

# Självuttorkning i betong med aluminatrika tillsatsmaterial

---

Björn Grahn – Aleksandra Talevska  
Byggnadsmaterial | LTH | Lunds universitet





# Självuttorkning i betong med aluminatrika tillsatsmaterial

**Björn Grahn**  
**Aleksandra Talevska**



**LUND**  
UNIVERSITY

Master Thesis, Report 5116, Division of Building Materials, Faculty of Engineering, Lund University, Lund, 2019

Examensarbete, Rapport 5116, Avdelningen Byggnadsmaterial, Lunds tekniska högskola, Lunds universitet, Lund, 2019

Självuttorkning i betong med aluminatrika tillsatsmaterial/Self desiccation in concrete with high-alumina additives

Björn Grahn – Aleksandra Talevska

Report 5116  
ISRN LUTVDG/TVBM-19/5116-SE

Antal sidor/Number of pages: 58  
Illustrationer/Illustrations: 20

Sökord

Betong, cement, cementpasta, uttorkning, självuttorkning, tillsatsmaterial, aluminatrika tillsatsmaterial, värmeutveckling, ettringit, aluminat, relativ fuktighet, RF, CSA, CA

Keywords

Concrete, cement, cement paste, dehydration, self-desiccation, additives, high-alumina additives, heat, ettringite, alumina, relative humidity, RH, CSA, CA

© Copyright: Division of Building Materials, Faculty of Engineering, Lund University, Lund 2019  
Avdelningen Byggnadsmaterial, Lunds tekniska högskola, Lunds universitet, Lund 2019.

---

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)

# Sammanfattning

Detta examensarbete behandlar effekten av självuttorkningen hos betong med innehåll av aluminatrika tillsatsmaterial. Syftet med arbetet var att undersöka möjligheterna att optimera bindemedel för betong med avseende på betongens självuttorkning. I försöken har 10% av bindemedlet ersatts med ett av två aluminatrika tillsatsmaterial. Tre kommersiellt tillgängliga cementprodukter av cementtyperna CEM I, CEM II och CEM III har använts vid försöken.

En ökad självuttorkning genom optimering av bindemedel möjliggör en minskning av mängden Portlandcement i betong. En mindre mängd Portlandcement minskar i sin tur byggnadsdelens klimatpåverkan då produktionen av portlandklinker, största beståndsdel i Portlandcement, är en stor källa till världens CO<sub>2</sub>-utsläpp.

Mätning av relativ fuktighet (RF) har utförts på betongprov vct 0.38 med CEM II och CEM III mellan 30–90 dagar efter gjutning. Mätning av RF och utvecklad värmeeffekt har utförts på cementpastaprov vct 0.38 och vct 0.5 med cementtyperna CEM I, CEM II och CEM III.

Aluminatrika tillsatsmaterial binder en stor mängd vatten vid hydratation på grund av hydratationsprodukternas kemiska sammansättning. Detta har i försök med betong visats ge en ökad självuttorkning. RF i betongprov efter 30 dygn minskade med 5% och 7% för CEM II respektive CEM III när 10% av bindemedlet hade ersatts med aluminatrika tillsatsmaterial.

Mätning av utvecklad värmeeffekt visade att det tidiga hydratationsförloppet påverkas vid ersättning av 10% av bindemedlet med aluminatrika tillsatsmaterial. Detta är kopplat till förändringen i den kemiska sammansättningen hos den hydratiserade cementpastan.

En del av arbetet har varit att vidareutveckla en metod för RF-mätning på små prov av cementpasta (åtta gram). Denna metod har potential att förenkla vidare arbete med att optimera bindemedel med avseende på självuttorkning.

Resultaten visar att användning av aluminatrika tillsatsmaterial i cement är en möjlighet för att öka självuttorkning hos betong. Detta kan bidra till en minskad cementanvändning med bibehållen uttorkningstid.



# Abstract

This master thesis work concerns the effect of high-alumina additives on the self-desiccation of concrete. The purpose of the work was to examine the possibilities to optimize the binder-content of concrete with regards to self-desiccation. Two high-alumina additives have been examined. In the experiments 10% of the binder mass has been replaced with one of these additives. Commercially available cement products of the cement types CEM I, CEM II and CEM III have been used for the experiments.

An increased self-desiccation enables a reduction of Portland clinker. A reduction of the amount of Portland clinker reduces the climate-impact of the construction since cement production is a source of carbon dioxide emissions.

Relative humidity (RH) measurements have been performed on concrete samples w/c 0.38 containing CEM II and CEM III between 30–90 days after casting. RH-measurements and measurements of developed heat effect have been performed on samples with cement paste w/c 0.38 and w/c 0.5 containing cement types CEM I, CEM II and CEM III.

High-alumina additives bind a large amount of water during hydration due to the chemical composition of the hydration products. In experiments on concrete, this has been shown to give an increased self-desiccation. RH in concrete samples after 30 days was reduced with 5% and 7% respectively for samples with CEM II and CEM III when 10% of the binder was replaced with high-alumina additives.

Measurements of the developed heat-effect indicates that the early hydration is affected when replacing 10% of the binder with high-alumina additives. This is linked to the change in chemical composition of the hydrated cement paste.

A part of this work has been to further develop a method for RH-measurements on small samples of cement paste. This method has the potential to simplify further work on optimizing binder-content with regards to self-desiccation.

The results indicate that addition of high-alumina additives increases the self-desiccation of concrete. This could be a way forward to reduce use of cement while still meeting demands for moisture safety.





# Förord

Detta examensarbete utgör den avslutande delen av *civilingenjörsprogrammet med inriktning Väg- och vattenbyggnad* vid Lunds Tekniska Högskola.

Examensarbetet har utförts på avdelningen för Byggnadsmaterial, LTH, av Björn Grahn och Aleksandra Talevska.Handledare för examensarbetet har varit Lars Wadsö, avdelningen för Byggnadsmaterial och Nilla Olsson, NCC Sverige AB. Examinator för arbetet är Katja Fridh, avdelningen för Byggnadsmaterial.

Vi vill rikta ett varmt tack till våra handledare för deras stöd och engagemang vilket har varit till stor hjälp genom hela arbetet. Ett stort tack även till Martin Strand, Stefan Backe och Oskar Linderoth för deras hjälp i det laborativa arbetet. Tack också till samtliga medarbetare på avdelningen Byggnadsmaterial för deras goda bemötande och hjälpsamhet. Vidare vill vi tacka Rolands Cepuritis vid Primekss, Lars Hansson vid Schwenk samt cementleverantören Cementa för deras bidrag till arbetet i form av material och goda råd.

Jag vill särskilt tacka Karna för det kärleksfulla stödet, utan vilket denna utbildning aldrig kunnat genomföras, Björn.

Jag vill tacka familj och nära vänner för er fantastiska support under hela min studietid. Utan er hade detta aldrig varit möjligt, Aleksandra.

Lund, maj 2019

Björn Grahn & Aleksandra Talevska



# Innehåll

<b>Förkortningar och förklaringar</b>	<b>1</b>
<b>1 Introduktion</b>	<b>4</b>
1.1 Betong och CO <sub>2</sub>	4
1.2 Uttorkningskrav betong	5
1.3 Möjligheter med aluminatrika tillsatsmaterial	6
1.4 Syfte och omfattning	7
<b>2 Cement och cementpasta</b>	<b>8</b>
2.1 Cementtyper	9
2.2 Hydratation	12
2.2.1 Cementreaktioner	12
2.2.2 Puzzolana reaktioner	14
2.3 Strukturutveckling	16
2.3.1 Kristallstrukturer	17
2.3.2 Tillsatsmaterials inverkan på strukturutvecklingen	18
<b>3 Självtorkning i betong</b>	<b>20</b>
3.1 Kemisk uttorkning	20
3.2 Tillsatsmaterials inverkan på självtorkning	21
<b>4 Metod</b>	<b>22</b>
4.1 Val av metod	22
4.2 Material och försökupställning	23
4.2.1 Värmeeffekt cementpasta	23
4.2.2 Relativ fuktighet i cementpasta och betong	23
4.3 Värmeeffekt och relativ fuktighet cementpasta	25
4.3.1 Kalibrering och analys av data	26
4.4 Relativ fuktighet betong	29
<b>5 Resultat</b>	<b>32</b>
5.1 Värmeeffekt cementpasta	32
5.2 Relativ fuktighet cementpasta	36
5.3 Relativ fuktighet betong	38
5.4 Samband relativ fuktighet cementpasta och betong	40

<b>6</b>	<b>Diskussion</b>	<b>42</b>
6.1	Metodval . . . . .	42
6.2	Värmeeffekt cementpasta . . . . .	43
6.2.1	Resultatens tillförlitlighet . . . . .	43
6.2.2	Tillsatsmaterialens effekt . . . . .	43
6.3	Relativ fuktighet cementpasta . . . . .	45
6.3.1	Resultatens tillförlitlighet . . . . .	45
6.3.2	Tillsatsmaterialens effekt . . . . .	45
6.4	Relativ fuktighet betong . . . . .	47
6.4.1	Resultatens tillförlitlighet . . . . .	47
6.4.2	Tillsatsmaterialens effekt . . . . .	47
6.5	Vinster med aluminatrika tillsatmaterial . . . . .	49
<b>7</b>	<b>Slutsats</b>	<b>50</b>
7.1	Förslag till framtida studier . . . . .	51
	<b>Referenser</b>	<b>51</b>
	<b>Bilagor</b>	<b>56</b>
	<b>A – Betongrecept</b>	<b>56</b>
	<b>B – Blankett F8</b>	<b>57</b>
	<b>C – Beteckning bindemedel</b>	<b>58</b>

# Förkortningar och förklaringar

## Förkortningar

vbt	$\text{vbt} = \frac{\text{vattenmängd}}{\text{bindemedelsmängd}} \text{ [kg/kg]}$	Vatten-bindemedeltal
vct	$\text{vct} = \frac{\text{vattenmängd}}{\text{cementmängd}} \text{ [kg/kg]}$	Vatten-cementtal
RF	$\text{RF} = \frac{\text{ånghalt}}{\text{mättnadsånghalt}} \text{ [g/g]}$	Relativ fuktighet

## Förklaringar

AFm	Erhållen produkt vid hydratation av cement. Benämns i detta arbete som monosulfat
AFt	Erhållen produkt vid hydratation av cement. Benämns i detta arbete som ettringit
Ballast	Bergartsmaterial av olika kornstorlek
Bindemedel	Ett material som efter reaktion med vatten bygger upp en den fasta strukturen mellan ballastkornen i betong
CEM I	Cementtyp innehållande Portlandcement
CEM II	Cementtyp innehållande Portlandcement med tillsats av slagg, silikastoft, puzzolaner, flygaska, skiffer eller kalksten
CEM III	Cementtyp innehållande Portlandcement med tillsats av slagg
Cement	Ett finkornigt mineraliskt material som reagerar vid kontakt med vatten
Cementpasta	Blandning av cement och vatten
C-S-H-gel	Den huvudsakliga reaktionsprodukten från ett Portlandcement

Hydratationsgrad	Andel reagerat bindemedel i cementpasta i förhållande till den totala mängden bindemedel
Porlösning	Vätskefasen i cementpasta
Portlandcement Portlandklinker	Ett hydraulisk bindemedel Produkt som erhålles vid cementproduktion efter bränning av kalksten och lera
Tillsatsmaterial	Material som ersätter en del av Portlandklinker i cement
Tillsatsmedel	Medel som tillsätts betong för att modifiera dess egenskaper

## Cementkemiska beteckningar

Inom cementkemin används en förenklad notation för kemiska ämnen baserat på de oxider som bygger upp både bindemedel och hydratiserade faser. I detta arbete används genomgående följande cementkemiska beteckningar.

<b>Cementkemisk beteckning</b>	<b>Kemisk beteckning</b>	<b>Namn</b>
A	$\text{Al}_2\text{O}_3$	Aluminiumoxid
C	$\text{CaO}$	Kalciumoxid
H	$\text{H}_2\text{O}$	Vatten
F	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	Järnoxid
S	$\text{SiO}_2$	Kiseldioxid
$\bar{\text{S}}$	$\text{SO}_3$	Sulfat
CA	$\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	Monokalciualuminat
CH	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	Kalciumhydroxid
$\text{C}\bar{\text{S}}$	$\text{CaSO}_4$	Anhydrit
$\text{C}\bar{\text{S}}\text{A}$	$4\text{CaO} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SO}_3$	Kalciumsulfoaluminat
C-S-H	$\text{CaO}_x \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}_y$	Kalciumsilikathydrat
$\text{C}\bar{\text{S}}\text{H}_2$	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Gips
$\text{C}_3\text{S}$	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	Alit
$\text{C}_2\text{S}$	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	Belit
$\text{C}_3\text{A}$	$3\text{CaOAl}_2\text{O}_3$	Aluminat
$\text{C}_4\text{AF}$	$4\text{CaOAl}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3$	Ferrit

# 1 Introduktion

Idag utgör betong mer än 50% av hela världens tillverkade material [1]. Det är med stor marginal det dominerande byggnadsmaterialet i flerbostadshus i Sverige idag [2]. Materialets goda egenskaper vad det gäller hållfasthet, beständighet samt formbarhet lade grunden till det industriella byggandets framväxt i Sverige under efterkrigstiden [3].

Användningen av betong vid samhällsbyggnation är en stor källa till de CO<sub>2</sub>-utsläpp som driver den globala uppvärmningen [1]. En av huvudingredienserna i betong, cementet, ger vid produktion upphov till 8% av världens totala CO<sub>2</sub>-utsläpp [4]. Av dessa utsläpp kommer 60–70% från den kemiska reaktion som sker vid kalkstensförbränningen då de aktiva komponenterna i cementet bildas.

Förutom betonganvändningens påverkan på klimatet ställer den svenska betongbranschen även krav på uttorkningen av betong vid husbyggnation. Krav på uttorkning av betong är ställda för att undvika fuktskador i byggnaden som kan utgöra en risk för människors hygien och hälsa [5].

## 1.1 Betong och CO<sub>2</sub>

De länder, inklusive Sverige, som skrivit under Parisavtalet har förbundit sig att genomföra åtgärder för att hålla den globala uppvärmningen under en höjning av temperaturen på 2°C och att sträva mot att hålla den under 1,5°C [6]. Enligt den rapport som publicerades av FN:s klimatpanel (IPCC) i oktober 2018 behöver den globala ekonomin bli koldioxidneutral till år 2050 om 1,5-graders målet ska uppfyllas [7].

En färdplan mot koldioxidneutralitet har publicerats i en rapport från Eidgenössische Technische Hochschule (ETH) Zürich och École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL) i Lausanne som finansierats av Europeiska Klimatfonden [4]. Här betonas vikten av att involvera samtliga intressenter i cementets värdekedja för att minska cementanvändningen och nå de uppsatta målen för reducerad klimatpåverkan. Fyra nivåer där åtgärder kan vidtas är:

- Minskade utsläpp från byggnadsverk, där en betong med lägsta cementinnehåll som uppfyller funktionskraven bör användas, tillsammans med en dimensionering av byggnadsdelen som inte leder till överanvändning av betong.
- Minskade utsläpp från betong genom minskat cementinnehåll. Detta kan uppnås genom en optimering av betongsammansättningen och en genomtänkt användning av tillsatsmaterial och proportionering av ballast.
- Minskade utsläpp från cement genom ett minskat klinkerinnehåll och en ökad användning av tillsatsmaterial i cement.
- Minskade utsläpp från klinkerproduktion genom mer energieffektiv förbränning och utbyte av fossila bränslen mot andra energikällor.

## 1.2 Uttorkningskrav betong

För att undvika fuktskador i byggnader ställs det krav på uttorkningen av betong i produktionen [5]. En tät golvbeläggning, till exempel en plastmatta, som placeras på ett betongbjälklag med högt fukttinnehåll kan leda till den typen av skador. Boverkets byggregler (BBR) ställer krav på utformning av byggnader med avseende på fuktsäkerhet [8]. Utdrag ur BBR: *”Byggnader ska utformas så att fukt inte orsakar skador, elak lukt eller hygieniska olägenheter och mikrobiell tillväxt som kan påverka människors hälsa”* (BBR 6:51).

Till följd av en strävan mot kortare byggtider har kraven på uttorkningstiden för betong ökat. Ett vanligt sätt att påskynda uttorkningen av betong är att minska vatten-cementtalet (vct) vilket kräver en ökad cementhalt [9]. Detta innebär att en större mängd cement används i byggnadsdelar än vad som krävs för att klara övriga funktionskrav.



