

Värmeutveckling och självuttorkning hos
pasta- och bruksprov med
flygaskainblandning – litteraturstudie
samt test av ny metod för kombinerad
mätning av värmeutveckling och RF-nivå

Matilda Andersson

TVBM-5113 Examensarbete
Byggnadsmaterial LTH 2018

ISSN 0348-7911 TVBM-5113

Lunds Tekniska Högskola
Byggnadsmaterial
Box 118
221 00 Lund

www.byggnadsmaterial.lth.se

Förord

Det här projektet är genomfört som ett examensarbete för civilingenjörsutbildningen inom väg och vattenbyggnad vid Lunds tekniska högskola. Projektet är ett samarbete mellan avdelningen Byggnadsmaterial vid Lunds tekniska högskola och företaget Cementa AB. Arbetet har genomförts av Matilda Andersson med Lars Wadsö och Oskar Linderoth som handledare och Katja Fridh som examinator. Niklas Johansson på Cementa har haft rollen som industrihandledare.

Projektet har till stor del bestått av laborativa undersökningar, men även av en litteraturstudie. Alla laborativa undersökningar är utförda i avdelningen Byggnadsmaterials laboratorium, vid Lunds tekniska högskola.

Jag vill rikta ett tack till:

Oskar Linderoth och Lars Wadsö för all hjälp och feedback, Bengt och Stefan för hjälpen i labbet samt övriga på avdelningen Byggnadsmaterial som har hjälpt mig på ett eller annat sätt under projektets gång. Jag vill även tacka Niklas Johansson på Cementa och övrig personal som hjälpte mig med gjutningar under min vistelse på Gotland.

Matilda Andersson

Lund, juni 2018

Sammanfattning

Betong har använts flitigt som byggmaterial under modern tid och är idag ett av de mest använda byggmaterialen. Då krav på hållbarhet blir allt större läggs mer fokus på de stora koldioxidutsläpp som cementtillverkningen medför. Ett sätt att minska klimatpåverkan är att ersätta delar av Portlandcementet med restprodukter från andra industrier, såsom flygaska från kol- och kraftvärmeverk. Det är en komplex fråga att svara på hur hållfasthet, självuttorkning och strukturutveckling påverkas av flygaskainblandning, många faktorer påverkar såsom inblandningsgrad och härdningstemperatur. Forskningsprojektet har startats med initiativ från byggbranschen då det blivit svårare att prediktera uttorkningstider för betongkonstruktioner och man i vissa fall erhållit ett högre fuktinnehåll än väntat. Detta har lett till större osäkerhet och i vissa fall längre uttorkningstider och större kostnader, vilket är ett problem då man idag har en hög produktionstakt och kort produktionstid.

Detta projekt syftar till att i en litteraturstudie sammanställa den kunskap som finns gällande hur flygaskainblandning påverkar självuttorkning och värmeutveckling för cementpasta och betong. Projektet omfattar även en laborativ del som går ut på att undersöka självuttorkningsförlopp och värmeutveckling på cementpastaprov och betongblandningar med olika mängd flygaskainblandning. Detta undersöks genom att placera färsk cementpastaprov i en kalorimeter, som mäter värmeutveckling under tio dagar vid härdningstemperaturen 20 °C. Kalorimetern är utrustad med RF-givare som registrerar RF-nivån i proven under tiden proven är placerade i kalorimetern. Betongblandningar placeras i hinkar med tätförslutande lock och kuber med storleken 100x100 mm. Hinkarna användes för att undersöka RF-nivån genom att borra ett mäthål där RF-givare monterades. Kuberna användes för hållfasthetstest. Förhoppningen var att kunna se tendenser till vilka effekter som flygaskainblandningen gav på proven och att undersöka om RF-mätning på cementpastaprov ger en bra uppskattning och bra överensstämmelse med motsvarande tester på betongprov med dagens metod där man borrar mäthål i gjuten betong. Även bindetidstest genomfördes för betongblandningarna, med syfte att få svar på om flygaskainblandningen gav ett lägre vattenbehov.

Examensarbetet utfördes vid Lunds Tekniska Högskola på avdelningen för Byggnadsmaterial och på cementtillverkaren Cementas fabrik i Slite, på Gotland under våren 2018.

Resultaten från undersökningen visar att inblandning av flygaska ger en långsammare hållfasthetsutveckling jämfört med för rent Portlandcement under de första 28 dyggen med 15, 20 samt 35 % flygaskainblandning och vid en härdningstemperatur på 20 °C. Resultaten visar även tendenser på att flygaskainblandning ger ett lägre vattenbehov och binder mindre vatten genom att högre RF-nivåer uppmättes på flygaskacementproven, jämfört med för prov med enbart cement som bindemedel.

Man bör dock vara försiktig med att dra några slutsatser från resultaten då undersökningen endast pågick under tio dagar och utfördes under laborativa förhållanden med en nyutvecklade, relativt oprövade metod, för att mäta självuttorkning. Testerna bör undersökas under en längre tid med fler mineraliska tillsatsmedel än flygaska.

Abstract

Concrete has been frequently used as a building material in modern time and is today one of the most applied building materials. Since the demand of sustainability is getting bigger, more focus is put on the large carbon dioxide emissions that happens due to the cement manufacturing. One way to reduce the carbon dioxide emissions is to replace a part of the Portland cement with residues from other industries, such as flyash from coal power plants that produces energy and heat. It's a complex situation to describe how self dehydration, strength and structure development of concrete and cement paste changes when flyash replaces a part of the Portland cement. Many things effect the outcome and properties of the concrete, such as how much flyash added and the curing temperature. A research-project has been started in Sweden due to the fact that it's been harder to predict dehydration times and some concrete structures have received a higher amount of water content than expected. This fact has led to a higher uncertainty and in some cases longer drying times and higher cost in order to dry the structures. In today's high production rates and short production times this becomes a problem.

This project aims to compile the knowledge about flyash and how it effects heat development and self dehydration of concrete in a literature study. The project also involves a laboratory part where self dehydration and heat development is investigated on samples of concrete and cement paste, where different amount of flyash has replaced the cement. It is analyzed by putting samples of fresh cement paste in a calorimeter which measures heat development for ten days with the curing temperature of 20 °C. The calorimeter that's been used in the project is provided with RH-sensors that registers the RH-level constantly during these ten days. Also concrete samples are made both in buckets with sealing lid and in shape of cubes (100x100 mm). The buckets were used for RH-measurements. A hole was drilled in the concrete sample and a RH-sensor put down to measure the RH-level. The cubes were used for testing compressive strength. The prospect of the project was to see some trends of how the flyash involvement affects the properties of the samples. Another was to test this new method of measuring RH-levels on cement paste samples and see if the results correspond to same type of test on concrete samples. Except for these tests a setting time test was made for the concrete samples, in order to say something about the water need when flyash is replacing a part of the Portland cement.

The work was carried out at Lunds Tekniska Högskola at the department of Building Materials and on the cement manufacturer Cementa's factory in Slite, on Gotland, Sweden during the spring of 2018.

The results shows that samples consisting of cement with flyash seems to have a slower development of strength comparing to samples consisting of plain cement. The results are applicable for samples with maximum 35 % flyash content and during the first 28 days and with a curing temperature of 20 °C. Another result is that samples with flyash cement seems to need less water and are binding less water too. This is based on the fact that higher RH-levels are measured for the samples with flyash content. You should however be careful to make conclusions from these results since they are completed during only ten days under laboratory circumstances with a newly developed and a relatively untested method for measuring RH-levels on cement paste samples. The samples should be analyzed for a longer period of time and with several mineral residues.

Innehållsförteckning

1	INLEDNING	1
1.1	SYFTE OCH PROBLEMFRÅGESTÄLLNING	2
1.2	AVGRÄNSNINGAR	2
1.3	FÖRKORTNINGAR	2
2	BETONG	3
2.1	BINDEMEDEL	4
2.1.1	<i>Portlandcement</i>	4
2.1.2	<i>Flygaska</i>	5
2.2	CEMENTPASTA	6
3	HYDRATATIONSPROCESSEN	9
3.1	KEMISKA REAKTIONER	9
3.2	VÄRMEUTVECKLING	10
3.3	INVERKAN AV OMGIVNINGSTEMPERATUR	13
3.4	SJÄLVUTTORKNING	14
4	EFFEKTER AV FLYGASKA PÅ CEMENTPASTA OCH BETONG	17
4.1	FILLEREFFEKT	17
4.2	LÄNGRE INDUKTIONSTID	18
4.3	PUZZOLANREAKTION	19
4.4	KEMISKT BUNDET VATTEN OCH SJÄLVUTTORKNING	20
4.5	HÅLLFASTHET OCH INRE PRODUKT	21
4.6	KEMISK BALANS I PORLÖSNING	22
5	TEST: HYDRATATION AV CEMENT MED FLYGASKA	23
5.1	METOD	24
5.1.1	<i>Kalorimetri</i>	24
5.1.2	<i>Mätning av relativ fuktighet</i>	28
5.1.3	<i>Blandning och behandling av prov</i>	30
5.1.4	<i>Bindetid</i>	31
5.2	TEST MED BETONG	32
5.2.1	<i>Gjutning av betongprover</i>	32
6	RESULTAT OCH DISKUSSION	35
6.1	VÄRMEUTVECKLING OCH SJÄLVUTTORKNING	35
6.2	BINDETID	42
6.3	BETONGTESTER	43
6.3.1	<i>Självuttorkning</i>	43
6.3.2	<i>Hållfasthet</i>	44
6.4	METODENS TILLÄMPBARHET	44
6.4.1	<i>Drift-beteende hos RF-givare</i>	44
6.4.2	<i>Täta behållare</i>	48
6.5	SAMMANFATTNING	48
7	SLUTSATSER	51
8	FORTSATTA STUDIER	53
9	REFERENSER	54

1 Inledning

Betong är ett av de mest använda byggmaterialen i modern tid. Betongkonstruktioner konstruerade av romarna för tvåtusen år sedan står fortfarande kvar och dagens betongkonstruktioner har en lång projekterad livslängd på uppemot 120 år. Men idag handlar inte hållbarhet enbart om beständighet, utan om att bygga för framtiden i den kontexten att säkerställa flera generationers behov och inte uppfylla en generations behov på bekostnad av nästas. Ett problem med byggmaterialet betong i detta sammanhang, är de stora koldioxidutsläpp som tillverkningen av cement medför. Ett ton cement genererar cirka 1 ton CO₂-utsläpp. Det gör att cementtillverkningen världen över ansvarar för uppskattningsvis 5 % av de totala koldioxidutsläppen. Branschen har försökt att minska utsläppen genom att bland annat effektivisera cementtugnar, användning av alternativa bränslen och mineraliska tillsatsmaterial som utgör restprodukter från andra industrier. Exempel på sådana alternativa bindemedel är flygaska, masugnsslagg och silikastoft [1].

