

# Bestämning av utvecklad tryckhållfasthet för platta betongkonstruktioner i ett tidigt skede

D. Stenberg | Byggnadsmaterial | LTH | Lunds universitet





# **Bestämning av utvecklad tryckhållfasthet för platta betongkonstruktioner i ett tidigt skede**

**Daniel Stenberg**



**LUND**  
UNIVERSITY

Master Thesis, Report 5133, Division of Building Materials, Faculty of Engineering, Lund University, Lund, 2023

Examensarbete, Rapport 5133, Avdelningen Byggnadsmaterial, Lunds tekniska högskola, Lunds universitet, Lund, 2023

Bestämning av utvecklad tryckhållfasthet för platta betongkonstruktioner i ett tidigt skede

Bestämning av utvecklad tryckhållfasthet för platta betongkonstruktioner i ett tidigt skede

Daniel Stenberg

Report 5133

ISRN LUTVDG/TVBM-23/5133-SE

Antal sidor/Number of pages: 54

Illustrationer/Illustrations: 28

Sökord

Betong, cement, tidig avformningshållfasthet, bestämma avformningshållfasthet, avformningshållfasthet

Keywords

Concrete, cement, early demolding strength, determine demolding strength, demolding strength

© Copyright: Division of Building Materials, Faculty of Engineering, Lund University, Lund 2023  
Avdelningen Byggnadsmaterial, Lunds tekniska högskola, Lunds universitet, Lund 2023.

---

Byggnadsmaterial  
Lunds tekniska högskola  
Lunds universitet  
Box 118  
221 00 Lund

[www.byggnadsmaterial.lth.se](http://www.byggnadsmaterial.lth.se)

Division of Building Materials  
Faculty of Engineering  
Lund University  
P.O. Box 118  
SE-221 00 Lund  
Sweden  
[www.byggnadsmaterial.lth.se/english](http://www.byggnadsmaterial.lth.se/english)

## Förord

Detta examensarbete är skrivet som avslutande del på min utbildning på civilingenjörsprogrammet Väg- och Vattenbyggnad vid Lunds Tekniska Högskola, Lunds universitet. Arbetet gjordes på avdelningen för Byggnadsmaterial tillsammans med Skandinaviska Byggelement AB:s anläggning i Ängelholm.Handledare för examensarbetet har varit Lars Wadsö på avdelningen för Byggnadsmaterial vid LTH.

Jag vill först och främst rikta ett stort tack till fabrikschef William Sandholt från Skandinaviska Byggelement som har bidragit med en intressant problemformulering, samt tillhandahållit materiel och plats att utföra mätningar. Jag vill även tacka Sebastian Gustafsson och Ann-Charlotte Gustafsson som har hjälpt mig att utföra mätningar under nattetid när jag själv inte kunde närvara. Slutligen vill jag tacka min handledare Lars Wadsö som har bidragit med teknisk mätutrustning och vägledning under projektets gång.

Daniel Stenberg

Juni, 2023



## Sammanfattning

Betong är ett byggnadsmaterial som normalt gjuts efter recept, där en större andel cement i blandningen resulterar i en snabbare hållfasthetsutveckling och ökad sluthållfasthet.

Tryckhållfastheten, som kan anses vara betongens viktigaste egenskap, mäts genom standardiserat förfarande, där en provkropp utsätts för en successivt ökande belastning tills den går till brott. Det vanligaste är att betongens sluthållfasthet mäts efter 28 dygn, men betongens hållfasthetsutveckling pågår så länge det finns tillgång till både ohydratiserat cement och fritt vatten. Initialt är denna process starkt beroende av betongens temperatur, där en högre temperatur resulterar i en snabbare härdning, men övergår efter hand till att vara mer diffusionsberoende genom att vattnet får det svårare att nå till de ohydratiserade delarna av cementet efter hand som en porstruktur utvecklas. Efter 28 dygn går reaktionen så långsamt att betongen anses ha nått sin slutgiltiga hållfasthet.

Vid gjutning av konstruktioner där hänsyn behöver tas till avformningshållfasthet måste betongens aktuella hållfasthet fastställas innan gjutformen kan rivas. Detta kan göras på flera sätt. En vanlig metod är att gjuta provkroppar som förvaras i samma miljö som undersökt konstruktion och prova efter hand tills önskad hållfasthet är uppnådd. Ett potentiellt problem med denna metod är att hållfasthetsutvecklingen i provkropparna är annorlunda än i större element på grund av olika förhållanden mellan kropparnas volym och area. Detta medför att värmen som utvecklas i betongen när cementet hydratiserar försvinner mot omgivningen snabbare i en provkropp jämfört med ett fullstort element, och resulterar i att hållfastheten utvecklas långsammare i provkroppen.

I fabriksmiljö är det vanligt att betongreceptet anpassas till att avformningshållfastheten ska kunna uppnås efter en önskad, relativt kort tid. Detta resulterar i detta fall att mer cement än vad som är nödvändigt för önskad sluthållfastheten används. I det här examensarbetet har temperatur- och hållfasthetsutveckling studerats i ett tidigt skede för fullstora platta betongelement i en betongindustri och jämförts med motsvarande standardiserade kubiska provkroppar. Resultaten visar på en substantiell skillnad i utvecklad hållfasthet, där hållfastheten som utvecklats i provkroppen är lägre än den som har utvecklats i det fullstora elementet. Detta bör innebära att cementhalten i slutändan kan minskas.





## Abstract

Concrete is a building material that is normally cast according recipes, where a larger proportion of cement in the mixture results in a faster strength development and increased ultimate strength. The compressive strength, which can be considered as the most important property of concrete, is usually measured by a standardized procedure, where a test specimen is subjected to a progressively increasing load until it breaks. The most common is that the concrete's final strength is measured after 28 days, but the concrete's strength development continues as long as there is access to both unhydrated cement and water. Initially, this process is strongly dependent on the temperature of the concrete, where a higher temperature results in faster hardening, but gradually becomes more diffusion dependent. After 28 days, the reaction is so slow that the concrete is normally considered to have reached its final strength.

When casting constructions where demolding strength needs to be taken into account, the concrete's current strength must be determined before the mold can be removed. This can be done in several ways. A common method is to cast test specimens that are kept in the same environment as the structure, and test them regularly until the desired strength is achieved. A potential problem with this method is that the strength development in the test specimen is different than in larger elements due to different ratios between the bodies' volume and area. This means that the heat developed in the concrete when the cement hydrates is transferred to the surroundings faster in a test specimen compared to a full-sized element. This results in the strength developing more slowly in the specimen.

In a factory environment, it is common for the concrete recipe to be adapted so that the demoulding strength can be achieved after a desired, relatively short time. This often results in more cement being used than is necessary for the desired final strength. In this degree project, temperature and strength development has been studied at an early stage for full-sized flat concrete elements in a concrete industry and compared with the corresponding standardized cubic test specimens. The results show a substantial difference in developed strength, which should mean that the cement content can ultimately be reduced.



# Innehållsförteckning

1	Inledning .....	1
1.1	Bakgrund.....	1
1.2	Syfte .....	1
1.3	Målsättning.....	1
1.4	Avgränsningar .....	2
1.5	Målgrupp .....	2
2	Förutsättningar .....	3
2.1	Balkonger .....	3
2.2	Blandning av betong .....	4
2.3	Säkerställande av kvalitetskrav .....	4
2.4	Formning, gjutning och avformning .....	4
2.5	Transportlyft .....	5
3	Teori.....	7
3.1	Betong.....	7
3.2	Cement .....	7
3.2.1	Tillverkning av cement.....	7
3.2.2	Bindemedelskemi för cement och puzzolaner.....	7
3.2.3	Vattencementtal.....	8
3.2.4	Miljöpåverkan.....	9
3.3	Betongens värmeutveckling.....	9
3.3.1	Värmeförlust mot omgivningen under isoterma förhållanden .....	10
3.3.2	Värmebalans.....	10
3.3.3	Temperaturutveckling i betong.....	11
3.3.4	Hydratationsgrad över tid.....	12
3.3.5	Ekvivalent mognadsålder.....	15
3.3.6	Hydratationshastighet .....	16
3.4	Bestämning av betongs tryckhållfasthet .....	16
3.4.1	Mätning av hållfasthet i färdiga konstruktioner.....	17
3.5	Klassificering av betong.....	17
3.6	Gjutning av kubiska provkroppar .....	18
3.7	Krav med avseende på exponeringsklass .....	19
4	Material och utrustning.....	21

4.1	Betong.....	21
4.2	Utrustning.....	21
5	Metod .....	25
5.1	Inledande undersökning .....	25
5.2	Temperaturutveckling i fullstora balkonger .....	26
5.3	Temperaturutveckling i balkong jämfört med isolerade kuber .....	27
5.4	Temperaturberoende hållfasthetsutveckling.....	27
5.5	Tendenskurva.....	28
5.6	Jämförelse mellan beräknad och uppmätt hållfasthet.....	28
5.7	Utvecklad hållfasthet i balkongerna.....	28
5.8	Försök med mindre mängd bindemedel .....	28
6	Resultat .....	29
6.1	Inledande undersökning .....	29
6.2	Temperaturutveckling i fullstora balkonger .....	29
6.3	Temperaturutveckling i balkong jämfört med isolerade kuber .....	30
6.4	Temperaturberoende hållfasthetsutveckling.....	32
6.5	Anpassad tendenskurva .....	33
6.6	Jämförelse mellan beräknad och uppmätt hållfasthet.....	34
6.7	Utvecklad hållfasthet i balkonger.....	35
6.8	Försök med mindre mängd cement .....	38
7	Diskussion .....	41
7.1	Resultat.....	41
7.2	Hantering av provkroppar .....	41
7.3	Tendenskurva.....	42
7.4	Ekvivalent mognadsgrad och beräknad hållfasthet.....	42
7.5	Bedömning av hållfasthet .....	42
7.6	Felkällor .....	42
8	Slutsats.....	45
9	Framtida forskning .....	47
9.1	Förslag på fortsatta studier .....	47
10	Referenser.....	49

# 1 Inledning

## 1.1 Bakgrund

Skandinaviska Byggelement AB i Ängelholm har nischat sin verksamhet i prefabbranschen till att gjuta balkonger avsedda för utomhusbruk. Utöver kravet på betongens slutgiltiga hållfasthet ställs även krav på luftinnehåll, arbetsbarhet och vid vilken hållfasthet avformning och lyft av element får ske. Ju tidigare ett element kan flyttas, desto tidigare kan ett nytt gjas. För att produktionen ska fungera behöver avformning och flytt ske i tidsintervallet 12 – 16 timmar efter att en balkong har gjutits.

Inom företaget pågår ett kontinuerligt arbete att ta fram en mer miljövänlig betong. Ett sätt att uppnå detta är att minska mängden cement som används. För att kunna uppnå avformningshållfastheten inom önskat tidsintervall används dock en större andel cement. Detta leder även till att betongens slutgiltiga tryckhållfasthet är högre än nödvändigt, och följaktligen är dess miljöbelastning gällande koldioxidutsläpp onödigt hög.

Samtliga hållfastheter verifieras idag med hjälp av kubiska provkroppar. För att fastställa betongens 28-dygns hållfasthet följs ett standardiserat förfarande, där provkropparna under det första dygnet står i rumstemperatur och därefter förflyttas till ett vattenbad med temperaturen  $20 \pm 2$  °C, där de får härda fram till provtryckningstillfället. För att fastställa betongens avformningshållfasthet följs samma standardiserade förfarande, men provkropparna provas redan efter 12 timmar. På grund av att det råder olika förhållande gällande värmefflöde i en provkropp jämfört med en fullstor balkong är temperaturutvecklingen i provkroppen är lägre. Detta medför att proverna som utförs för att kontrollera avformningshållfastheten visar på en lägre hållfasthet än vad som har utvecklats i balkongerna.

Ett sätt att minska mängden cement i betongen är genom att använda en mätmetod som mer efterliknar förhållanden i motsvarande prefabelement. För att efterlikna de förhållanden som finns i större konstruktioner kan testkuberna exempelvis isoleras. I denna rapport behandlas hur mycket hållfasthetsutvecklingen skiljer sig mellan en testkropp och ett fullstort element, samt hur mätning ska kunna göras rent praktiskt för att erhålla ett mer rättvisande värde.

## 1.2 Syfte

Detta examensarbete syftar till att undersöka ifall det är möjligt att minska mängden cement som används vid gjutning där tidig avformningshållfasthet behöver uppnås genom att ta hänsyn till att betongens tidiga temperaturutveckling skiljer sig mellan en provkropp och ett fullstort element.

## 1.3 Målsättning

För att bedöma ifall det är möjligt att minska mängden cement behöver följande punkter analyseras.

- Hur mycket skiljer sig den utvecklade hållfastheten mellan en fullstor balkong och en standardiserad provkropp?
- Vilka faktorer har störst påverkan för betongens tidiga härdning i fabriksmiljö?
- Hur ska en provkropp hanteras för att ge ett rättvisande värde av betongens tidiga härdningsprocess?

## **1.4 Avgränsningar**

Inga andra egenskaper än betongens hållfasthet och temperatur under betongens tidiga skede behandlas i detta examensarbete. Enbart ett betongrecept har använts för samtliga mätningar, där 30% av cementet har ersatts med masugnsslagg.

## **1.5 Målgrupp**

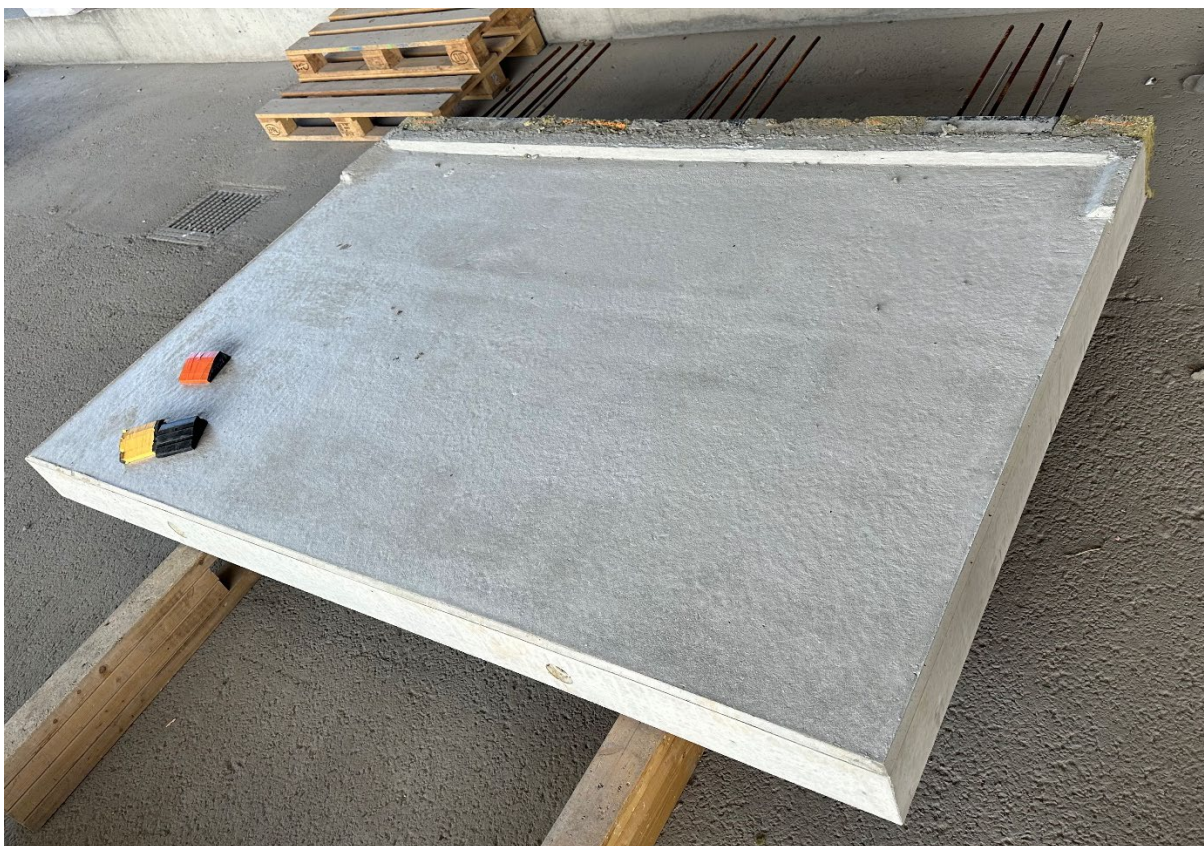
Denna rapport är skriven så att alla med grundläggande kunskap om betong ska kunna tillgodogöra sig informationen, men är riktad till yrkesfolk verksamma i prefabbranchen.

## 2 Förutsättningar

### 2.1 Balkonger

Balkongerna som gjuts behöver både uppfylla krav på funktionalitet och estetik. Kraven på funktionalitet avser dels att balkongen måste kunna klara den belastning den utsätts för, och dels kunna uppfylla de krav som ställs gällande livslängd och väderrelaterad exponering. Detta innebär att noggranna kontroller behöver göras gällande armeringens mängd, kvalitet och placering, samt betongens egenskaper och gjutformens utformning.

Kraven på estetik innefattar bland annat att en jämn och porfri yta skapas som mer liknar en målad yta än rå betong. För att kunna göra detta så behöver betongen vara tillräckligt snabbhärdande för att uppnå rätt avformningshållfasthet vid rätt tid, men inte så pass snabbhärdande att betongens yta inte hinner behandlas innan den härdar. Detta ställer stora krav på betongens recept, eftersom hänsyn behöver tas till både betongens gjutegenskaper och hur personalen upplever att den är att jobba med. Användning av acceleratorer för att uppnå avformningshållfastheten snabbare är således inte aktuellt, eftersom betongen troligen skulle bli allt för snabbhärdande. Redan i dagsläget är luckan där betongen anses vara arbetsbar kort, och genom att använda acceleratorer så härdar betongen snabbare. Detta kan i förlängningen innebära att balkongernas estetik äventyras. Figur 1 visar en nästan färdig balkong.



Figur 1. En nästan färdig balkong.

Lokalen där gjutning sker och betongens härdas under de första timmarna håller normal rumstemperatur med vissa variationer på grund av portar som öppnas och stängs vid arbete med

truckar. Det är praxis att en port ska vara öppen så kort tid som möjligt för att inte påverka betongens härdning negativt.