### 1.3 Möjligheter med aluminatrika tillsatsmaterial

Kraven på uttorkning driver på cementanvändningen för inomhusbetonger [10]. Den svenska betongbranschen har en uttalad ambition om att stegvis minska klimatpåverkan från betong och att nå en halverad klimatpåverkan från betonganvändning till 2024. Beräknad klimatpåverkan i förhållande till ställda uttorkningskrav visas i Tabell 1. Enligt dessa beräkningar innebär en sänkning av RF med 5% en reduktion av CO<sub>2</sub>-utsläpp med 15% om sänkningen kan åstadkommas utan att tillsätta mer cement.

**Tabell 1:** CO<sub>2</sub>-utsläpp i förhållande till uttorkningskrav för inomhusbetonger [10].

Uttorkningskrav	Exponeringsklass	Branschreferens		
		vct	cement	kg CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>
85% RF	X0; XC1	0.35	500 kg CEM II	365
90% RF	X0; XC1	0.45	400 kg CEM II	305

Att aluminatrika cementmaterial ger en snabbare självuttorkning av betong, är något som är känt sedan tidigare och har utnyttjats för speciella tillämpningar [11]. Hur dessa material kan optimeras med avseende på fuktbindning har studerats i nyligen publicerade studier [12]. Vid optimering av cementsammansättningen, genom ersättning av cement med aluminatrika tillsatsmaterial, finns det en potential till en minskning av CO<sub>2</sub>-utsläppen. Klinkermineralet i aluminatrika tillsatsmaterial avger cirka 200 kg CO<sub>2</sub> för varje producerad ton i jämförelse med Portlandcement som avger närmre 580 kg CO<sub>2</sub> per ton [13]. Detta innebär att genom att ersätta en del av cementet med denna typ av tillsatsmaterial kan den totala CO<sub>2</sub>-påverkan från betonganvändningen minskas.

Enligt beräkningar som redovisas i Tabell 1 innebär en sänkning av RF från 90 till 85% en ökning av CO<sub>2</sub>-utsläpp med 15% för byggnadsdelar av betong [10]. Om denna effekt kan åstadkommas genom att ersätta en del av cementet med ett tillsatsmaterial med lägre klimatpåverkan finns stora miljömässiga vinster att göra. De stora volymerna betong som används gör att en optimering av bindemedelssammansättningen ger en stor utväxling i form av minskade CO<sub>2</sub>-utsläpp.

## 1.4 Syfte och omfattning

Syftet med detta arbete är att undersöka hur inblandning av tillsatsmaterial med hög aluminathalt påverkar självuttorkningen av betong av olika cementtyper.

Undersökningar har utförts på cementpasta, vatten-bindemedeltal (vbt) 0.38 och 0.50, med CEM I, CEM II/A-V och CEM III/A där två aluminatrika tillsatsmaterial har ersatt 10% av bindemedlet. Försök har även genomförts på betong, vbt 0.38, med CEM II/A-V och CEM III/A med samma tillsatsmaterial. Mätning av hydratationsvärmets har genomförts på prov med cementpasta och mätning av relativ fuktighet (RF) har genomförts på förslutna prov med cementpasta och betong.

De aluminatrika tillsatsmaterialens påverkan på cementpastans mikrostruktur har inte studerats i detta arbete.

## 2 Cement och cementpasta

Betong består av cement, vatten och ballast där cement utgör en central del i utvecklingen av betongens egenskaper [11]. Cement tillsammans med vatten utgör den sammanfogande delen i betong där den binder ihop ballastkornen. Som cement i betong används ofta Portlandcement men inblandning av olika andelar tillsatsmaterial är vanligt. Eftersom cement oftast innehåller andra material än Portlandcement kallas det som ett samlingsbegrepp i detta arbete för bindemedel.

Förutom cement, vatten och ballast används ofta olika tillsatsmedel för att modifiera betongens egenskaper. Dessa tillsatsmedel tillsätts i små mängder och kan till exempel verka vattenreducerande, luftporbildande eller ge betongen en god arbetbarhet [14]. Tillsatsmedel kan användas för att förändra egenskaperna hos såväl den färska som den hårdnade betongen.

Detta avsnitt beskriver egenskaper hos cement och olika tillsatsmaterial, de vanligaste cementtyperna, cementhydratationen samt hur strukturen hos bindemedlet utvecklas.

De cement som används i betong i Sverige idag består av olika kombinationer av aktiva och latenta bindemedel [15]. Portlandcement är ett aktivt hydrauliskt bindemedel vilket betyder att det reagerar vid kontakt med vatten, hårdnar och bildar en produkt som är beständig mot vatten [11].

Vid kontakt med vatten bildas de reaktionsprodukter som bygger upp strukturen runt ballastkornen i den färdiga betongen [14]. Ett aktivt hydrauliskt bindemedel reagerar direkt vid kontakt med vatten. Ett latent hydrauliskt bindemedel behöver en aktivator för att reagera [15]. Latent hydrauliska bindemedel benämns ofta som puzzolana material, eller material med puzzolana egenskaper.

Cement blandat med vatten benämns cementpasta. Cementpastans egenskaper bestäms till stor del av dess vatten-cementtal (vct), vilket anger förhållandet mellan vatten- och cementmängd. Då andra bindemedel förekommer i kombination med cement kan beteckningen vatten-bindemedelstal (vbt) användas.

Den dominerande beståndsdel i cement har under de senaste århundradet utgjorts av portlandklinker [14]. Egenskaperna hos portlandklinkern har studerats ingående och lagt grunden till den kunskap vi har om cement och betong idag.

## 2.1 Cementtyper

I Sverige gäller standarden SS-EN 197-1 vid kategorisering av olika cementtyper [16]. Denna standard beskriver bindemedelssammansättningar och egenskaper för olika typer av bindemedel. De olika cementtyperna innehåller olika mängd av det hydrauliska bindemedlet Portlandcement i kombination med tillsatsmaterial som till exempel flygaska eller slagg, två material med puzzolana egenskaper.

De tre mest förekommande bindemedlen i betong kategoriseras som: CEM I, CEM II eller CEM III. Dessa innehåller olika massandel Portlandcement i kombination med olika tillsatsmaterial, se Tabell 2 [11]. Förutom Portlandcement och olika tillsatsmaterial förekommer även bindemedel med inblandning av cement för speciella ändamål.

**Tabell 2:** Massandel porlandklinker och typ av puzzolana tillsatsmaterial i tre kategorierna av cement.

Cementtyp	Massandel portlandklinker (%)	Massandel tillsatsmaterial (%)
CEM I	$\geq 95$	-
CEM II	$\geq 65$	$\leq 35$
CEM III	5–64	36–95

Inom huvudgrupperna CEM I-III delas cementtyperna upp vidare beroende på massandel porlandklinker respektive tillsatsmaterial. I detta arbete undersöks CEM II med tillsats av flygaska som motsvarar klassificeringen CEM II/A-V, det vill säga ett Portland-flygaskacement med 80–94% portlandklinker och 6–20% kiselrik flygaska.

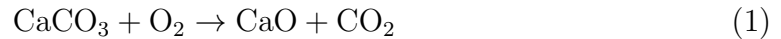
De aluminatrika tillsatsmaterial som används i detta arbete benämns här som ”tillsatsmaterial”. I standarden SS-EN 206 som specificerar krav för delmaterial i betong definieras tillsatsmaterial som ”*finfördelat oorganiskt material använt i betong för att förbättra vissa egenskaper eller för att erhalla speciella egenskaper*” [17]. I Betonghandboken kallas materialen ”cement för speciella ändamål” [18].

Vid klassificering av bindemedel enligt standarden SS-EN 206 kan dessa material benämnas ”tillsatsmedel” och anses då inte utgöra en del av bindemedlet [17]. Tillsatsmedel kan tillsättas upp till en mängd av 5% av cementmängden. Om denna mängd överskrids ska det styrkas att tillsatsmedlets inverkan på betongens funktion och beständighet är påvisad och beaktas enligt EN 206:2013 avsnitt 5.2.6 som beskriver cementhalt och vatten-cementtal.

## Portlandcement

Portlandcement består av portlandklinker som mals ned med cirka 5% gips till ett fint pulver [11]. Vid tillverkning av portlandklinker bryts kalksten och lera ned och bränns därefter i långa, svagt lutande roterugnar [14]. Temperaturen i ugnen uppgår till cirka 1450°C då det bildas en sammansättning av olika massandelar klinkermineral. Portlandcement erhålls slutligen genom att mala portlandklinkern tillsammans med gips för att förhindra en alldeles för snabb bindning av cementet.

Förbränning av kalksten( $\text{CaCO}_3$ ) vid hög temperatur, den så kallade kalcineringen, medför att koldioxid( $\text{CO}_2$ ) bildas tillsammans med osläckt kalk( $\text{CaO}$ ). En principmodell för den kemiska processen vid kalcinering visas i Reaktion (1)[19].



De fyra klinkermineralen med störst massandel i portlandklinker är alit, belit, aluminat och ferrit som redovisas i Tabell 3.

**Tabell 3:** Massandel klinkermineral i portlandklinkern [11].

Klinkermineral	Massandel (%)
Alit	50–70
Belit	15–20
Aluminat	5–10
Ferrit	5–15

## Puzzolaner

Puzzolana material är finkorniga latent hydrauliska bindemedel som innehåller reaktivt silika, det vill säga kiseloxider som hydratiserar vid kontakt med vatten och produkter från portlandklinkerns reaktion [15]. Puzzolaner bidrar till betongens hållfasthet genom att bilda kemiska föreningar. Dessa föreningar har en kemisk sammansättning som liknar de reaktionsprodukter som bildas från Portlandcement [20].

Två exempel på puzzolaner med utbredd användning är flygaska och granulerad masugnsslagg (slag) [21]. Flygaska och slag benämns som industriella puzzolaner, vilka är material som innehåller föreningar med puzzolana egenskaper som erhålls som en restprodukt från industrin.

### *Flygaska*

Flygaska är en restprodukt från koleldade värmeverk och innehåller aluminium- och kiselföreningar med puzzolana egenskaper [20]. Under 1940-talet började flygaska användas som ersättning av delar av portlandcement i betong i större byggnationsprojekt. Flygaskans kemiska sammansättning och dess specifika yta varierar mellan olika kolsorter och förbränningstemperaturer och klassificeras enligt standarden SS-EN 450–1 vilken beskriver flygaska för betong [22].

### *Slagg*

Slagg är en restprodukt från stål- och järnverk [20]. Den kemiska sammansättningen påverkas av de råmaterial som använts samt driftförhållanden vid järnframställningen [21]. Slaggens egenskaper kan därför variera mellan olika järnverk och tidpunkter för framställning.

## Cement för speciella ändamål

Cement för speciella ändamål är en samlingsbeteckning för bindemedel som används för att framställa en betongprodukt med speciella egenskaper [18]. Dessa kan utgöra hela eller ersätta en del av bindemedlet i betong. Cement med en anpassad kemisk sammansättning och finmalningsgrad används bland annat för tillämpningar vid hög temperatur, i aggressiva miljöer och vid krav på snabb hållfasthetsutveckling. Aluminatcement och kalciumsulfoaluminatcement är två exempel på cement för speciella ändamål.

### *Aluminatcement*

Aluminatcement består bland annat av kalciumaluminater som vid reaktion med vatten bildar svårlösliga hydrater [18]. Högvärdiga aluminatcement används för eldfasta konstruktioner i till exempel industriugnar. Härdningstemperaturen har stor inverkan på den hårdnade cementpastans mikrostruktur. Aluminatcement ingår ofta som en beståndsdel i sammansatta bindemedel där man eftersträvar reducerad krympning, snabbare hållfasthetsutveckling eller en snabbare självuttorkning.

En typ av aluminatcement är kalciumsulfoaluminatcement som ofta ingår som en beståndsdel i krympkompenserande cement [18]. Detta cement expanderar vid hydratation då expansiva kristaller bildas i cementpastans struktur. Denna expansion kompenserar krympningen från portlandklinkerns reaktion och motverkar därigenom sprickbildning i den hårdnade betongen. Ett användningsområde där aluminatcement kan ingå är i avjämningsmassa för golvbjälklag.

## 2.2 Hydratation

När bindemedlet i betong blandas med vatten startar omedelbart en rad kemiska reaktioner vilka bidrar till betongens hårdnande [14]. De kemiska reaktioner som sker bidrar till cementhydratationen, eller bindemedlets reaktion med vatten. Hydratationen är ett komplext förlopp där flera kemiska processer pågår parallellt och samverkar med varandra [15]. I dessa reaktioner binds vatten till klinkermineralen, varför denna process är avgörande för betongens självuttorkning. De kemiska processer som sker faller inom följande kategorier [23]:

- Upplösning – när molekyler på cementkornets yta lossnar när cementkornet kommer i kontakt med vatten.
- Diffusion – transport av lösta partiklar (joner) i cementpastans porstruktur eller via ett adsorptionsskikt vid cementkornets yta.
- Nukleering (ny partikelbildning) och tillväxt – då molekyler samlas i kristallina eller amorfa strukturer mot en fast yta.

Hydratationsförloppet beror av hur klinkermineralen i bindemedlet reagerar och kan delas upp i cementreaktioner och puzzolanreaktioner. Reaktionerna för de olika beståndsdelarna i bindemedlet pågår samtidigt och påverkar varandra.

### 2.2.1 Cementreaktioner

Hydratationen påverkas av en rad faktorer såsom: bindemedlet sammansättning och specifika yta, omgivande temperatur, vbt och användning av tillsatsmedel [11]. De reaktioner som har störst betydelse för betongens strukturutveckling är silikat och aluminatreaktionerna.

#### Silikatreaktionerna

Alit ( $C_3S$ ) och belit ( $C_2S$ ) är de klinkermineral som utgör den största massandelen i ett Portlandcement [23]. Cementgelen som bildas i silikatreaktionerna består av ett poröst nätverk av kalciumsilikathydrater (C-S-H), även kallat C-S-H-gel, med inneslutna kristaller av kalciumhydroxid (CH). Cementpastans hållfasthet avgörs till största del av reaktionsprodukterna från alit och belit i ett Portlandcement. Ett typiskt reaktionsförlopp för alit- och belitreaktionerna visas i Reaktion (2) och (3).

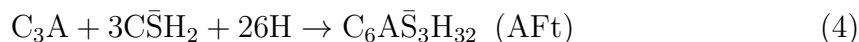


C-S-H-gel saknar definierad struktur och kan variera i sin sammansättning, det vill säga har en amorf struktur [15]. En mer korrekt cementkemisk notation är  $C_xSH_y$ , där x och y kan variera brett.

#### Aluminatreaktionerna

Aluminat ( $C_3A$ ) reagerar snabbt vid kontakt med vatten vilket kan orsaka ett för tidigt tillstyvnande av betongen då aluminathydrater bildas [11]. För att kontrollera aluminatreaktionen tillsätts en sulfatkälla såsom gips ( $C\bar{S}H_2$ ) eller anhydrit ( $C\bar{S}$ ).

Vid förekomst av sulfat i lösningen bildas ettringit (AFt) i den inledande aluminatreaktionen, se Reaktion (4) [15]. Då sulfatet i lösningen förbrukats reagerar AFt med kvarvarande  $C_3A$  och ombildas till monosulfat (AFm), se reaktion (5).



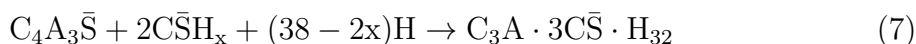
$C_3A$  binder fler vattenmolekyler (H) om den ingår i AFt än om den bidrar till ombildningen från AFt till AFm enligt Reaktionerna (4) och (5). En  $C_3A$  binder totalt 26 H när AFt bildas (4). Vid senare ombildning från AFt till AFm (5) binder en  $C_3A$  ytterligare 2 H utöver de som ingår i AFt.

Aluminoferritreaktionen ( $C_4AF$ ) liknar den för  $C_3A$  men har en lägre reaktionshastighet [11]. Reaktionsprodukterna är de samma som för  $C_3A$ -reaktionen förutom den del aluminat (A) i hydraterna som ersatts av ferrit (F). Liksom för aluminat är reaktionen av aluminoferrit beroende av tillgången på sulfat i lösningen.

Stora mängder sulfat orsakar en volymökning hos cementpastan [24]. Denna beror av den stora skillnaden i mängden H som binds i fast fas. Under aluminatreaktionen binds en stor mängd vatten i AFt vilket ökar den fasta volymen med 230%. Att balansera innehållet av sulfat är en viktig del vid proportionering av cement. Om aluminatreaktionen förskjuts, på grund av ett överskott av sulfat, tills dess att cementpastan utvecklats en tät struktur, kan volymförändringen orsaka sprickor i den hydratiserade betongen [15]. En förhöjd sulfathalt kan även medföra att gips faller ut i cementstrukturen vilket kan leda till ett för tidigt tillstyvnande [25]. Betongstandarden EN 197-1 anger att massfraktionen sulfat ej får överskrida 4% i ordinära cement.