Ofta är fokus på betongens egenskaper vid 28 dygns ålder eller mer. Dagens höga produktionstakt kräver dock ofta kunskaper om betongen och dess egenskaper vid mycket yngre ålder än så. Detta för att kunna fastställa när formrivning, ytbehandling och belastning kan ske utan risk för skador på konstruktionen. Tidig ålder, eller ung betong har ofta förknippats med perioden fram till att hälften av cementen i betongen har hydratiserat. Under denna tid utvecklas egenskaperna för betong i hög takt och detta motsvarar ofta de första tre dagarna efter att cementreaktionen startat [2].

Både egenskaper och strukturutveckling för betong påverkas av inblandning av mineraliska tillsatsmaterial, till exempelvis flygaska. Detta på grund av att dessa material ger förändrad hydratationsutveckling jämfört med för vanligt cement [3]. Det är svårt att säga exakt vilken effekt flygaskainblandning ger på en cementpasta och därmed betong. Flera faktorer påverkar, såsom härdningstemperatur och inblandningsgrad. De Weerd et al [4] har visat att betong med flygaska kan ha en lägre hållfasthet i tidig ålder för att sedan nå en högre sluthållfasthet, jämfört med betong med enbart portlandcement. Detta är något som måste tas hänsyn till under betongens tidiga ålder för att undvika en för tidig formrivning. Skador på framförallt människor, men även konstruktioner, i samband med en för tidig formrivning av väggar och bjälklag är ett av de moment som är kopplat till risk för olycksfall på dagens arbetsplatser [5].

Dagens höga produktionstakt och korta produktionstider gör det önskvärt att använda självuttorkande cement i betongkonstruktioner. Forskningsprojekt har startats på grund av att flertalet byggarbetsplatser i landet har haft svårt att prediktera uttorkningstider. Det faktum att det blivit svårare att uppskatta uttorkningstider har lett till större osäkerheter under produktionsfasen. I vissa fall har uttorkningen tagit längre tid än väntat, vilket leder till förseningar och större kostnader. En undersökning av självuttorkningsprocessen i betong med mineraliska tillsatsmaterial hade kunnat ge branschen en större förståelse för hur uttorkningstider och formrivningsskede påverkas av inblandning av tillsatsmaterial. Detta hade i sin tur kunnat minska riskerna i samband med formrivning och därmed även risken för olycksfall på arbetsplatser.

1.1 Syfte och problemfrågeställning

Detta projekt har fokus på betong med flygaskainblandad cement och syftar till att ge förståelse för hur reaktionsförloppet fortskrider för denna typen av cementbundet material samt till hur självuttorkningen påverkas. Projektet fokuserar vidare på frågorna;

- Hur påverkar flygaska självuttorkningen?
- Hur påverkar flygaska värmeutvecklingen?

Projektet syftar till att sammanställa den kunskap och sammanlänka de teorier som utvecklats inom området, gällande reaktionsförlopp och effekt av tillsatsmaterial på betongens egenskaper. Framförallt fokuserar litteraturstudien på vad nukleeringseffekt, fillereffekt och dispersion innebär. Vidare försöker litteraturstudien även svara på vad flygaska ger för kemisk respektive fysikalisk effekt på hydratationsprocessen och hur den kemiska balansen påverkas av flygaskans närvaro. Projektet omfattas vidare av att göra laborativa undersökningar av hydratation- och självuttorkningsförlopp på cementpastor och betongblandningar med flygaskacement. De prov som testats har haft en varierande mängd (15-35 %) flygaska inblandad. Även referensprov med standard Portlandcement har undersökts samt prov bestående av cement med kvartssandsinblandning. Den senare typen av prov har undersökts för att kunna skilja på fysikalisk och kemisk påverkan från flygaskan. Kwartssanden har getts en kornstorleksfördelning som motsvarar den för flygaskan, i syfte att ge så god överensstämmelse med flygaskan som möjligt. I samband med självuttorkningstesterna på cementpastaproven används en ny, relativt obeprövad metod som gör det möjligt att studera värmeutveckling och relativ fuktighet samtidigt. Ett viktigt syfte med studien är därför att undersöka om den nya metoden ger resultat som stämmer väl överens med resultat från mätningar som gjorts med befintliga metoder för RF-mätning i betong.

1.2 Avgränsningar

- Studien baseras på prov där delar av Portlandcementet ersatts av flygaska eller kvartssand undersöktes
- De första 10 dygnen av hydratationen studerades
- De första 10 dygnen av självuttorkningen undersöktes kontinuerligt och kompletterades med en kortare mätning efter 24-27 dygn
- Testerna har utförts vid 20 °C

1.3 Förkortningar

$C_3S = Ca_3SiO_5$

$C_2S = Ca_2SiO_4$

$C_3A = Ca_3Al_2O_6$

$C_4AF = Ca_4Al_2Fe_2O_{10}$

FA = flygaska

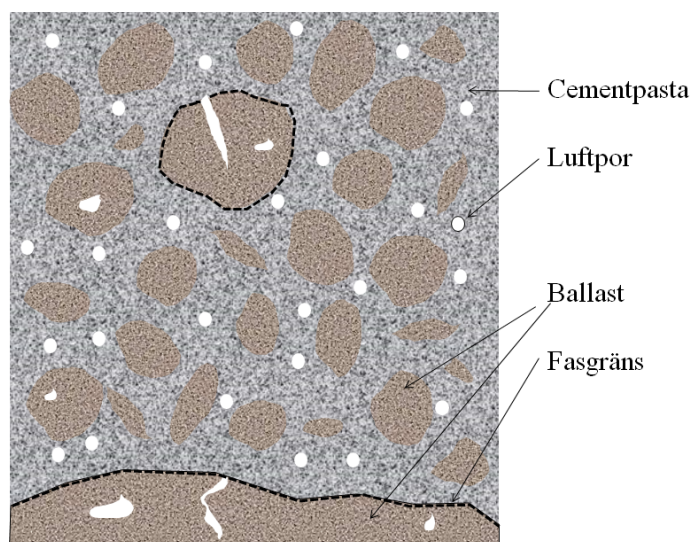
Q-FA = kvartssand med en kornstorleksfördelning som den aktuella flygaskan

2 Betong

Betong har många fördelaktiga egenskaper såsom: formbarhet, styrka och beständighet samtidigt som det har hög isoleringsförmåga mot brand, ljud och värme. Betong är även ett relativt billigt byggnadsmaterial, tack vare att komponenterna som bygger upp betong existerar på många ställen i världen och är lätta att utvinna. Det finns även svagheter med betong. Betong kännetecknas av låg draghållfasthet, varvid armering brukar användas för att öka betongens förmåga att motstå dragkrafter [1]. Betong har i genomsnitt en densitet som är cirka 4-5 gånger högre än trä, det kan därmed vara ofördelaktigt att använda i fall där en tung konstruktion inte är önskvärt [6].

Komponenterna som bygger upp en modern betong är vatten, cement, ballast och eventuella tillsatsmaterial och tillsatsmedel (se Figur 1) [1]. Cement är bindemedlet i betong, men det finns flera andra material som kan användas som bindemedel. En del av cementklinkern kan ersättas med mineraliska tillsatsmaterial som flygaska, slagg och silikastoft. Tillsatsmaterialen brukar kategoriseras efter sin förmåga att själva reagera med vatten, det vill säga hur hydrauliska de är [7]. Eventuella tillsatsmedel i betongen verkar i cementpastan. Det förekommer även luftporer som uppstår i samband med blandning av betongen eller genom luftporbildande tillsatsmedel. Det tunna men avskiljande området mellan ballastkornen och cementpastan kännetecknas av egenskaper som skiljer sig från både partikelfasen och den kontinuerliga fasen. Det klassificeras därför som en egen fas, fasgränsområdet [3].

Ur ett mikroskopiskt perspektiv består den hydratiserade cementpastan av cementgel, kalciumhydroxid och kapillärporer. Cementgelen, även kallad C-S-H-gel då den huvudsakligen består av kalciumsilikathydrat, ger pastan sin styrka. Kapillärporerna hittas där cementgel saknas. Kapillärporerna kan både vara torra och fyllda med vatten beroende på vilken relativ fuktighetsnivå som råder i materialet [8].



Figur 1. Uppbyggnaden av betong [3].