## 2.2 Blandning av betong

Betongen blandas genom en automatiserad process. Ballasten, som förvaras och hanteras utomhus, vägs upp på ett transportband och förs in till en uppsamlingsbehållare. Cement, masugnsslagg, vatten och tillsatsmedel vägs upp på liknande sätt. När samtliga delmaterial är uppvägda och ligger i respektive uppsamlingsbehållare påbörjas blandningen av betongen. De torra komponenterna hålls ner i blandaren och blandas i 20 sekunder, varpå vatten och tillsatsmedel tillförs och betongen blandas i ytterligare 180 sekunder innan den är färdig.

Hänsyn till fukthalten i ballastens finare kornfraktioner tas genom frekventa stickprovskontroller, och mängden vatten som tillsätts i betongen justeras därefter. Detta är dock ingen exakt metod, och på grund av att ballasten förvaras och hanteras utomhus kan dess fukthalt variera något. Detta medför att den totala mängden vatten som tillsätts betongen kan variera något.

På grund av att ballasten förvaras utomhus varierar även dess temperatur med utomhusklimatet. Eftersom betongens härdning är temperaturberoende så justeras betongens initiala temperatur till att hamna så nära 20 °C som möjligt. Detta görs genom temperaturen på vattnet som tillsätts i betongen, och eventuellt med het ånga som blåses på den inkommande ballasten. Trots detta varierar betongens initiala temperatur. Den lägsta uppmätta temperaturen under examensarbetets gång har varit 16 °C och registrerades i februari, och den högsta har varit strax över 20 °C.

## 2.3 Säkerställande av kvalitetskrav

Både luftinnehåll och hållfasthet kontrolleras regelbundet för att säkerställa betongens kvalitet. Mängden luft som betongen innehåller mäts på den nyblandade betongmassan genom direktavläsning på en lufthaltsmätare som uppfyller kraven för standarden DIN EN 12350-7. Luftinnehållet kan justeras både upp och ner genom att ändra mängden luftporbildande medel som tillsätts.

Betongens tryckhållfasthet kontrolleras genom att en kub i veckan gjuts, förvaras och trycks enligt standardiserat förfarande. Den avlästa tryckhållfastheten kontrolleras så den inte understiger kravet för betongens hållfasthetsklassning. Under kallare perioder gjuts även kuber som är avsedda för att bedöma ifall avformning kan ske på ett säkert sätt.

## 2.4 Formning, gjutning och avformning

I lokalen där gjutning sker finns ett antal flyttbara stålbord som används som botten av gjutformen. På dessa byggs sidor av formplywood, och formen armeras enligt ritning. Efter att formen har fyllts med betong så vibreras, avjämnas och bereds ytan enligt specifikation från beställaren. Även hålkäl och eventuella ramper skapas i detta skede. När balkongen är färdig täcks den med cellplast för att skapa ett gynnsammare härdningsförhållande. Täckning sker ca 3 timmar efter gjutning, och balkongen lämnas att härda tills den ska avformas.

Avformning sker vanligen 12 – 16 timmar efter gjutning, då sidorna av formplywood avlägsnas och balkongen lyfts med travers kopplad till ingjutna lyftdon. Det är då viktigt att balkongen har



hunnit nå en hållfasthet som garanterar att lyft kan ske på ett säkert sätt. Balkongen flyttas sedan till en plats där den kan uppnå sin 28-dygns-hållfasthet, och plats lämnas att gjuta nästa balkong.

## 2.5 Transportlyft

Varje balkong förses med 4 transportlyft på ett sätt som fördelar balkongens tyngd jämnt. Dessa används både när avformning sker och elementet flyttas till platsen där slutgiltig härdning sker, samt vid montage på arbetsplatsen. Efter att montering av balkongen har skett på arbetsplatsen så spacklas hålen igen för att lyftpunkterna inte ska synas från utsidan.

Transportlyft som används på den oisolerade sidan av balkongen är ett fotankare som tillsammans med en bygel tar upp de spänningar som uppstår när balkongen lyfts. På den isolerade sidan sätts motsvarande dimension av vajerlyft. Dessa är av tillverkaren godkända att användas vid lyft när betongen har uppnått en tryckhållfasthet på minst 16 MPa (Neofac AB, 2023). Figurerna 2 och 3 förtydligar utformningen av transportlyften.



Figur 2. Transportlyft på oisolerad sida. På vänster sida visas ett fotankare med tillhörande bygel. Höger sida visar transportlyftet med tillhörande lyftdon påkopplat utifrån.



Figur 3. Transportlyft på isolerad sida. Detta består av en vajer som placeras så att ena änden sticker ut genom isoleringen.

## 3 Teori

### 3.1 Betong

Betong är en blandning av ballast (sten, grus, sand), cement, vatten och i detta fall även masugnsslagg och tillsatsmedel som blandas till en homogen massa. Efter blandning med vatten börjar cementen att hydratisera i en exoterm kemisk reaktion, och betongen börjar att härda. Den behöver då snarast möjligt placeras i gjutform och bearbetas så att formen fylls utan större håligheter, och ingjutningsgods omsluts väl. En vanlig metod att få tillräcklig bearbetning av betongen är genom vibrering, som tillfälligt sänker betongens viskositet och gör den mer lättflytande (Burström, 2014).

Tillsatsmedel kan användas för att påverka betongens egenskaper. Det kan röra sig om öka lufthalten, ändra viskositeten eller påverka betongens härdningstid.

### 3.2 Cement

Cement är betongens huvudsakliga bindemedel och används i stor utsträckning världen över. Globalt används ca 4,5 miljarder ton årligen vilket ger upphov till 2,7 miljarder ton koldioxidutsläpp. Detta motsvarar ca 8% av de totala koldioxidutsläppen (Naturskyddsföreningen, 2023).

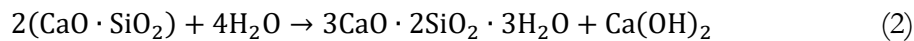
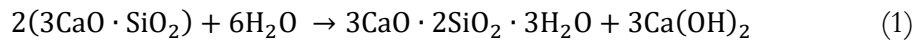
#### 3.2.1 Tillverkning av cement

Råmaterialen för cementtillverkning utgörs av kalksten och lera. Dessa mals till ett fint pulver som hettas upp till 1450 °C. När råmaterialen bränns avgår koldioxiden  $\text{CO}_2$  som är bunden i kalkstenen  $\text{CaCO}_3$ , och kvar blir kalciumoxid  $\text{CaO}$ . I råmaterialen förekommer även kiseldioxid  $\text{SiO}_2$ , samt mindre mängder aluminiumoxid  $\text{Al}_2\text{O}_3$  och järnoxid  $\text{FeO}_3$ . Dessa oxider förenar sig med varandra vid bränningen till flera olika nya ämnen, och kommer ut som små hårda kulor, så kallade cementklinker. Cement erhålls slutligen genom att mala denna cementklinker till ett fint pulver (Burström, 2014).

#### 3.2.2 Bindemedelskemi för cement och puzzolaner

Cement är betongens huvudsakliga bindemedel, där den vanligaste sorten är så kallat portlandcement. Den består av fyra huvudsakliga klinkerkomponenter, men enbart två av dessa bidrar i väsentlig utsträckning till betongens hållfasthetsutveckling. Alit,  $\text{C}_3\text{S}$ , är den huvudsakliga hållfasthetsbyggande komponenten och utgör 50 – 70% av cementen. Den reagerar snabbt med vatten och har störst betydelse för hållfasthetsutvecklingen upp till 28 dygn. Belit,  $\text{C}_2\text{S}$ , utgör normalt 15 – 20% av cementen och reagerar något långsammare med vatten och bidrar mer till hållfasthetsutvecklingen på sikt (Johansson, 2020, ss. 45 - 47).

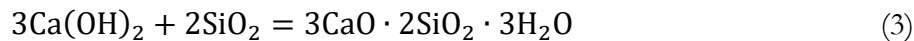
Förhållandet mellan dessa två klinkerkomponenter har stor betydelse för betongens hållfasthetsutveckling, där en större andel alit bidrar till en snabbare hållfasthetsutveckling, men en lägre sluthållfasthet. Alit och belits reaktion med vatten beskrivs enligt ekvation 1 respektive 2 (Johansson, 2020, s. 57).



Ekvation 1 och 2 kan med ord förklaras:

cementklinker + vatten → kalciumpulikathydrat + kalciumpulihydroxid + värme

Det är kalciumpulikathydratet (CSH) som binder ihop ballasten i betongen, där mängden utvecklade CSH har stor betydelse för betongens hållfasthet. För att öka mängden CSH som erhålls från en viss mängd cement är det möjligt att tillsätta puzzolana komponenter innehållande kiselsyra. Dessa reagerar då med den tidigare bildade kalciumpulihydroxiden och bildar mer CSH enligt ekvation 3.



Detta innebär att det är möjligt att uppnå samma eller högre hållfasthet genom att ersätta en del av cementet med kiselsyrarhaltiga material som exempelvis masugnsslagg eller flygaska. Tidigare utförda tester visar dock att detta sker på bekostnad av reaktionshastighet i betongens tidiga skede (Oskar Esping, 2013).

### 3.2.3 Vattencementtal

Vattencementtalet  $v_{ct}$  är en av de viktigaste faktorerna gällande betongens hållfasthetsutveckling. Detta beskriver förhållandet mellan mängden vatten  $W$  i förhållande till mängden cement  $C$  som används för en viss volym betong, och kan definieras enligt ekvation 4a (Fagerlund, 2020, s. 398).

$$v_{ct} = \frac{W}{C} \quad (4a)$$

$W$  är mängden vatten [kg]

$C$  är mängden cement [kg]

När alternativa bindemedel används skrivs vattencementtalet om för att ge ett motsvarande värde enligt ekvation 4b, där  $k$  är en effektivitetsfaktor och  $D$  är mängden alternativt bindemedel (Fagerlund, 2020, s. 422).

$$v_{ct_{ekv}} = \frac{W}{C+kD} \quad (4b)$$



Generellt gäller att ett lägre vattencementtal resulterar i en högre hållfasthet och bättre beständighet för betongen, men gör samtidigt gjutmassan svårare att hantera. För att komma runt detta tillsätts ofta flyttillsatsmedel som tillåter att mängden vatten kan minskas drastiskt samtidigt som betongen har en god arbetsbarhet.

### 3.2.4 Miljöpåverkan

Trots att cement utgör en relativt liten andel i betongmassan står denna för majoriteten av miljöpåverkan, och kan härledas till dels till att stora mängder energi går åt vid bränning av råmaterialet och dels till att råmaterialet i sig avger koldioxid vid upphettning. Som helhet räknas betongindustrin stå för 8% av de globala koldioxidutsläppen (Naturskyddsföreningen, 2023).

I Sverige finns en målsättning om att betongindustrin som inom rikets gränser ska vara klimatneutral senast år 2045, och klimatneutral betong ska finnas tillgänglig på marknaden år 2030 (Betonginitiativet, 2018). Ett sätt att uppnå dessa mål är att använda alternativa bindemedel i större utsträckning, men även genom att optimera betongrecepten så att mindre mängd cement används.

## 3.3 Betongens värmeutveckling

När cement kommer i kontakt med fritt vatten startar en exoterm kemisk reaktion när CSH bildas. Processen kallas att cementet hydratiserar, och det är denna process som binder ihop ballasten och skapar hållfasthet i betongen. Mängden värme som frigörs är direkt proportionell mot mängden cement i en viss volym betong enligt ekvation 5.

$$Q = q_{\text{cem}} \cdot C \quad (5)$$

där

$Q$  är utvecklad hydrationsvärme per betongvolym [ $\text{J}/\text{m}^3$ ]

$q_{\text{cem}}$  är utvecklad hydrationsvärme per cementmängd [ $\text{J}/\text{kg}$ ]

$C$  är mängden cement per volymenhet [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

Mängden värme  $q_{\text{cem}}$  [ $\text{J}/\text{kg}$ ] som utvecklas per cementmängd är direkt proportionell mot cementets hydrationsgrad  $\alpha$ , där 0 innebär att ingen hydratation har skett och 1 innebär att betongen har hydratiserat fullständigt, och kan beskrivas enligt ekvation 6.

$$q_{\text{cem}} = \alpha \cdot Q_{\alpha=1} \quad (6)$$

där

$\alpha$  är hydrationsgraden vid en given tidpunkt

$Q_{\alpha=1}$  är den totala mängden energi som kan utvinnas ur en viss mängd cement [ $\text{J}/\text{kg}$ ]

Ekvationerna 5 och 6 kan kombineras för att beräkna vilken värmeeffekt  $P_b$  [W/m<sup>3</sup>] som genereras över tid enligt ekvation 7 (Emborg, 2021, s. 376).

$$P_h = \frac{d\alpha}{dt} \cdot Q_{\alpha=1} \cdot C \quad (7)$$

### 3.3.1 Värmeförlust mot omgivningen under isoterma förhållanden

Ifall ingen temperaturstegring i kroppen sker gäller ekvation 8, där kroppens förlorade värmeeffekt mot omgivningen  $P_f$  [W/m<sup>3</sup>] kan ses som värmeförlusthastigheten  $Q_f$  över tid. Sambandet är giltigt oavsett hur kroppens temperatur förhåller sig till omgivningens temperatur, men värmeflödet blir det omvända ifall kroppen är kallare än omgivningen. Det vill säga att kroppen då tar upp värme från omgivningen istället (Emborg, 2021, s. 378).

$$P_f = \frac{dQ_f}{dt} \quad (8)$$

### 3.3.2 Värmebalans

Temperaturjämvikt för en kropp med små interna temperaturskillnader kan beräknas enligt ekvation 9, som bygger på principen att temperaturen i kroppen ökar ifall värmeutvecklingen i kroppen är större än avkylningen och vice versa (Emborg, 2021, s. 377).

$$\rho c \frac{dT}{dt} = P_h - P_f \quad (9)$$

där

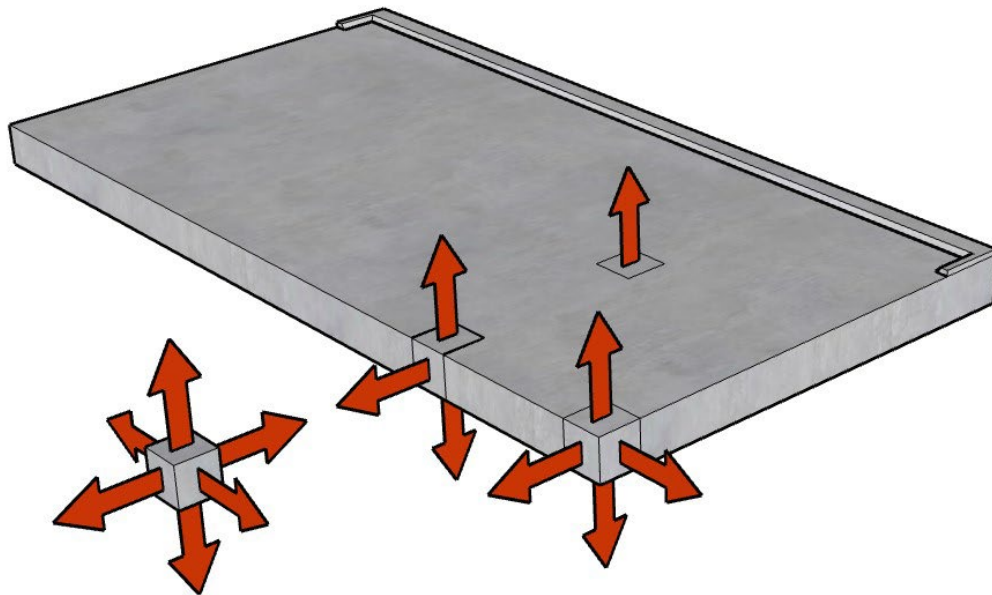
$\rho$  är betongens densitet [kg/m<sup>3</sup>]

$c$  är betongens specifika värmekapacitet [J/K]

$T$  är kroppens temperatur [°C]

För större konstruktioner kan det förväntas en temperaturgradient, där temperaturen i mitten av kroppen är högre än vid ytterkanterna. Skillnaden i temperatur är beroende av bland annat kroppens geometri, och höga temperaturer kan förväntas i mitten av mycket tjocka konstruktioner. För platta kroppar med begränsad tjocklek kyla betongen av effektivare genom att den förlorar värme mot sin omgivning, och temperaturstegringen i kroppen blir lägre.

Figur 4 visar schematiskt värmeflöden för en balkong jämfört med en kubisk provkropp. Det kan noteras att i stora delar av kroppen sker värmeflödet endimensionellt. Detta ändras dock utmed kanterna, och värmeflödet kan i stället ses som två- eller tredimensionellt. Detta resulterar i att avkylningen blir effektivare utmed kroppens kanter, och leder till en lägre temperatur. Det bör även noteras att balkongens gjutform har ett visst isolerande värde, vilket gynnar temperaturutvecklingen i denna ytterligare jämfört med provkroppen.

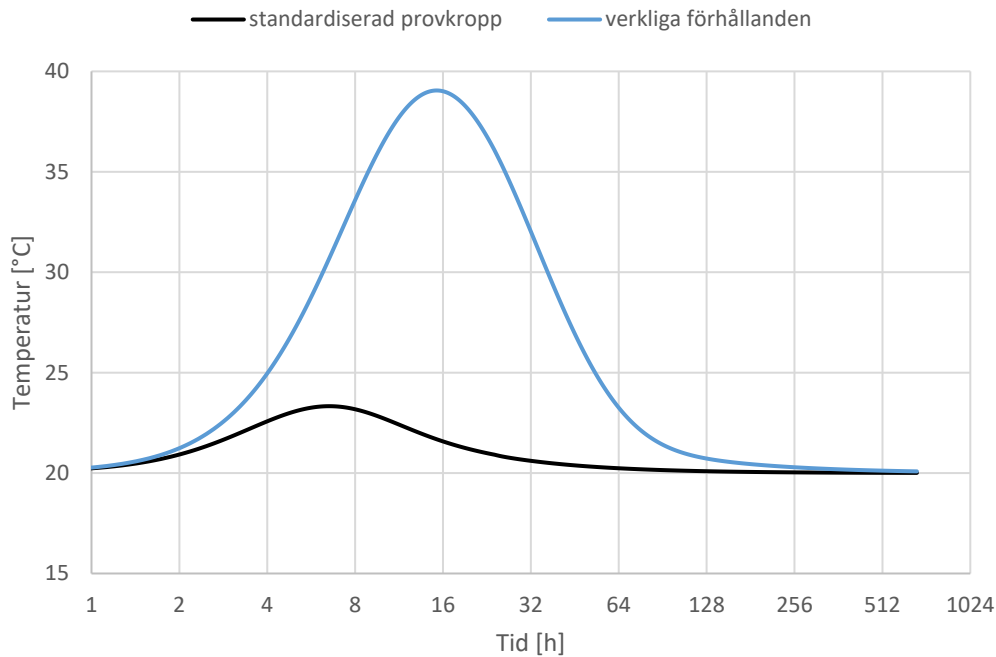


Figur 4. Schematiskt värmefflöde i en balkong jämfört med en kubisk provkropp.