### Cement för speciella ändamål

Kalciumsulfoaluminat ( $C\bar{S}A$ ) har en kemisk sammansättning som liknar den för monokalciualuminat (CA) blandat med sulfat och båda kan användas i krympkompenserade cement [26]. Bildningen av AFt, som bidrar till en volymökning, ökar med en ökad tillsats av sulfat. Huvudfaserna i dessa två expansiva cement är CA respektive ye'elimit ( $C_4A_3\bar{S}$ ). Ye'elimit är ett naturligt förekommande mineral som fått sitt namn efter Ye'elim i Israel där det påträffats i berggrunden. När dessa klinkermineral hydratiserar, med förekomst av sulfat i lösningen, bildas AFt och aluminiumhydroxid ( $AH_3$ ) enligt Reaktionerna (6) och (7) där värdet på x varierar mellan 0–2 beroende på sulfatkälla. För gips är  $x=2$ .



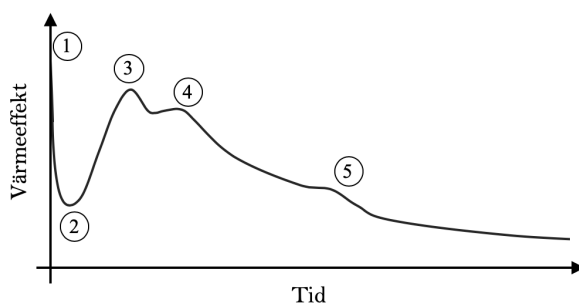
Försök att optimera självuttorkning i  $C\bar{S}A$ -cement har genomförts i en nyligen genomförd studie [12]. Studien visar att då gips ersätts av anhydrit i bindemedel leder det till en högre hydratationsgrad och en större upptagning av vatten. Detta beror på att gips löses upp snabbare och bildar en tät mikrostruktur. I samband med detta avstannar hydratationen i brist på tillgängligt vatten för ohydratiserat bindemedel.



### 2.2.1.1 Reaktionsförlopp

Cemthydratationen är en exoterm process, det vill säga en reaktion där energi frigörs i form av värme. Värmeutvecklingen under den tidiga hydratationen är direkt kopplad till reaktionsprocessen för de i bindemedlet ingående klinkermineralen [27]. Eftersom värmeutvecklingen beror av reaktionshastigheten hos bindemedlet går det att genom mätning av det avgivna värmnet utvärdera reaktionsförloppet för en specifik bindemedelssammansättning. Summan av det avgivna värmnet beskriver hydratationsgraden, det vill säga andel reagerat bindemedel.

En principiell modell för värmeutvecklingen för ett Portlandcement som blandas med vatten visas i Figur 1. Under de första minuterna (1) löses lättlösliga ämnen upp i vattenfas samtidigt som de första silikatreaktionerna och bildningen av ettringit inleds, det vill säga upplösningsfasen [11]. Därefter går cementet in i den latent fasen (2). I denna fas sker ingen hållfasthetsutveckling och betongen kan transporteras, gjutas och kompakteras.



*Figur 1: Principskiss för värmeutveckling av bindemedel vid hydratation.*

Efter den latent fasen (2) inleds accelerationsfasen med en kraftig stegring av värmeeffekten. Den maximala värmeutvecklingen (3) inträffar vid reaktionsmaximum för  $C_3S$  som då bildar en fast struktur av hydrater.

Den första effekttoppen (3) inträffar vanligtvis efter efter 10–20 timmar [11]. Den andra effekttoppen (4) orsakas av upplösningen av  $C_3A$  och bildning av AFt [28]. Den sena puckeln i värmeutvecklingen (5) har tillskrivits bildandet av AFm från  $C_3A$  och ettringit.

### 2.2.2 Puzzolana reaktioner

Latenta bindemedel som slagg och flygaska innehåller reaktivt kiseldioxid (S) som reagerar med CH från silikatreaktionen och bildar C-S-H enligt Reaktion (8).



Reaktiviteten hos puzzolana bindemedel kan variera beroende på kemisk sammansättning och finmalningsgrad. Flygaska reagerar vid blandning av cementpasta efter cirka 14 dygn medan slaggreaktionen startar redan inom 1–2 dygn [21].

## **Flygaska**

Flygaska reagerar med CH och bidrar på så sätt till betongens hållfasthet [20]. Jämfört med ett rent Portlandcement ger ersättning med flygaska en långsammare hållfasthetsutveckling hos betongen.

Flygaskans puzzolana reaktion sker först efter en viss tid [20]. Enligt De Weerd et al. är flygaskareaktionens utveckling starkt temperaturberoende [29].

## **Slagg**

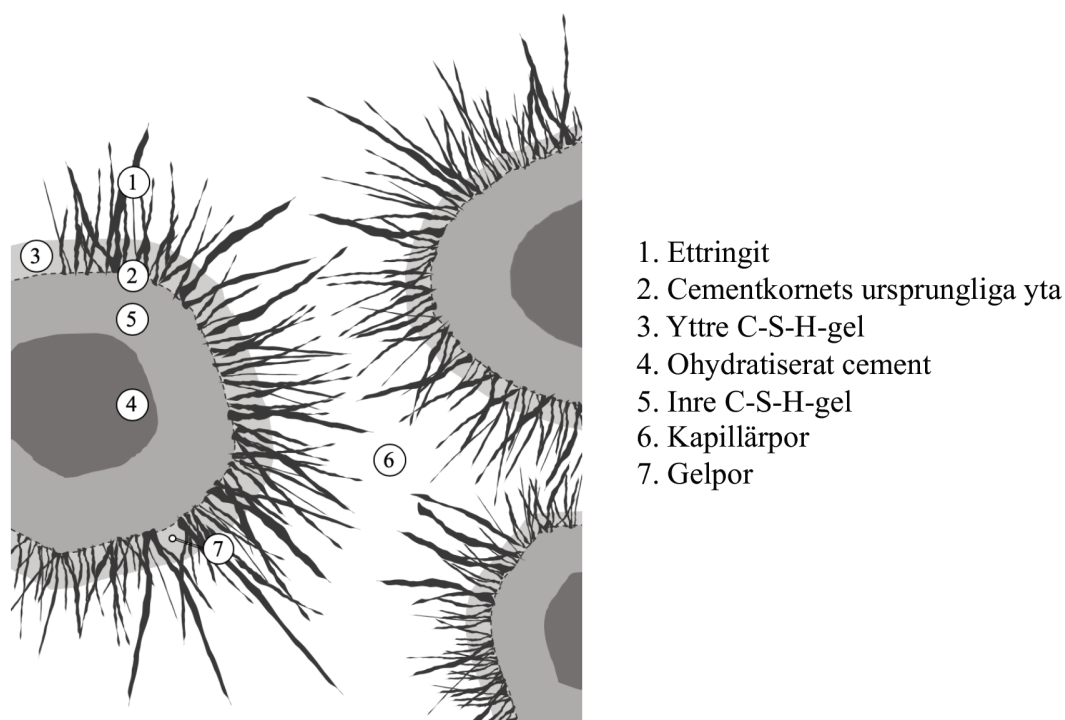
Slaggreaktionen kan enbart utlösas av de alkalier eller sulfat som finns tillgängliga i cement [30]. Enligt Kocaba påverkar slagg cementets hydratation genom att påskynda  $C_3A$ - och  $C_4AF$ -reaktionen och bromsa reaktionen av  $C_2S$  [31].

Slagg har en lägre reaktionshastighet än Portlandcement och kan jämföras med hydratationen av  $C_2S$  [32], se avsnitt 2.2.1. Andelen slagg som reagerar minskar vid en högre massandel slagg i bindemedlet [33].

## 2.3 Strukturutveckling

Efter blandning av bindemedel och vatten omges bindemedlet av vatten och cementpastan kan i detta stadium delas upp i vattenfas och fast fas [11]. I vattenfasen löser sig lösliga joner och bildar en lösning. I denna lösning sker aktivitet där de laddade jonerna utjämnar elektriska potentialskillnader. Den fasta fasen utgörs av olöst bindemedel och senare av de reaktionsprodukter som bildar kristaller mot fasta ytor i systemet.

Runt cementkornen bildas en struktur av C-S-H-gel och stavformade kristaller av ettringit (1), se Figur 2 [24]. Dessa reaktionsprodukter växer ut från cementkornets ursprungliga yta (2) i taggformiga strukturer och fyller det utrymme som tidigare upptagits av vattenfas [34]. När reaktionsprodukterna som växer från cementkornen kommer i kontakt med varandra bildar de en sammanhängande struktur som ger cementpastan dess hållfasthet.



*Figur 2: Cementpastans uppbyggnad.*

Samtidigt som C-S-H-gel formas på utsidan av cementkornet transporteras vatten genom diffusion genom det yttre lagret av C-S-H (3) in till ännu oreagerade delar av cementkornet (5) [24]. Den C-S-H-gel som bildas innanför cementkornets ursprungliga yta (5) har en tätare struktur och lägre porositet än den C-S-H-gel som bildats på utsidan [35]. Porstrukturen hos cementpastan kan delas upp i två grupper: kapillärporer (6) och gelporer (7). Kapillärporer är sammanhängande porer och är större än gelporer [14].

Vid hydratation av Portlandcement fälls kristaller av CH ut, som tidigare beskrivits i avsnitt 2.2.1. Dessa platta kristaller fälls ut inuti eller i anslutning till C-S-H-gelen.

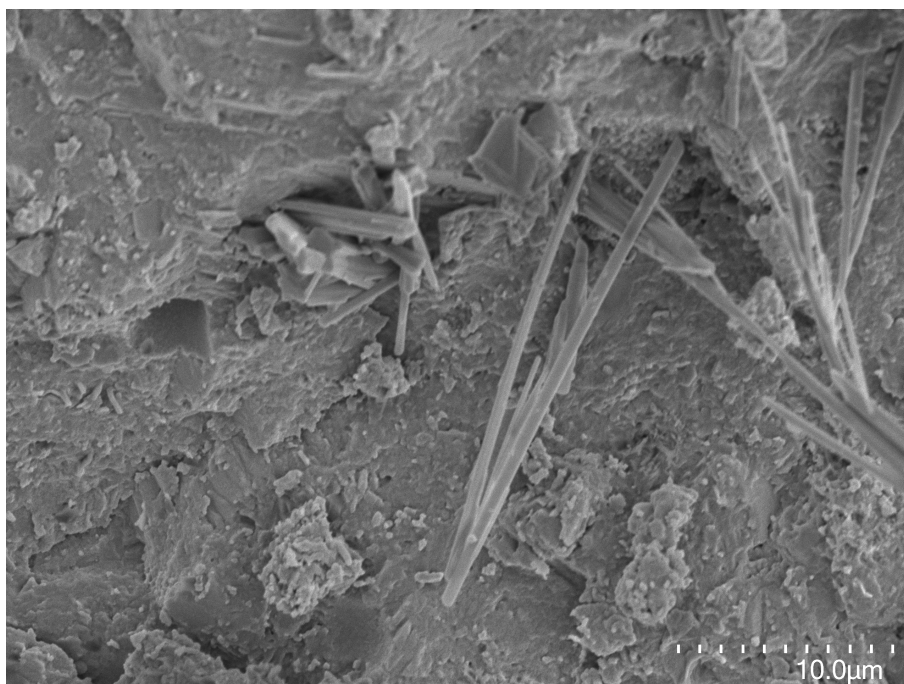
### 2.3.1 Kristallstrukturer

Hydratationsprodukternas mikrostruktur skapar variationer i cementpastans struktur. Produkterna AFt och AFm kan forma olika typer av kristallstrukturer beroende på koncentrationen av olika ämnen i porlösningen samt tillgänglig plats för kristallerna i systemet [36].

AFm bildar under gynnsamma förhållanden, det vill säga med tillräckligt utrymme och god tillgång på reaktionsämnen, platta sexkantiga kristaller [24]. Då AFt kristalliserar utan begränsning av utrymmet, formas långa, nålformade kristaller som växer ut från nukleeringsytan. Vid brist på utrymme, som i mindre slutna porer, formar AFt en tätare bollformad struktur [37].

Tillgången på fri kalk (C), osläckt kalk, i lösningen påverkar kristallstrukturen hos AFt [35]. Utan tillgång till C bildar AFt kristaller som är mer kompakta i sin struktur och inte orsakar lika stor expansion som de nålformade kristallerna. Krympkompenserade cement utnyttjar den kontrollerade bildningen av expansiv AFt för att kompensera för den krympning som sker när fritt vatten binds till C-S-H-gel.

Exempel på cementpastans mikrostruktur i brottytor på hydratiserad cementpasta redovisas i Figur 3. Avlånga stavformade kristallstrukturer som antas vara AFt avviker från mer kompakta strukturer.



**Figur 3:** SEM-fotografi av hydratiserad CEM II cementpasta med nålformade kristaller (Foto: Wadsö, L. Avdelningen för Byggnadsmaterial, LTH).

### **2.3.2 Tillsatsmaterials inverkan på strukturutvecklingen**

Tillsats av flygaska eller slagg ger en cementpasta med finare porstruktur och en minskad por-konnektivitet [20]. Tillsatsmaterial påverkar utvecklingen av cementpastans porstruktur och därigenom materialets specifika yta och fukttransportegenskaper. Mikrostrukturen förändras också i den hydratiserade cementpastan över tid. Att beskriva olika tillsatsmaterials påverkan på strukturutvecklingen är komplext och omfattande och faller utanför ramen för detta arbete.



# 3 Självtorkning i betong

Fukttinnehållet i ett poröst material som betong påverkar materialets egenskaper på flera olika sätt [38]. I byggnadsdelar där betong är en del av konstruktionen kommer byggfukt från betongen att omfördelas till omgivande material tills dess att fukt-jämvikt uppnåtts mellan byggnadsdelen och dess omgivande klimat [5].

Självtorkning betecknar materialets förmåga att binda vatten oberoende av fukttransport till omgivande klimat och material [14]. Definitionen av självtorkning kan även benämnas som kemisk uttorkning vilket motsvaras av det vatten som binds kemiskt till ett material.

Begreppet uttorkning som används i detta kapitel kan antyda att vatten avgår ur materialet. För självtorkning gäller ”uttorkningdet vatten som binds till materialet varpå den totala mängd vatten minskar. En mer fysikaliskt korrekt benämning är kemisk bindning av vatten.

## 3.1 Kemisk uttorkning

Kemiskt bundet vatten i betong är det vatten som kvarstår i materialet efter uppvärmning till 105°C [14]. Det vatten som binds till cement genom kemisk uttorkning kommer att ingå som en del av det fasta materialets struktur. Störst kemisk uttorkning uppnås vid maximal hydratationsgrad, det vill säga då allt ingående klinkermineral hydratiserat.

Under hydratationen reagerar vatten med klinkermineral och bildar nya föreningar, se Kapitel 2.2. Utifrån reaktionsprodukternas sammansättning kan det avgöras hur mängden kemiskt bundet vatten ( $W_c$ ) skiljer sig mellan de tre dominerande klinkermineralen (alit, belit och aluminat) i ett Portlandcement vid fullständig hydratation enligt (9) [15].

$$W_c = \begin{cases} C_3S & = 0.24 \text{ g}_{\text{vatten}}/\text{g}_{\text{klinker}} \\ C_2S & = 0.22 \text{ g}_{\text{vatten}}/\text{g}_{\text{klinker}} \\ C_3A & = 0.40 \text{ g}_{\text{vatten}}/\text{g}_{\text{klinker}} \end{cases} \quad (9)$$

I tidiga försök utförda av Powers (1948) har det visats att hydratationstakten för Portlandcement minskar vid lägre RF och i praktiken avstannar kring 80% RF [34]. Vidare försök på de enskilda klinkermineralen har visat att hydratationen för  $C_3S$ ,  $C_2S$  och  $C_3A$  avstannar under 85, 90 respektive 60% RF [39].

Lösta joner i porlösningen begränsar vattenaktiviteten vilket ger en inledande minskning av RF. Denna effekt har i försök visats kunna ge en sänkning på 3% RF [40]. Effekten från lösta joner är mer framträdande för system med en lägre vbt, där koncentrationen av joner i porlösningen är högre.