För att kunna styra betongens egenskaper och anpassa dessa efter de förutsättningar som råder i olika klimat där betongen ska användas, kan man tillsätta tillsatsmedel till

betongen. Tillsatsmedlen är kemiska produkter som förändrar egenskaperna i färskt eller hårdnat tillstånd. Exempel på vanliga tillsatsmedel är [9];

- Luftporbildare – skapar luftporer som gör betongen frostbeständig
- Acceleratorer – minskar tiden till betongens tillstyvnande sker
- Retarder – förlänger arbetbarheten
- Plasticerare – reducerar mängden vatten som måste tillsättas

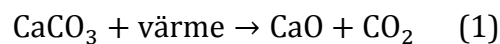
2.1 Bindemedel

Då cement är en av komponenterna i betong påverkar dess kemiska sammansättning många egenskaper hos betongen. Cement har även betydelse när det gäller hur stor motståndskraft betongen får mot olika angrepp samt hur mycket värme som den utvecklar under hydratationen. Då olika egenskaper för betong efterfrågas i olika sammanhang kan rätt cementsort väljas utifrån vilka egenskaper som önskas. Långsamt härdande cement används med fördel för konstruktioner med stora dimensioner och som därmed utvecklar mycket värme, för att minimera risken för temperatursprickbildning. Sulfatresistent cement med låg aluminiumhalt är å andra sidan fördelaktigt i mark och vatten, där det finns risk för sulfatangrepp som kan leda till sprickbildning på grund av ettringitbildning. Det finns även snabbhärdande cement som kan användas vid låg temperatur och i situationer som kräver snabb hållfasthetsutveckling. Cement delas vanligen in i tre huvudgrupper med avseende på inblandningsgrad av tillsatsmaterial [10];

- CEM I, portlandscement med minst 95 % portlandklinker.
- CEM II, sammansatta portlandscement med minst 65 % portlandklinker och resterande del bestående av tillsatsmaterial som slagg, flygaska eller silikastoft.
- CEM III, slaggcement som består av mindre än 64 % portlandklinker.

2.1.1 Portlandcement

Tillverkningen av portlandklinker sker i en cementugn med mycket hög temperatur, (1400-1600 °C) varvid kalksten och lera hettas upp och omvandlas till kalciumsilikater, kalciumoxider och andra oxider [1, 8]. Samtidigt drivs CO₂ ut ur kalkstenen. Processen kallas kalcinering och kan beskrivas enligt (1) [11];



Kalciumsilikaterna och kalciumoxiderna blir till små kulor som kallas cementklinker och kyls efter vistelsen i ugnen ned med luft. Nedkylningen sker snabbt i syfte att behålla klinkerns struktur och reaktivitet och inte låta den omvandlas. Bränslet som används i ugnarna är oftast fossila vilket genererar ytterligare CO₂-utsläpp förutom den CO₂ som drivs ut under kalcineringen [1, 10]. Portlandsklinkercement består framförallt av fyra olika klinkermineralkomponenter. De är följande [12]:

- C_3S (alit)
- C_2S (belit)
- C_3A (aluminat) och
- C_4AF (ferrit)

Aluminat reagerar mycket snabbt med vatten och hade utan gipstillsats gett oönskad sättning och tillstyvning av cementpastan. Gipsen styr aluminatreaktionen genom att bromsa upp den. Efter aluminat är alit, C_3S , den komponent som reagerar snabbast med vatten och har därför en stor inverkan på hållfastheten i ett tidigt skede. Belit, C_2S reagerar däremot långsamt med vatten och bidrar inte särskilt mycket till hållfastheten under den första månaden efter reaktionen inlett. Undersöks däremot cementpastan efter ett år, kan man se att alit och belit bidrar i princip lika mycket till den slutgiltiga hållfasthet som uppmätts [13, 14]. Reaktionshastigheten för ferrit skiftar, då sammansättningen av denna mineralkomponent varierar [10].

2.1.2 Flygaska

Flygaska är ett restmaterial från el- och värmeproduktion, vid kol- och kraftvärmeverk. Flygaska är den aska som avskiljs från rökgaserna och består av mycket små runda, glasiga partiklar. Tillsatsmedlet består bland annat av nedanstående föreningar [14, 15]:

- SiO_2
- Al_2O_3
- Fe_2O_3
- CaO

Kalciumoxidinnehållet (CaO) i flygaska varierar mycket, vilket gör att flygaska delas in i två huvudgrupper, de som innehåller hög andel CaO (latent hydraulisk flygaska) respektive låg andel av CaO (puzzolan flygaska) [7]. Enligt EN-standard kallas flygaska med hög andel CaO för klass C flygaska, medan en låg andel CaO ger en klass F flygaska [16]. En klass C flygaska kan reagera med vatten utan tillsats av cement och närvaro av kalciumhydroxid, men reaktionen är väldigt långsam. I dag ersätts normalt mellan 5-30 % av Portlandcementet med flygaska i så kallade flygaskacement [7].

Förutom vilken typ av kol som använts i förbränningsprocessen, påverkar framförallt tre faktorer egenskaperna som eftersträvas hos flygaskan då den ska användas som tillsatsmaterial i betong;

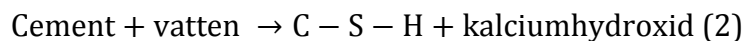
- Finhet (anges i kornstorlek eller specifik yta)
- Glasighet
- Andel reaktiva oxider

För samtliga ovanstående faktorer vill man erhålla ett högt värde, eftersom de ökar flygaskans reaktivitet. Även glödförlusten påverkar flygaskans kemiska sammansättning, som motsvarar mängden oförbränt kol. Detta är ett mått på effektiviteten för förbränningsprocessen. Flygaskans finhet beror på förbränningstemperatur i kolvärmeverken, kolets finmaldhet samt när under rökavgasfiltreringen man gör uttaget av askan och kan därför variera [7].

Kiseldioxid (SiO_2) i flygaskan reagerar med kalciumhydroxid från cementreaktionen och vatten där C-S-H-gel utgör reaktionsprodukten. Detta medför att andelen kalciumhydroxid i cementpastan minskar vid inblandning av flygaska och betongen erhåller därmed ett sämre skydd mot karbonatisering och korrosion. Kristallerna av kalciumhydroxid är därmed färre, vilket ger cementpastan en finare porositet. I ett längre perspektiv kan detta leda till att hållfastheten för betong med flygskacement blir högre än för vanligt Portlandcement, efter längre tid (90 dagar) [4, 7].

2.2 Cementpasta

Cement är ett hydrauliskt bindemedel. Det betyder att cementpastan i tidigt skede består av bindemedel och blandningsvatten, men att den vid reaktion mellan de två faserna övergår till en finporös hård massa som är beständig mot vatten. Reaktionen kan översiktligt skrivas:



När hydratationen startar bildas C-S-H-gel likt ett tunt lager på cementkornens yta, i ett första skede. Därefter fortsätter mer gel att bildas efterhand som reaktionerna fortgår. Eftersom det binds vatten till gelen och dess struktur består av en viss porositet tar gelen upp större volym än själva cementkornet, efter det att cementkornet medverkat i reaktionen. Mer än hälften av gelens volym fyller istället ut utrymmet mellan cementkornen. När hydratationen pågått så länge att cementgelen fyllt ut porutrymmet i den omfattning att hydratiseringsprodukter som härstammar från olika cementkorn får kontakt, bildas cementpastans styrka. En del av cementkornen förblir oreagerade inre kärnor.

Cementgelen består av gelpartiklar, nämligen C-S-H-molekyler. Förenklat är cementgelen en tät massa men med en viss porositet som byggs upp av väldigt små porer, kallade gelporer, som skiljer gelpartiklarna åt. Kapillärporer är istället mycket större porer som uppstår i cementpastan, de är rester av en kontinuerlig vätskefas som separeras på grund av reaktionsprodukternas tillväxt.

C-S-H-gelen ger cementpastan dess hållfasthet och bidrar till många andra egenskaper som tillskrivs cementpastan och betongen. Den utgör dessutom majoriteten av en välhärdad cementpastavolym. I reaktionen mellan cement och vatten bildas även kalciumhydroxid. Till skillnad från C-S-H-gelen bidrar inte kalciumhydroxiden till hållfasthet hos pastan, eftersom den förekommer som kristaller i porsystemet. Däremot är den en basisk förening, en förening med högt pH-värde. Kalciumhydroxid bidrar därmed till beständighet mot korrosion, då ett högt pH-värde i betongen leder till att armeringsjärn i betongkonstruktionen ges ett skyddande passiveringsskikt som minskar chansen för att korrosion kan börja ske [3].

Faktorer som vattencementtal (vct) och specifik yta hos cementkornen påverkar hur snabbt processen når den slutgiltiga bindetiden, när styrkan i cementpastan skapas. Den

specifika ytan hos cementet påverkar reaktionshastigheten genom att en större yta leder till snabbare reaktioner eftersom kontaktytan mellan vatten och cement ökar [10].

Powers [3] har identifierat vct 0,39 som en slags gränsvå, ett läge där C-S-H-gel teoretiskt kan fylla utrymmet mellan cementkornen, vid fullständig hydratation. Då vct för cementpastan istället är större än 0,39 är utrymmet mellan cementkornen större än den totala volym cementgel som kan bildas vid fullständig hydratation. Det kommer därmed att dröja längre tid innan bindetiden nås. Om vct är lägre 0,39 räcker utrymmet inte till, vilket omöjliggör fullständig hydratation. Bindetiden kommer nås snabbare men det kan samtidigt leda till en lägre slutgiltig hållfasthet hos betongen, jämfört med om där funnits plats för all cementgel att bildas. En senare mer omfattande studie av Taylor [14] visar att denna gränsvå inträffar vid vct 0,44, där olika Portlandcement undersöktes.