### 3.3.3 Temperaturutveckling i betong

Några timmar efter att cement kommit i kontakt med vatten startar cementets huvudreaktion, och den reaktionen ger upphov kraftig till värmeutveckling. Detta resulterar i en kortvarig topp i betongens temperaturutveckling som illustreras i figur 5. Värmeutvecklingen avtar dock efter hand som vattnet binds kemiskt till cementet och fritt vatten får det svårare att tränga in till de oreagerade delarna av cementkornen. Reaktionen fortsätter dock så länge det finns tillgång på både ohydratiserat cement och obundet vatten, men värmeeffekten är då så låg att den inte längre ger någon nämnvärd temperaturstegring i betongen (Johansson, 2020, s. 52).

Genom kännedom om cementets egenskaper och hur mycket värme som kroppen avger mot sin omgivning kan temperaturstegringen beräknas. I figur 5 visas temperaturutvecklingen för två likvärdiga betongkroppar som härdar i samma miljö, men under olika isoleringsförhållanden. Den svarta linjen motsvarar en temperaturutveckling för en provkropp utan isolering, medan den blå linjen motsvarar isoleringsförhållanden som kan uppstå i mitten av större betongkonstruktioner eller en isolerad kub.



Figur 5. Temperaturstegring i två likvärdiga kroppar av betong, där den ena kroppen förlorar värme mot omgivningen långsammare än den andra. OBS: logaritmisk tidsskala.

När avformning behöver göras kort tid efter gjutning kan det vara fördelaktigt att ta hänsyn till denna skillnad i temperaturutveckling, eftersom det är sannolikt att hållfastheten som har utvecklats under förhållanden som uppstår i ett fullstort element väsentligt överstiger den hos en provkropp.

### 3.3.4 Hydratationsgrad över tid

Cementens hydratationshastighet är starkt beroende av både temperatur- och fuktförhållanden i materialet, och kan uttryckas med ekvation 10 (Emborg, 2021, ss. 383 - 386).

$$\frac{d\alpha}{dt} = \alpha_0 \beta_T \beta_{RH} \quad (10)$$

där

$\alpha$  är hydratationsgraden

$t$  är tid

$\alpha_0$  är det aktuella bindemedels hydratationshastighet under referensförhållanden

$\beta_T$  är hastighetsfaktor som beror på temperaturen

$\beta_{RH}$  är hastighetsfaktor som beror på relativ fuktighet i betongens porer



I ett tidigt skede av hydratationen kan faktorn som beror på betongens relativa fuktighet  $\beta_{RH}$  sättas till 1 beroende på den goda tillgången på fritt vatten. Efter hand som betongen härdar binds det fria vattnet kemiskt till cementet, och tillgången på fritt vatten minskar. Faktorn  $\beta_{RH}$  sjunker efterhand som betongen utvecklar en porstruktur, och fritt vatten får allt svårare att nå fram till de ohydratiserade cementkornen. Hydratationsprocessen blir då mer diffusionsberoende. Flera samband för temperaturfaktorn  $\beta_T$  har tagits fram genom åren, och nedan presenteras de kanske tre mest kända (Emborg, 2021, ss. 383 - 386).

#### 3.3.4.1 Arrheniusfunktionen

Arrheniusfunktionen enligt ekvation 11 anses ofta vara väl lämpad för noggranna beräkningar vid temperaturberoende reaktionsförlopp, eftersom den tar hänsyn till att reaktionshastigheten ökar progressivt med temperaturen (Fagerlund, 1988).

$$\beta_T = e^{-\frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{293} - \frac{1}{T+273}\right)} \quad (11)$$

där

$E_a$  är aktiveringsenergi [J/mol]

$R$  är allmänna gaskonstanten = 8,314 [J/mol K]

Arrheniusfunktionen är tillämpningsbar vid temperaturer över 20 °C då aktiveringsenergin  $E_a$  är konstant, men försvagas vid både låga temperaturer och höga hydratationsgrader. Detta medför att Arrheniusfunktionen har karaktären av en godtycklig anpassningsfunktion, och andra enklare samband kan användas utan att gå miste om precision. (Emborg, 2021, s. 383)

Flera anpassningar av faktorn  $\theta$  har gjorts för att ge en bättre passning till dels olika sorters cement, och dels för lagringstemperaturer under 20 °C. Ekvation 12 visar en förenklad metod att beräkna aktiveringstemperaturen.

$$\frac{E_a}{R} = \theta \approx \theta_0 \left(\frac{30}{T+10}\right)^\kappa \quad (12)$$

där  $\theta_0$  och  $\kappa$  är anpassningsparametrar

Dessa finns även tillgängliga i tabellform enligt tidigare utförda mätningar i bland annat Fagerlunds(1988) studie "Olika sätt att definiera mognadsgrad – en jämförelse", där han antar att en lämplig aktiveringstemperatur för elementbetong är 3800 K.

#### 3.3.4.2 TT-faktormetoden

Temperaturens inverkan på betongens härdning kan beskrivas genom den så kallade TT-faktormetoden enligt ekvation 13.

$$\beta_T = \frac{T+10}{30} \quad (13)$$

där

T är betongens temperatur [°C]

Ekvationen bygger på ett antagande om att reaktionshastigheten ökar linjärt med betongens temperatur, och att reaktionen i stort sett avstannar vid temperaturer under -10°C. Vid referenstemperaturen 20°C antas den relativa reaktionshastigheten vara 1. Ifall den relativa reaktionshastigheten har värdet 2 sker reaktionen dubbelt så snabbt jämfört med 1.

TT-faktormetoden, så som den beskrivs i betonghandboken, är i sitt grundutförande och behöver anpassas till både cementsort och i vilket temperaturintervall den härdande betongen väntas få enligt ekvation 14.

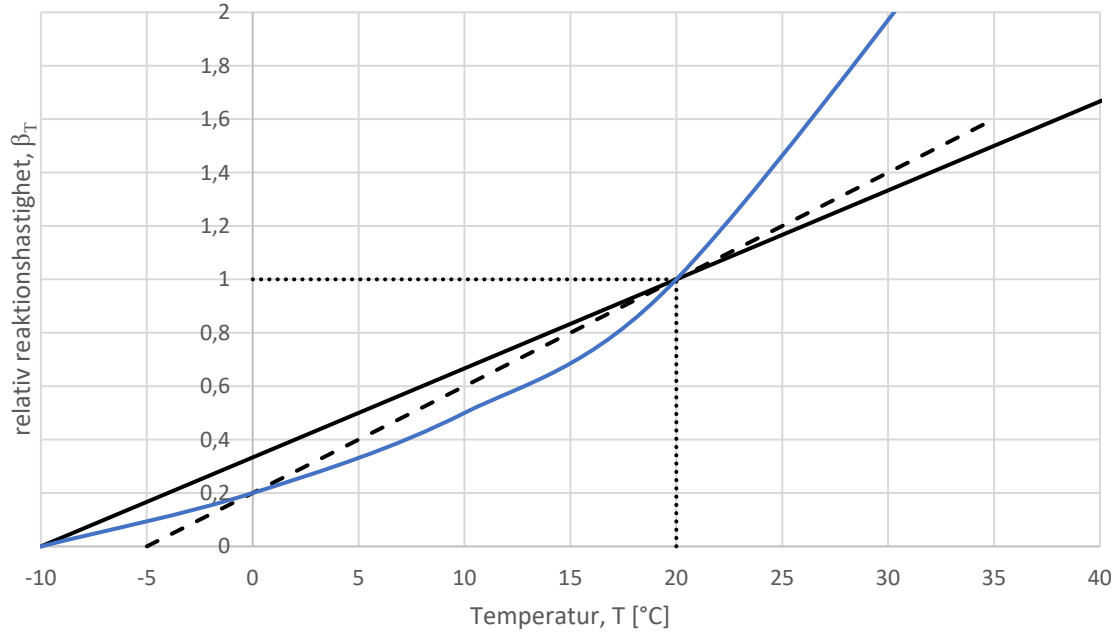
$$\beta_T = \frac{T-\theta_0}{20-\theta_0} \quad (14)$$

Där

T är betongens uppmätta temperatur vid en given tidpunkt

$\theta_0$  är linjens skärning på x-axeln enligt figur 6

Ett vanligt temperaturintervall för betong med standard portlandcement väljs lämpligen så att temperaturspannet är 0°C - 25°C och 25°C - 50°C ifall snabbhärdande portlandcement används.



Figur 6. Relativ reaktionshastighet enligt TT-faktormetoden. Den heldragna svarta linjen är utvecklingen i sitt grundutförande enligt ekvation 13 och den streckade är utvecklingen ifall  $\theta_0$  sätts till -5 i ekvation 14. Blå linje representerar ett tänkt verkligt fall.

### 3.3.4.3 Empiriskt samband

Flera enklare empiriska samband har tagit fram genom åren. I ekvation 15 presenteras en enkel modell som approximerar den relativa reaktionshastigheten  $\beta_T$  (Fagerlund, 1988).

$$\beta_T = \left( \frac{10+T}{30} \right)^{1,6} \quad (15)$$

### 3.3.5 Ekvivalent mognadsålder

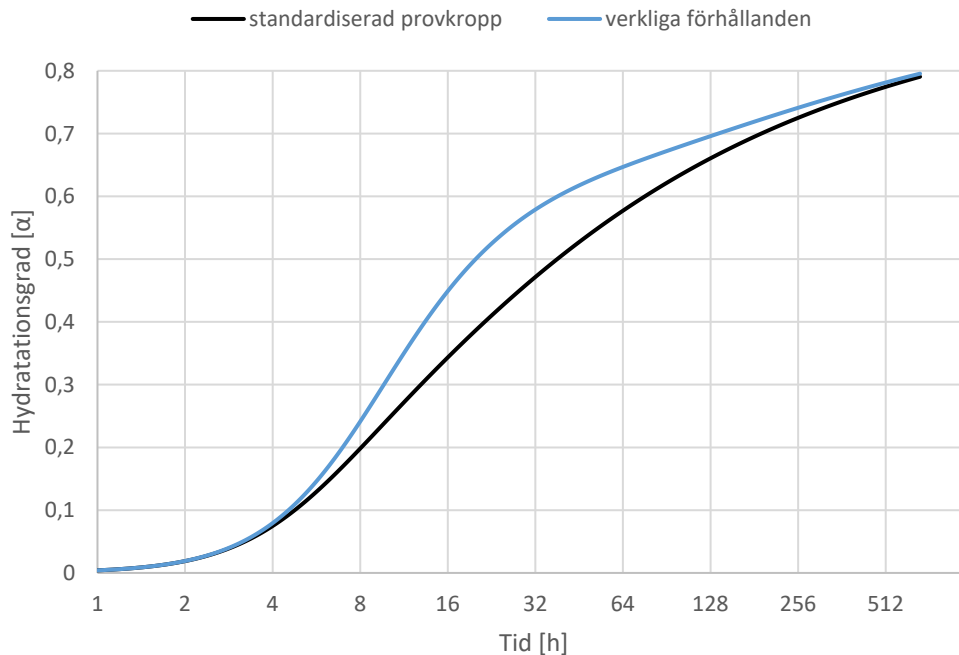
Det kan noteras att både Arrheniusfunktionen, TT-faktormetoden och det empiriska sambandet bygger på att en högre temperatur i betongen ger ett högre värde på temperaturfaktorn  $\beta_T$ , och därmed en snabbare hydratation. Genom att skriva om och integrera ekvation 10 erhålls ekvation 16, som gör det möjligt att beräkna hur hydratationen har utvecklats som en integral med avseende på tiden.

$$\int_0^\alpha \frac{d\alpha}{\alpha_0} = t_e = \int_0^t \beta_T dt \quad (16)$$

Vänsterledet i ekvation 16 är även känd som den ekvivalenta mognadsåldern  $t_e$ , som beskriver hur betongens mognadsgrad har utvecklats i jämförelse med referensförhållanden (Emborg, 2021, s. 384).

### 3.3.6 Hydratationshastighet

Eftersom cementens hydratationshastighet är beroende av betongens temperatur så förlorar en isolerad kropp mindre värme till sin omgivning, vilket leder till att hydratationen sker snabbare i ett tidigt skede. I figur 7 visas en möjlig hydratationsutveckling baserad på temperaturutvecklingen i figur 5 beräknad med TT-faktormetoden. Det kan noteras att även om hydratationsgraden efter 672 timmar (28 dygn) är så gott som densamma, så skiljer den sig markant efter kort tid. Det innebär att även om sluthållfastheten blir densamma så skiljer sig vägen dit, där det är mer fördelaktigt med en högre temperaturstegring ifall avformning behöver ske tidigt.



Figur 7. Hydratationshastighet i olika temperaturförhållanden.

### 3.4 Bestämning av betongs tryckhållfasthet

Det finns två dominerande metoder för att fastställa betongs tryckhållfasthet. Den ena metoden, som används i större delen av världen och även i Eurokoderna, är cylinderhållfasthet. Som namnet antyder provas cylinderformade kroppar av betong, vanligen med diametern 150 mm och höjden 300 mm. Den andra metoden, som är den vanligaste metoden i Sverige, är kubhållfasthet. Kubhållfastheten fastställs på samma sätt som cylinderhållfasthet, men med kubformade provkroppar, där den vanligaste storleken har sidorna 150 mm.

För bestämning av betongens slutgiltiga hållfasthet gjuts och härdas provkropparna enligt standardiserade förfaranden, men för bestämning av tryckhållfasthet i annat syfte kan härdningen anpassas till syftet med provningen. (Westerberg, 2021)

Oavsett vilken metod som används provas kropparna på samma sätt. De utsätts för en succesivt ökande belastning tills brott uppstår, och kroppen ej längre kan bära lasten utan att gå sönder. Den största last som en kropp kan bära kallas för brottlast och betecknas  $F_u$ . Genom att registrera hur stor denna last är vid brottillfället kan betongens tryckhållfasthet  $f_c$  beräknas genom ekvation 17.

$$f_c = \frac{F_u}{A} \quad (17)$$

där  $A$  är kroppens tvärsnittsarea [ $\text{m}^2$ ]

Beroende på vilken form och storlek på provkropp som används erhålls något olika resultat. För att kunna jämföra resultat från olika testmetoder kan omräkning ske enligt standard. Faktorer som kan påverka uppmätt hållfasthet är förutom testkroppens form vilken omgivande temperatur och luftfuktighet den har lagrats i.

### 3.4.1 Mätning av hållfasthet i färdiga konstruktioner

Hållfastheten i färdig konstruktion kan bestämmas med hjälp av utborrade prov eller med indirekt metod som kan påvisas ge en tillförlitlig relation till hållfastheten för utborrade prov (Sundquist, 2021, s. 143). Eftersom utborring av prov är en förstörande metod är denna inte aktuell för detta examensarbete på grund av den allt för höga kostnad det skulle medföra, men skulle troligen ge det mest rättvisande värdet på utvecklad hållfasthet.

## 3.5 Klassificering av betong

Beroende på vilken provkropp som har används betecknas hållfastheten med ett C följt av betongens karaktäristiska värde i MPa för både cylinder- och kubhållfasthet. C32/40 innebär exempelvis att betongens karaktäristiska hållfasthet är 32 MPa när cylindrar provas och 40 MPa när kuber provas. Kvoten mellan cylinder- och kubhållfasthet ligger runt 0,8 med mindre variationer på grund av avrundning.

Resultatet av en tryckning är normalfördelad runt medelvärdet  $f_{cm}$ , och ett enskilt prov är således inte tillräckligt för att bedöma betongens tryckhållfasthet. Detta innebär att ifall flera provkroppar av samma betong provas så kommer de visa något olika värden, och osäkerheten kan minskas genom att flera kroppar provas.

Det karaktäristiska värdet  $f_{ck}$  på betongens tryckhållfasthet avser den undre 0,05-fraktilen, innebärande att högst 5% av utförda prover får understiga det fordrade värdet. Bestämning av betongens karaktäristiska hållfasthet genom provning görs i enlighet med Boverkets föreskrifter och allmänna råd (2011:10) om tillämpning av europeiska konstruktionsstandarder (eurokoder), och skrivs enligt ekvation 18.

$$f_{ck} = f_{cm} - k_n \cdot \sigma \quad (18)$$

där

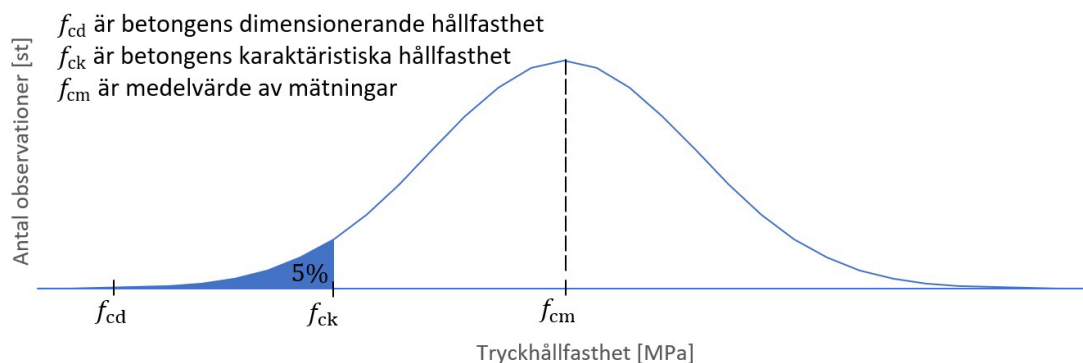
$k_n$  är en koefficient enligt tabell 1 för n antal stickprov

$\sigma$  är stickprovets standardavvikelse

Tabell 1. Värde på koefficienten  $k_n$  beroende på antal stickprov, n, enligt boverkets föreskrifter och allmänna råd.