## 3.2 Tillsatsmaterials inverkan på självuttorkning

Tillsatsmaterial har visat sig påverka betongens självuttorkning på olika sätt [20]. I detta avsnitt beskrivs kort hur flygaska, slagg samt cement för speciella ändamål kan påverka självuttorkningen. Självuttorkningen påverkas vid tillsats av material som reagerar långsammare än Portlandcement genom att ge varje cementkorn mer tillgängligt vatten under den tidiga hydratationen [41].

### **Flygaska**

Bindemedel med inblandning av flygaska antas ha en lägre grad av självuttorkning än Portlandcement [42]. Mängden vatten som binds kemiskt är mindre för bindemedel med flygaskainblandning på grund av att flygaska förbrukar vatten från CH och inte från porlösningen. För vissa typer av flygaska är hydratationsgraden endast 70% jämfört med Portlandcement [42].

### **Slagg**

Slagg förbrukar mindre vatten vid hydratation, vilket gör att bindemedel med inblandning av slagg har en lägre självuttorkning [41]. Bindemedel med inblandning av slagg har en ökad hydratation av Portlandklinker under accelerationsfasen.

### **Cement för speciella ändamål**

Bindemedel med innehåll av aluminatrika tillsatsmaterial har en effektivare kemisk uttorkning eftersom den ökade bildningen av AFt leder till ökad mängd kemiskt bundet vatten [18].



## 4 Metod

Laborationsförsök har utförts på cementpasta och betong med tre kommersiellt tillgängliga cementprodukter. I försöken har 10% av bindemedlet ersatts med ett av två olika aluminatrika tillsatsmaterial för att utvärdera deras effekt på hydrationsförlopp och fuktbindning. För varje cementtyp och vbt har även ett referensprov utan tillsatsmaterial utvärderats. Försöken med cementpasta har utförts i styrt klimat vid 20°C. Betongproven har under mätningarna placerats i klimatrum med 20°C och 60% RF.

Angivna vbt för försöken innefattar hela bindemedlets massa, det vill säga bindemedel inklusive de aluminatrika tillsatsmaterialen. De aluminatrika tillsatsmaterial som ingår i detta arbete kan enligt SS-EN 206 definieras som tillsatsmedel och materialen är på så sätt inte en del av bindemedlet [17]. Vid beräkning av cementpastans och betongens ”verkliga” vbt måste hänsyn tas till hur materialen definieras.

### 4.1 Val av metod

Tre olika laborationsförsök har genomförts:

- Mätning av avgiven värmeeffekt på cementpasta med vbt 0.38 och 0.50
- Mätning av RF på cementpasta med vbt 0.38
- Mätning av RF på betong med vbt 0.38

#### *Värmeeffekt och relativ fuktighet cementpasta*

Mätning av värmeeffekt hos cementpastaprov är en beprövad metod för att utvärdera reaktionsförlopp och hydrationsgrad för en bindemedelssammansättning. Hur hydrationsförloppet påverkas av tillsatsmaterialen kan bidra till förståelse av vilka produkter som bildas och när under hydratationen de bildas. Det utvecklade värmnet, det vill säga summan av avgiven värmeeffekt över tid, visar hur mycket av bindemedlet som reagerat. Med mätning av RF i cementpasta kan förändringar i RF kopplas till värmeutvecklingen. RF-mätning på cementpasta kan genomföras under den tidiga hydratationen samt att mätningar kan göras kontinuerligt. Detta kan ge en större förståelse av hur RF förändras med tiden och vilket samband detta har med hydrationsförloppet.

#### *Relativ fuktighet betong*

RF-mätning i betong utfördes för att undersöka hur de aluminatrika tillsatsmaterialen påverkar självuttorkningen hos betong. Denna metod används för att utvärdera hur enkelsidig uttorkning samt självuttorkning i betong påverkas av olika bindemedelssammansättningar. Metoden är arbetskrävande varför det vore önskvärt att kunna validera metoden som användes för mätning av RF hos små cementpastaprov för tillämpningar med betong. Antalet mätpunkter i ett betongprov är med vår mätmetod begränsat till fyra stycken. RF-mätningar på mindre cementpastaprov är möjligt att göra på ett större antal.

## 4.2 Material och försöksuppställning

I försöken användes bindemedel av typerna CEM I, CEM II/A-V och CEM III/A med sammansättning enligt Tabell 4.

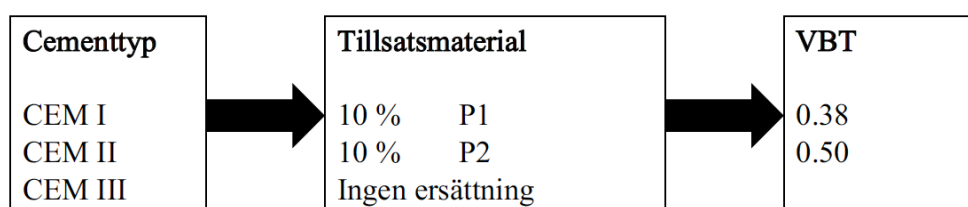
*Tabell 4: Massandel portlandklinker och puzzolant tillsatsmaterial i bindemedel.*

Cementtyp	Produkt	Massandel portlandklinker (%)	Massandel puzzolant tillsatsmaterial (%)
CEM I 52,5 N	CEMEX CEM I	> 95	–
CEM II/A-V 52,5 N	Cementa BasC Skövde	80–94	Flygaska 6–20
CEM III/A 42,5 N	CEMEX Miljöcement	> 50	Slagg <50

De två aluminatrika tillsatsmaterial som använts i försöken benämns i arbetet som produkt ett (P1) och två (P2) (Primekss). Tillsatsmaterialen används vanligen för sin krympkompenserande funktion och har en högre sulfat- och aluminathalt jämfört med Portlandcement. Aluminathalten är högre i P2 än i P1. Den specifika oxid-sammansättningen redovisas inte för använda tillsatsmaterial eller cement, eftersom dessa är kommersiella produkter.

### 4.2.1 Värmeeffekt cementpasta

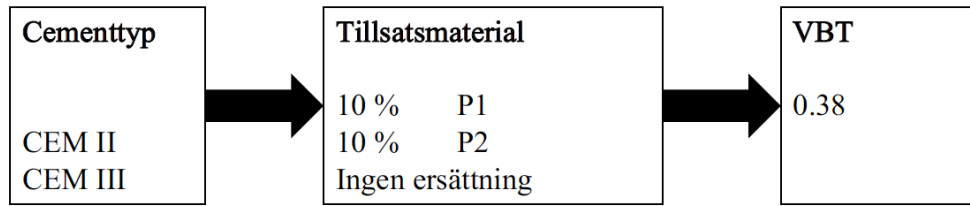
Vid mätning av avgiven värmeeffekt för cementpasta undersöktes 18 bindemedels-sammansättningar där cementtyp, tillsatsmaterial och vbt varierades enligt Figur 4. Varje bindemedelsblandning utfördes i två duplikat.



*Figur 4: Försöksuppställning för mätning av värmeeffekt cementpasta.*

### 4.2.2 Relativ fuktighet i cementpasta och betong

Vid mätning av RF på cementpasta och betong med olika bindemedelssammansättning undersöktes sex olika kombinationer av cementtyp och tillsatsmaterial enligt Figur 5. Varje bindemedelsblandning utfördes i två duplikat och varje betongprov i tre duplikat.



*Figur 5: Försöksuppställning för mätning av relativ fuktighet cementpasta och betong.*

De stenfraktioner som användes som ballast var: 0–2, 4–8, 8–12 och 12–16 mm. Glappet mellan stenfraktionerna 0–2 och 4–8 mm beror på att stenfraktionen 2–4 mm ej fanns tillgänglig vid utförandet av försöken.

För bättre arbetbarhet av betongen användes flyttillsatsmedel (Sika ViscoCrete RMC-520).

### 4.3 Värmeeffekt och relativ fuktighet cementpasta

Mätning av värmeeffekt utfördes i en av två kalorimetrar, Flex (AB Biometric) och TAM Air 1 (TA Instruments), se Figur 6. RF mättes med digitala RF-sensorer (Sensirion SHT20) och registerades med en mikroprocessor (AB Biometric).



Figur 6: Kalorimeter Flex (vänster) och TAM Air 1 (höger).

En mätserie innehöll cementpastaprov som förberetts i plastampuller (20 ml) med lock. Med kalorimeterutrustningen mättes provens avgivna värmeeffekt. RF i provampullerna registrerades med en RF-sensor monterad i ampullens lock, se Figur 7. Vid mätning av RF placerades proverna i kalorimeterutrustningen för att minimera temperaturvariationer.



(a) RF-sensor monterat i ampullock.



(b) Ampull innehållande cementpasta med monterad RF-utrustning.

Figur 7: Mätutrustning för mätning av relativ fuktighet i cementpasta.

Mätning av värmeeffekt respektive RF utfördes vid separata tillfällen. Kalorimeterutrustningarna kalibrerades elektriskt för att bestämma förhållandet mellan värmeeffekt och spänning. Arbetsgången för förberedelse inför varje mätserie innehöll:

1. Åtta gram bindemedel (cement och eventuellt tillsatsmaterial) vägdes upp i ampull på våg med 0.001 g noggrannhet (AND FX-2000f).
2. Cementprovet torrblandades i vortexmixer (Stuart SA 8 Vortex Mixer) med hållare med 1600 varv per minut (rpm) under 30 sekunder.
3. Avjoniserat vatten vägdes upp och tillsattes den torra bindemedelsblandningen varefter provet blandades med vortexmixer med 1600 rpm under 30 sekunder.
4. Proven placerades i kalorimeterutrustningen.

Värmeeffekten hos cementpastan registrerades med en minuts mätintervall under tio dygn för att registrera det inledande reaktionsförloppen. Vid mätning av RF placerades proven i kalorimeterutrustningen och efter ett dygn (24 h) byttes locken ut till lock med RF-sensorer för mätning av RF med en minuts mätintervall.

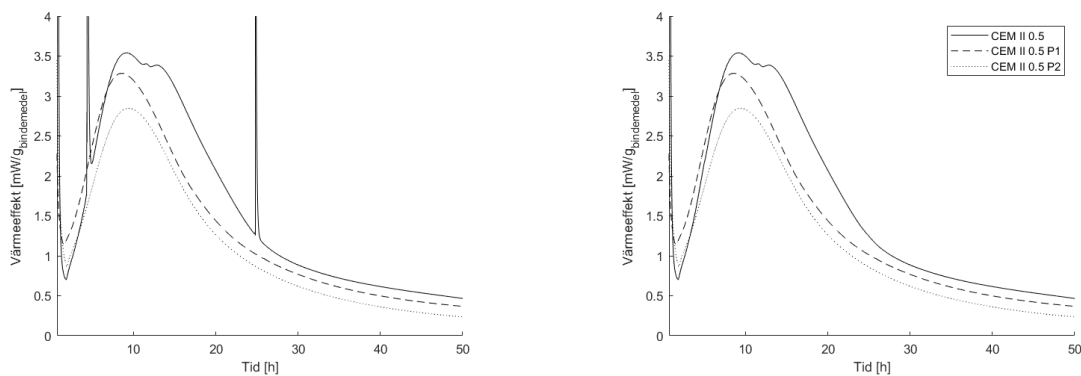
En punktmätning genomfördes även med cementpasta CEM II där RF registrerades under tre dygn. Denna punktmätning utfördes 20–23 dagar efter tillberedning av cementpastaproven. RF vid punktmätningen avlästes som ett punktvärde efter 23 dagar.

Data från mätningen av värmeeffekten registrerades i programmet PicoLog (Pico Technology). Data från RF-mätningen samlades in av en mikroprocessor (Arduino Uno) och avlästes sedan av ett terminalprogram (Tera Term) på en PC. Registrerad data utvärderades i Matlab (Mathworks).

Inför och efter varje mätserie genomfördes kalibrering av RF-sensorerna med fyra mättade saltlösningar i intervallet 75,3–97,3%.

### **4.3.1 Kalibrering och analys av data**

Mätdata för värmeeffekt justerades för vissa korta ”spikar” i dataserien, se Figur 8. En linjär interpolation gjordes för att ta bort dessa mätfel som orsakats av en extern störning på mätutrustningen. För att ta fram det totala avgivna värmets integrerades värmeeffekten över mätserien.

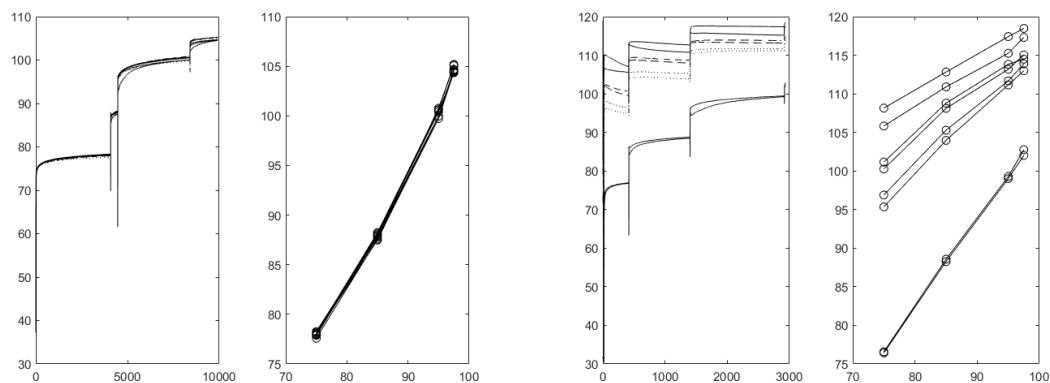


(a) Mätstörningar i form av ”spikar”.

(b) Korrigerade mätvärden.

**Figur 8:** Korrigering för mätstörning. Värmeffekt över tid före och efter korrigering.

Data från RF-mätningar korrigerades enligt de kalibreringar av sensorer som gjorts med mättade saltlösningar före och efter varje mätning. Detta gjordes på grund av att sensorerna vid exponering för höga RF-nivåer driver uppåt och visar högre RF än de verkliga, se Figur 9. Kalibreringskurvorna visar helt nya RF-sensorer som efter exponering i fuktigt klimat vid en mätning i cirka 9 dagar har drivit uppåt. Figur 9 visar kalibreringskurvor för RF-sensorerna innan mätning (a) och kalibreringskurvor efter exponering (b). De två nedersta kurvorna i Figur 9 (b) har inte exponerats för fuktigt klimat.

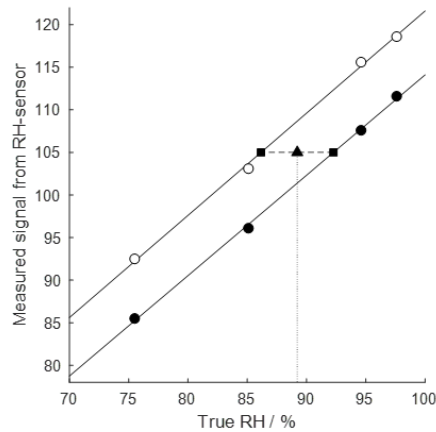


(a) Kalibreringskurvor före.

(b) Kalibreringskurvor efter.

**Figur 9:** Kalibreringskurva före och efter exponering i fuktigt klimat. Vänstra figurer med heldragna linjer visar avläst RF över tid. Högra figurer med cirklar visar avläst RF mot verklig RF vid kalibrering.

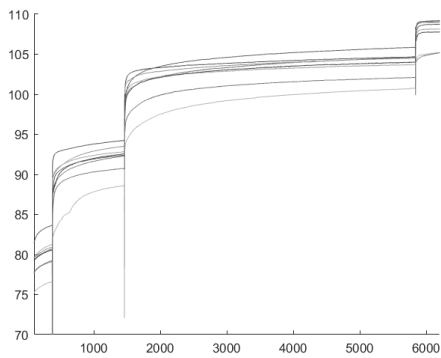
Principen för korrigering för drift av sensorer visas i Figur 10. Driften hos sensorn ger ett högre avläst värde efter mätningen (öppna cirklar i Figur 10) än avlästa värden före mätning (fyllda cirklar i Figur 10). Korrektionen görs genom att kalibreringarna före och efter mätning anpassas till två linjära funktioner som det sedan interpoleras mellan som en funktion av tiden, se Figur 10). Som exempel: om avläst värde är 86 och detta motsvarar 80 respektive 84 vid kalibreringar före och efter mätning motsvarar detta 82 efter halva mättiden.