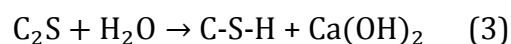
3 Hydratationsprocessen

Två huvudsakliga delprocesser sker då hydratationen av cement äger rum. Alkalisulfater löses upp från cementet i blandningsvattnet och mättar det med följande joner; K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , SO_4^{2-} och OH^- . Därefter täcks cementkornens yta av hydratationsprodukter; C-S-H-molekyler och kalciumhydroxid. Vidare bildas ytterligare reaktionsprodukter med en hastighet som beror på flera faktorer, såsom bindemedelstyp och härdningstemperatur. Allt eftersom hydratationen fortskrider fyller reaktionsprodukterna ut utrymmet mellan cementkornen och ger cementpastan sin styrka. Eftersom cement byggs upp av olika mineral sker flera olika reaktioner samtidigt i denna process. Genom att undersöka och följa hydratationsförloppet, kan man få bättre förståelse för vilka reaktioner som ligger till grund för de egenskaper som cementpastan och vidare betongen erhåller [10].

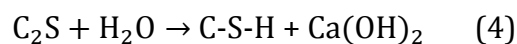
3.1 Kemiska reaktioner

Reaktionen mellan cement och vatten kallas hydratation, vilket betyder att vatten binds till cementet och bildar en så kallad cementpasta. Vatten har flera roller i reaktionen, dels löser det upp cementet till joner och dels fungerar det som transportmedel för jonerna när de väl lösts upp. Dessutom binds det in som en komponent i reaktionsprodukterna.

När både alit och belit reagerar med vatten bildas $Ca(OH)_2$ (portlandit) och olika variationer av calcium silikat hydrater som kallas C-S-H-gel (3 – 4):



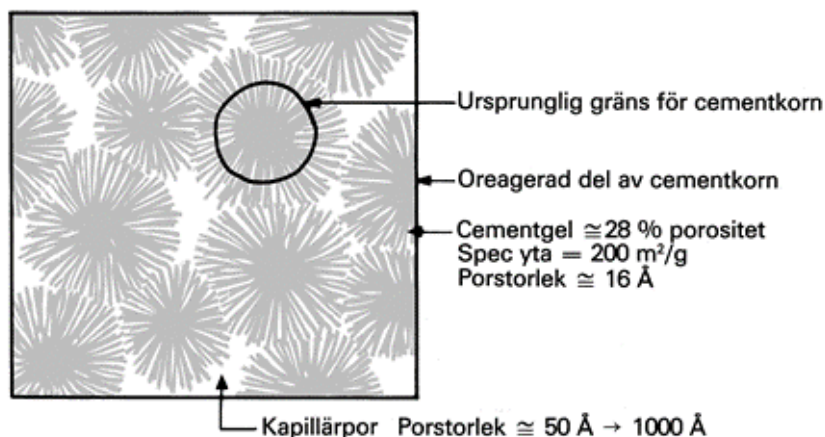
respektive



Tidigare studier har visat att C_3S och C_2S binder till sig 24 respektive 21 viktsprocent vatten i reaktionerna (3-4) [10].

C_3A och C_4AF bidrar inte nämnvärt till hållfasthet och bildar heller ingen kalciumhydroxid. De försämrar även betongens beständighet mot sulfathaltig mark och vatten. Innehållet av dessa komponenter begränsas därför i cementet. Komponenterna fyller dock en viktig funktion i tillverkningskedet av cementet. Under förbränningen bildar de en smälta som krävs för att kalciumsilikaterna ovan ska kristalliseras [17].

Utseendet hos C-S-H-gelen som bildas när alit och belit reagerar med vatten kan liknas vid fiberformade nålar som knyter an till cementpartiklarnas yta. Det resulterar i något som kan liknas vid en sjöborre enligt [12], se Figur 2. Efterhand som hydratationen fortskrider växer dessa fiberformade nålar in i varandra och bildar ett sammanvävt, finporöst nätverk som påminner om en gelmassa och därför kallas cementgel [3, 12, 18]. Kalciumhydroxid, $Ca(OH)_2$, bildas också vid hydratationen och förekommer i cementpastan som relativt stora kristaller, i anknytning till C-S-H-gelen eller inuti den [3].

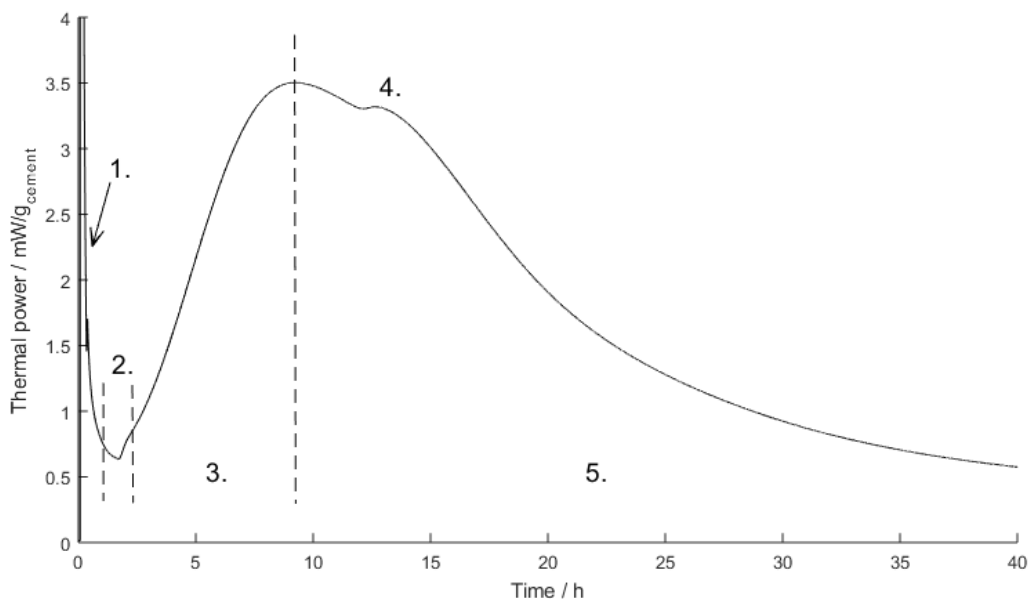


Figur 2. Schematisk bild av strukturen för delvis hydratiserad cementpasta. Figuren visar oreagerad cement och cementgel, varvid kalciumhydroxid och gipsens reaktionsprodukter måste tilläggas för att erhålla en fullständig bild [3].

Som tidigare nämnt tillsätts gips till cement för att förhindra omedelbar reaktion mellan aluminater (C_3A) och vatten. En teori gällande hur den omedelbara reaktionen förhindras är att det bildas en tunn hinna av som omger cementkornen. Ettringit är en förening mellan gips, aluminat och vatten. Hinnan fungerar som en vägg mellan porlösningen (blandningsvattnet) och cementkornen, vilket saktar ned reaktionen. En annan teori är att reaktionsprodukterna absorberar sulfatjoner som hindrar aluminaten från att reagera omedelbart med vatten [19]. Efter cirka ett dygn, när all gips reagerat, reagerar ettringiten med återstående mängd aluminat och vatten eller bara med vatten. Det bildas då monosulfat. Även ferrit, C_4AF , reagerar med gips och blir till sulfatkristaller, vars sammansättning beror hur stor koncentration sulfat som finns i porlösningen. De joner som dominerar i porlösningen för standard Portlandcement är K^+ , Na^+ och OH^- . Jonsammansställningen i porlösningen har stor inverkan på hydratationens utveckling och reaktionshastighet [10].

3.2 Värmeutveckling

Värmeutvecklingen kan med fördel användas för att uppskatta hydratationsgraden, hur långt hydratationen nått, för olika cement. Det finns nämligen i princip ett linjärt samband mellan värmeutveckling och hydratationsgrad. Hydratationsgraden motsvaras av ett värde mellan 0 och 1, där 1 innebär att hydratationen är fullständig. [3].



Figur 3. Typiskt utseende på värmeutvecklingskurva för Portlandcement [20].

I Figur 3 illustreras ett typiskt utseende för värmeutvecklingen i samband med hydratationen av standard Portlandcement. Som figuren visar kan processen delas in i fem faser. Första fasen motsvarar den kortvariga toppen under de första minuterna av cementreaktionen. Det som orsakar denna initiala värmeutveckling är den snabba upplösning av joner som sker direkt då cementkornen får kontakt med vattnet. Värmen utvecklas då kemiska bindningar bryts i samband med att jonerna löses upp. Den andra fasen kallas induktionsfasen och varar normalt några timmar. Induktionsfasen kan ses som en viloperiod där reaktionen stannar av och det inte händer särskilt mycket med avseende på värmeutvecklingen. En sammanställande studie av vad olika undersökningar och forskare kommit fram till gällande hydratationsprocessen av Portland cement publicerades 2015 [19]. Den sammanställande studien behandlar framförallt de reaktioner och mekanismer som sker under fas ett och två. Speciellt fokus lades på induktionsfasen, då många olika teorier och hypoteser gällande vad som inträffar under denna fas tagits fram de sista femton åren.

En teori som tas upp är att viloperioden uppstår på grund av att ett laddat dubbellager av kalciumjoner bildas på ytan av cementkornen och hämnar vidare upplösning av kornen. Denna teori förklarar övergången mellan induktionsperioden och accelerationsfasen genom att utfällning av andra komponenter i lösningen leder till en stegvis upplösning av kalciumsiktet [19].

En annan teori som behandlas i [19] och som stöds av många forskare inom området är teorin om ett skyddande lager som bildas runt cementpartiklarna. Det finns i sig olika teorier om hur detta lager bildas och vad det är uppbyggt av, men den mest erkända förklaringen med starkast bevis är att det består av en metastabil fas av C-S-H-molekyler. Denna metastabila form av C-S-H-molekyler ska enligt teorin bildas initialt och har skyddande egenskaper som saktar ned reaktionen. Då C-S-H-molekyler av den vanliga formen börjar nukleera på cementkorn i lösningen omvandlas den metastabila formen till den slutgiltiga formen som sen bygger upp C-S-H-gelen. Trots att många undersökningar gjorts för att bevisa denna teori har ett skyddande lager aldrig kunnat identifieras i verkliga experiment [19]. Vid tillsats av retarder och accelerator till

cementpastan har undersökningar dessutom visat på dåligt överensstämmande samband mellan teori och verklighet. Detta då retardern som förväntades generera en längre induktionsperiod och ett tjockare skyddande lager och acceleratorn tvärtom, resulterade i motsatta effekter [21].