<b>n</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>
$k_n$	3,15	2,68	2,46	2,34	2,25	2,19	2,14	2,1	2,07	2,05	2,03	2,01
<b>n</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>20</b>	<b>25</b>	<b>30</b>	<b>35</b>	<b>40</b>	<b>100</b>	<b><math>\infty</math></b>
$k_n$	1,99	1,98	1,96	1,95	1,94	1,93	1,89	1,87	1,85	1,83	1,76	1,64

Betongens dimensionerande hållfasthet  $f_{cd}$  är betongens karaktäristiska hållfasthet med en pålagd säkerhetsfaktor. Detta används vid konstruktionsberäkningar för att säkerställa att betongen inte underskrider belastningen den har dimensionerats för att motstå. Figur 8 förtydligar förhållandet mellan de olika hållfastheterna (BFS2011:10, 2011).



Figur 8. Förtydligande av hur hållfasthetsbenämningarna förhåller sig till varandra.

### 3.6 Gjutning av kubiska provkroppar

Det finns flera standarder som behandlar hur en provkropp ska gjutas och hanteras för att erhålla jämförbara resultat. Under denna rubrik förklaras i korthet två vanliga metoder och hur dessa förhåller sig gentemot varandra. I bägge fallen förbereds formen genom att oljas in med en olja som inte påverkar betongens härdning, och fylls därefter med betong. Kompaktering sker genom vibrering till den grad att större hålrum är ifyllda, men luften som är bunden i betongen inte äventyras. Betongen förvaras i formen i minst 16 timmar, men max 72 timmar, skyddad mot uttorkning, vibrationer och stötar.

#### Metod enligt SS-EN 12390

Under tiden som betongen är i formen ska den omgivande temperaturen ligga på  $20 \pm 5$  °C. Efter avformning ska testkropparna förvaras i antingen vattenbad med temperatur  $20 \pm 2$  °C eller i

klimatekåp med samma temperatur och en relativ luftfuktighet på minst 95% tills provning ska ske (Svensk Standard SS-EN 12390-2, 2019).

#### **Metod enligt SS-EN 206**

Efter avformning förvaras provkropparna i vattenbad med temperaturen  $20 \pm 2$  °C, alternativt i en klimatkammare med motsvarande temperatur och en relativ luftfuktighet om minst 95%. När kuberna har uppnått en ålder av 7 dygn tas de ur vattenbadet och förvaras i ett klimatstyrt rum med lufttemperaturen  $20 \pm 2$  °C och den relativa luftfuktigheten 40% – 80% fram till tiden då de ska provas. Detta motsvarar klimatförhållanden för ett vanligt vistelserum (Svensk Standard SS137003, 2021).

Provning med denna metod kräver en omräkning av hållfastheten enligt ekvation 19 för att erhålla jämförbara resultat med metoden enligt SS-EN 12390.

$$f_{c,kub} = 0,92f_{c,kub,SS} \quad (19)$$

### **3.7 Krav med avseende på exponeringsklass**

För att balkongerna ska kunna anses uppfylla krav gällande väderrelaterad belastning behöver de ha en porstruktur som tillåter eventuellt vatten att frysa och smälta utan att äventyra betongens strukturella integritet. Detta ställer krav dels på högsta tillåtna vattencementtal, men även minsta luftinnehåll. Enligt i SS-EN 206, kapitel 5.3 kan en betong i exponeringsklass XF3 anses vara frostsäker. För den aktuella betongen innebär det att den behöver ha ett luftinnehåll på minst 4,5%.





## 4 Material och utrustning

### 4.1 Betong

Betongen består av ballast i kornfraktionerna 0 – 16 mm, snabbhärdande cement av typen SH Slite (CEM 1), där 30% av cementmängden har ersatts med masugnsslagg. Även flyttillsatsmedel och luftporbildande medel användes. De torra komponenterna blandades i 20 sekunder varpå vatten tillfördes och betongen blandades i ytterligare 180 sekunder. Varje sats kontrollerades så den klarade kraven för exponeringsklass XF3 enligt SS-EN 206.

Betongens hållfasthet behöver uppnå minst 16 MPa vid avformning och en karaktäristisk hållfasthet på 40 MPa 28 dygn efter gjutning.

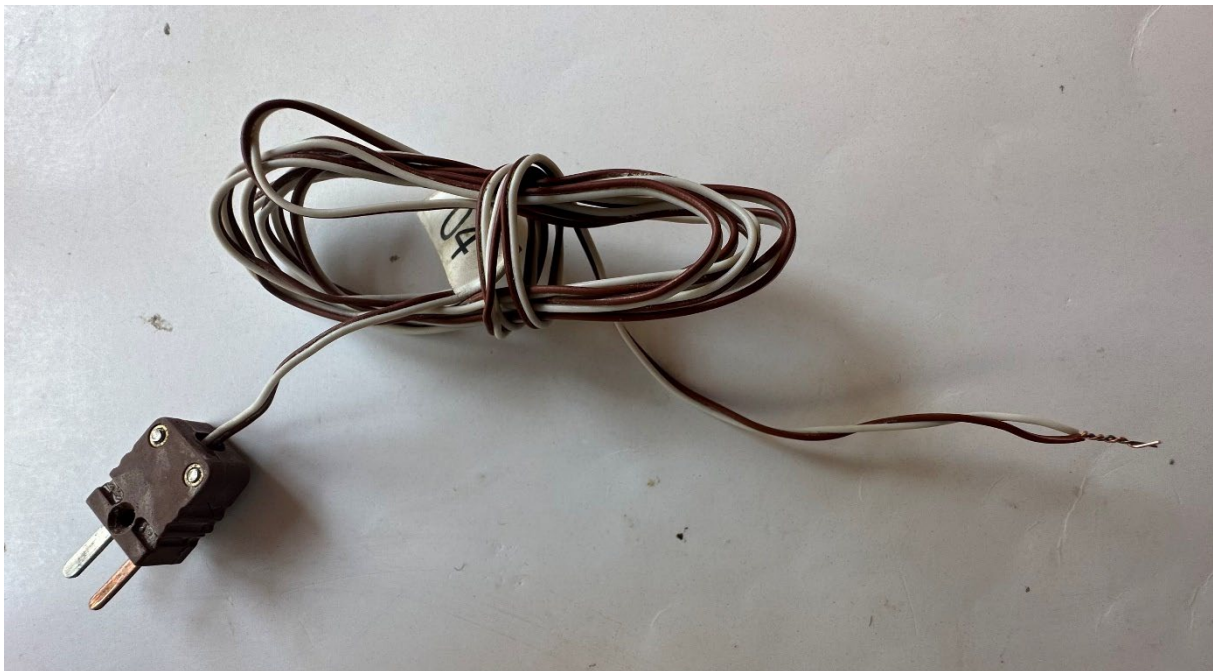
### 4.2 Utrustning

Under arbetets gång har följande utrustning använts.

#### Temperaturlogger

All mätning och loggning av temperaturer gjordes med TC-08 från Pico Technologies kopplad till en dator med programvaran picolog samt termoelement typ K. Temperaturloggningen bygger på Seebeck effekten, som innebär att ifall en sluten krets bestående av två olika metaller utsätts för en temperaturskillnad, så induceras en spänning i kretsen som är direkt proportionell temperaturskillnaden. Genom att mäta storleken på spänningen kan temperaturen bestämmas.

Termoelement typ T består av två isolerade ledare, där den ena är gjord av ren koppar och den andra av konstantan, som är en legering bestående av huvudsakligen koppar och nickel. En kontakt som passar TC-08 sätts på i ena änden medan den andra änden tvinnades ihop enligt figur 9. Mätning av temperatur sker i den hoptvinnade änden.



Figur 9. Termoelement typ K.

Programvaran picolog ställdes in för att logga temperaturer minut för minut under samtliga mätningar. På grund av en del förberedelsearbete var det inte alltid möjligt att påbörja loggningen i samma stund som betongen var färdigblandad.

### **Kubiska gjutformar**

Samtliga provkroppar som användes för att mäta tryckhållfasthet gjöts i formar enligt figur 10. Dessa ger kuber med sidorna 150 mm och är tvådelade för att enkelt kunna avforma betongkuben efter gjutning. Innan varje gjutning oljades formarna med formolja som inte påverkar betongens härdningsprocess.



*Figur 10. Standardiserade kubiska gjutformar avsedda för att bestämma tryckhållfasthet i betong.*

### **Vibrationsbord**

För att säkerställa en god kompaktering och efterlikna verkliga förhållanden i största möjliga mån vibrerades varje kub på ett vibrationsbord i 5 sekunder efter att den fyllts med betong och avjämnats.

### **Tryckpress**

Vid mätning av betongens tryckhållfasthet användes tryckpress enligt figur 11, där en konstant belastningshastighet ställdes in på 0,6 MPa per sekund för 150 mm kuber. Samtliga prover hanterades i enlighet med de standardiserade förfarande som beskrivs i SS-EN 206, och sammanfattas i följande steg:

1. Kontroll så att provkropp inte har några synliga kaviteter eller andra defekter som kan tänkas påverka resultatet.
2. Rengöring av samtliga tryckytor.
3. Provkroppen placerades så centrerat som möjligt i tryckpressens tryckyta.
4. Provet genomfördes och provkroppens brottslast registrerades.
5. Provkroppen kontrollerades för ett godkänt brottsmönster enligt SS-EN 12390-3:2019.





Figur 11. Utrustning för provning av kubers hållfasthet.

### Kåpor

För att simulera olika isoleringsförhållanden täcktes kuberna med specialtillverkade kåpor av cellplast enligt figur 12. Dessa byggdes precis så stora som krävdes för att kunna täcka de kubiska gjutformarna, men ett kvadratisk innermått på 265 mm och höjden 170 mm. Tjockleken på materialet var 18 mm, 50 mm och 100 mm sett från vänster till höger, och dessa hölls ihop av vävtejp.



Figur 12. Kåpor som användes för att täcka gjutformarna.

### Lufthaltsprovare

Vid all gjutning kontrollerades betongens luftinnehåll med en lufthaltsprovare för att dels uppfylla kraven för gjutning, och dels för att erhålla jämförbara resultat.



## 5 Metod

För att utvärdera hållfasthetsutvecklingen i betongen användes två metoder. Dels beräknades ekvivalent mognadsgrad utifrån loggade temperaturer, och dels utvärderades hållfastheten genom att trycka kuber som hade isolerats så att deras temperaturutveckling skulle motsvara en fullstor balkong. Stegen som vidtogs förklaras i korthet nedan:

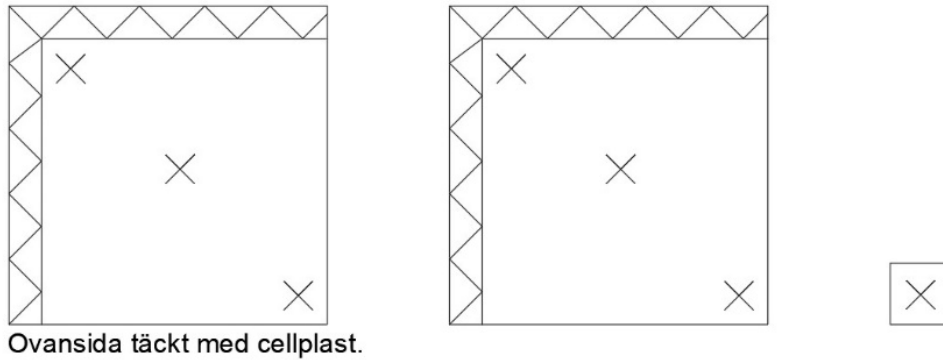
1. Inledande undersökning för att jämföra skillnaden i temperaturutveckling beroende på kropparnas storlek och hur de hanteras.
2. Undersökning för att kartlägga hur temperaturutvecklingen skiljer sig mellan olika delar av en balkong. Här valdes även en referenspunkt för vidare mätningar i balkonger.
3. Temperaturutveckling i referenspunkt jämfört med kubiska provkroppar med varierande mängd isolering.
4. Temperaturens inverkan på hållfastheten undersöktes genom att 60 provkroppar gjöts och trycktes vid olika tillfällen. Temperaturutvecklingen för kuberna loggades.
5. En tendenskurva togs fram baserad på Arrheniusfunktionen och ett antagande om aktiveringstemperatur på 3500 K.
6. Beräkning och anpassning av beräknad hållfasthet till uppmätta värden i steg 4.
7. Bedömning av utvecklad hållfasthet i balkonger.
8. Försök med mindre mängd cement.

### 5.1 Inledande undersökning

Skillnaden i temperaturutveckling med avseende på provkroppens storlek och hantering undersöktes genom att tre provkroppar gjöts av betong från samma blandning. En standardiserad kubisk provkropp med sidorna 150 mm och två större provkroppar med måtten 700 x 700 x 160 mm. Temperaturer loggades i totalt 8 mätpunkter under 24 timmar fördelat på tre punkter vardera i de stora provkropparna, en i mitten av provkuben samt en som loggade den omgivande lufttemperaturen. Termoelementen i de stora testkropparna placerades ca 50 mm från de undersökta hörnen, samt i mitten. Figur 13 förtydligar testkropparnas geometri och termoelementens placering, där varje kryss representerar ett termoelement.

Formen till de stora provkropparna byggdes av 18 mm formplywood och ställdes på ett stålbord avsett för gjutning. Två sidor på de stora kropparna isolerades med 80 mm cellplast, och två sidor lämnades oisolerade. För att underlätta vidare hantering så vaxades både stålbordet och sidorna på de stora provkropparna med spraybart formvax. Även ett lyftdon gjöts in i de stora provkropparna för att underlätta vidare hantering.

För att bättre efterlikna verkliga förhållanden så täcktes ovensidan på en av de stora provkropparna med en skiva cellplast två timmar efter gjutning. Täckningen skedde på ett sätt så att cellplasten inte kommer i kontakt med betongen. Den andra stora testkroppen och kuben lämnades otäckta. Samtliga kroppar stod i direkt närhet av varandra under testets gång.

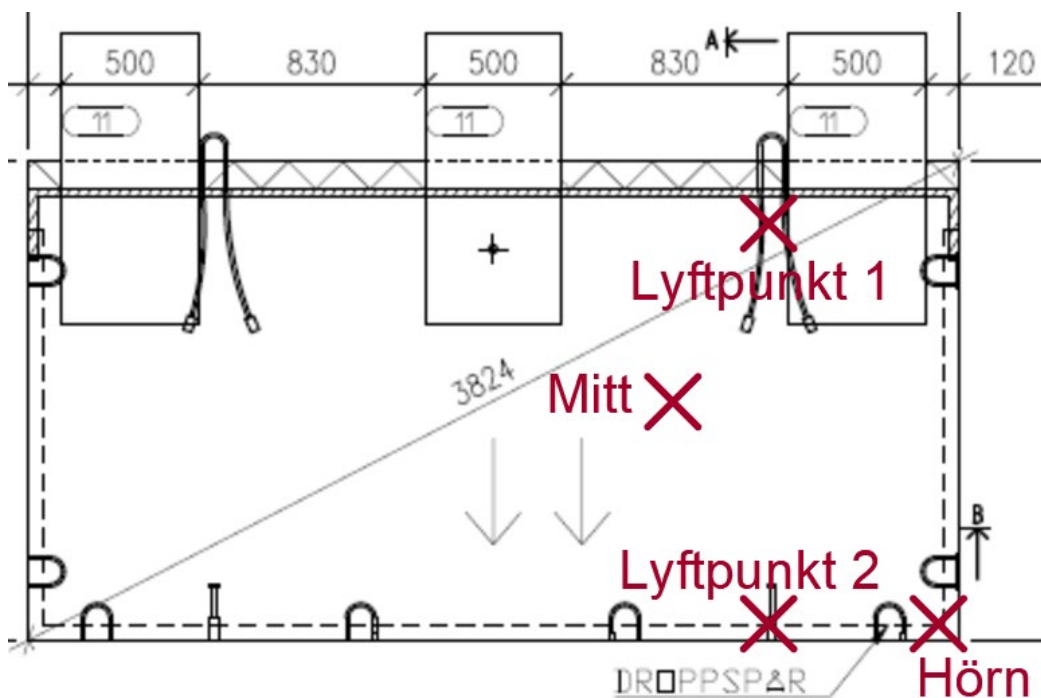


Figur 13. Utformning av testkroppar och placering av termoelement.

## 5.2 Temperaturutveckling i fullstora balkonger

Temperaturutvecklingen undersöktes genom att fyra termoelement placerades ut på intressanta punkter i en balkong, dessa är markerade med kryss i figur 14. Framför allt lyftpunkter bedömdes vara av stort intresse eftersom belastningen är som högst vid dessa punkter när elementen lyfts. Temperaturen loggades även för luften och en kubisk provkropp som gjöts samtidigt. Termoelementen utmed balkongens kanter och hörn placerades ca 50 mm från formens sidor och så nära mitten som möjligt.

Även om balkongernas mått kan skilja sig något mellan olika projekt är principen densamma, där samtliga balkonger förses med fyra lyftpunkter som jämnt fördelar balkongens tyngd. Balkongen i figur 14 är av mindre modell jämfört med vad som vanligtvis gjuts. Balkongens storlek borde inte ha någon nämnvärd påverkan för resultatet, men det kan tänkas att temperaturutvecklingen sker något snabbare ju större balkongen är. Att mäta på en liten balkong ger således resultat på den säkra sidan.

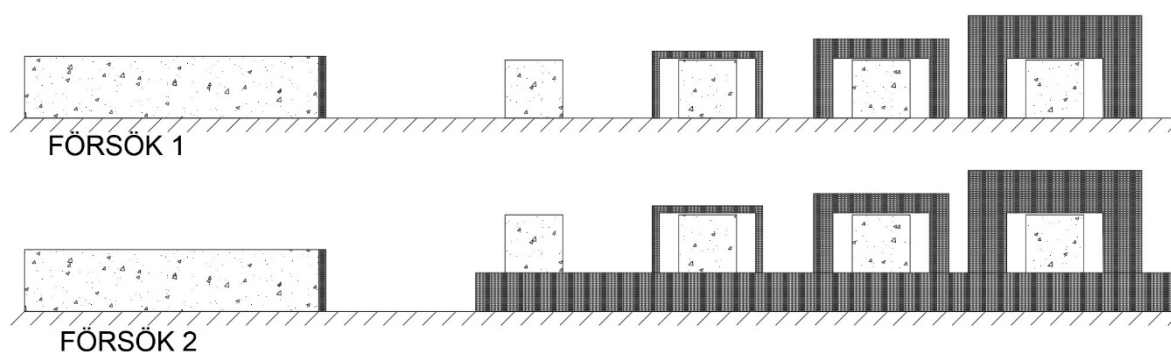


Figur 14. Placering av termoelement i undersökt balkong.

