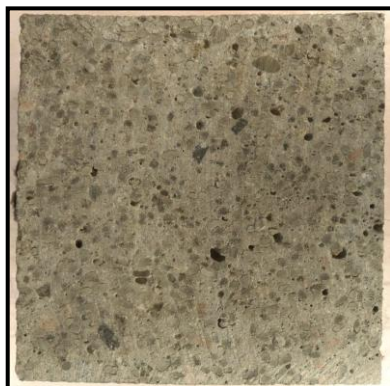
### Referensbetong



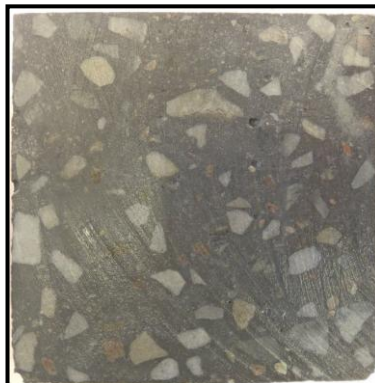
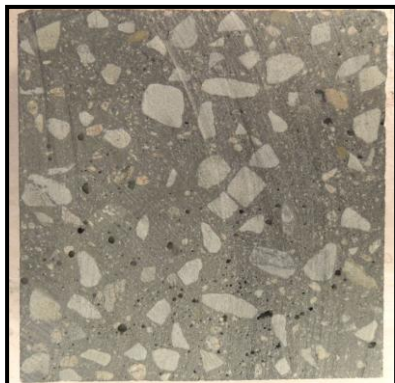
### Magnetit



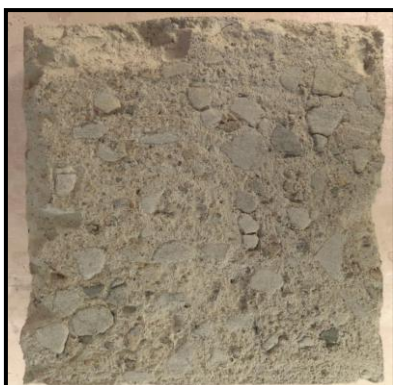
### Makroinkapslad PCM



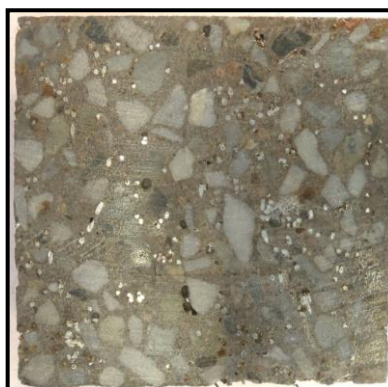
**Expanderad grafit**



**PCM som emulsion**

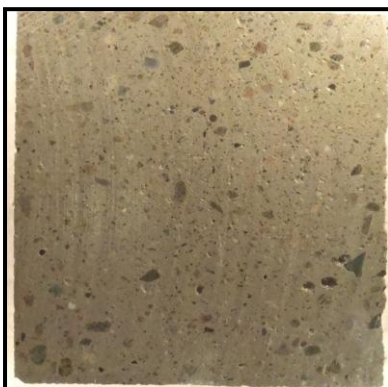
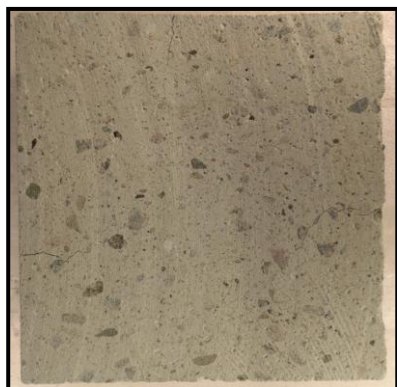