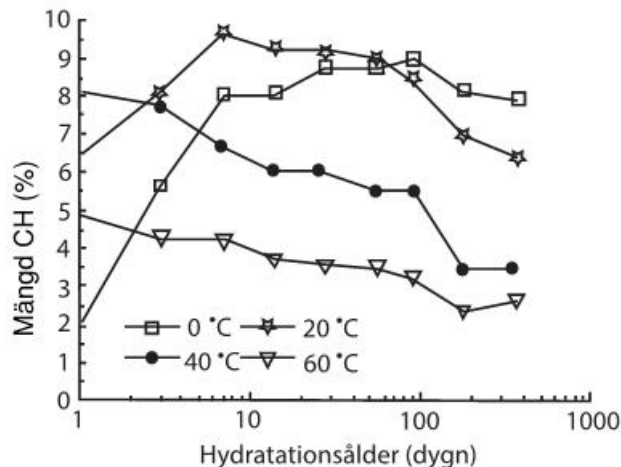
Istället framhävs en geokemisk upplösningsteori av flertalet forskare [19, 21, 22]. Teorin förklarar den inbromsning av processen som induktionsfasen innebär, utan ett skyddande lager av någon komponent som hämmar reaktionen. Teorin förklarar istället det som händer med en stegvis upplösningssprocess. Lösningens mättnadsnivå bestämmer hastigheten som reaktionen har. Under de första minuterna går lösningens mättnadsnivå från obefintlig till mättad, varpå hastigheten först ökar kraftigt under fas ett i värmeutvecklingen, för att kort därefter stanna upp. När lösningen är omättad är upplösningen av cementkornen snabb eftersom det är energimässigt fördelaktigt att bilda hydratationsprodukter. När lösningen mättas allt mer blir det inte lika energimässigt fördelaktigt och upplösningen sker istället stegvis och långsamt. Då C-S-H-molekyler nukleeras på cementkornen i stabil takt övergår induktionsfasen till accelerationsfasen. Teorin kan förklara alla experimentella observationer och även generera samband mellan kalorimetriska undersökningar och teoretiska beräkningar. Bevisen för teorin växer men vidare undersökningar måste göras för att kunna fastställa denna teori som helt trovärdig, samt för att få större förståelse för processen.

När värmeutvecklingen sätter igång igen har processen gått in i fas tre, accelerationsfasen, där värmeutvecklingen också når sitt högsta värde för att sedan avta igen. Accelerationen som sker under fas tre orsakas av att alit reagerar med joner i blandningsvattnet och bildar C-S-H-gel på cementkornens yta samt CH-molekyler i porlösningen. Efterhand som hydratationen fortskrider bildas ett allt tjockare lager av C-S-H-gel runt cementkornen, som vattnet får allt svårare att tränga genom för att nå oreagerat cement i kornens centrum. Det innebär att diffusionskoefficienten för cementgelen kan ses som en styrande faktor för reaktionshastigheten och det faktum att den ökar en förklaring till varför reaktionen avtar. Övergången mellan den accelererande fasen (fas tre) och den retarderande fasen (fas fem) kännetecknades tidigare av ögonblicket då reaktionen går från att styras av kemiska reaktioner till att regleras av diffusionskapacitet [8]. Men senare publicerade resultat från flertalet undersökningar pekar på detta inte stämmer och att reaktionen inte blir diffusionskontrollerad då reaktionshastigheten börjar avta efter att ha nått sitt högsta värde [19, 23, 24]. Flera studier [19, 22, 24] visar även att den långsiktiga hydratationen verkar förklaras dåligt av diffusionskontrollerade processer då de visar att resultat från verkliga experiment stämmer dåligt överens med teorin. Istället tenderar det tillgängliga utrymmet för hydratiseringsprodukter att växa på, vara en styrande faktor för reaktionshastigheten. Dock behöver mer forskning göras för att kunna bevisa att så är fallet och att klargöra om det finns fler styrande faktorer. Den mindre toppen som ofta kallas axeltoppen och benämns som fas 4 i Figur 3 förklaras av att ettringitbildningen är som störst här. Anledningen till att toppen inträffar vid denna tidpunkt är på grund av att upplösningen av aluminat satt igång efter att ha hindrats från att reagera initialt, av gipsen som nu tagit slut [19].

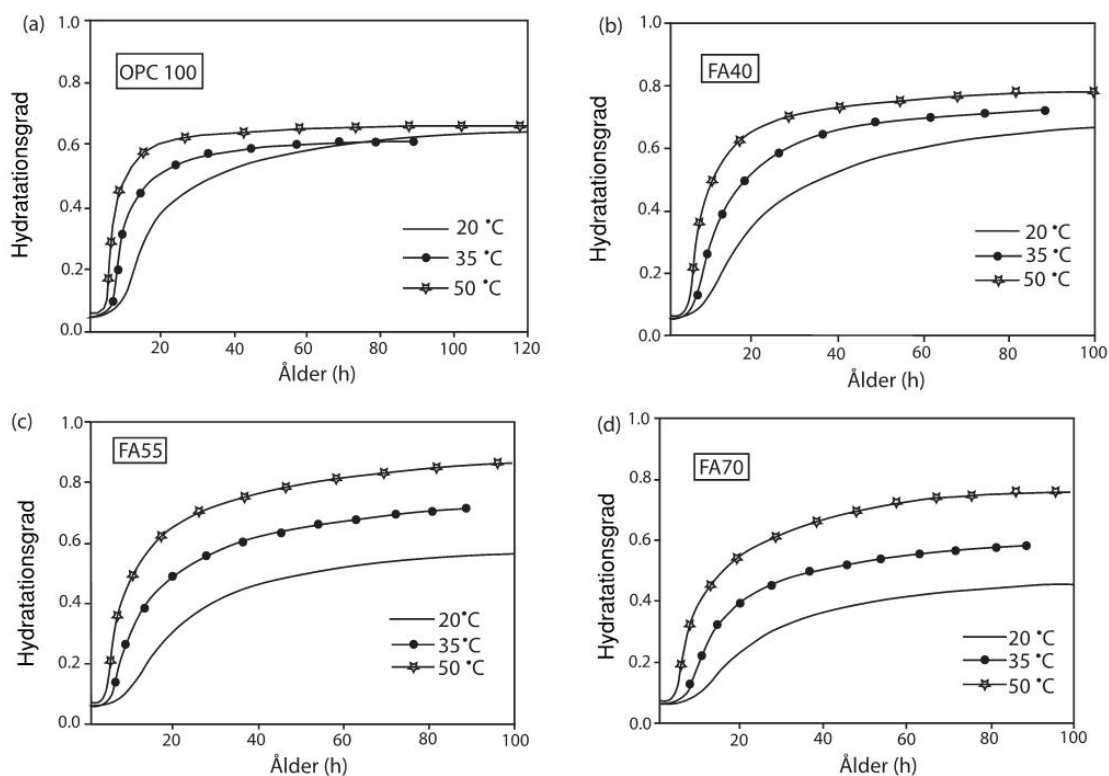
3.3 Inverkan av omgivningstemperatur

Reaktionshastigheten för kemiska reaktioner ökar då temperaturen höjs. Av denna anledning påverkas värmeutvecklingen från cementreaktionerna av omgivningstemperaturen. Processen är mest känslig under fas tre, accelerationsfasen, då flest kemiska reaktionerna sker [8]. Olika bindemedel har olika stor temperaturkänslighet. Flygaska har en större temperaturkänslighet än Portlandcement eftersom den inte är lika reaktiv och temperaturen därmed har en större betydelse för reaktionshastigheten [4].

Genom att studera koncentrationen av CH i cementpasta har forskare kunnat dra slutsatser om omgivningstemperaturens inverkan på hydratationen då cementet till viss del består av flygaska, resultaten ses i Figur 4. Grafernas utseende förklaras av att flygaskans puzzolana reaktion konsumerar CH. Reaktionen sker efter cirka en till tre dagar, men det kan dröja upp till sju dagar innan någon betydande effekt kan identifieras. Som ses i Figur 4 medför en högre omgivningstemperatur att CH konsumeras snabbare, vilket tyder på att flygaskans reaktion accelereras av högre temperatur. Reaktionen sker även tidigare, vilket tyder på att hela hydratationen påskyndas av högre temperatur eftersom det faktum att CH bildas i ett tidigare skede antyder att alit-reaktionen sker tidigare [25]. Nettoeffekten av flygaskainblandningen behöver dock inte resultera i att mer CH konsumeras totalt sett. Hurvida mer eller mindre CH förekommer i cementpastan beror på mängden flygaska som ersätter portlandklinkern och hur stor andel av flygaskan som faktiskt reagerar i hydratationen, vilket även är temperaturberoende och beroende av flygaskans kemiska komposition enligt undersökningar gjorda av De Weerd med flera [4].



Figur 4. Koncentrationen kalciumhydroxid under hydratationsförloppet för flygaskacement med en inblandningsmängd på 30 %, vid olika omgivningstemperaturer [25].



Figur 5. Hydrationsgraden som funktion av tiden för Portlandcement respektive cement med varierat innehåll av flygaska, vid olika temperaturer [13].