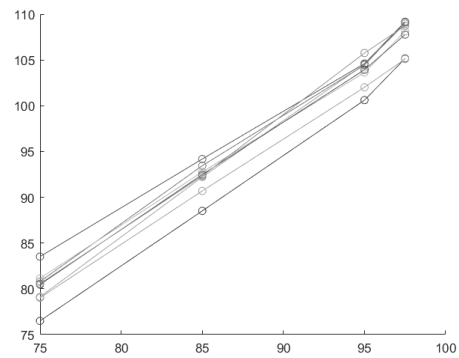
**Figur 10:** Principfigur för interpolering mellan två kalibreringsserier. Kalibreringsvärden innan RF-mätning (fyllda cirklar) och efter RF-mätning (öppna cirklar) (Figur: Wadsö, L. Avdelningen för Byggnadsmaterial).

Kalibreringen ger en uppskattad noggrannhet av  $\pm 2\%$  RF.

Kalibreringskurvor från försöken redovisas i Figur 11. Vid byte av mättat salt med högre RF-nivå steg värdena snabbt uppåt för att senare stabilisera sig på en högre nivå. En viss icke-linearitet kan noteras för avlästa värden i det översta RF-området.



(a) Mätning av RF med mättade saltlösningar.



(b) Linjeanpassning mellan kalibrerade mät-punkter.

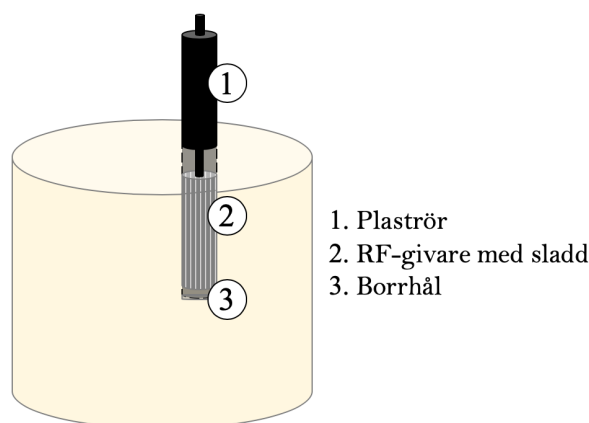
**Figur 11:** Kalibrering av RF-sensorer. Figur (a) visar avläst RF över tid. Figur (b) visar avläst RF mot verklig RF.

## 4.4 Relativ fuktighet betong

Självtorkning i betong utvärderades genom mätning av RF i betongprover som härdat i förslutna hinkar. Betongproven tillreddes enligt framtagna betongrecept med olika bindemedelssammansättningar, se Bilaga A. Betongproven förbereddes enligt nedan:

1. De ingående materialen vägdes upp (ballast, bindemedel och vatten) på våg med 1 g noggrannhet (Mettler Toledo ID1 Plus). För att bestämma den torra vikten på ballastens minsta stenfraktion (0–2 mm) mättes dess fuktkvot i en fuktkvotsmätare (Adam Equipment, Moisture Analyzer). Den tillsatta vattenmängden justerades för den vattenmängd som uppmätts i fraktionen 0–2 mm.
2. Vid tillberedningen av betongen blandades först de olika stenfraktionerna samman i en tvångsblandare (AB Sandby Maskiner). Därefter tillsattes bindemedel, vatten och slutligen flyttillsats. Mängden flyttillsats var 1,5% av den totala torrcementvikten.
3. Betongen blandades i en 250 l tvångsblandare i cirka två minuter. Betongen hölls därefter ner i plåthinkar (5 l) som fylldes upp till kanten.
4. För att kompaktera betongen och minimera luftbubblor vibrerades betongproven på ett vibratorbord. För de tre sista betongblandningarna placerades en stålplatta under hinkens botten för att få en jämnare kompaktering.
5. Hinkarna förslöts med ett tätt lock och placerades i ett klimatrum med kontrollerad temperatur och RF, 20°C respektive 60%. Betongproven vägdes vid tre olika tillfällen för att kontrollera hinkarnas täthet på våg med 0.1 g noggrannhet (Sartorius LE 340015).

RF mättes med kapacitiv givare (Vaisala HMP40S) monterad i ett borrhål som borrats till halva betongprovets djup, se Figur 12. Vid avläsning av RF i betongproven användes RBK (Rådet för byggkompetens) standardmetod *Rutin för RF-bestämning i borrhål Vaisala HMP40S* [43]. Vid borrning användes slagborrmaskin (Hilti TE 30C) med 16 mm borrhål.



**Figur 12:** Betongprov med borrhål och monterad RF-givare.



För att kontrollera självuttorkningen över tid genomfördes fyra mätningar, i fyra olika borrhål för varje duplikat. Varje betongblandning utfördes i tre duplikat. Den första mätningen utfördes 30 dagar efter gjutning. De två följande mätningarna gjordes om cirka 15 dagars intervall. Den sista mätningen genomfördes mellan 83–90 dagar efter gjutning.

För att ta hänsyn till de felkällor som bidrar till osäkerheter avseende fuktmätning genomfördes korrektion samt en beräkning av mätosäkerhet i försöket enligt metod RBK [44]. Två korrektioner beaktades:

- Korrektion för omräkning av RF till RF vid 20°C
- Korrektion på grund av givarnas fuktkapacitet

Dessa korrektioner och mätosäkerheter korrigerade det kalibrerade värdet av RF.

### **Korrektion för omräkning av RF till RF vid 20°C**

För att underlätta jämförelse med andra mätningar justeras uppmätt RF till RF vid 20°C. Korrektionen för omräkning av RF till RF vid 20°C beror på att om temperaturen i betongen ändras vid konstant ånghalt så kommer även RF att ändras något [44]. Denna korrektion,  $K_1$ , beror på betongens temperatur, RF-nivå och vbt och beräknas enligt Ekvation (10).

$$K_1 = \Delta RF / \Delta T \cdot (20 - t) \quad (10)$$

där  $\Delta RF / \Delta T$  är en korrektionsfaktor hämtad från [44] och  $t$  är betongprovets uppmätta temperatur. Korrektionsfaktorn beror på det kalibrerade värdet på betongprovets RF och vbt. Denna korrektion blev liten för de aktuella försöken, som utfördes i ett kontrollerat klimat, och uppgick som mest till +0,2% RF.

### **Korrektion på grund av givarens fuktkapacitet**

Då RF-givaren monteras i borrhålet kommer en del av fukten i betongen att upptas i givarens membran. Detta medför att uppmätt RF i borrhålet blir lägre än det egentliga värdet för provet. För RF-givare Vaisala gäller korrektionen,  $K_2$ , +0,5% RF för korrektion på grund av fuktkapacitet [44].

### **Mätosäkerhet beroende på slumpmässiga fel**

Mätosäkerheten som beror på slumpmässiga fel summerar samtliga felkällor som förekommer vid mätning av RF i betong med borrhålsmätning enligt RBK [44]. Osäkerheterna kombineras enligt denna metod till ett värde, så kallad utvidgad mätosäkerhet, som representerar den totala osäkerheten i mätningen.

Felkällorna och dessas standardosäkerheter redovisas i Tabell 5. Värde på standardosäkerheterna togs fram enligt Flik 27 i RBK-standardmetod [44] som används för borrhålsmätning i fält.

**Tabell 5:** Standardosäkerheter vid fuktmätning i betong.

Standardosäkerhet (% RF)	Beskrivning av standardosäkerhet
$\pm 0.29$	Osäkerhet på grund av icke-linearitet mellan kalibreringspunkter
$\pm 0.58$	Osäkerhet på grund av drift hos RF-givare mellan mätningar. Denna antas vara mindre än $\pm 1,0\%$ då givarna används under god uppsikt och i styrt klimat
$\pm 0.29$	Osäkerhet i korrektionsfaktorn, $K_2$ , som beror på givarens fuktkapacitet
$\pm 0.40$	Osäkerhet i kalibrering. Denna antas vara låg på grund av regelbunden och tillförlitlig egenkontroll
$\pm 0.021$	Osäkerhet vid mätning utförd i annan temperatur än $20^\circ\text{C}$

Den totala utvidgade mätosäkerheten beräknades med hjälp av Blankett F8 i RBK-standardmetod [44], se Bilaga B. Med 95% säkerhet ligger verkligt värde inom  $\pm 1,63\%$  från det uppmätta värdet med avseende på slumpmässiga fel.

# 5 Resultat

## 5.1 Värmeeffekt cementpasta

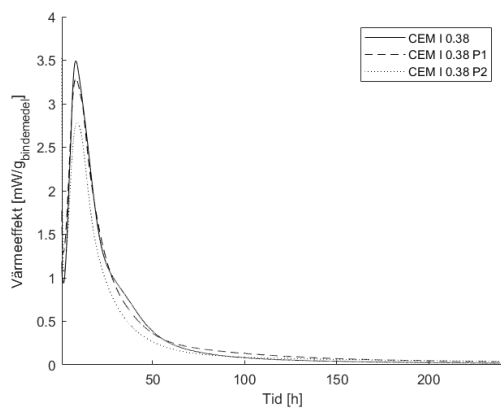
Värmeeffekten registrerades under de tio första dygnen efter omblandning av bindemedel och vatten. Duplikaten visade god samstämmighet och för varje prov redovisas medelvärdet av två duplikat. I detta avsnitt redovisas värmeeffekt och total värmeeffekt under 10 dygn för vbt 0.38 respektive 0.50 samt värmeeffekt under det tidiga hydratationsförloppet.

### Värmeeffekt och total värmeeffekt

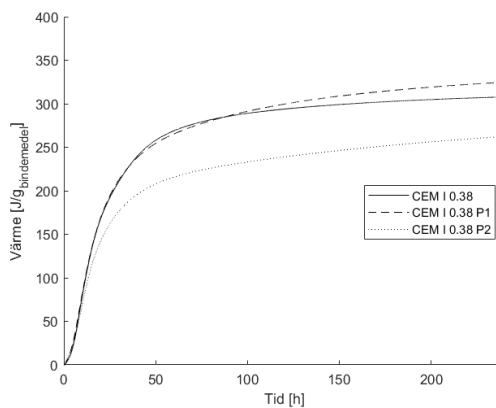
Utvecklad värmeeffekt och total avgiven värme för CEM I, CEM II och CEM III, med och utan aluminatrika tillsatsmaterial, redovisas för vbt 0.38 i Figur 13 (a)–(f) och för vbt 0.50 i Figur 14 (a)–(f). Tillsatsmaterialen P1 eller P2 har ersatt 10% av bindemedlet.

### Värmeeffekt tidigt hydratationsförlopp

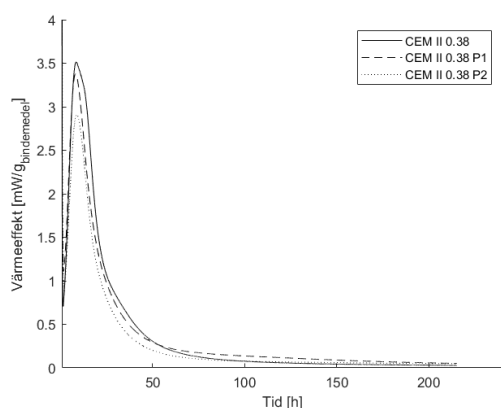
Huvuddelen av klinkermineralen hydratiserar under de inledande två dygnen. Utvecklad värmeeffekt under de första 50 timmarna för CEM I, CEM II och CEM III vbt 0.38 och 0.50, med och utan aluminatrika tillsatsmaterial, redovisas i Figur 15 (a)–(f). Tillsatsmaterialen P1 eller P2 har ersatt 10% av bindemedlet.



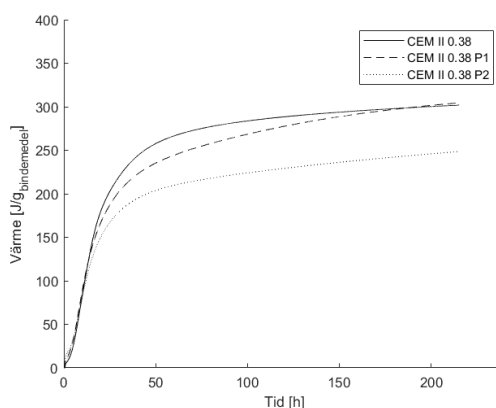
(a) Värmeeffekt CEM I.



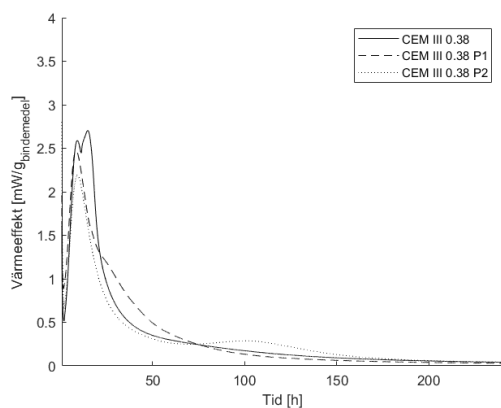
(b) Avgiven värme CEM I.



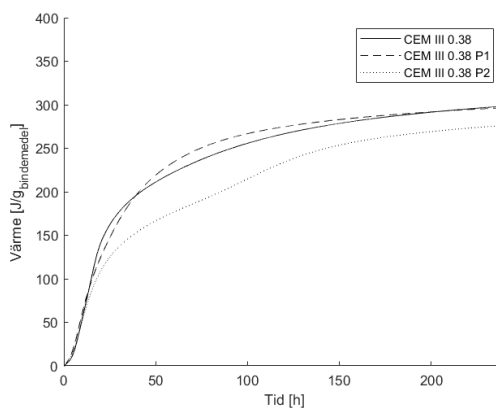
(c) Värmeeffekt CEM II.



(d) Avgiven värme CEM II.

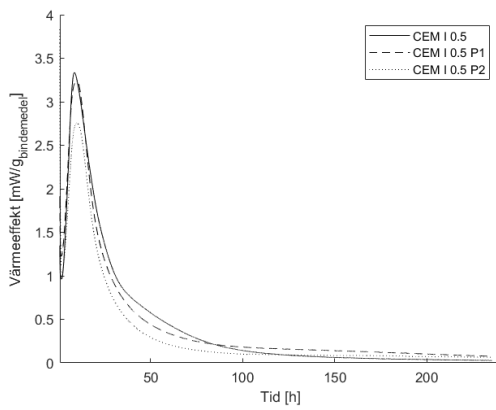


(e) Värmeeffekt CEM III.

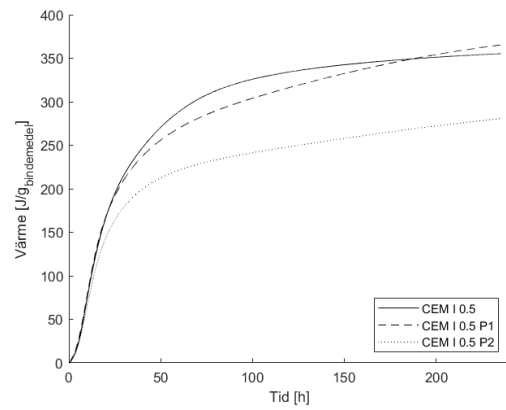


(f) Avgiven värme CEM III.

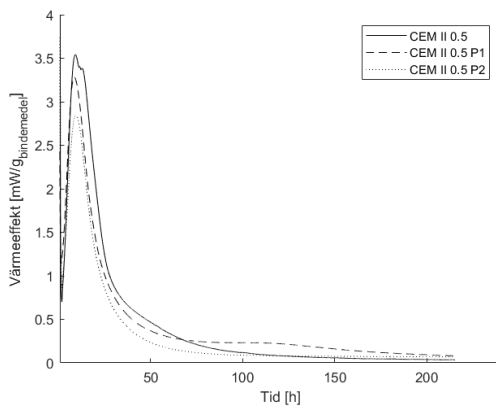
**Figur 13:** Värmeeffekt och avgiven värme CEM I–III vbt 0.38 med och utan tillsatsmaterial som funktion av tid.



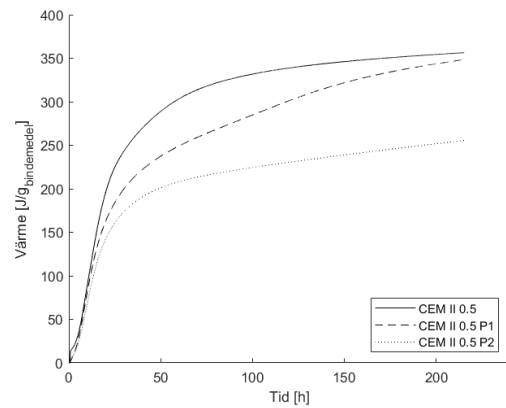
(a) Värmeeffekt CEM I.