**Stålfiber**

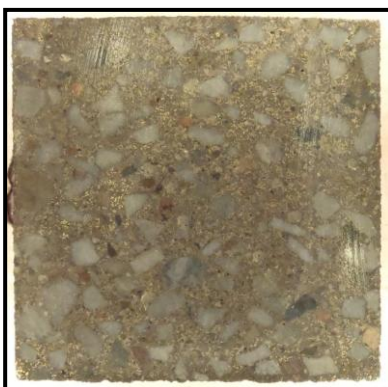
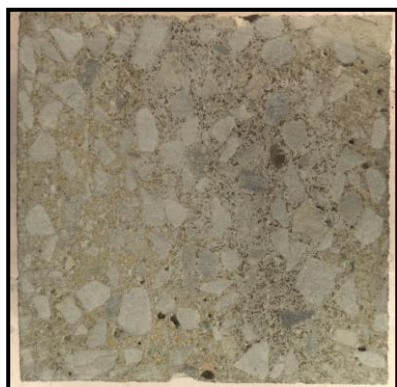




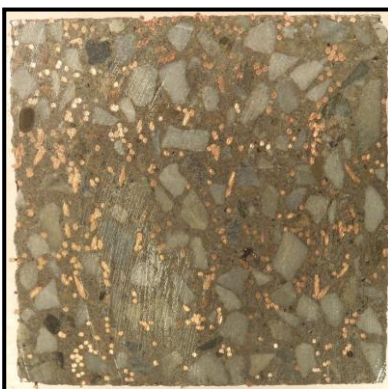
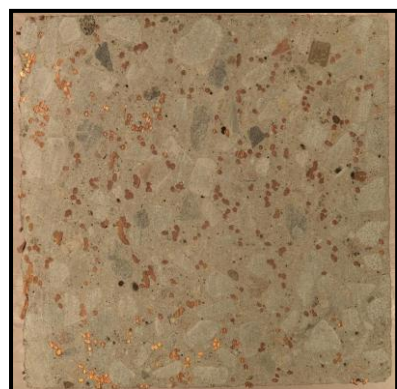
**Mikroinkapslad PCM**



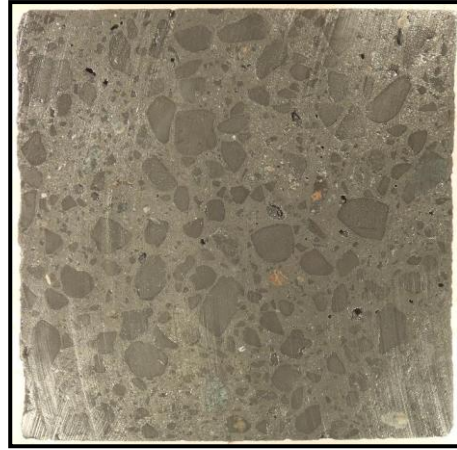
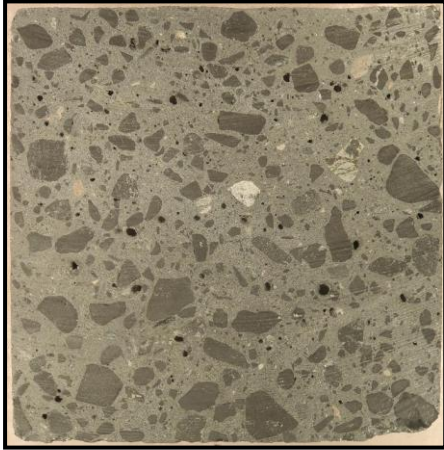
**Mässingspån**