Figur 5 stödjer ovan nämnda resultat och visar hur hydratationsgraden för olika bindemedel förändras över tid vid olika temperaturer. Denna beräknades genom att räkna ut kvoten mellan kumulativ värme (uppmätt med isoterm kalorimetri) och den totala mängden värme som kan utvecklas för respektive prov [13]. Generellt för samtliga bindemedelstyper oberoende av dess sammansättning, gäller att hög temperatur leder till en snabbare hydratation [13, 25, 26]. För vanlig Portlandcement (fig 5a) [13] accelereras hydratationshastigheten kraftigt i tidig ålder, medan hydratationsgraden tenderar att konvergera med tiden. För bindemedel med tillsats av flygaska, tenderar hydratationsgraden att vara mer temperaturberoende under hela förloppet och öka då temperaturen ökar. Undersökningen är gjord på flygskacement med upp till 55 viktsprocent flygaska.

3.4 Självtorkning

Självtorkningen utgör en del av betongens torkningsprocess. Självtorkningen består framförallt av att en viss mängd av blandningsvattnet binds kemiskt till cementpastan under hydratationsförloppet. Därefter binds återstående vatten genom fysikalisk bindning till den porstruktur som bildas då hydratationen fortgår.

Självtorkning av cementpastan leder till att den relativa fuktigheten (RF) i pastan och vidare i betongen sjunker. Lägre vct och därmed mindre blandningsvatten genererar således ett lägre RF-värde. Olika stora porer töms på vatten vid olika relativa fuktighetsnivåer. Detta fenomen förklaras av det undertryck som finns inuti porerna och som gör att porerna fylls med vatten vid uppfuktning. Mindre porer ger ett högre tryck och

fylls således först, medan större porer ger lägre tryck och fylls först vid en högre RF-nivå. Då uttorkning råder töms det grövre porsystemet (kapillärporer) först, på grund av det lägre trycket och därmed den sämre förmågan att hålla kvar vattnet. Då RF-nivån nått ett värde motsvarande 40% är kapillärporerna helt tömda, men adsorberat vatten återfinns fortfarande i gelporerna (C-S-H-gelens inre porositet). Ett fint porsystem med små porer kräver således lägre RF-nivåer för att tömmas jämfört med ett grövre porsystem. Högre vct ger större volym kapillärporer, stora grövre porer som kommer tömmas i ett tidigt uttorkningsskede, vid höga RF-nivåer [3].

Självuttorkning medför att betongen krymper på grund av en invändig uttorkning. Normalt krympningsbeteende hos betong sker ojämnt över betongkonstruktionens tvärsnitt, på grund av att vatten mitt i tvärsnittet har längre väg att färdas ut ur betongen än vad vatten i utkanten av tvärsnittet har. Krympningen sker därmed snabbare i konstruktionens ytskikt än i centrum av konstruktionen. Krympningsbeteendet styrs därmed av dimensionerna hos konstruktionen och hur snabbt fukten färdas ut ur konstruktionen. Fördelen med självuttorkningen är att den sker homogent över tvärsnittet och följer hydratationsprocessen. Detta ger framförallt fördelar i två situationer [3, 18]:

- Självuttorkningen resulterar i expansionsutrymme för vatten när det fryser till is och ökar i volym. Gjutning av betong i kallt klimat möjliggörs därmed. Eftersom vattnets volym ökar med 9 % måste betongens självuttorkning ske till den grad där denna volym skapats för den aktuella vattenmängden, för att undvika risk för frostsprängning.
- Mattläggning och andra ytbeläggningar som är känsliga för fukt och därför inte kan beläggas förrän RF-nivån nått en viss gränsvärde, kan utföras inom kortare tid efter gjutning.

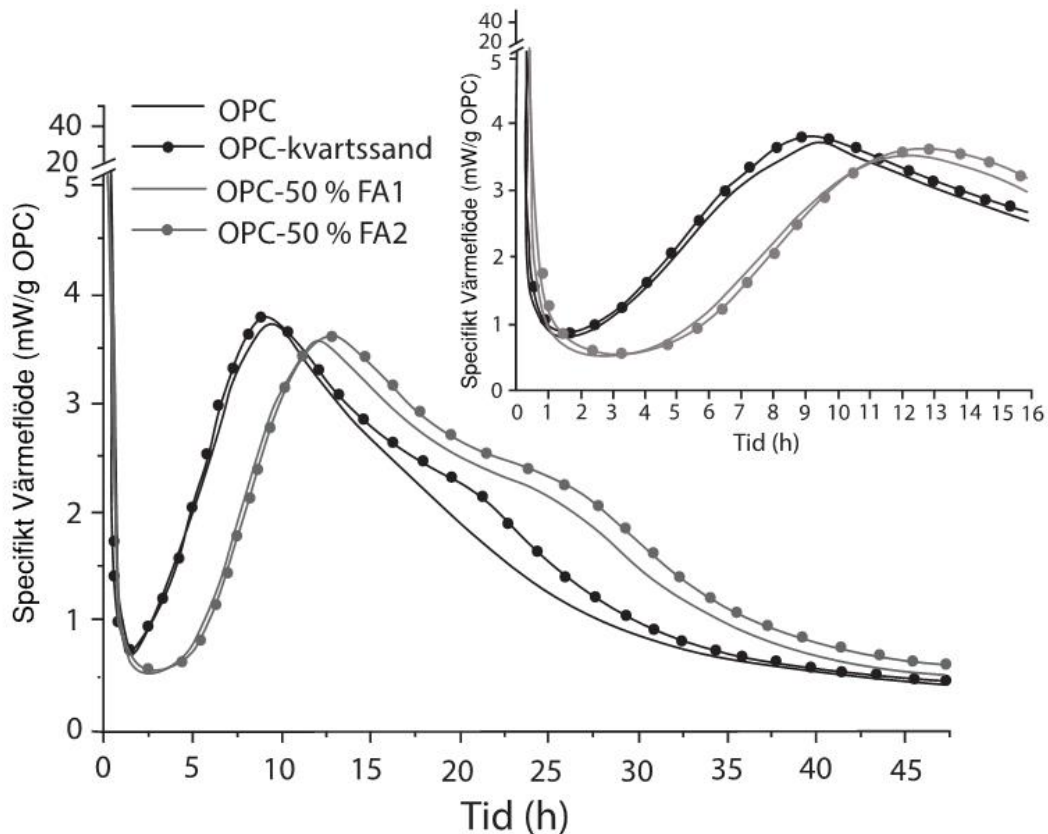
Undersökningar [27, 28] visar att ett lägre vct initialt ökar hastigheten på hydratationsprocessen och självuttorkningen av betong. Samma undersökningar framhäver att förklaringen till detta kan vara att koncentrationen av alkalijoner i porlösningen ökar och skyndar på processen till en allt mer vattenfri fas. Däremot visar samma undersökningar att hydratiseringsprocessen stannar av snabbare då det finns mindre plats för hydratiseringsprodukter att växa på och mindre tillgång på vatten, som krävs för att reaktionen ska ske. Dessa resultat stödjer på så sätt de hypoteser som på senare år tagits fram gällande geokemisk upplösning under induktionsfasen och tillgängligt utrymme, vilka nämnts i avsnitt 3.2.

4 Effekter av flygaska på cementpasta och betong

4.1 Fillereffekt

I tidigare studier [28-31] definieras fillereffekt som de effekter ett tillsatsmaterial ger på cementreaktionen, utan att själv delta i reaktionen. Man syftar därmed på den fysikaliska effekten av tillsatsmaterial. Fillereffekten som ges av puzzolaniska tillsatsmaterial som flygaska, består av olika främjande faktorer på cementreaktionen. Dels genom att öka andelen vatten per cement, eftersom den puzzolana flygaskan ersätter en del av cementet och ger en så kallad dispersionseffekt som innebär att cementkornen har tillgång till mer vatten och hydratationsprodukterna större plats att växa på. Dels genom att flygaskapartiklarna skapar fler platser för hydratiseringsprodukter att reagera på. Platserna skapas på flygaskapartiklarnas sfäriska yta och medför en mer heterogen kärnbildning av C-S-H-molekyler och kristallisering av kalciumhydroxid. Detta främjar hydratationen och kallas nukleeringseffekt. Samma studier [28-31] redogör för att den varierande partikelstorleken hos tillsatsmedel som flygaska medför att cementpasta och senare betongen, blir lättare att bearbeta och packa.