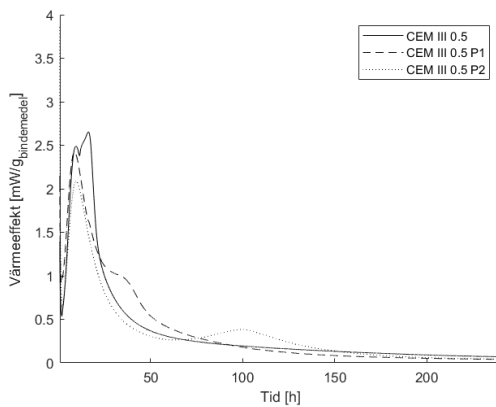
(b) Avgiven värme CEM I.



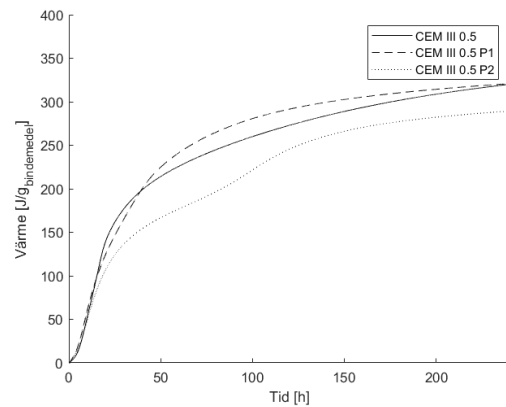
(c) Värmeeffekt CEM II.



(d) Avgiven värme CEM II.

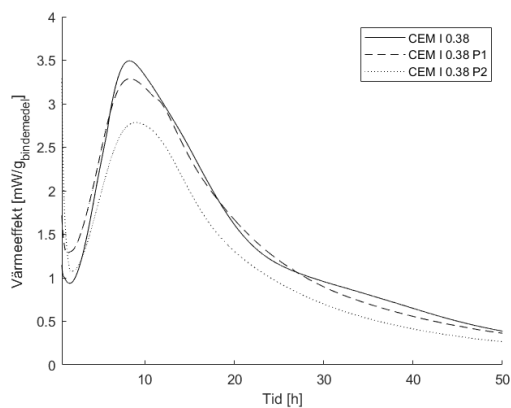


(e) Värmeeffekt CEM III.

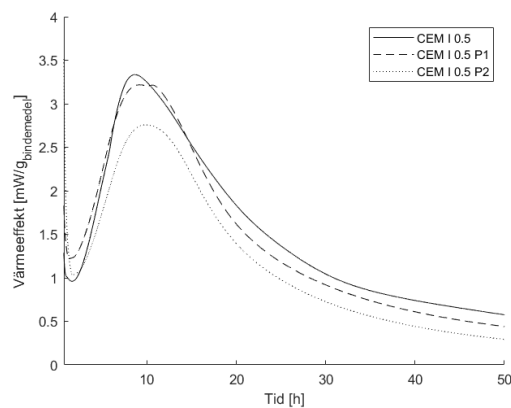


(f) Avgiven värme CEM III.

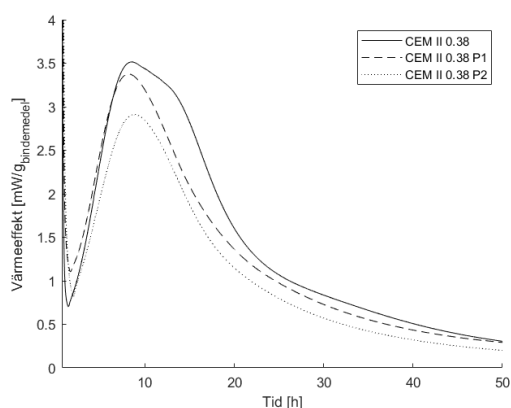
**Figur 14:** Värmeeffekt och avgiven värme CEM I–III vbt 0.50 med och utan tillsatsmaterial som funktion av tid.



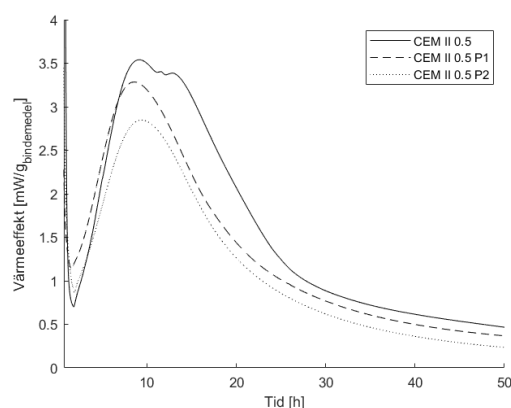
(a) Värmeeffekt CEM I vbt 0.38.



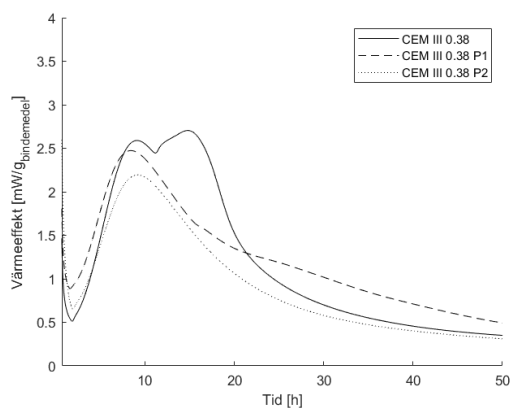
(b) Värmeeffekt CEM I vbt 0.50.



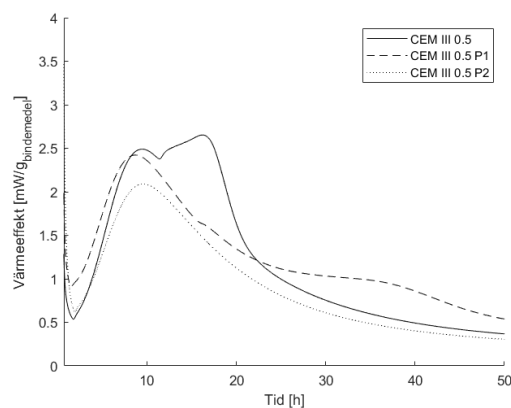
(c) Värmeeffekt CEM II vbt 0.38.



(d) Värmeeffekt CEM II vbt 0.50.



(e) Värmeeffekt CEM III vbt 0.38.



(f) Värmeeffekt CEM III vbt 0.50.

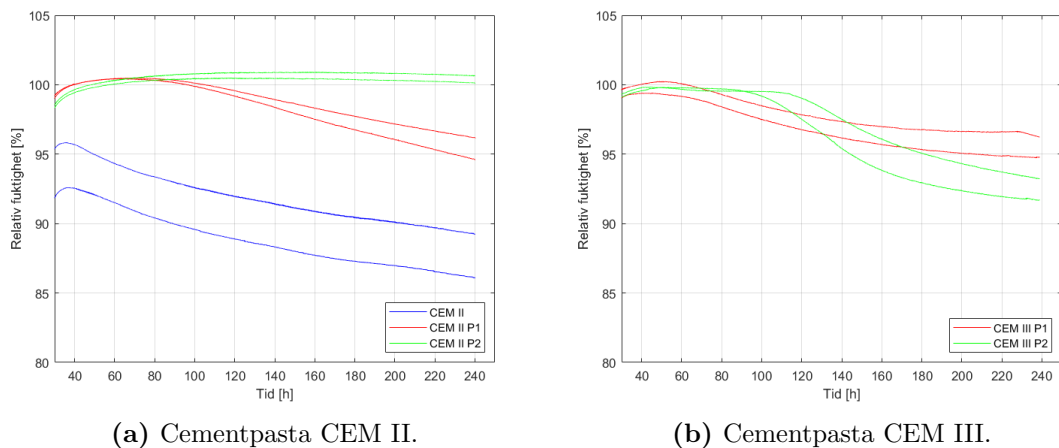
**Figur 15:** Värmeeffekt under de första 50 timmarna.

## 5.2 Relativ fuktighet cementpasta

Mätning av RF hos cementpasta startades 24 h efter tillberedning och mättes i nio dagar. Därefter gjordes en punktmätning 23 dagar efter tillberedning.

### Relativ fuktighet tio dagar

Uppmätt RF i nio dagar hos två duplikat av cementpastaprov, vbt 0.38, CEM II och CEM III med och utan aluminatrika tillsatsmaterial, redovisas i Figur 16. Tillsatsmaterialen P1 eller P2 har ersatt 10% av bindemedlet. På grund av den höga driften hos RF-sensorerna bör resultaten från dessa försök tolkas med viss försiktighet, se Figur 9. För cementpasta CEM III skedde ett mätfel för cementpastaprov utan tillsatsmaterial, dessa resultat har därför uteslutits.



**Figur 16:** Självtorkning i cementpasta, vbt 0.38, med och utan aluminatrika tillsatsmaterial, RF som funktion av tid.

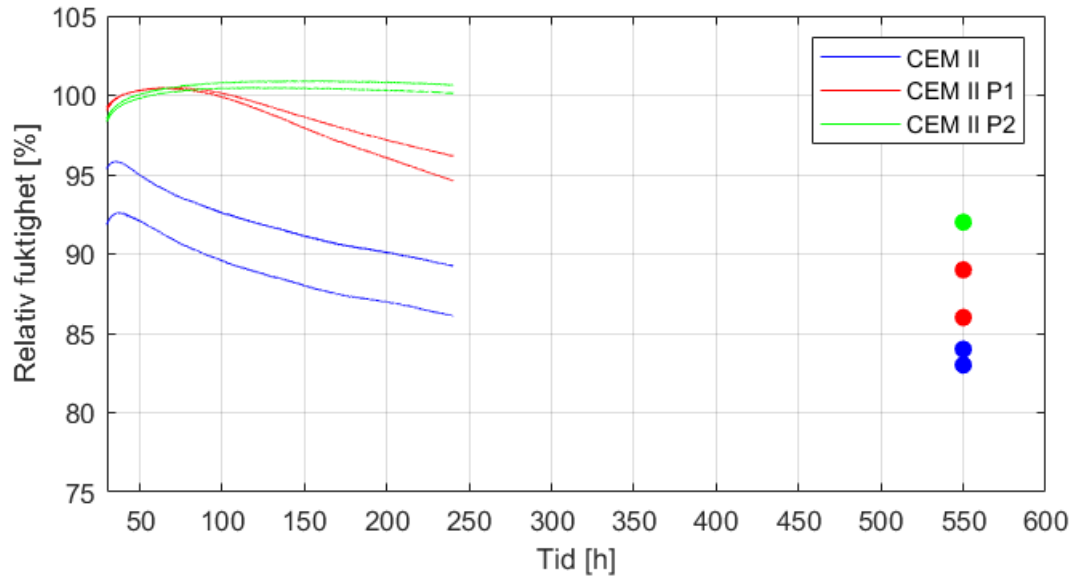
Sammanställning av RF hos cementpasta tio dagar efter tillberedning redovisas i Tabell 6. Värdena har tagits fram som ett medelvärde av de två duplikaten.

**Tabell 6:** Relativ fuktighet hos cementpasta tio dagar efter tillberedning.

Cementpastaprov	Relativ fuktighet (%)
CEM II	87
CEM II P1	96
CEM II P2	100
CEM III	–
CEM III P1	96
CEM III P2	92,5

### Relativ fuktighet tio dagar och punktmätning

RF hos cementpastaprov CEM II tio dagar samt punktmätning 20–23 dagar efter tillberedning, se Figur 17. Punktmätningen visas vid 550 h (23 dagar) som fyllda cirklar i diagrammet.

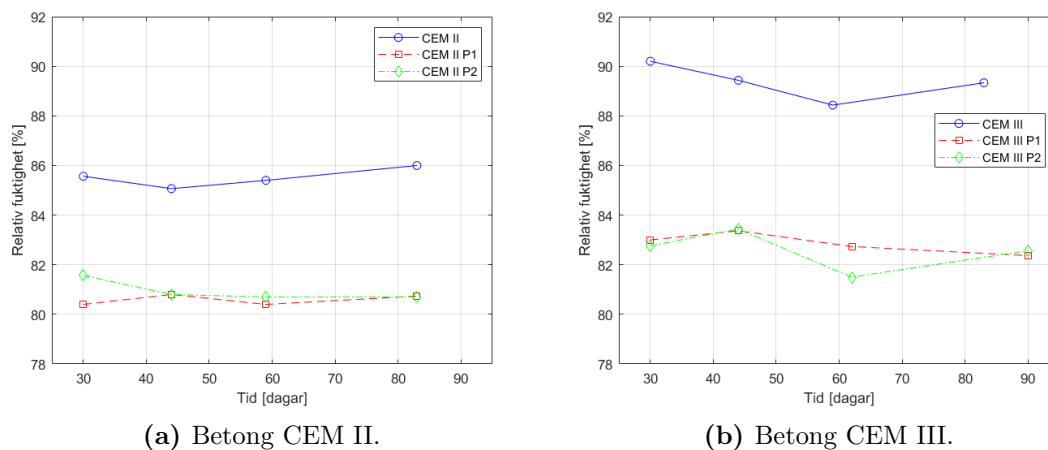


**Figur 17:** Relativ fuktighet hos cementpasta CEM II 24–550 h efter tillberedning. Fyllda cirklar visar resultat från punktmätning.



## 5.3 Relativ fuktighet betong

Uppmätt RF i betong, vbt 0.38, CEM II och CEM III med och utan aluminatrika tillsatsmaterial redovisas som punkter i Figur 18. Tillsatsmaterialen P1 eller P2 har ersatt 10% av bindemedlet. Redovisade punkter visar ett medelvärde av tre duplikat från samma betongblandning.



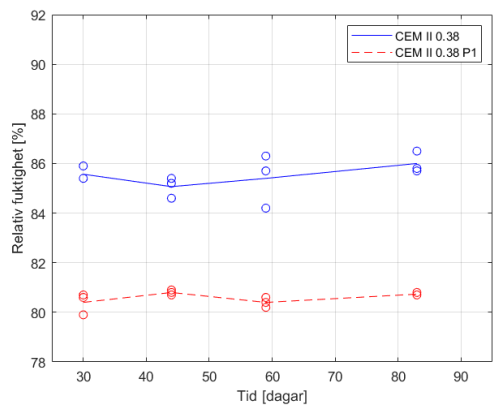
**(a)** Betong CEM II. **(b)** Betong CEM III.  
**Figur 18:** Relativ fuktighet hos betong, vbt 0.38, 30–90 dagar efter gjutning.

En sammanställning av RF 30–90 dagar efter gjutning hos samtliga betongprov redovisas i Tabell 7.

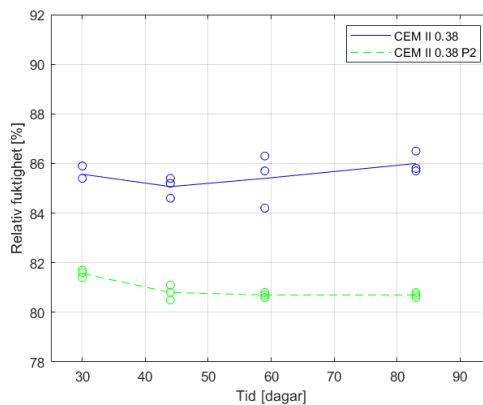
**Tabell 7:** Relativ fuktighet hos betong 30 dagar efter gjutning.

Betongprov	Relativ fuktighet (%)
CEM II	85,5
CEM II P1	80,5
CEM II P2	80,5
CEM III	89,5
CEM III P1	82,5
CEM III P2	82,5

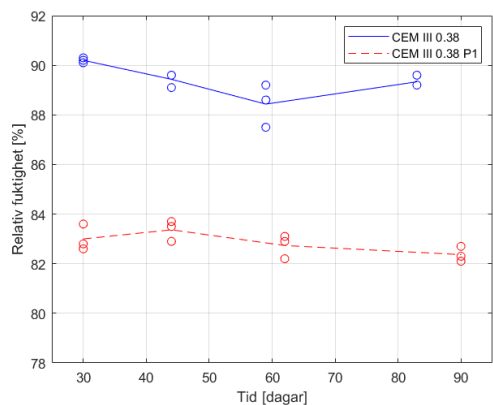
Resultatet av uppmätt RF för samtliga mätpunkter i alla duplikat redovisas i Figur 19. En linjeanpassning har gjorts av medelvärdena för mätvärdena hos duplikaten. Med ett 95% konfidensintervall ligger verkligt värde inom  $\pm 1,63\%$  från det uppmätta värdet enligt beräkning i Kapitel 4.4.