**Kopparfiber**



**Expanderad grafit och magnetit**



## 15 Appendix D - Tillsatsmaterial



Figur 9 - Grus 0-8mm



Figur 10 - Kvartsit 12-16mm



Figur 11 - MagnaDense 8S



Figur 12 - MagnaDense 20S





Figur 13 - Makroinkapslad PCM



Figur 14 - Expanderad grafit



Figur 15 - PCM i påsform



Figur 16 - PCM som emulsion



Figur 17 - Stålfiber



Figur 18 - Mikroinkapslad PCM



**Figur 19 - Mässingsspån**



**Figur 20 - Kopparfiber**

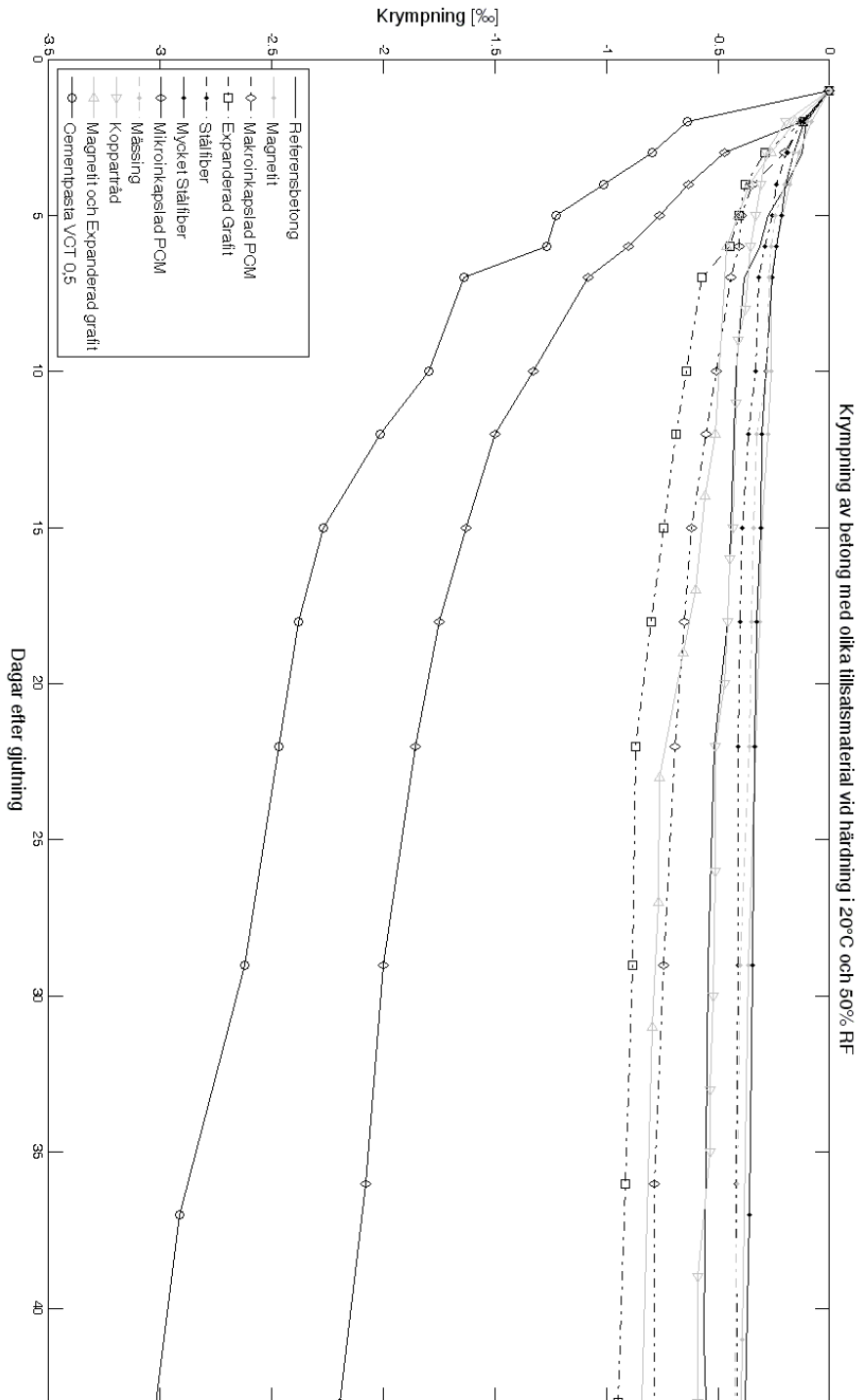


## 16 Appendix E - Kornfördelningskurva Grus



Figur 21 - Kornfördelningskurva Grus 0-8mm

## 17 Appendix F – Krympning



Figur 22 - Krympning av betong med olika tillsatsmaterial vid härdning i 20 °C och 50 % RF