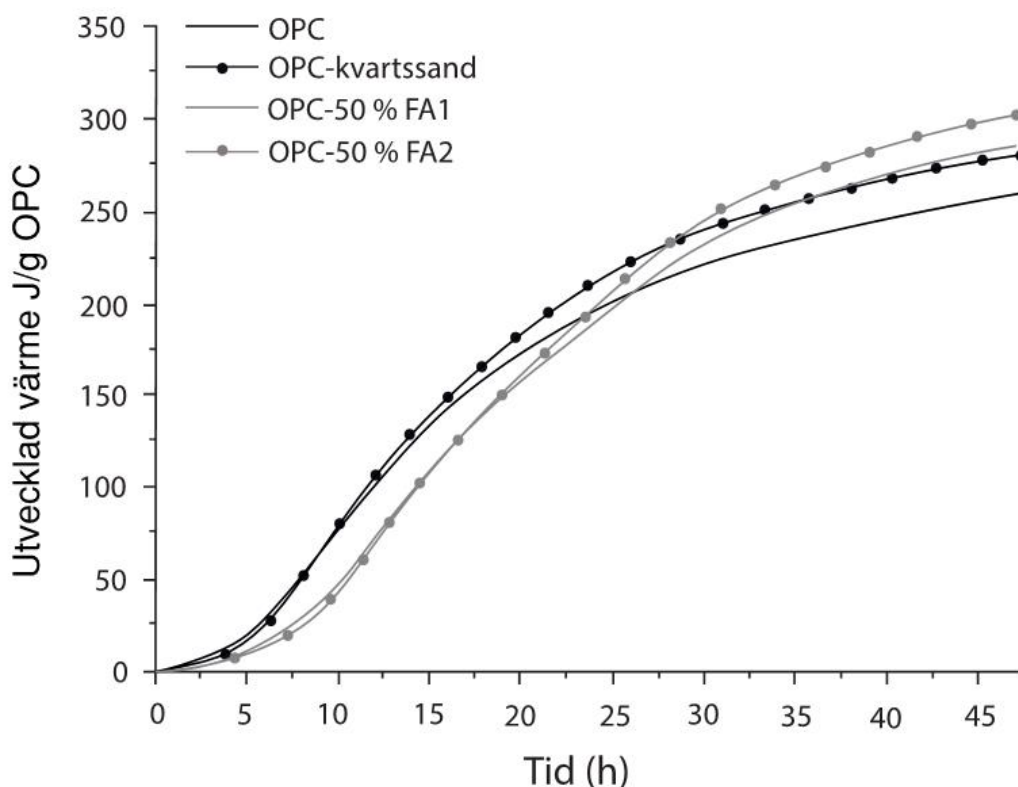
Flera studier [31, 32] visar att fillereffekten har större inverkan på aluminatreaktionen, än silikatreaktionen då alit hydratiserar. Den andra, lägre toppen i värmeutvecklingen motsvaras av aluminatreaktionen, då C_3A reagerar med vatten och bildar ettringit. Studierna omfattar olika sorters cement med inblandning av flygaska men också av kvartssand, för att kunna identifiera vad som är fysikalisk (fillereffekt) respektive kemisk effekt av flygaskan. Resultatet som presenteras i studierna illustreras i Figur 6. Eftersom kurvorna för flygaskacementen ser ut på samma sätt som grafen för Portlandcementet för den första värmetoppen, verkar värmeutvecklingen inte påverkas nämnvärt av fillereffekten i det första skedet. Då den senare toppen som ses i Figur 6 efter cirka sjutton timmar, i princip saknas hos portlandcementet men tydligt ses för både cement med flygaska och kvartssand tyder det på att toppen orsakas av fillereffekt. Det faktum att utseendet på toppen ser lite olika ut för de olika flygaskacementen samt cementet med kvartssand, kan förklaras av att partikelstorleken varierar.



Figur 6. Värmeutvecklingen som funktion av tiden för olika cementpastaprov. OPC: Portlandcement. OPC-kvartssand: Kvartssand med kornstorleksfördelning likt portlandcement. OPC-50% FA1 och OPC-50% FA2: Portlandcement med 50 viktsprocent flygaska av två olika sorter [31].

4.2 Längre induktionstid

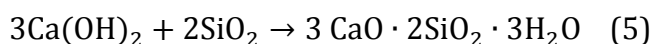
Tidigare studier [26, 33] visar att fas 2 i värmeutvecklingen sträcker sig över en längre tid för flygaskacement jämfört med då vanligt Portlandcement används. Enligt resultaten i Figur 6 är det bara flygaskacement som genererar längre induktionsperiod, kvartssands cement påverkar inte induktionstiden. Detta innebär att fördröjningen av den accelererande fasen inte kan förklaras av enbart fillereffekt. Istället presenteras en kemisk förklaring, en kemisk reaktion mellan flygaskapartiklarna och kalciumjoner i porlösningen. Aluminiumföreningar i flygaskan frigörs till lösningen och fördröjer hydratiseringen. Enligt [31] reagerar aluminiumföreningarna med fria kalciumjoner i lösningen och binder dem till flygaskapartiklarna samtidigt som kalciumjonerna även adsorberas till flygaskapartiklarnas yta. Detta ger en retarderande effekt på bildandet av C-S-H- gel eftersom förekomsten av fria kalciumjoner minskar i porlösningen. Resultatet visas även i Figur 7, som istället visar den totala mängden värme i förhållande till antalet timmar som passerat. Efter cirka tretton timmar utvecklar kvartssands cementet mer värme jämfört med standard Portlandcementet. Detta kan förklaras av fillereffekten. Eftersom induktionsperioden för flygaskan konstaterats vara längre förklarar det varför denna värmeökning först visar sig några timmar senare för flygaskacementen [31].



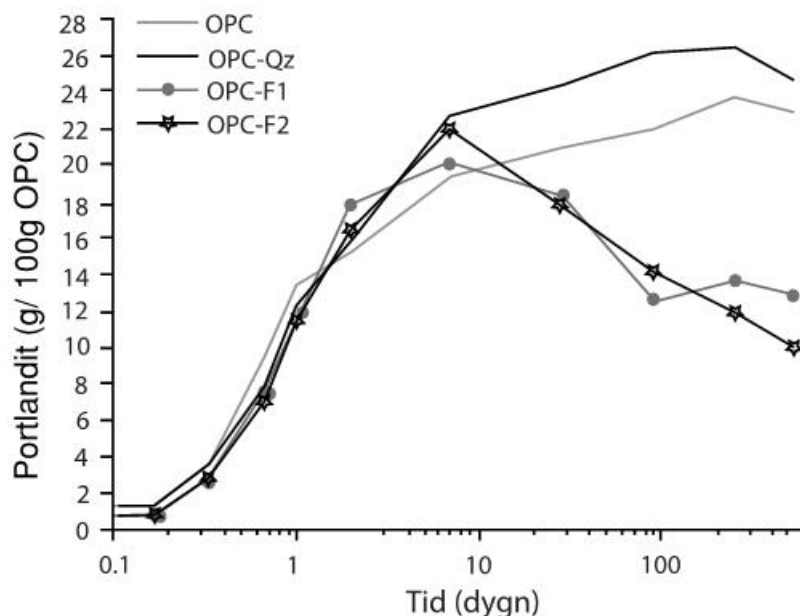
Figur 7. Den kumulativa värmen från flygaskacement med 50 viktsprocent flygaska och 50 viktsprocent portlandcementklinker, i förhållande till för portlandcement (OPC) vid 23 grader [31].

4.3 Puzzolanreaktion

Den huvudsakliga effekten på hydratationen som orsakas av att tillsätta flygaska till cement, är den puzzolana reaktionen. Reaktionen innebär att flygaskan reagerar med hydrationsprodukten portlandit (Ca(OH)_2) och bildar C-S-H-gel enligt (5) [3]:



Reaktionen kräver att cementmineralet alit och belit reagerat med vatten och bildat portlandit, eftersom det förbrukas i puzzolanreaktionen. Reaktionen tar fart efter ett till tre dygn men det kan ta upp till sju dagar eller mer innan effekterna av puzzolanreaktionen börjar synas och någon nämnvärd hydratation skett [7]. Detta bekräftas av Figur 8, som kommer från en undersökning där mängden portlandit som förekommer i cementpasta analyserats i flygaskacement [31]. Figur 8 visar att portlanditen når sitt högsta värde för flygaskacementen vid cirka sju dagar, för att sedan minska. En faktor som tros påverka när flygaskan börjar delta i reaktionen är pH-värdet i cementpastan, vilken portlanditen bidrar till att höja. Flera studier [31, 32] har visat på att flygaskan tenderar att lösas upp i stor utsträckning först när lösningen i pastan erhåller ett pH-värde som överstiger 13,2 -13,4.

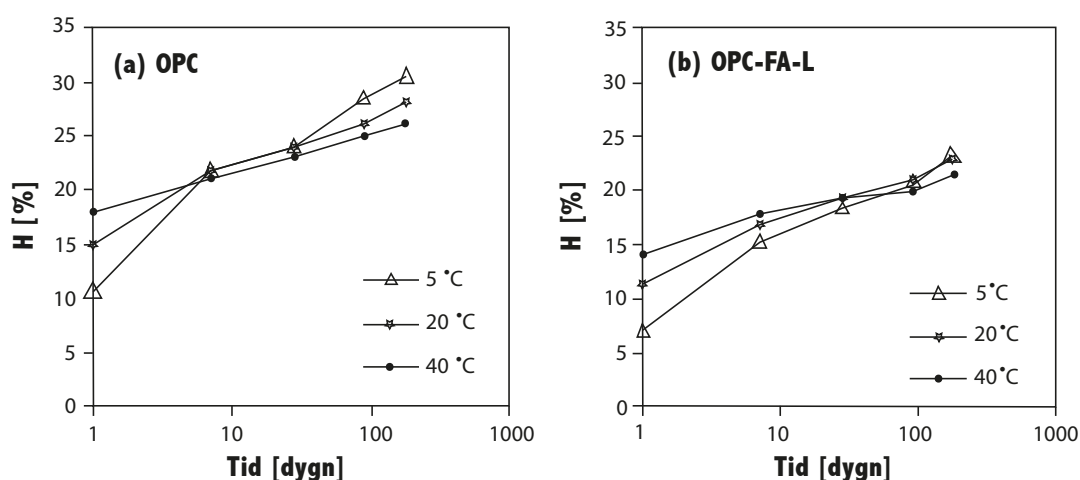


Figur 8. Mängden portlandit per 100 g Portlandcement som funktion av tiden. OPC: Portlandcement, OPC-kvartssand: Kvartssand med kornfördelningskurva som OPC, OPC-50% FA1 Och OPC-50% FA2: Portlandcement med 50 viktsprocent flygaska av två olika sorter. Mängden portlandit uppmättes med metoden TGA [31].

Värmeutvecklingen blir totalt sett lägre i betong med flygskacement. Undersökningar [7] visar att flygskans bidrag till värmeutvecklingen utgörs av halten CaO i flygskans sammansättning. Eftersom halten normalt är låg är även bidraget till värmeutvecklingen lågt, vilket förklarar varför värmeutvecklingen blir lägre för denna typ av cement.