### 5.3 Temperaturutveckling i balkong jämfört med isolerade kuber

Temperaturutvecklingen för en lyftpunkt (lyftpunkt 2 enligt figur 14) i en balkong jämfördes med temperaturutvecklingen för 4 kuber med varierande mängd isolering. Kuberna ställdes på samma stålbord som balkongen. För att säkerställa att ingen värmeledning mellan kropparna skedde så ställdes kuberna så långt ifrån balkongen som möjligt. Efter att kuberna gjöts så försågs de med vars ett termoelement och täcktes med kåpor enligt figur 15. Temperaturutvecklingen loggades från gjutning till avformning.

Försöket gjordes i två omgångar, en där kuberna stod direkt på stålbordet och 5 sidor isolerades, och en där kuberna stod på en skiva cellplast och isolerades som samma sätt som i första omgången.



Figur 15. Temperaturutveckling i balkonger jämfört med kuber.

### 5.4 Temperaturberoende hållfasthetsutveckling

Den temperaturberoende hållfasthetsutvecklingen undersöktes genom att kuber gjöts och täcktes med olika kåpor. Kuberna tryckprovades efter olika lång tid och deras temperaturutveckling loggades under hela härdningsförloppet. Totalt gjöts 60 kuber i 7 olika uppställningar (A - G), där termoelementet placerades i den sista kuben för serien som provades.

En uppställning avser ett visst antal kuber gjutna vid samma tillfälle och isolerad med samma mängd isolering, där tryckprovning sker vid ett eller flera tillfällen. Vid varje provtryckningstillfälle trycktes 3 kuber. I tabell 2 presenteras isoleringens tjocklek, totalt antal provkroppar, samt vid hur många tillfällen proverna trycktes för respektive serie.

Tabell 2. Vilken kåpa som användes samt hur många prov som gjordes för respektive serie.

Serie	Underlag	Kåpa [mm]	Antal prov [Antal]	Provtillfällen [Antal]
A	Cellplast	100	9	3
B	Cellplast	50	9	3
C	Cellplast	18	9	3
D	Cellplast	0	12	4
E	Cellplast	0	15	5
F	Stålbord	18	3	1
G	Stålbord	0	3	1

## 5.5 Tendenskurva

För betong gjuten med enbart cement finns det tendenskurvor att tillgå i bland annat Betonghandbok MATERIAL. Eftersom den aktuella betongen innehåller både cement och masugnsslagg är det förväntat att dess tendenskurva avviker från en betong med enbart cement. Reaktionen förväntas ske något långsammare i början, men tillta efter hand som hydratationen kommit igång.

För att utvärdera ett rättvisande samband mellan den beräknade ekvivalenta mognadsgraden och hållfastheten plottas dessa mot varandra, där den ekvivalenta mognadsgraden  $t_e$  har beräknats med Arrheniusfunktionen med en aktiveringstemperatur på 3500 K. Detta inte är ett vedertaget sätt att utvärdera en tendenskurva, och avser mer att ge en fingervisning gällande betongens utveckling.

## 5.6 Jämförelse mellan beräknad och uppmätt hållfasthet

Med utgångspunkt i en tendenskurva framtagen enligt beskrivning i kapitel 5.5 och beräknad ekvivalent mognadsgrad  $t_e$  med hjälp av Arrheniusfunktionen beräknades hållfastheten utifrån de loggade temperaturerna för serierna A – E och jämfördes med motsvarande uppmätta hållfastheter. Detta gjordes för att undersöka ifall beräkningar med hjälp av ekvivalent mognadsgrad är applicerbara så pass kort tid efter gjutning, och hur stor avvikelser i så fall kan tänkas vara.

## 5.7 Utvecklad hållfasthet i balkongerna

Hållfasthetsutvecklingen i balkongerna bedömdes genom tidigare fastställda samband applicerades på de loggade temperaturutvecklingarna i 3 balkonger. Genom att beräkna den ekvivalenta mognadsåldern  $t_e$  enligt Arrheniusfunktionen och matcha denna mot tendenskurvan utvärderad enligt beskrivning i kapitel 5.5 kunde den utvecklade hållfastheten beräknas enbart utifrån uppmätt temperaturdata. Beräkningarna gjordes för både fullstora balkonger och kubiska provkroppar som gjöts vid samma tillfälle.

## 5.8 Försök med mindre mängd bindemedel

Resultaten från försöken enligt kapitel 5.6 och 5.7 pekar på att den utvecklade hållfastheten är avsevärt högre i balkongerna jämfört med motsvarande kubiska provkroppar, och det finns således potential till att minska mängden cement. Därför gjordes ett försök där mängden cement, masugnsslagg och vatten reducerades med 20% jämfört med ordinarie betongrecept. Försöket gjordes i två omgångar, där både tidig hållfasthet och 28-dygns hållfasthet provades. Den tidiga hållfastheten provades vid tre olika tillfällen, 11 – 14 timmar efter gjutning, där tre provkroppar trycktes vid varje tillfälle. 28-dygns hållfastheten hanterades enligt standard 12390-2.

Eftersom försöket enligt kapitel 5.6 visade att utvärdering av betongens utvecklade hållfasthet genom ekvivalent mognadsgrad inte var tillförlitligt förrän närmare 20 timmar efter gjutning så täcktes provkropparna istället med 50 mm kåpor, som enligt försök enligt kapitel 5.3 visade sig ge en högre temperaturutveckling än oisolerade kroppar, men något lägre än i en fullstor balkong. Ingen temperaturloggning har skett vid dessa försök.

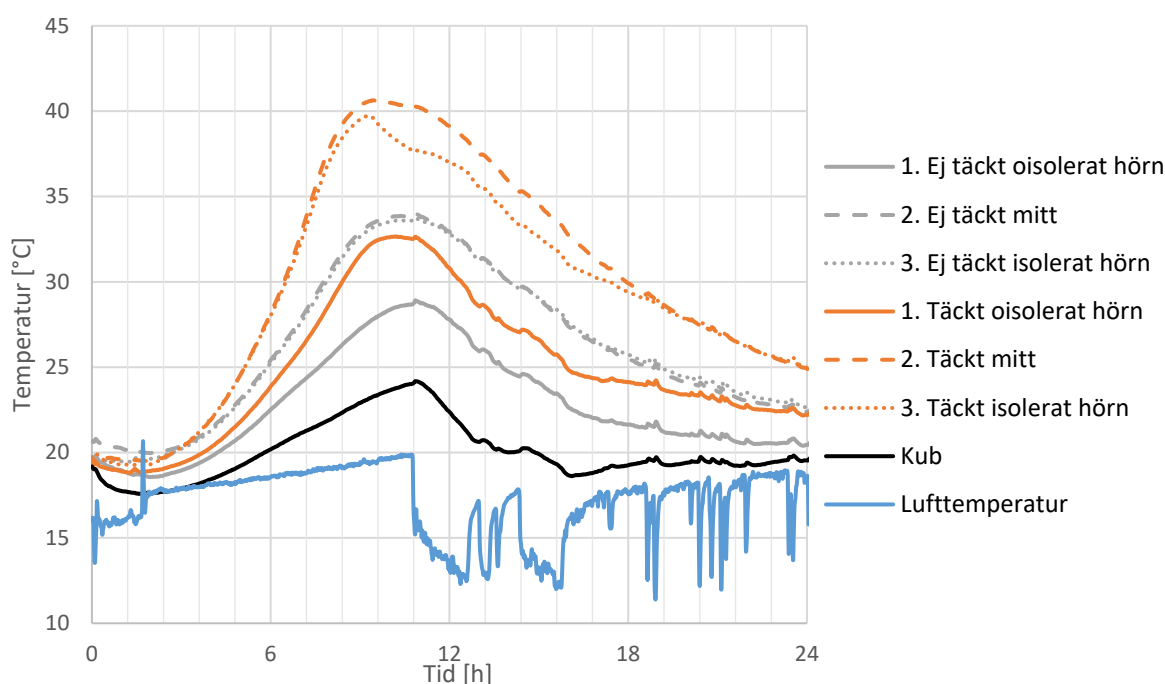


## 6 Resultat

### 6.1 Inledande undersökning

Den inledande undersökningen visade att det är betydande skillnad i kropparnas temperaturutveckling, där temperaturutvecklingen i den standardiserade kubiska provkroppen är markant lägre jämfört med det mest ofördelaktiga läget i de större testkropparna. Detta innebär sannolikt att hållfasthetsutvecklingen i kuben är lägre än vad som har utvecklats i de större testkropparna.

Att täcka ovansidan med cellplast visade sig vara ett effektivt sätt att öka temperaturen i den stora provkroppen oavsett mätpunkt. Figur 16 visar temperaturutvecklingen för de tre provkropparna.



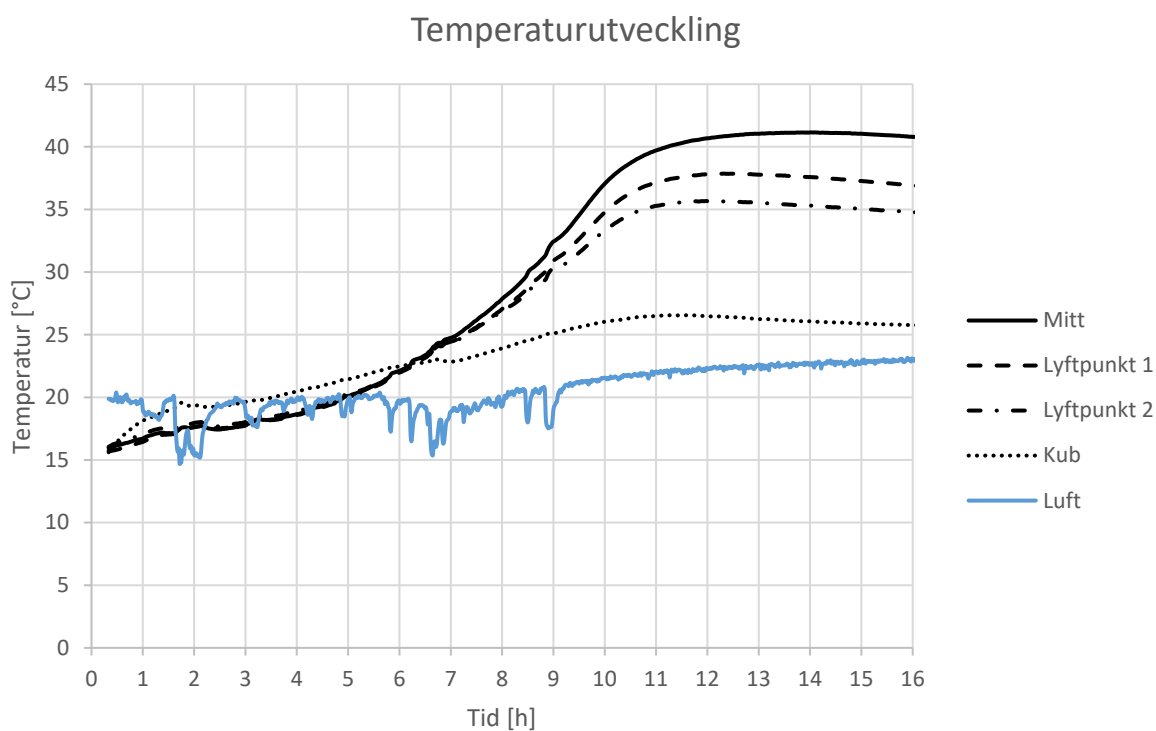
Figur 16. Temperaturutveckling i de olika provkropparna.

### 6.2 Temperaturutveckling i fullstora balkonger

Som förväntat skedde störst temperaturstegring i mitten av balkongen och var ett fåtal grader lägre utmed kanterna. Oavsett vilken mätpunkt som studerades var temperaturstegringen i en fullstor balkong betydligt större än motsvarande oisolerad kubisk provkropp. Det bör noteras att även om betongens initiala temperatur var densamma så avvek kubens temperaturutveckling jämfört med balkongens genom att kubens i högre grad påverkades av yttre faktorer. En kort tid efter gjutning värmdes kubens av omgivningen tills den hamnade i jämvikt, och var då ett fåtal grader varmare än balkongen. Denna differens minskade efterhand som cementreaktionen tog fart. Temperaturutvecklingen för respektive punkt kan ses i figur 17.

Lyftpunkt 2 valdes som referens för framtida mätningar.

Termoelementet som registrerade det mest ofördelaktiga läget, det viss säga i ett oisolerat hörn, slutade att fungera under testets gång och finns ej med i figur 17. Det förväntade resultatet var en något lägre temperaturstegring än vad som kan observeras för lyftpunkt 2.

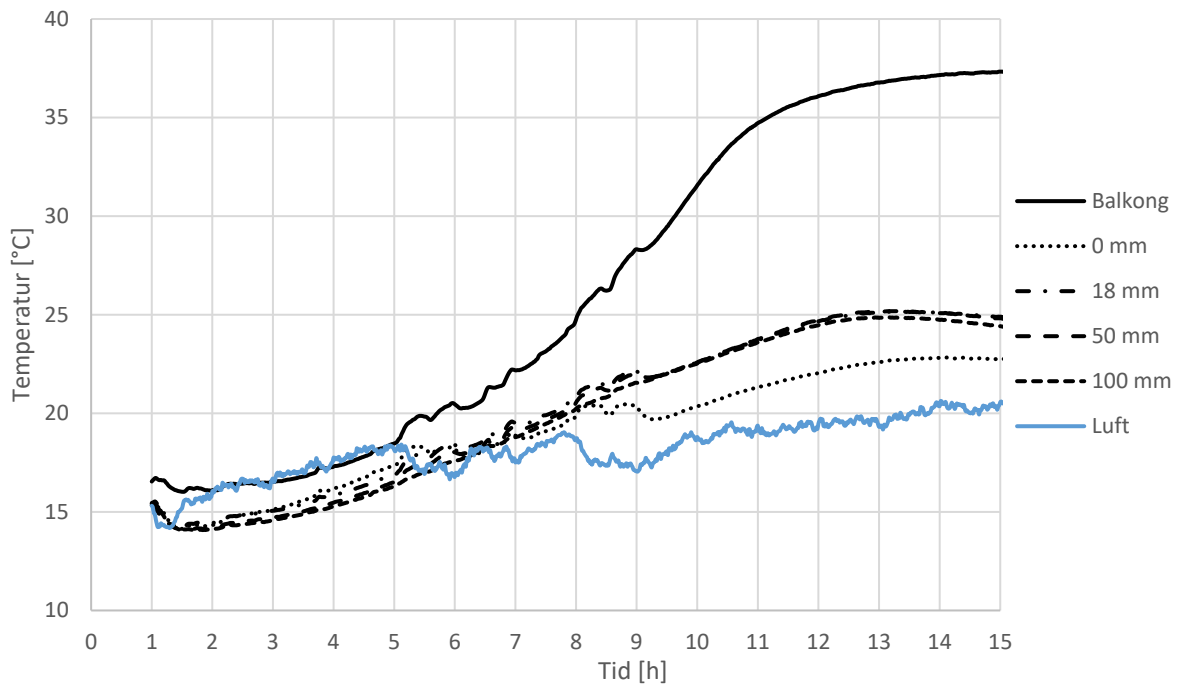


Figur 17. Temperaturutveckling för flertalet punkter i en balkong jämfört med en kubisk provkropp.

### 6.3 Temperaturutveckling i balkong jämfört med isolerade kuber

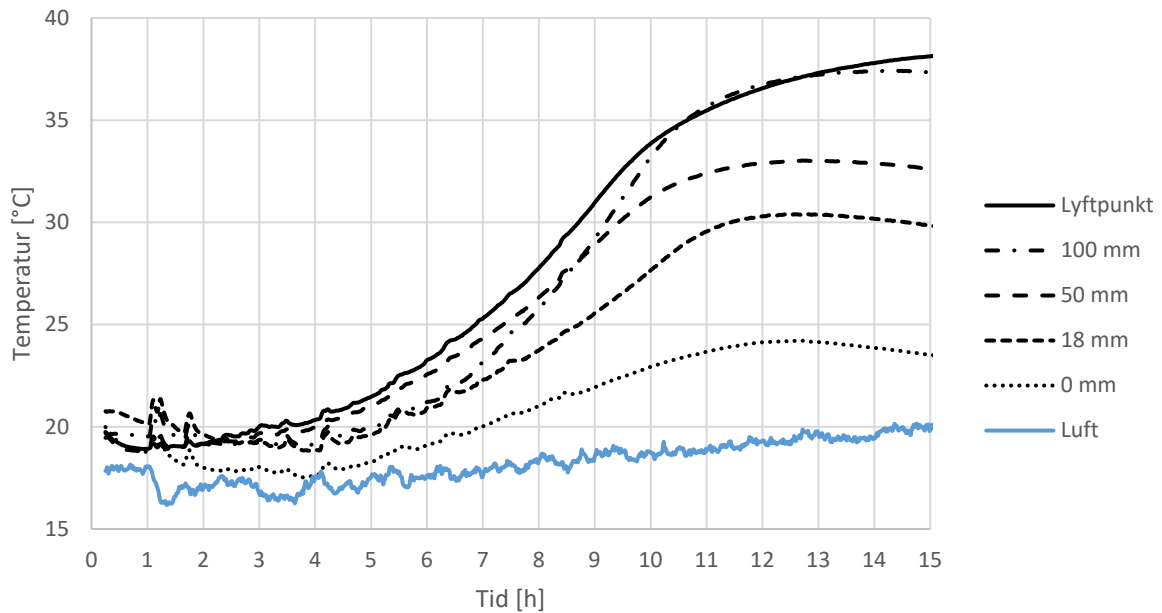
Figur 18 visar att genom att täcka kuber som står direkt på stålbord med isolerande kåpor uppnås endast en liten ökning av temperaturutvecklingen jämfört med den oisolerade kuben. Isoleringens tjocklek tycks inte vara av betydelse i detta fall, troligen beroende på att stålbordet agerar som en kylfläns för små kroppar och effektivt leder bort värmen.