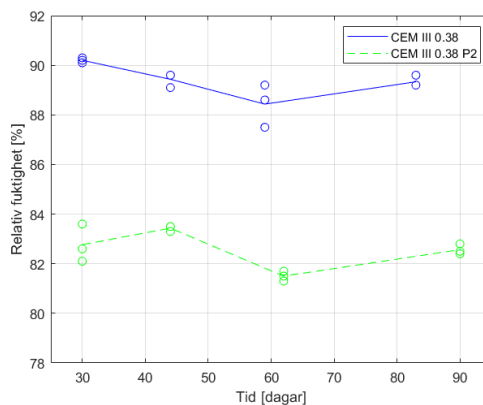
(a) Betong CEM II.



(b) Betong CEM II.



(c) Betong CEM III.

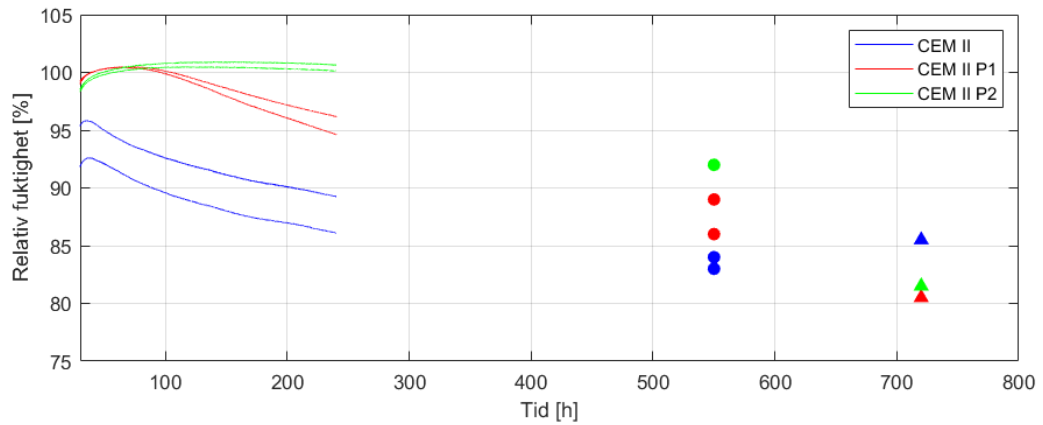


(d) Betong CEM III.

**Figur 19:** Mätpunkter av uppmätt relativ fuktighet hos betong, vbt 0.38, vid självuttorkning i förslutna betongprov.

## 5.4 Samband relativ fuktighet cementpasta och betong

RF hos cementpasta, CEM II, 24–550 h (linjer och cirklar) efter tillberedning samt RF hos betong, CEM II, 30 dagar efter gjutning (trianglar), CEM II, redovisas i Figur 20.



**Figur 20:** Relativ fuktighet hos cementpasta (linjer och cirklar) samt betong (trianglar), CEM II, 24–550 h efter tillberedning respektive 30 dagar efter gjutning.



## 6 Diskussion

I detta avsnitt kommer de olika bindemedelssammansättningarna att betecknas enligt vbt-cementtyp-tillsatsmaterial, se Bilaga C. Cementpasta, vbt 0.38, CEM II med tillsatsmaterial P2 förkortas alltså 0.38-II-P2. Prov utan tillsatsmaterial benämns referensprov.

### 6.1 Metodval

Under arbetet har metoden för mätning av RF i cementpasta utvecklats vidare. Den ursprungliga tanken vid planering av mätningarna var att huvuddelen av resultaten skulle hämtas från dessa mätningar, och sedan skulle dessa resultat valideras mot RF mätningar i betong och diskuteras utifrån uppmätt värmeeffekt i cementpasta. RF-mätning i cementpasta är ännu behäftad med vissa svagheter och framförallt sensorernas drift är en utmaning. När metoden har utvecklats och blivit mer stabil öppnar den nya möjligheter för att optimera bindemedelssammansättningar med avseende på självuttorkning. Metoden är relativt enkel och ingen skrymmande utrustning krävs. Den ger möjlighet att ställa upp försök för att i detalj utvärdera vilka material som ger störst inverkan på självuttorkning. Dessa resultat kan sedan valideras mot prover på betong med ballast och tillsatsmaterial som används i produktion.

Borrhålmätning i gjutna prover har gett resultat som bedöms som tillförlitliga. Denna metod i fältmätningar i produktion innan montering av ytskikt på betongbjälklag, och ger därför resultat som lätt kan översättas till praktiska tillämpningar. Försöken har utförts i styrt klimat (20°C och 60% RF), och effekten från tillsatsmaterialen vid en annan härdningstemperatur har inte undersökts. Det är känt att lägre härdningstemperaturer påverkar porstrukturen hos vissa aluminatrika cementmaterial, varför försök bör göras vid lägre temperaturer för att se effekten på självuttorkning.

## 6.2 Värmeeffekt cementpasta

### 6.2.1 Resultatens tillförlitlighet

Mätning av utvecklad värmeeffekt med isoterm kalorimetri är en väl beprövad metod med väldokumenterad tillförlitlighet. Försöksuppställningen har kalibrerats i nära anslutning till de utförda försöken. Duplikaten visade en god samstämmighet i mätresultaten vilket minskat risken för slumpmässiga fel. Sammantaget ger detta att tillförlitligheten hos resultaten bedöms vara god.

### 6.2.2 Tillsatsmaterialens effekt

Värmeutvecklingen hos prov 0.38 och 0.50 följer samma utveckling, se Figur 13 och 14 (a), (c) och (e). Samtliga prov med tillsatsmaterial P2 har en lägre maximal värmeutveckling än för referensprov och prov med tillsatsmaterial P1. Detta beror troligen på att aluminathalten hos tillsatsmaterial P2 är högre än hos tillsatsmaterial P1. En större mängd aluminat gör att mer vatten binds tidigt i hydratationen då  $C_3A$ -reaktionen äger rum. Detta vatten finns därmed inte tillgänglig för  $C_3S$ -reaktionen vilket begränsar hydratationen.

För prov 0.38-III-P2 och 0.50-III-P2 kan man vid cirka 100 h se en tydlig ökning av avgiven värme som avbildar sig som en ”puckel” i värmeeffektdiagrammen. Fenomenet har troligen orsakats av att sulfatet förbrukats vilket gör att upplösningen av  $C_3A$  och bildning av AFt förskjuts.

Vid cirka 100 h kan man se en ökning av värmeeffekten för prov 0.38-II-P1 och 0.50-II-P1 vilket kan bero på att sulfatet i lösningen förbrukats.

För samtliga prov ger inblandning av tillsatsmaterial P1 och P2 en lägre värmeutveckling under den tidiga hydratationen, se Figur 15. För prov med tillsatsmaterial P2 är maximal värmeeffekt i de flesta fall cirka 1 mW lägre än för referensprov och prov med tillsatsmaterial P1. Detta kan bero på den högre mängden aluminat i P2.

För prov 0.38-III-P1 och 0.50-III-P1 kan en förändring noteras i värme-effekten cirka 25 h efter tillberedning av proven, se Figur 15 (e) och (f). Ökningen beror troligen på att den andra effekttoppen med upplösning av  $C_3A$  och bildning av AFt har förskjutits och inträffar vid 25 h.

För samtliga prov med tillsatsmaterial avtar hydratationshastigheten cirka 24 h efter tillberedning, se Figur 13 och 14 (b), (d) och (f). Det avgivna värmets är efter tio dygn, för referensproven och för prov med tillsatsmaterial P1, nästan detsamma. För prov med tillsatsmaterial P2 är det avgivna värmets lägre. Hos prov med tillsatsmaterial P2 är värmeeffekten under den tidiga hydratationen (50 h) lägre vilket pekar på en lägre hydratationsgrad. Det går inte att utifrån resultaten dra någon generell slutsats för hur inblandning av tillsatsmaterial P1 påverkar avgiven värme.

Det avgivna värmets för referensprov 0.50–I och 0.50–II samt prov med tillsatsmaterial P1 är högre än motsvarande för prov 0.38–I och 0.38–II, se Figur 13 och 14 (b) och (d). Förklaringen till detta kan vara att mängden tillgängligt vatten är större hos 0.50 vilket ökar hydratationsgraden. Effekten kan inte påvisas hos prov med CEMIII.

För prov 0.38–II, 0.38–III, 0.50–II och 0.50–III i referensproven kan man tydligt se en andra effekttopp mellan 10–20 h efter tillberedning, se Figur 15. Fenomenet är särskilt framträdande för referensprov 0.38–III och 0.50–III som har en större andra effekttopp än den första. I prov med tillsatsmaterial P1 respektive P2 saknas denna andra effekttopp. Detta kan betyda att en förnyad upplösning av  $C_3A$  och bildning av AFt antingen uteblir eller sker senare.

Eftersom den andra effekttoppen har ett samband med ombildningen av AFt till AFm har denna puckel i värmeutvecklingen ett samband med den kemiska bindningen av vatten. Att puckeln uteblir vid tillsats av aluminatrika material kan ha ett samband med den sänkning av RF i betong som uppmätts vid 30 dygn. Om ombildningen till AFm uteblir betyder detta att  $C_3A$  bildar faser som binder en större mängd vatten.

## 6.3 Relativ fuktighet cementpasta

### 6.3.1 Resultatens tillförlitlighet

Samstämmigheten mellan duplikaten är god avseende självuttorkningens generella utvecklingsförlopp, se Figur 16. Skillnaden i RF mellan duplikaten är inom  $\pm 2\%$  vilket för mätmetoden var förväntat. Metoden är under utveckling och RF-sensorerna har visat sig vara särskilt känsliga för drift vid höga RF, se Figur 9. Dessa resultat har därför tolkats med viss försiktighet.

### 6.3.2 Tillsatsmaterialens effekt

Resultaten visar att tillsatsmaterialen ger en försenad sänkning av RF, och under de första 10 dygnen har referensprovet en större självuttorkning. Referensprov 0.38-II visar att RF börjar avta efter cirka 30 h vilket fortsätter under mätperioden med en viss avtagande hastighet, se Figur 16 (a). Efter tio dagar har RF hos referensprov 0.38-II nått 87% (medelvärde av duplikat).

Sänkningen av RF hos prov 0.38-II-P1 börjar senare än hos motsvarande referensprov. Förändringen i RF börjar efter cirka 100 h och efter tio dagar har RF sjunkit till cirka 96% (medelvärde av duplikat). För prov 0.38-II-P2 har ingen självuttorkning påvisats under mätperiodens tio dygn.

För prov 0.38-III-P1 har självuttorkningen startat efter cirka 70 h och efter tio dagar har RF nått cirka 96% (medelvärde av duplikat), se Figur 16 (b). Självuttorkningen påbörjas för prov 0.38-III-P2 senare än för prov 0.38-III-P1, efter cirka 110 h. Efter tio dagar har prov 0.38-III-P2 nått 92,5% RF (medelvärde av duplikat).

Självuttorkningen hos prov 0.38-III-P1 har börjat tidigare än hos prov 0.38-II-P1. Detta kan bero på innehållet av slagg i CEMIII som reagerar tidigare än flygaska. Under mätperioden sker ingen uttorkning hos prov 0.38-II-P2 medan det efter 110 h sker en sänkning av RF för prov 0.38-III-P2.

Vid jämförelse av RF-mätning (tio dygn) av proven och punktmätningen kan man se vidare självuttorkning av referensprov och prov 0.38-II-P1. Utifrån detta kan man anta att självuttorkningen har följt samma trend som under de tio första dygnen. För 0.38-II-P2 kan man se en kraftig sänkning av RF vilket tyder på att självuttorkningen måste skett hastigt under perioden mellan 10 och 23 dagar.

Vid 10 och 20 dygn efter tillberedning ligger RF mellan proven i samma relation till varandra, det vill säga att referensprovet har nått högst självuttorkning och 0.38-II-P2 lägst.

### Samband mellan värmeeffekt och relativ fuktighet

Efter cirka 100 h kan man se en liten ökning av värmeeffekten hos cementpasta 0.38-II-P1, se Figur 13 (c). Denna ökning av värmeeffekt sammanfaller i tid med sänkningen av RF hos samma prov. Sänkningen av RF sker då det avgivna värmnet nått 260 J. Den reaktion som sker vid detta tillfälle kan vara orsaken till att en ökad bindning av vatten sker vilken därefter fortsätter.



Skillnaden i det avgivna värmnet från hydratationen hos prov med tillsatsmaterial P1 respektive P2 efter tio dagar är markant. Det avgivna värmnet för prov 0.38-II-P2 när tio dagar efter tillberedning 240 J, se Figur 13 (d). Om självuttorkningen startar vid 260 J (enligt sänkning av RF hos prov 0.38-II-P1) har prov 0.38-II-P2 inte nått denna gräns vilket kan vara anledningen till att en sänkning av RF inte skett.

Självuttorkningen som hos prov 0.38-III-P2 börjar vid 110 h sammanfaller med den förhöjda värmeeffekten ("puckeln") i värmeutvecklingen, se Figur 13 (e). Detta kan innebära att reaktionerna som sker vid 100 h ger en ökad bindning av vatten vilket bidrar till självuttorkning.

För att dra vidare slutsatser om värmeeffektens samband med RF kan man i framtida arbeten studera reaktionsentalpierna för de klinkermineral som ingår i bindemedlet. På så vis kan man göra försök där hydratationsgraden kopplas till kemiskt bundet vatten. Detta kräver att kemiskt väldefinierade material används i försöken.

## 6.4 Relativ fuktighet betong

### 6.4.1 Resultatens tillförlitlighet

Den totala utvidgade mätosäkerheten har beräknats till  $\pm 1,63\%$  med den metod som föreskrivs enligt RBK och som används för bedömning av mätosäkerhet för mätningar i fält.

Spridningen i resultaten anses vara liten. Det skiljer som mest 2,1% RF mellan största och minsta värde. Medelvärdet av skillnaden mellan största och minsta mätvärde för tre duplikat är 0,67%, vilket indikerar att mätosäkerheten för dessa försök är mindre än den som beräknats med metod enligt RBK.

### 6.4.2 Tillsatsmaterialens effekt

RF i proven har 30 dagar efter gjutning sjunkit från 100% RF till mellan 80,5–90% RF, se Figur 18. Vidare har ingen tydlig förändring av RF skett under mätperioden. Detta indikerar att fullständig självuttorkning uppnåtts innan 30 dagar.

Mellan vissa på varandra följande mätpunkter avläses en förändring i RF på mellan 0,5–1% RF. Utifrån beräknad utvidgad mätosäkerhet, se Kapitel 4.4, ligger förändringen inom intervallet för mätosäkerhet.

Prov 0.38–II har efter 30 dagar lägre RF än prov 0.38–III. Efter 30 dagar har prov med tillsatsmaterial P1 och P2 nått lägre RF än referensprovet. Det går inte att se någon skillnad i självuttorkning mellan prov med tillsatsmaterial P1 respektive P2. Orsaken till detta kan vara att klinkermineralen binder samma mängd vatten som de i P2 men utvecklar mindre värme i hydratationen.

För betongprov 0.38–II–P1 och 0.38–II–P2 är RF efter 30 dagar cirka 5% lägre än referensprovet, se Figur 18. För betong 0.38–III–P1 och 0.38–II–P2 är RF efter 30 dagar cirka 7% lägre än referensprovet. Detta tyder på att de aluminatrika tillsatsmaterialen ger en större effekt för betongprov 0.38–III än för 0.38–II. En möjlig förklaring till detta är den större mängden tillgängligt vatten i cementpasta med innehåll av slagg, som även ökar hydratationsgraden för  $C_3S$ . Denna utspädningseffekt har tidigare diskuterats i Kapitel 3.2.

### Samband mellan relativ fuktighet cementpasta och betong

Efter tio dagar har RF i cementpastaprov 0.38 utan tillsatsmaterial nått cirka 87% RF.

Efter tio dagar har RF i cementpasta 0.38–II med tillsatsmaterial P1 och P2 en mindre sänkning av RF (4% respektive 0%) än för referensprovet (13%). För motsvarande betongprov är RF, 30 dagar efter gjutning, lägre för betong med tillsatsmaterial P1 och P2. Detta betyder att RF måste sjunka med högre hastighet hos cementpastaprov med tillsatsmaterial än för referensprov efter tio dagar.

Mellan 23 och 30 dagar hos cementpasta, 0.38-II, respektive betong kan ingen koppling mellan RF göras. Trenden som sker i uttorkning hos cementpasta följer inte de mätvärden som erhållits för betong. Störst avvikelse noteras för 0.38-II-P2.