Temperaturutvecklingen vid lyftpunkten i balkongen är avsevärt högre än samtliga testkuber oavsett tjocklek på den isolerande kåpan. Detta medför att det är troligt att även hållfasthetsutvecklingen skiljer sig, och kuberna ger inte ett rättvisande värde.



Figur 18. Temperaturer hos kuber stående direkt på stålbord med isolerande kåpor. (Försök 1)

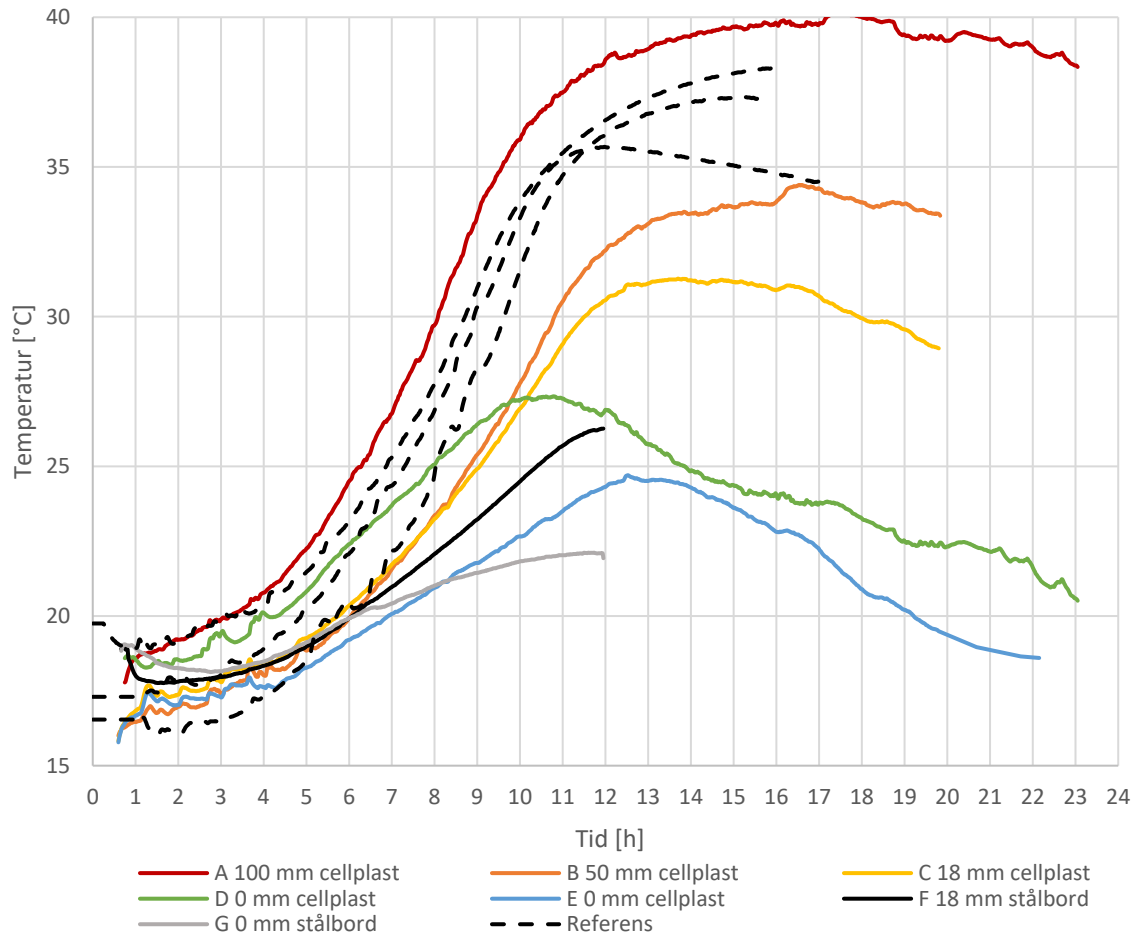
Figur 19 visar att genom att isolera kuberna även mot stålbordet så uppnåddes både en högre temperatur i kuberna, och en större spridning av temperaturer beroende på kåpornas varierande tjocklek. Som förväntat var temperaturen i den oisolerade kuberna lägst.



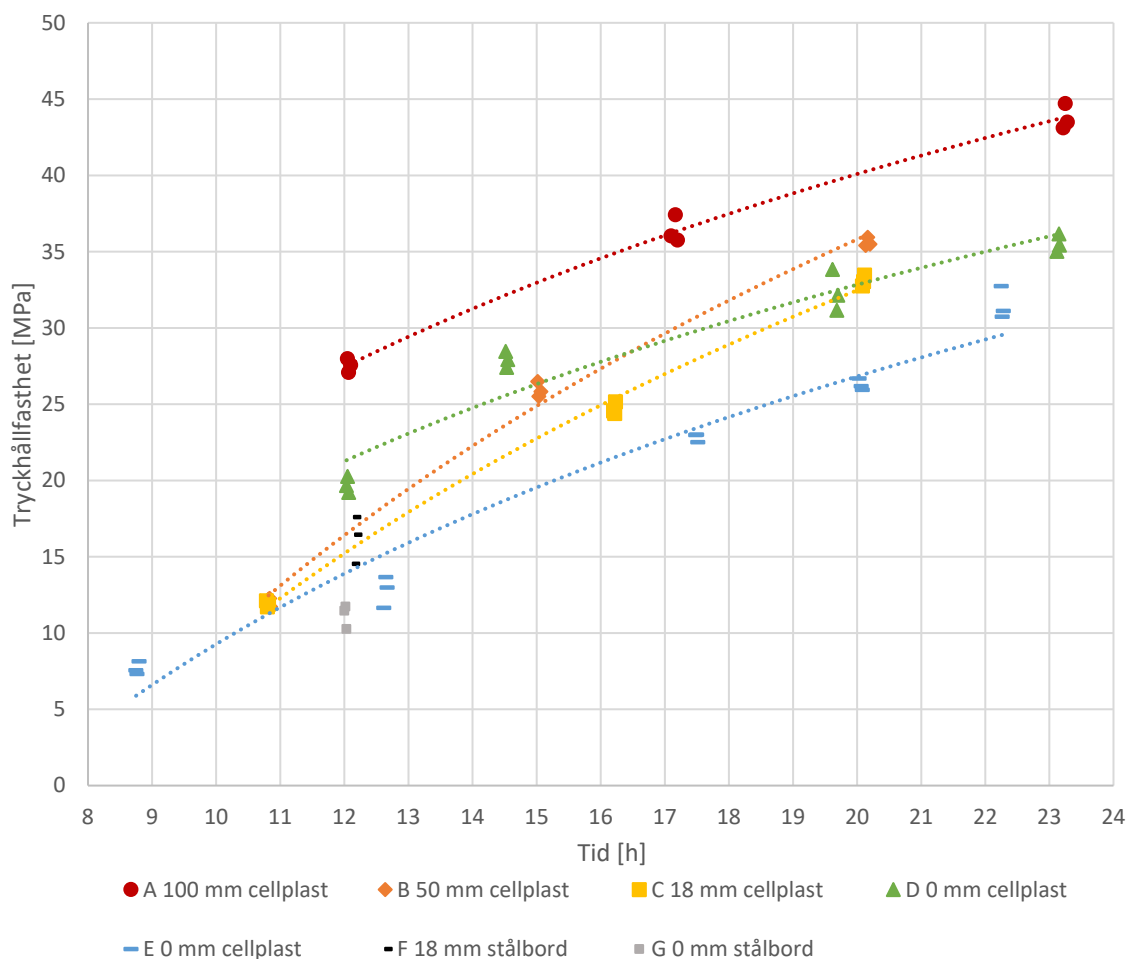
Figur 19. Temperaturer hos kuber stående på cellplast med isolerande kåpor. (Försök 2)

## 6.4 Temperaturberoende hållfasthetsutveckling

Figur 20 visar temperaturutveckling och figur 21 utförda hållfasthetsmätningar för respektive provkroppar. Det kan noteras att hållfasthetsutvecklingen i betongens tidiga skede går mycket snabbt, och som förväntat ger en högre temperatur i betongen ger en snabbare hållfasthetsutveckling. Samtliga serier gjöts med samma recept, men vid olika tillfällen.



Figur 20. Temperaturutveckling för serierna A – G. Streckade linjer visar temperaturutveckling från fullstora element.



Figur 21. Hållfasthetsutveckling för serierna A-G.

Serierna F och G var enbart isolerade på fem sidor och stod direkt på stålboard. Deras temperaturutveckling avviker från övriga serier genom att de troligen kylades underifrån. Dessa provades enbart vid ett tillfälle ca 12 timmar efter gjutning.

Både Serie D och E helt oisolerade, och båda stod på en skiva cellplast. Den enda skillnaden mellan dem är att den initiala temperaturen för serie D är något högre. Det kan ses i figur 21 att betongens hållfasthetsutveckling i serie D tycktes genom hela testets gång ligga 4 – 5 timmar före betongen i serie E, vilket tyder på att betongens gjuttemperatur har stor inverkan på hur snabbt avformningshållfastheten nås.

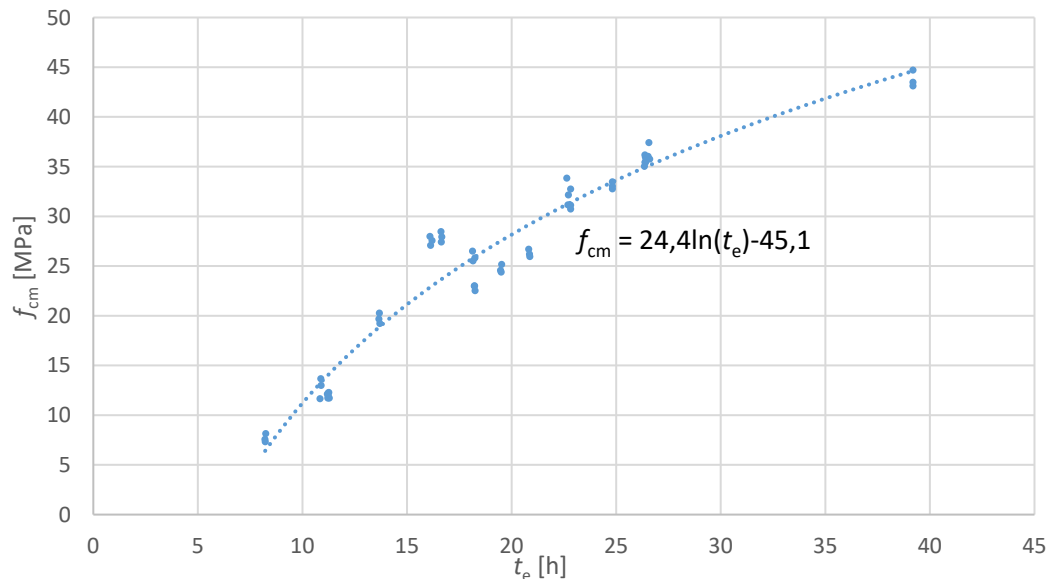
Jämförs serie A med serie G kan det ses att det är stor skillnad i utvecklad hållfasthet. Serie A:s temperaturutveckling är mest lik den som kan ses vid lyftpunkterna i fullstora balkonger, medan temperaturutvecklingen i serie G motsvarar en provkropp som stått direkt på stålboard. Detta innebär att provkropparnas hantering har stor påverkan på den utvecklade hållfastheten, och genom att isolera en provkropp så kan ett mer rättvisande värde på den utvecklade hållfastheten erhållas.

## 6.5 Anpassad tendenskurva

Figur 22 visar att det finns ett tydligt samband mellan beräknad ekvivalent mognadsålder och uppmätt hållfasthet, där medeltryckhållfastheten  $f_{cm}$  kan approximeras som en funktion av den

ekvivalenta mognadsgraden  $t_e$ . Avvikelser från trendlinjen kan bero på både den naturliga variationen mellan prover, men också att betongen är gjuten vid flera olika tillfällen och det är troligt att det har varit små variationer i betongens beståndsdelar.

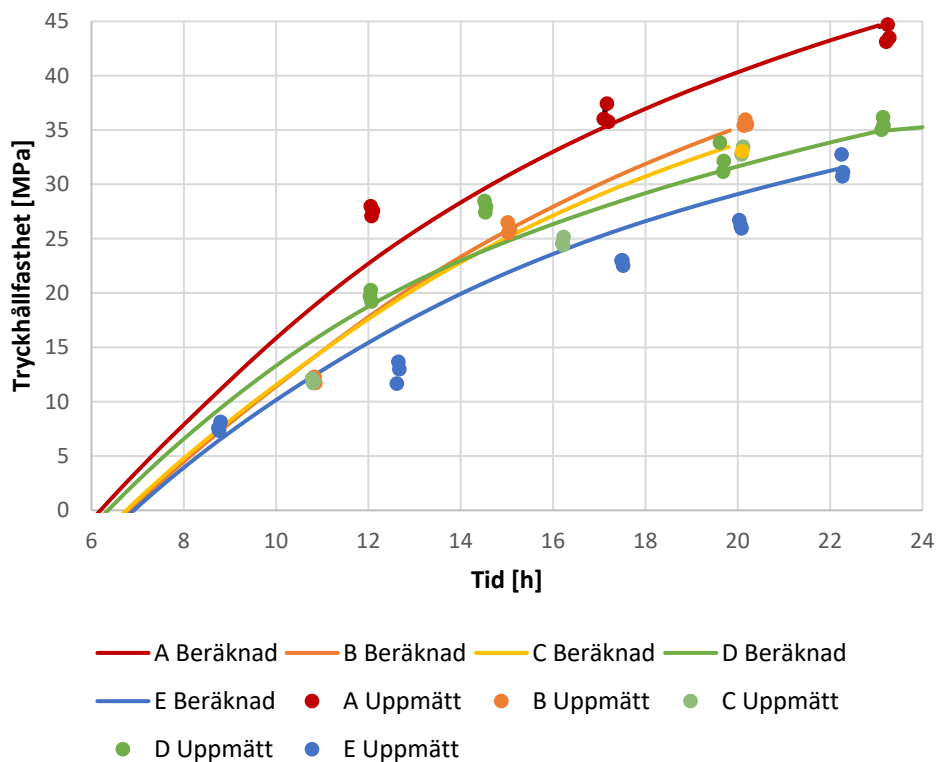
Tendenskurvan i figur 22 är speciellt framtagen för betongen som används vid gjutning på fabriken i Ängelholm. För andra betongrecept där en del av cementet har ersatts med alternativa bindemedel behöver anpassade kurvor tas fram.



Figur 22. Samband mellan ekvivalent mognadsålder och uppmätt hållfasthet.

## 6.6 Jämförelse mellan beräknad och uppmätt hållfasthet

Figur 23 visar den beräknade hållfastheten plottad tillsammans med den uppmätta. Det kan ses att det finns en viss skillnad mellan dem. Denna skulle delvis kunna förklaras med att det tidigare antagandet om att faktorn som behandlar relativ fuktighet  $\beta_{RH}$  inte är försumbart. Ingen hänsyn har tagits till detta dock.



Figur 23. Beräknad hållfasthet i förhållande till sig till den uppmätta.

## 6.7 Utvecklad hållfasthet i balkonger

Figur 24 visar resultaten från tre försök där temperaturutvecklingen vid en lyftpunkt i en balkong jämfördes med temperaturutvecklingen för motsvarande kubisk provkropp som gjöts samtidigt. Utifrån de loggade temperaturutvecklingarna beräknades den ekvivalenta mognadsåldern för respektive kropp. Beräkningarna gjordes i Excel med Arrheniusfunktionen enligt ekvation 20 med en antagen aktiveringstemperatur  $\theta$  på 3500 K och ett tidssteg på 1 minut.

$$t_e = \sum e^{\theta \left( \frac{1}{293} + \frac{1}{273+T} \right)} \cdot \Delta t \quad (20)$$

där

$t_e$  är ekvivalent mognadsålder [h]

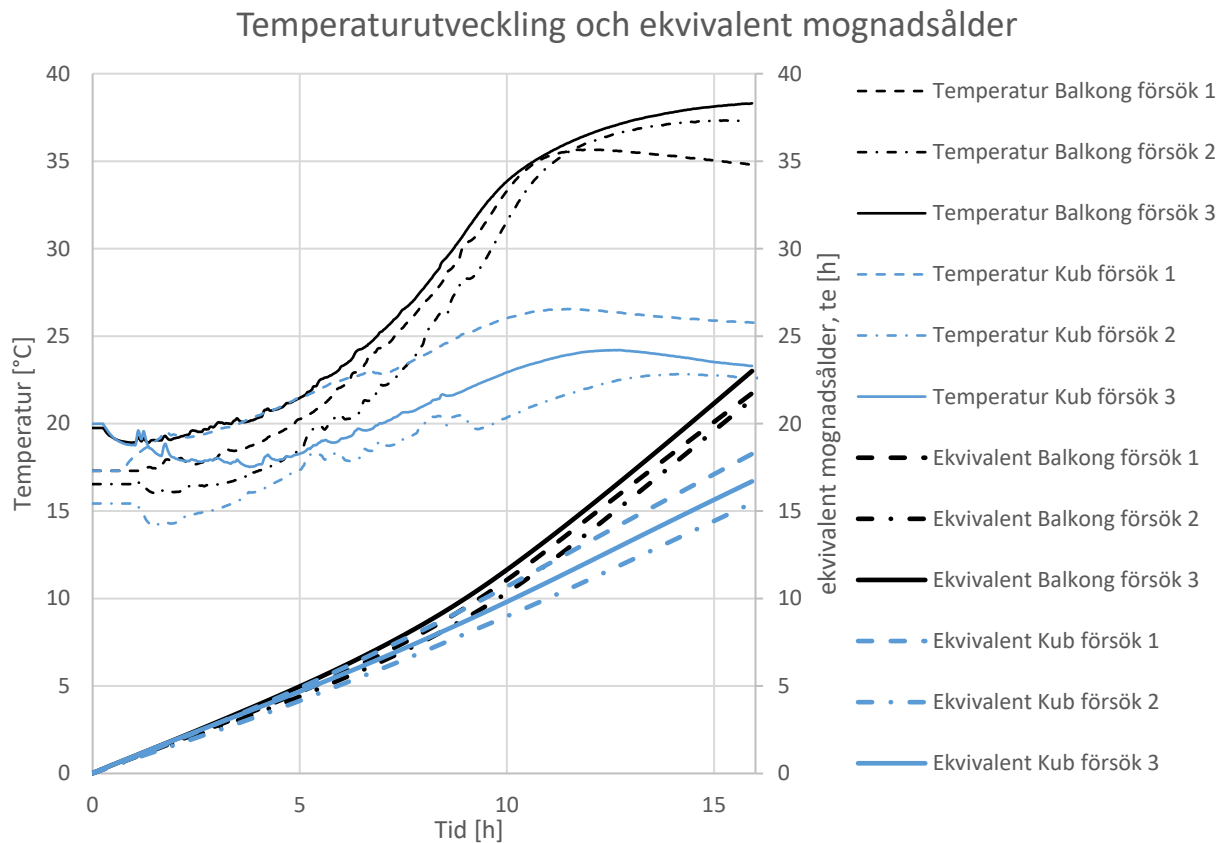
$\theta$  är aktiveringstemperatur [°K]

$T$  är betongens temperatur [°C]

$\Delta t$  är tidssteg [h]

Det kan ses att den utvecklade ekvivalenta mognadsgraden skiljer sig en del mellan verkliga förhållanden och provkroppen, där utvecklingen i balkongerna är längre gången för samma

tidpunkt. En intressant observation är att provkropparna påverkas av sin omgivning i större utsträckning än balkongerna. Detta kan ses genom att studera temperaturutvecklingen för försök 1, där betongens initiala temperatur var 17,3 °C. Betongen som användes till balkongen håller sig kvar på den temperaturen avsevärt längre jämfört med motsvarande kub, som mindre än 2 timmar efter gjutning är 1,5 °C varmare.