Vid jämförelse av RF mellan cementpasta och betong måste hänsyn tas till det att i betongproven tillsats 1,5% flyttillsatsmedel. Flyttillsatsmedlet ger cementpartiklarna en större spridning i lösningen vilket ger en ökad hydratationsgrad och en större självuttorkning. Detta kan medföra att RF blir lägre i prov med betong. I praktiska tillämpningar används ofta flyttillsatsmedel i betongen för en ökad arbetbarhet, speciellt vid låga vct.

## 6.5 Vinster med aluminatrika tillsatmaterial

En optimering av bindemedelssammansättningen kan ge stora vinster för projektets ekonomi och minska byggnadens totala klimatpåverkan. Den ökade självuttorkningen som påvisats för betong med tillsats av aluminatrika tillsatmaterial kan korta projekttiden vilket ger en direkt fördel i form av minskade kapitalkostnader. Användningen av betong kommer att vara fortsatt hög under en överskådlig framtid varför materialutveckling och optimering bör ske med ett långsiktigt perspektiv.

De beräkningar som redovisas i Tabell 1 i inledningen visar att ett uttorkningskrav som skärps från 90 till 85% RF leder till en 15% ökning av CO<sub>2</sub>-utsläpp för byggnadsdelar av betong. Om denna effekt kan åstadkommas genom att ersätta en del av bindemedlet med ett tillsatmaterial med lägre klimatpåverkan, som de undersökta tillsatmaterialen, finns stora miljömässiga vinster att göra. De stora volymerna betong som används gör att en optimering av bindemedelssammansättningen ger stor utväxling i form av minskade CO<sub>2</sub>-utsläpp.

## 7 Slutsats

Inblandning av de aluminatrika tillsatsmaterialen P1 och P2 ger en ökad självuttorkning för betong vct 0.38 som härdat i 30 dygn. Det finns ingen skillnad i RF mellan betong med tillsatsmaterial P1 respektive P2. RF i betongproven förändras inte under hela mätperioden vilken är mellan 30–90 dagar efter gjutning.

Vid användning av tillsatsmaterial P1 och P2 har en andra effektopp i värmeutvecklingen för cementpastaprov CEM II och CEM III eliminerats. Detta tyder på att innehållet i dessa prov består av hydratationsprodukter som binder mer vatten kemiskt.

Resultat från RF-mätningar på cementpasta är behäftade med en viss osäkerhet eftersom metoden är under utveckling. Någon koppling mellan RF i cementpasta och betong kan inte göras. Mätmetoden har stor potential att förenkla arbetet med optimering av bindemedel med avseende på självuttorkning.

## 7.1 Förslag till framtida studier

Vidare studier kan göras på tillsatsmaterial med ett känt klinkerinnehåll för att kvantifiera de enskilda klinkermineralens effekt på självuttorkning. Cementsammansättningar med varierat sulfat- och kalciuminnehåll kan undersökas för att optimera den kemiska bindningen av vatten. Genom att studera de kemiska processerna samt strukturutvecklingen finns det möjlighet att optimera bindemedlets egenskaper med avseende på självuttorkning.

Fler studier bör utföras för att optimera bindemedelssammansättningar med tillsats av aluminatrika tillsatsmaterial med avseende på självuttorkning. Faktorer som klinkersammansättning, sulfat- och kalciuminnehåll bör studeras vidare med utgångspunkt i de studier som utförts av Cau-dit-Coumes et al. Dessa studier bör göras med blandningar som innehåller de cementprodukter som är tillgängliga på den svenska marknaden idag.

Hur bindemedelssammansättningar med innehåll av aluminatrika tillsatsmaterial bör hanteras i förhållande till de standarder som används i projektering är en fråga som endast delvis berörts i detta arbete. Det vore intressant att vidare utreda hur denna typ av tillsatsmaterial kan användas regelmässigt i svensk byggproduktion i enlighet med gällande standarder. Möjligheten att tillsätta dessa material redan på betongstationen bör utredas tillsammans med betongproducenterna.

I framtida studier kan borrhålmätningar göras under de första 30 dagarna efter gjutning för att kunna studera uttorkningsförloppet i detalj. Detta kan kompletteras med RF-mätningar på mindre uttagna prov från ett betongprov med samma metod som i detta arbete användes vid mätning av RF i cementpasta.

Genom fortsatt utveckling av metoden för mätning av RF i cementpasta kan metoden användas för att optimera bindemedel med avseende på kemisk bindning av vatten. Resultat från denna metod kan då jämföras med resultat från borrhålmätningar på betong.

Vidare studier kan innefatta fler jämförelser av effekten på självuttorkning vid inblandning av aluminatrika tillsatsmaterial i betong med olika vbt. Detta kan lägga grunden till en utvärdering av hur mängden cement kan reduceras samtidigt som uttorkningstiden bibehålls.

För att kvantifiera potentialen till minskade CO<sub>2</sub>-utsläpp vid användning av aluminatrika tillsatsmaterial i betong bör en studie av tillsatsmaterialens CO<sub>2</sub>-påverkan vid tillverkning genomföras. Resultaten från en sådan studie kan på så sätt jämföras med den förväntade minskningen av CO<sub>2</sub>-utsläpp då cementmängden inte reduceras.

# Referenser

- [1] K. L. Scrivener. "Options for the future of cement". I: *Indian Concr. J* 88.7 (2014), s. 11–21.
- [2] Samhällsbyggaren. *Så används stommaterial i flerbostadshus*. [http://www.samhallsbyggarna.org/media/94996/Samhallsbyggaren\\_140617low.pdf](http://www.samhallsbyggarna.org/media/94996/Samhallsbyggaren_140617low.pdf). 17 juni 2014. (hämtad 2019-02-25).
- [3] B. Roos. *Hej bostad!* Stockholm: Länsstyrelsen i Stockholms län, 2004.
- [4] A. Favier, C. De Wolf, K. Scrivener och G. Habert. *A sustainable future for the European Cement and Concrete Industry: Technology assessment for full decarbonisation of the industry by 2050*. Tekn. rapport. ETH Zurich, 2018.
- [5] L.-O. Nilsson. *Byggvägledning 9. En handbok i anslutning till Boverkets byggregler*. Stockholm: Svensk byggtjänst, 2015. ISBN: 9789173337168.
- [6] *United Nations Treaty Collection, Chapter XXVII 7. d. Parisavtalet*.
- [7] *Global Warming of 1.5 C: An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5 C Above Pre-industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty*. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2018.
- [8] *Boverkets byggregler – föreskrifter och allmänna råd, BBR*. Boverkets byggregler. Boverkets byggregler. 2011.
- [9] SvenskBetong. *Betongkvalite och exponeringsklass*. <https://www.svenskbetong.se/bygga-med-betong/bygga-med-platsgjutet/statik/kontorshus/bjalklag/val-av-betongkvalitet-och-exponeringsklass?format=pdf>. (hämtad 2019-02-25).
- [10] SvenskBetong. *Klimatförbättrad betong*. [http://cms.betongarhallbart.se/wp-content/uploads/2019/05/klimatforbatttrad-betong\\_webb.pdf](http://cms.betongarhallbart.se/wp-content/uploads/2019/05/klimatforbatttrad-betong_webb.pdf). Maj 2019. (hämtad 2019-05-14).
- [11] S.-E. Johansson. "Cement". I: *Betonghandbok*. Stockholm: Svensk byggtjänst, 2017. Kap. 3, s. 31–68.
- [12] C. Cau Dit Coumes, O. Farcy, P. Antonucci, J.-B. Champenois, D. Lambertin och A. Mesbah. "Design of self-desiccating binders using CSA cement: influence of the cement composition and sulfate source". I: *Advances in Cement Research* (2019), s. 1–17.
- [13] *The advantages of C.S.A. cement*. Mijdrecht: CALTRA Netherland BV, u.å.
- [14] P. G. Burström. *Byggnadsmaterial: uppbyggnad, tillverkning och egenskaper*. Lund: Studentlitteratur, 2001. ISBN: 9144011768.
- [15] I. Odler. "Hydration, Setting and Hardening of Portland Cement". I: *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*. Vol. 1. Butterworth-Heinemann, 1998, s. 241–289.

- [16] *SS-EN 197-1:2011 Cement - Del 1: Sammansättning och fordringar för ordinära cement*. Swedish Standards Institute. 2013.
- [17] *SS-EN 206:2011 Betong-Fordringar, egenskaper, tillverkning och överensstämmelse*. Swedish Standards Institute. 2018.
- [18] P. Norelius. "Cement". I: *Betonghandbok*. Stockholm: Svensk byggtjänst, 2017. Kap. 3, s. 31–68.
- [19] P. C. Hewlett. *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*. Utg. av P. C. Hewlett. London: Butterworth-Heinemann, 1998. ISBN: 9780080535418.
- [20] I. Löfgren. "Tillsatsmaterial". I: *Betonghandbok*. Stockholm: Svensk byggtjänst, 2017. Kap. 6, s. 139–191.
- [21] F. Massazza. "Puzzolana and Pozzolanic Cements". I: *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*. Vol. 1. Butterworth-Heinemann, 1998, s. 471–631.
- [22] *SS-EN 450-1:2012 Flygaska för betong – Del 1: Definition, specifikationer och kriterier för överensstämmelse*. Swedish Standards Institute. 2012.
- [23] J. W. Bullard, H. M. Jennings, R. A. Livingston, A. Nonat, G. W. Scherer, J. S. Schweitzer, K. L. Scrivener och J. J. Thomas. "Mechanisms of cement hydration." I: *Cement and Concrete Research* 41.Conferences Special: Cement Hydration Kinetics and Modeling, Quebec City, 2009 CONMOD10, Lausanne, 2010 (2011), s. 1208 –1223. ISSN: 0008-8846.
- [24] H. F. W. Taylor. "Hydration of Portland Cement". I: *Cement chemistry*. Vol. 2. London: Thomas Telford, 1997, s. 187–225.
- [25] G. Fagerlund. "Struktur och strukturutveckling". I: *Betonghandbok*. Stockholm: Svensk byggtjänst, 2017. Kap. 3, s. 391–446.
- [26] J. Bizzozero, C. Gosselin och K. L. Scrivener. "Expansion mechanisms in calcium aluminate and sulfoaluminate systems with calcium sulfate". I: *Cement and Concrete Research* 56 (2014), s. 190–202.
- [27] L. Wadsö. "Applications of an eight-channel isothermal conduction calorimeter for cement hydration studies". I: *Cement international* 5 (2005), s. 94–101.
- [28] K. L. Scrivener, P. Juilland och P. J. Monteiro. "Advances in understanding hydration of Portland cement". I: *Cement and Concrete Research* 78 (2015), s. 38–56.
- [29] K. De Weerd, H. Justnes, M. Haha, G. Le Saout, B. Lothenbach och K. Kjellsen. "The effect of temperature on the hydration of composite cements containing limestone powder and fly ash." I: *Materials and Structures/Materiaux et Constructions* 45.7 (2012), s. 1101–1114. ISSN: 13595997.
- [30] J. L. Provis och J. S. Van Deventer. *Alkali activated materials: state-of-the-art report, RILEM TC 224-AAM*. Vol. 13. Springer Science & Business Media, 2013.
- [31] V. Kocaba, E. Gallucci och K. L. Scrivener. "Methods for determination of degree of reaction of slag in blended cement pastes". I: *Cement and Concrete Research* 42.3 (2012), s. 511–525.



- [32] H. F. W. Taylor. “Composite cements”. I: *Cement chemistry*. Vol. 2. London: Thomas Telford, 1997, s. 261–293.
- [33] B. Lothenbach, K. Scrivener och R. Hooton. “Supplementary cementitious materials.” I: *Cement and Concrete Research* 41 (2011), s. 217 –229. ISSN: 0008-8846.
- [34] T. C. Powers. “A discussion of cement hydration in relation to the curing of concrete”. I: *Highway Research Board Proceedings*. Vol. 27. 1948.
- [35] E. Gartner. “Hydration of Portland cement”. I: utg. av P. Barnes och J. Bensted. Vol. 1. CRC Press, 2002, s. 57–108.
- [36] P. Barnes och J. Bensted, utg. *Structure and performance of cements*. CRC Press, 2002.
- [37] K. Tosun och B. Baradan. “Effect of ettringite morphology on DEF-related expansion.” I: *Cement and Concrete Composites* 32 (2010), s. 271 –280. ISSN: 0958-9465.
- [38] L.-O. Nilsson. *Hygroscopic moisture in concrete - drying, measurements related material properties*. Rapport TVBM: 1003. Lund, 1980 ; (Lund : TLTH/Sigma), 1980.
- [39] O. Jensen, P. Hansen, E. Lachowski och F. Glasser. “Clinker mineral hydration at reduced relative humidities.” I: *Cement and Concrete Research* 29.9 (1999), s. 1505–1512. ISSN: 00088846.
- [40] Z. Hu, K. Scrivener, M. Wyrzykowski och P. Lura. “A novel method to predict internal relative humidity in cementitious materials by 1H NMR.” I: *Cement and Concrete Research* 104 (2018), s. 80–93. ISSN: 00088846.
- [41] E. Berodier och K. Scrivener. “Evolution of pore structure in blended systems.” I: *Cement and Concrete Research* 73 (2015), s. 25 –35. ISSN: 0008-8846.
- [42] O. Linderoth. *Binding of moisture in fly ash blended Portland cement paste and mortar : Impact of replacement level and curing temperature*. eng. Licentiate Thesis. 2018.
- [43] *Rutin för borring av mätthål*. Rådet för byggkompetens. Rådet för byggkompetens (RBK). 2019.
- [44] *Beräkning av korrektion och mätosäkerhet*. Rådet för byggkompetens. Rådet för byggkompetens (RBK). 2019.



# Bilaga A – Betongrecept

Mängd (kg)									
Bindemedel	Cementtyp		Tillsatsmaterial		Vatten	Stenfraktion (mm)			
	CEM II	CEM III	P1	P2		0-2	2-4	8-12	12-16
0.38-II	7,342	–	–	–	2,07	13,27	5,95	5,95	5,951
0.38-II-P1	6,607	–	0,739	–	1,964	15,924	5,95	5,1	4,252
0.38-II-P2	6,608	–	–	0,734	1,872	17,72	5,53	4,68	3,4
0.38-III	–	7,344	–	–	1,872	17,72	5,53	4,682	3,4
0.38-III-P1	–	6,607	0,734	–	1,872	17,72	5,53	4,69	3,4
0.38-III-P2	–	6,608	–	0,735	1,872	17,72	5,53	4,68	3,4

# Bilaga B – Blankett F8

RBK-auktoriserad fuktkontrollant - betong

## Beräkning av osäkerhet i RF-mätning

BLANKETT F8

Mätmetod :			
Beräkning utförd av :		Datum :	

	Std.osäk.	(Std.osäk.) <sup>2</sup>
a. Spridning, konduktans	—	0
b. Ickelinearitet	0.29	0.0841
c. Drift hos RF-givare	0.58	0.3364
e. Fuktkapacitet	0.29	0.0841
g. Osäkerhet i kalibreringen	0.40	0.16
i. Kalibreringstabell, RF	—	0
j. Referenscell	—	0
l. Mättemperatur annan än 20°C	—	0
p. Temperaturvariationer under mätning	0.021	0.000441
q. Avvikelse i mätdjup	—	0
r. Avvikelse i plattjocklek	—	0

Summa = 0.6650

√Summa = 0.8155

Utvidgad mätosäkerhet, k = 2

x 2 = 1.63

Utvidgad mätosäkerhet avrundas **uppåt** till en decimal och förs in i kolumnen **Osäkerhet** i mätprotokollet

Version:	Datum:	Gäller från:	Utfärdad av:	Sign. Revisionsledare RBK	Flik:	Sida:
6	2017-09-07	2017-10-09	Ted Rapp		28	11(13)

# Bilaga C – Beteckning bindemedel

Bindemedel	vbt	Beteckning
CEM I	0.38	0.38-I
CEM I P1		0.38-I-P1
CEM I P2		0.38-I-P2
CEM II		0.38-II
CEM II P1		0.38-II-P1
CEM II P2		0.38-II-P2
CEM III		0.38-III
CEM III P1		0.38-III-P1
CEM III P2		0.38-III-P2

Bindemedel	vbt	Beteckning
CEM I	0.50	0.50-I
CEM I P1		0.50-I-P1
CEM I P2		0.50-I-P2
CEM II		0.50-II
CEM II P1		0.50-II-P1
CEM II P2		0.50-II-P2
CEM III		0.50-III
CEM III P1		0.38-III-P1
CEM III P2		0.38-III-P2