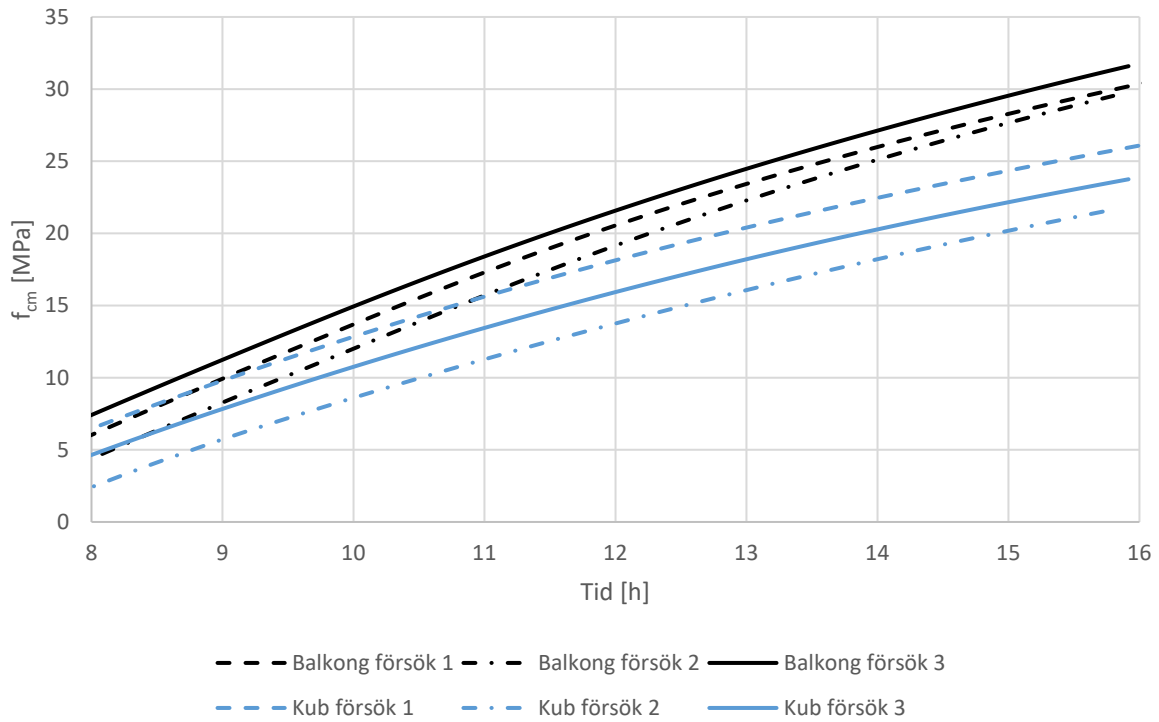


Figur 24. Beräknad ekvivalent mognadsålder utifrån loggade temperaturer i balkonger och oisolerade testkuber som härdats i samma miljö.

Den beräknade hållfastheten i balkongerna och kuberna visas i figur 25, där det kan observeras att det skiljer flera MPa mellan hållfastheten som har utvecklats i en balkong jämfört med en kub för samma tidpunkt.

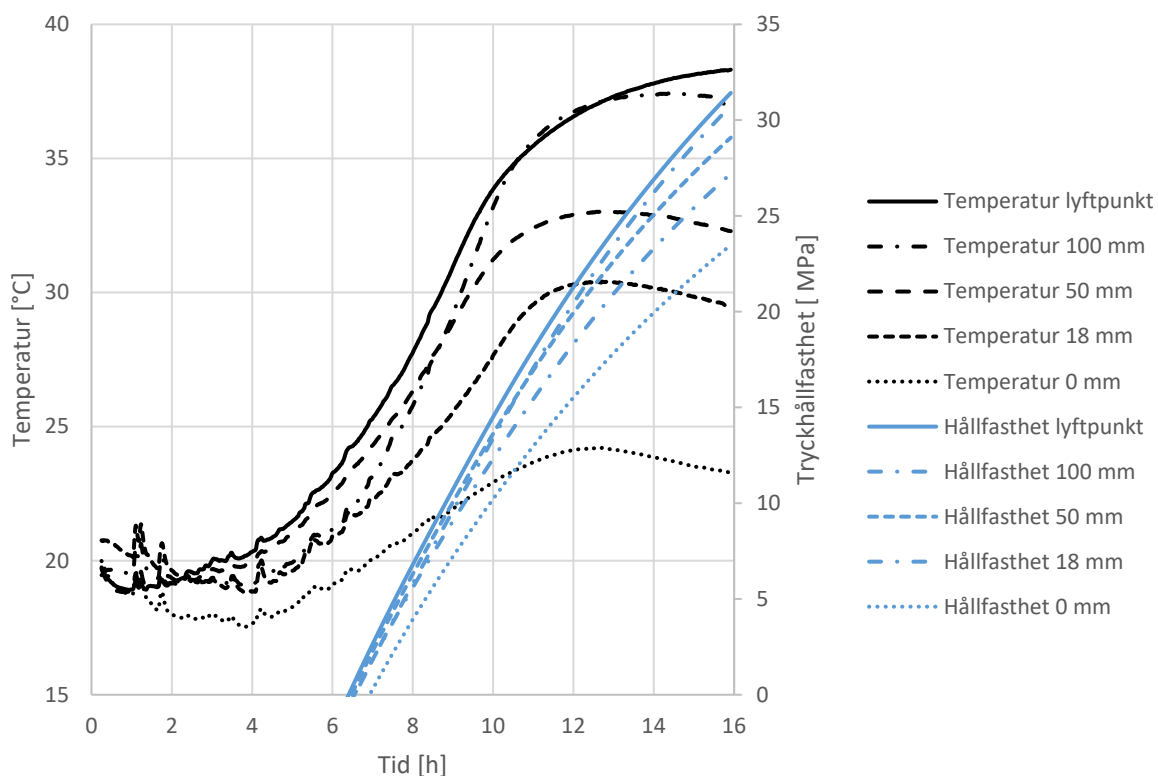


## Utvecklad hållfasthet över tid



Figur 25. Beräknad hållfasthet i balkonger och motsvarande oisolerade kuber.

I figur 26 har hållfasthetsutvecklingen beräknats utifrån loggade temperaturer för både en balkong och 4 provkroppar med olika kåpor. Det kan ses att isolera provkroppen med en kåpa kan en mer rättvisande hållfasthetsutveckling uppnås.

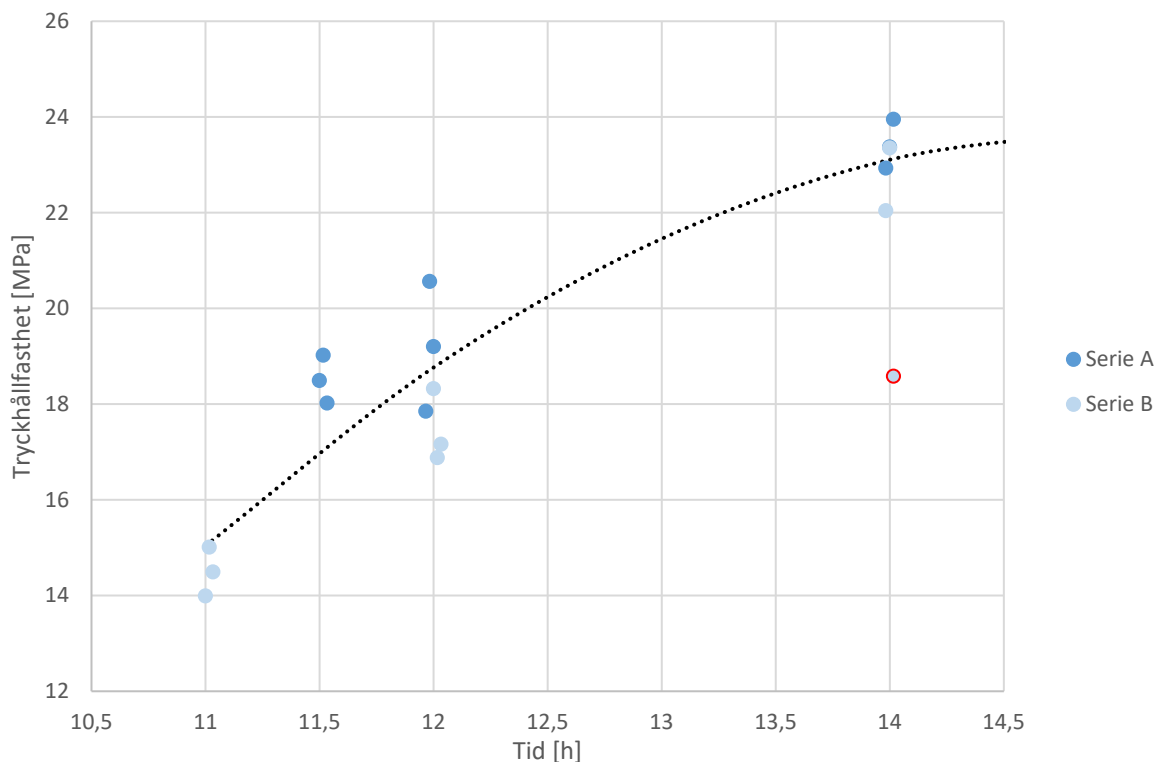


Figur 26. Temperatur- och beräknad hållfasthetsutveckling. Tjockleken på kåpornas isolering framgår av teckenförklaringen.

## 6.8 Försök med mindre mängd cement

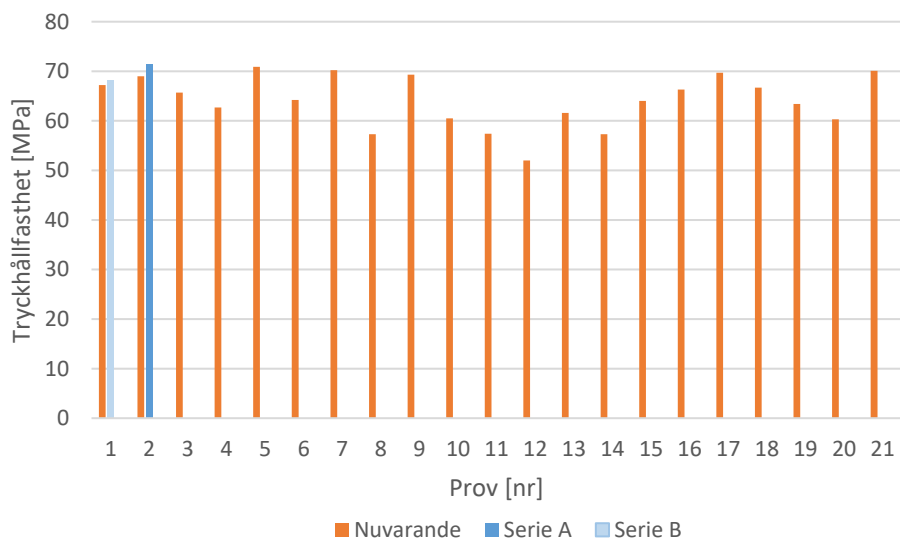
Figur 27 redovisar tryckhållfasthet från provkroppar där mängden cement, masugnsslagg och vatten har minskats med 20% vardera. Dessa prover var isolerade med 50 mm cellplastkåpor, vilket enligt tidigare provning visade ge en något lägre temperaturutveckling jämfört med en balkong. Eftersom minsta avformningshållfasthet ser ut att uppnås inom önskad tid finns stor potential till att minska mängden cement i det ordinarie betongreceptet.

En av provkropparna i serie B hade en icke tillfredsställande brottbild, där ett stycke hade spjälkats av från kubens sida. Denna kub provades 14 timmar efter gjutning och hållfastheten var markant lägre jämfört med övriga kuber som provades vid samma tidpunkt. Resultatet från den kuben är markerat med rött i figur 27 och är ej medräknat i trendlinjen.



Figur 27. Utvecklad tryckhållfasthet över tid från provbetong med 20% mindre bindemedel.

Figur 28 visar tryckhållfastheten för 28-dygns hållfasthet för nuvarande betongrecept, där en kub i veckan har testats under 21 veckors tid. I samma figur finns även resultaten för 28-dygns hållfasthet för betong med mindre andel bindemedel. Trots att mängden bindemedel och vatten har minskats med 20% i serie A och B verkar detta inte ha någon nämnvärd inverkan på sluthållfastheten. Provkropparna för att mäta långtidshållfastheten gjöts enligt standardiserat förfarande, där provkropparna efter avformning förvarades i vatten.



Figur 28. 28-dygns hållfasthet för nuvarande betongrecept jämfört provbetong där mängden bindemedel har minskats med 20%.



## 7 Diskussion

### 7.1 Resultat

Resultaten pekar på att hållfasthetsutvecklingen mellan standardiserade 150 mm kuber och fullstora element skiljer sig i hög grad, där en betydligt högre hållfasthet har utvecklats i balkongerna än vad motsvarande provkropp visar. Det är därför fördelaktigt att använda sig av anpassade mätmetoder för att bestämma betongens hållfasthet i ett tidigt skede. Att använda sig av termoelement och teoretiska beräkningar är dock opraktiskt under produktion på grund av den snabba produktionstakten och tiden det tar att hantera mätutrustningen, men det är ett bra hjälpmedel för att få en uppfattning om hur betongens värmeutveckling ser ut i ett undersökande syfte. Resultaten från försöket enligt rubrik 6.6 visade dessutom att beräknad hållfasthet med hjälp av ekvivalent mognadsgrad inte var rättvisande inom det tidsintervall som är mest intressant.

Ett betydligt snabbare och enklare sätt att mäta hållfasthet i ett tidigt skede är att använda sig av en variant på nuvarande mätmetod, där provkropparna isoleras på ett sätt så att deras temperaturutveckling motsvarar ett fullstort element. Denna metod är dock varken standardiserad eller välbeprövad sen tidigare, och isoleras provkropparna för mycket finns en risk med att de visar högre hållfasthet än vad som har utvecklats i balkongerna. Detta är dock inget som har hänt under examensarbetets gång.

Betongens hållfasthetsutveckling är starkt beroende av temperaturen, där ett fåtal graders skillnad i betongens initiala temperatur resulterade i flera timmars skillnad i hur snabbt avformningshållfastheten nåddes. Med grund i detta kan mängden cement justeras efter årstid, alternativt kan fler/andra åtgärder sättas in för att värma ballasten.

En viktig aspekt att ta hänsyn till är att betongens initiala temperatur justerades till stor del med temperaturen på vattnet som den blandades med. En minskning av mängden cement i betongen innebär även en minskning av mängden vatten vid konstant vattencementtal, och leder till en lägre initial temperatur i betongen under förutsättning att vattnet inte värms ytterligare.

### 7.2 Hantering av provkroppar

Mätvärden för korttidshållfasthet påverkas till stor del av vilken yta provkroppen ställs på. För att få en temperaturutveckling i provkroppen som liknar verkliga förhållanden i platta element som gjuts på stålbord krävs det dels att provkroppen ställs på en isolerande yta, och dels isoleras på rätt sätt. Att inte isolera provkroppen alls och/eller att ställa det på en yta med relativt god värmeledningsförmåga leder till att temperaturutvecklingen blir avsevärt lägre än vad som uppmättes i balkongerna. Det är troligt att det omvända kan gälla ifall provet täcks med för mycket isolering, men det är som sagt inget som har hänt i detta examensarbete.

Det finns en tydlig korrelation mellan betongens tidigt utvecklade värmetopp och den uppmätta hållfastheten. Genom att hantera provkroppar avsedda att mäta avformningshållfasthet på ett bättre sätt kan ett mer rättvisande värde erhållas. Eftersom isolering av provkroppar resulterar i uteslutande högre uppmätt hållfasthet så kan metoden användas till att optimera mängden bindemedel i betongen.

### 7.3 Tendenskurva

En rättvisande tendenskurva för betongens referensförhållanden visade sig vara svårt ta fram i fabriksmiljö. Detta på grund av att både betongens initiala temperatur och den omgivande lufttemperaturen varierade under examensarbetets gång, och även små variationer av dessa ledde till stora förändringar av hållfastheten. För säkrare resultat hade en bättre tendenskurva behövts tas fram i laboratoriemiljö med tillgång till klimatskåp. Tendenskurvan som togs fram i detta examensarbete är baserad på ett antagande om att betongens aktiveringstemperatur  $\theta$  är 3500 K och att den följer Arrheniusfunktionen väl.

### 7.4 Ekvivalent mognadsgrad och beräknad hållfasthet

Under arbetets gång provades flera olika aktiveringstemperaturer  $\theta$  för Arrheniusfunktionen så väl som andra empiriska samband och varianter på den framtagna tendenskurvan, men tyvärr kunde inte en bättre passning hittas än den som presenterades i figur 23. Att beräkna betongens hållfasthet enbart utifrån den loggade temperaturen visade sig vara möjligt, men tyvärr inte inom en acceptabel tolerans för att ha en praktisk tillämpning i det här fallet.

### 7.5 Bedömning av hållfasthet

En alternativ metod att bedöma betongens hållfasthet valdes genom att isolera provkroppar på ett sätt så att temperaturutvecklingen i provkroppen bättre matchar, men ej överskrider temperaturutvecklingen i en fullstor balkong. I detta fall bedömdes kåpor av 50 mm tjock cellplast lämplig samtidigt som provkropparna ställdes på en skiva cellplast. Detta ger en något lägre hållfasthet än vad som utvecklas i balkongerna, men mer rättvisande än en oisolerad provkropp.

### 7.6 Felkällor

#### Vattencementtal

Eftersom betongen blandades i fabriksmiljö med snabb produktionstakt, och det finkorniga materialets fukthalt bedöms med stickprovskontroller, är det förväntat att vissa variationer i betongens vattencementtal förekommer. Detta har en viss inverkan på betongens uppmätta hållfasthet, men på grund av en jämn kvalitet under examensarbetets gång tros dessa variationer vara små.

#### Mätning av hållfasthet

Resultaten vid tryckning visar enbart små avvikelser mellan prover tryckta vid samma tillfälle, vilket tyder på hög methodsäkerhet och jämn kvalitet på provkropparna.

#### Temperaturmätningar

Funktionskontroll av temperaturloggern visade på små skillnader mellan de olika kanalerna när de mätte ett referensobjekt, i det här fallet en hink med vatten. Den största avvikelsen som registrerades under examensarbetets gång var under 1 °C mellan den kanalen som visade högst värde jämfört med den som visade lägst värde. Det är möjligt att termoelementens varierande längd och kontaktyta kan vara en möjlig orsak till detta. Det längsta termoelementet som användes var ca 8 meter långt. Detta var nödvändigt för att kunna utföra en mätning på riktiga balkonger utan att lämna synliga spår efter mätningen eller hindra de som arbetade med

balkongens yta efter gjutning. Motsvarande var det kortaste termoelementet ca 1 meter långt och användes till att logga temperaturutvecklingen i provkroppar.

### **Beräknad mognadsålder**

Eftersom ingen hänsyn har tagits till faktorn som behandlar den relativa fuktigheten  $\beta_{RH}$  i betongen är detta en uppenbar felkälla gällande beräknad ekvivalent mognadsgrad. Betongen utvecklades snabbare än vad som var förväntat och antagandet om att nämnd faktor kan försummas är troligen felaktigt.





## 8 Slutsats

Den traditionella mätmetoden att utvärdera betongens tryckhållfasthet i ett tidigt skede genom provning av provkroppar som har härdats i samma miljö som fullstora element ger ett avsevärt lägre värde än vad som faktiskt har utvecklats i de fullstora elementen. Genom att isolera provkropparna så att deras temperaturutveckling blir mer lik den som observerades i fullskaliga element erhålls ett mer rättvisande resultat. Detta innebär att det i slutändan är möjligt att minska mängden cement som används i betongreceptet och fortfarande uppnå rätt avformningshållfasthet inom den önskade tidsramen.

Utvärdering av betongens tryckhållfasthet genom beräkning av ekvivalent mognadsgrad är ej applicerbar inom den önskade tidsramen på grund av allt för stora avvikelser mellan beräknad och uppmätt hållfasthet.



## 9 Framtida forskning

För att minska mängden cement som används vid gjutning i fabriksmiljö där hänsyn till avformningshållfasthet behöver tas, behöver nuvarande standardiserade mätmetoder uppdateras. Provkroppar avsedda att mäta korttidshållfasthet behöver hanteras så att deras temperaturutveckling motsvarar den i fullstora element. Ett sätt att uppnå detta skulle kunna vara genom att använda isolerande behållare som rymmer en standardiserad gjutform avsedd för hållfasthetsmätning, där mängden isolering anpassas så att temperaturutvecklingen i provkroppen motsvarar den i de fullstora elementen. Den exakta utformningen av en sådan lösning kräver dock vidare mätningar för att inkludera många olika tänkbara förutsättningar och bindemedelsblandningar, men begränsas dock i sin omfattning av att platta betongelement är snarlika i sin utformning.

### 9.1 Förslag på fortsatta studier

Under arbetets gång har det väckts nya frågor som kan analyseras för att ytterligare minska mängden cement i betongen:

- Den begränsande faktorn för avformningshållfastheten ligger i transportlyftens specifikationer. Är det möjligt att ändra utformning på dessa eller använda en grövre dimension så att kravet på avformningshållfasthet kan minskas?
- Genom att isolera sidorna på gjutformen kan en gynnsammare temperaturutveckling uppnås i betongen genom att betongens temperatur ökar, och bidrar till en snabbare härdning. Hur kan detta göras rent praktiskt så det blir användbart i produktionen, och hur stor blir skillnaden jämfört med nuvarande metod?



## 10 Referenser

- (2019). i *Svensk Standard SS-EN 12390-2*. Swedish Standards Institute.
- Betonginitiativet*. (2018). Hämtat från <https://betonginitiativet.se/om-oss/>
- BFS2011:10. (2011). *Boverkets föreskrifter och allmänna råd (2011:10) om tillämpning av europeiska konstruktionsstandarder (eurokoder)*. Boverket.
- Burström, P. G. (2014). *Byggnadsmaterial*. Lund: Studentlitteratur AB.
- Emborg, M. (2021). i *BETONGHANDBOK MATERIAL Del 2* (s. 376). Halmstad: Svensk byggtjänst.
- Emborg, M. (2021). i *BETONGHANDBOK MATERIAL Del 2* (s. 377). Halmstad: Svensk Byggtjänst.
- Emborg, M. (2021). i *BETONGHANDBOK MATERIAL Del 2* (ss. 383-386). Halmstad: Svensk Byggtjänst.
- Emborg, M. (2021). i *BETONGHANDBOK MATERIAL Del 2* (s. 383). Halmstad: Svensk Byggtjänst.
- Emborg, M. (2021). i *BETONGHANDBOK MATERIAL Del 2* (s. 384). Halmstad: Svensk Byggtjänst.
- Emborg, M. (2021). i *BETONGHANDBOK MATERIAL Del 2* (s. 378). Halmstad: Svensk Byggtjänst.
- Fagerlund, G. (1988). *Olika sätt att definiera mognadsgrad - en jämförelse*.
- Fagerlund, G. (2020). i *BETONGHANDBOK MATERIAL Del 1* (s. 398). Halmstad: Svensk Byggtjänst.
- Fagerlund, G. (2020). i *BETONGHANDBOK MATERIAL Del 1* (s. 422). Halmstad: Svensk Byggtjänst.
- Johansson, S.-E. (2020). i *BETONGHANDBOK MATERIAL Del 1* (ss. 43 - 45). Halmstad: Svensk Byggtjänst.
- Johansson, S.-E. (2020). i *BETONGHANDBOK MATERIAL Del 1* (s. 57). Halmstad: Svensk Byggtjänst.
- Johansson, S.-E. (2020). i *BETONGHANDBOK MATERIAL Del 1* (s. 52). Halmstad: Svensk Byggtjänst.
- Naturskyddsföreningen*. (2023). Hämtat från <https://www.naturskyddsforeningen.se/faktablad/cement-klimat-och-miljo/>
- Neofac AB. (u.d.). Lyft av Balkong, Avformning från 0 grader. *Hanteringsblad Balkong N10-H4*.
- Oskar Esping, I. L. (7 2013). *Hållfasthets- och värmentveckling hos slaggbetong - modellering och tillämpning*.
- Sundquist, H. (2021). i *BETONGHANDBOK MATERIAL Del 2* (s. 143). Halmstad: Svensk Byggtjänst.

Svensk Standard SS137003. (2021). i *Betong - Användning av SS-EN 206:2013+A2:2021 i Sverige* (s. 25). Svenska Institutet för Standarder.

Westerberg, B. (2021). *Betonghandbok MATERIAL Del 2*. Halmstad: AB Svensk Byggtjänst.

## Bilaga A – beräkning av temperaturutveckling i kropp

Betongens avkylning mot omgivningen beräknas:

$$\beta = \frac{\sum h \cdot A}{V \cdot c_b \cdot \gamma_b} = \frac{H}{V \cdot c_b \cdot \gamma_b}$$

$$h = \left( \frac{1}{h_0} + \sum \frac{d_i}{\lambda_i} \right)^{-1} = \left( \frac{1}{h_0} + \frac{1}{h_{tot}} \right)^{-1}$$

$$h_0 = 5,6 + 3,95 \cdot v \text{ för } v < 5 \text{ m/s}$$

$$h_0 = 7,6 \cdot v^{0,78} \text{ för } v > 5 \text{ m/s}$$

$v$  = vindhastighet [m/s]

$d$  = materialtjocklek

$\lambda$  = värmekonduktivitet

$h_{tot}$  är det totala värmeövergångstalet. Typiskt värde är 10 för en stålform och 0 vid adiabatiska förhållanden.

$A$  är ytans area [m<sup>2</sup>]

$V$  är kroppens volym [m<sup>3</sup>]

$c_b$  är

$\gamma_b$  är

Betongens värmeutveckling beräknas:

$$q = Q_{\alpha=1} \cdot (\exp(\ln t)^b)^a$$

$Q_{\alpha=1}$  antas till 500000 J

$a$  och  $b$  är anpassningsparametrar. För standardcement (Std P) kan  $a$  sättas till -10 och  $b$  till -2 vid 20°C.

Ekvivalent mognadsålder beräknas enligt empirisk metod:

$$t_e = \left( \frac{T + 10}{30} \right)^2$$

$$A = \frac{C}{c_b \cdot \gamma_b} \cdot q$$

$$B = T - 20$$

$$C = \beta(T - 20) \cdot \Delta t \cdot 3600$$

$$D = \sum \beta(T - 20) \cdot \Delta t \cdot 3600$$

$T$  är betongens aktuella temperatur

Beräkningarna i tabell A1 och A2 är med parametrar för standard cement (Std P) där omgivningens temperatur är 20°C. Det enda parametern som skiljer dem åt är värdena på värmeövergångskoefficienten  $h_{\text{tot}}$ .



Tabell A1. Beräkningar för de 36 första timmarna för en standardiserad provkropp.  $h_{tot} = 10$ .

$t$ [h]	$\Delta t$ [h]	$\Delta t_e$ [h]	$t_e$ [h]	$q$ [J]	A	B	C	D	$T$ [°C]	$\alpha$
0	1	1,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	20,00	0,00
1	1	1,00	1,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	20,00	0,00
2	1	1,00	2,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	20,00	0,00
3	1	1,00	3,05	160,90	0,02	0,02	0,01	0,00	20,02	0,00
4	1	1,03	4,05	3021,67	0,41	0,39	0,24	0,01	20,39	0,01
5	1	1,09	5,08	11326,32	1,53	1,27	0,78	0,25	21,27	0,02
6	1	1,16	6,16	24328,77	3,28	2,24	1,38	1,03	22,24	0,05
7	1	1,21	7,32	40079,19	5,40	2,99	1,83	2,41	22,99	0,08
8	1	1,24	8,53	56718,19	7,64	3,40	2,08	4,24	23,40	0,11
9	1	1,25	9,77	72933,40	9,83	3,50	2,15	6,33	23,50	0,15
10	1	1,24	11,02	88015,73	11,86	3,39	2,08	8,47	23,39	0,18
11	1	1,22	12,25	101708,41	13,71	3,16	1,93	10,55	23,16	0,20
12	1	1,20	13,48	114016,87	15,36	2,88	1,77	12,48	22,88	0,23
13	1	1,18	14,68	125065,20	16,85	2,60	1,60	14,25	22,60	0,25
14	1	1,16	15,86	135012,87	18,19	2,35	1,44	15,84	22,35	0,27
15	1	1,15	17,02	144015,24	19,41	2,12	1,30	17,28	22,12	0,29
16	1	1,13	18,17	152208,92	20,51	1,93	1,18	18,58	21,93	0,30
17	1	1,12	19,30	159708,79	21,52	1,76	1,08	19,76	21,76	0,32
18	1	1,11	20,42	166609,86	22,45	1,61	0,99	20,84	21,61	0,33
19	1	1,10	21,53	172990,45	23,31	1,48	0,91	21,83	21,48	0,35
20	1	1,09	22,63	178915,28	24,11	1,37	0,84	22,74	21,37	0,36
21	1	1,09	23,73	184438,24	24,85	1,28	0,78	23,58	21,28	0,37
22	1	1,08	24,81	189604,54	25,55	1,19	0,73	24,36	21,19	0,38
23	1	1,08	25,89	194452,40	26,20	1,11	0,68	25,09	21,11	0,39
24	1	1,07	26,97	199014,45	26,82	1,05	0,64	25,77	21,05	0,40
25	1	1,07	28,04	203318,68	27,40	0,99	0,60	26,41	20,99	0,41
26	1	1,06	29,11	207389,31	27,95	0,93	0,57	27,02	20,93	0,41
27	1	1,06	30,17	211247,43	28,47	0,88	0,54	27,59	20,88	0,42
28	1	1,06	31,23	214911,49	28,96	0,83	0,51	28,13	20,83	0,43
29	1	1,05	32,29	218397,73	29,43	0,79	0,49	28,64	20,79	0,44
30	1	1,05	33,34	221720,51	29,88	0,75	0,46	29,12	20,75	0,44
31	1	1,05	34,39	224892,59	30,30	0,72	0,44	29,59	20,72	0,45
32	1	1,05	35,44	227925,36	30,71	0,69	0,42	30,03	20,69	0,46
33	1	1,04	36,49	230828,99	31,10	0,66	0,40	30,45	20,66	0,46
34	1	1,04	37,53	233612,66	31,48	0,63	0,39	30,85	20,63	0,47
35	1	1,04	38,57	236284,63	31,84	0,60	0,37	31,24	20,60	0,47
36	1	1,04	39,61	238852,36	32,19	0,58	0,36	31,61	20,58	0,48

Tabell A2. Beräkningar för de 36 första timmarna för ett tänkbart verkligt förhållande.  $h_{tot} = 1$ .

$t$ [h]	$\Delta t$ [h]	$\Delta t_e$ [h]	$t_e$ [h]	$q$ [J]	$A$	$B$	$C$	$D$	$T$ [°C]	$\alpha$
0	1	1,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	20,00	0,00
1	1	1,00	1,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	20,00	0,00
2	1	1,00	2,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	20,00	0,00
3	1	1,00	3,05	160,90	0,02	0,02	0,00	0,00	20,02	0,00
4	1	1,03	4,05	3021,67	0,41	0,41	0,02	0,00	20,41	0,01
5	1	1,10	5,08	11334,72	1,53	1,50	0,09	0,03	21,50	0,02
6	1	1,22	6,18	24549,64	3,31	3,19	0,20	0,12	23,19	0,05
7	1	1,38	7,41	41267,23	5,56	5,25	0,32	0,31	25,25	0,08
8	1	1,56	8,79	60163,29	8,11	7,47	0,46	0,64	27,47	0,12
9	1	1,75	10,35	80076,11	10,79	9,70	0,59	1,09	29,70	0,16
10	1	1,94	12,10	100036,44	13,48	11,79	0,72	1,69	31,79	0,20
11	1	2,12	14,04	119305,66	16,08	13,67	0,84	2,41	33,67	0,24
12	1	2,28	16,16	137389,61	18,51	15,27	0,94	3,25	35,27	0,27
13	1	2,41	18,43	154015,99	20,75	16,57	1,02	4,18	36,57	0,31
14	1	2,52	20,84	169086,58	22,78	17,59	1,08	5,20	37,59	0,34
15	1	2,60	23,36	182622,76	24,61	18,33	1,12	6,28	38,33	0,37
16	1	2,65	25,95	194717,37	26,24	18,84	1,15	7,40	38,84	0,39
17	1	2,68	28,60	205498,90	27,69	19,14	1,17	8,55	39,14	0,41
18	1	2,70	31,29	215107,65	28,99	19,26	1,18	9,73	39,26	0,43
19	1	2,69	33,98	223681,60	30,14	19,24	1,18	10,91	39,24	0,45
20	1	2,68	36,68	231348,97	31,18	19,09	1,17	12,09	39,09	0,46
21	1	2,65	39,35	238224,98	32,10	18,85	1,15	13,26	38,85	0,48
22	1	2,62	42,01	244411,08	32,94	18,53	1,14	14,41	38,53	0,49
23	1	2,58	44,62	249995,49	33,69	18,14	1,11	15,55	38,14	0,50
24	1	2,53	47,20	255054,42	34,37	17,71	1,09	16,66	37,71	0,51
25	1	2,48	49,73	259653,42	34,99	17,25	1,06	17,74	37,25	0,52
26	1	2,43	52,21	263848,82	35,55	16,76	1,03	18,80	36,76	0,53
27	1	2,38	54,64	267689,01	36,07	16,25	1,00	19,83	36,25	0,54
28	1	2,32	57,01	271215,65	36,55	15,73	0,96	20,82	35,73	0,54
29	1	2,27	59,34	274464,63	36,98	15,20	0,93	21,78	35,20	0,55
30	1	2,22	61,61	277466,97	37,39	14,67	0,90	22,72	34,67	0,55
31	1	2,17	63,82	280249,54	37,76	14,15	0,87	23,62	34,15	0,56
32	1	2,12	65,99	282835,72	38,11	13,63	0,84	24,48	33,63	0,57
33	1	2,07	68,10	285245,85	38,44	13,12	0,80	25,32	33,12	0,57
34	1	2,02	70,17	287497,73	38,74	12,62	0,77	26,12	32,62	0,57
35	1	1,97	72,19	289606,98	39,03	12,13	0,74	26,89	32,13	0,58
36	1	1,93	74,16	291587,32	39,29	11,65	0,71	27,64	31,65	0,58
34	1	1,98	71,69	289092,27	38,96	12,25	0,75	26,70	32,25	0,58
35	1	1,94	73,67	291103,64	39,23	11,77	0,72	27,46	31,77	0,58
36	1	1,90	75,61	292995,31	39,48	11,31	0,69	28,18	31,31	0,59