4.4 Kemiskt bundet vatten och självuttorkning

Figur 9 stödjer påståendet att flygskareaktionen uppskattningsvis binder 54 % vatten per kilo jämfört med vad ett kilo klinkercement gör [4]. En teori som förklarar detta resultatet är att flygskan inte binder mer vatten än det som är bundet till kalciumhydroxiden, som den reagerar med för att bilda C-S-H-gel. Mängden bundet vatten är mindre i kalciumhydroxid jämfört med det vatten som förekommer i den C-S-H-gel som kalciumsilikaterna i Portlandcement bildar. Detta leder därmed till att mängden kemiskt bundet vatten är mindre i cementpasta med flygskainblandning jämfört med för cementpasta med enbart Portlandcement. Eftersom mindre vatten binds kemiskt till flygskacement kommer mer vatten påträffas i betongen [4]. Det vatten som inte binds kemiskt till den hårdnande pastan binds istället fysikaliskt till betongen, genom adsorption och kapillär kondensation.



Figur 9. mängd kemiskt bundet vatten (förhållande till totalvikten av bruk utan vatten) som funktion av tid vid olika temperaturer. (a): Portlandcement (b): 65 % Portlandcement, 30 % Flygaska och 5 % kalkstensfiller [4].

Resultatet från en nypublicerad studie visar att utseendet på sorptionsisotermen för flygaskacement respektive Portlandcement huvudsakligen skiljs åt i det högre RF-området (<80 %). Detta ger indikation om att den finare strukturen i cementpastan för båda bindemedelssorterna tenderar att uppträda likadant. Resultatet varierar dock lite beroende på mängden inblandad flygaska [20].

4.5 Hållfasthet och inre produkt

Generellt uppvisar flygaskacement en lägre hållfasthet under den första veckan efter hydratationen startat, jämför med Portlandcement. Men en undersökning av De Weerd med flera [4] har visat att flygaskacement däremot kan ge en högre slutlig hållfasthet. När strukturutvecklingen tar fart och cementet börjar hårdna har flera undersökningar visat att strukturen och hållfastheten byggs upp av både inre och yttre hydrationsprodukter, både för Portlandcement och flygaskacement. De börjar dock bildas vid olika tidpunkter för olika bindemedel.

Enligt Scrivener med flera [19] bildas en inre, tät C-S-H-produkt i det utrymme som frigörs är cementkornen löses upp. Det är inte klarlagt när denna inre produkt börjar ta form men en hypotes är att det sker när C-S-H-gelen utvecklats över hela ytan på cementkornet och inte längre får plats att växa på det sättet. Det inre lagret av C-S-H-gel uppträder inom de första dagarna efter att reaktionen startat, vilket har klarlagts då C-S-H-gelens utveckling har studerats i detalj med svepelektronmikroskop, SEM.

Vidare har SEM-undersökningar [31] gjorda på flygaskacement visat att det även bildas en inre C-S-H-produkt för denna typ av cement. Skillnaden är dock att den inre produkten uppträder först efter cirka sju dygn, då effekterna av den puzzolaniska reaktionen kan identifieras. Undersökningarna visar även att det inre lagret utvecklas allt mer och får en fiberlikande struktur som påminner om den "yttre" C-S-H-gelens utseende, allt längre tid efter hydratationens start. När hydratationen avstannat kan man se att kärnan av flygaskapartiklarna inte deltagit i processen utan är oförändrade i sitt tillstånd.

Att det finns plats innanför lagret av hydratiseringsprodukter, för en inre produkt att bildas, är tack vare det faktum att silikat- och aluminiumjoner från flygaskepartikeln upplösts. Under hydratationen sker därmed en tillväxt av både yttre och inre hydratationsprodukter, varav den största delen är inre produkter [7]. Senare i hydratationen, efter ytterligare tid, har koncentrationen av kalciumjoner sjunkit till en nivå som möjliggör att silikatjoner kan transporteras längre ifrån flygaskapartiklarna. Detta medför att C-S-H-gel bildas i kapillärporer och vidare att permeabiliteten blir lägre [7].

Även De Weerd med flera [4] har i sin undersökning visat att den puzzolana reaktionen som flygaskan bidrar till ger en mer komprimerad struktur och finare porositet för betongen. Vidare visar undersökningen att flygaskacement kan nå en högre slutlig hållfasthet jämfört med för Portlandcement, vid 20 °C härdningstemperatur och efter 28 samt 90 dygn. Den högre slutliga hållfastheten tycks enligt De Weerd med flera [4] bero på både effekten från den puzzolana reaktionen men också på fillereffekten som ger en mer homogen strukturutveckling. Att flygaskan ger en mer homogen strukturutveckling än Portlandcement har visats genom att studera inre och yttre produkt. För flygaskacement ses knappt någon gräns mellan inre och yttre produkter, vilket tyder på en jämn fördelning av hydratationsprodukter. Vidare visar undersökningen att flygaskacement tenderar att binda mindre vatten, men uppnå samma hållfasthet och styrka som Portlandcement. Undersökningen visar även att vid samma mängd reagerad Portlandcement och flygaska i de olika cementpastorna, når flygaskacement en högre hållfasthet än pastan med enbart Portlandcement. Detta tyder på att flygaskan bidrar mer till hållfastheten. En förklaring till detta, som presenteras i undersökningen, är att flygaskan omvandlar kalciumhydroxid till C-S-H-gel, som har en starkare bindning än kalciumhydroxiden som annars förekommer då enbart Portlandcement hydratiserar.

4.6 Kemisk balans i porlösning

Då en del av Portlandcimentet ersätts med flygaska minskar mängden kalcium i cementpastan, eftersom flygaskan innehåller mindre kalcium. Detta medför att kvoten mellan Ca/Si är lägre i ett flygaskacement. Även andra balanser ändras, ex. Al/Si, vilken ökar. Flygaskan medför vidare att koncentrationen av nedanstående joner minskar. Hur mycket de minskar beror på hur stor andel av cementen som ersätts av flygaska och sammansättningen hos flygaskan, vilken kan variera [31, 34]:

- K^+
- Na^+
- OH^-
- Ca

En effekt förändringen i balansen mellan olika komponenter är att det bildas längre silikatkedjor i C-S-H-molekylerna. Detta leder i sin tur till att mer aluminium kan bindas till dessa molekyler (C-S-H-gelen). Det innebär att effekten av en större Al/Si kvot i porlösningen tas ut av en ökad bindning av aluminium till C-S-H-gelen, som dessutom förekommer i större koncentration tack vare den puzzolaniska reaktionen som sker [31, 35].

5 Test: Hydratation av cement med flygaska

Projektets laborativa del omfattade att utföra tester på cementpastor och betongblandningar med olika stor inblandning av flygaska och olika vbt. Detta för att se hur flygaskan påverkade hydratationen samt självuttorkningen i dessa. De mätserier som utfördes ses i Tabell 1, mätserie 2 redovisas ej då resultaten gällande självuttorkning blev svåra att korrigera på grund av "drift-problem" hos RF-givarna, vilket behandlas vidare i avsnitt 6.4.1. Cementsorten som användes i undersökningen var ett CEM I (SH P Slite, Cementa AB), som ses i Tabell 2. Flygaskan som användes var av klass F, Tabell 3. Slutligen ses kompletterande egenskaper för de två bindemedel som är aktuella i projektet i Tabell 4.

Tabell 1. Materialstudien. C står för cementpastaprov, B står för betongprov och siffran framför bokstaven motsvarar antalet test som genomförts av respektive kombination.

Mätserie	Bindemedel	vbt = 0,25	vbt = 0,3	vbt = 0,35	vbt = 0,4	vbt = 0,45	vbt = 0,5	vbt = 0,55
Mätserie 5	OPC (100 %)	1 C	1 C	1 C	1 C	1 C	1 C	1 C
Mätserie 3	85% OPC + 15% FA					3 C		
Mätserie 3	80% OPC + 20% FA					2 B		
Mätserie 1+6	65% OPC + 35% FA	2 C	2 C	2 C	2 C	3 C	2 C	2 C
Mätserie 4	85% OPC + 15% Q-FA					2 C		
Mätserie 4	80% OPC + 20% Q-FA					2 C		
Mätserie 4	65% OPC + 35% Q-FA					3 C		

Tabell 2. Kemisk sammansättning för Portlandcementet (CEM I 52,5 R) som användes i projektet.

Förening	Procent
CaO	62,8
SiO ₂	19,4
Al ₂ O ₃	4,4
SO ₃	3,7
Fe ₂ O ₃	3,1
MgO	2,8
K ₂ O	1,1
Na ₂ O	0,26

Tabell 3. Kemisk sammansättning av flygaskan som använts i projektet.

Förening	Procent
SiO ₂	51,1
Al ₂ O ₃	25,6
Fe ₂ O ₃	6,57
CaO	4,04
MgO	2,81
K ₂ O	2,71
TiO ₂	1,08
SO ₃	0,5

Tabell 4. Egenskaper som påverkar reaktivitet för de aktuella bindemedel som använts i projektet. D50 motsvarar den siktstorlek som 50 % av materialets partiklar har passerat.

Bindemedel	Specifik yta (m ² /kg)	Glödförlust (%)	d50
Portlandcement	536	2,6	11,08
Flygaska	-	4,06	30,12

5.1 Metod

För att få svar på de inledande forskningsfrågorna har olika typer av undersökningar genomförts och därmed olika metoder använts. För att studera cementets hydratationsprocess har värmeutveckling valt att undersökas, detta med metoden kalorimetri. För att mäta självuttorkning i cementet har RF-givare som registrerar fuktnivån i cementet använts. RF-mätningar har även genomförts på betongprov, för att undersöka om metoden att mäta RF-nivå i cementpasta stämmer väl överens med mätning på motsvarande betongprov. Vidare har även bindetidstest utförts, detta för att kunna svara på hur flygaskacement påverkar vattenbehovet samt om det ger en långsammare struktur- och hållfasthetsutveckling jämfört med Portlandcement. Slutligen har även tryckhållfasthet undersökts på betongprov, för att jämföra skillnaden i hållfasthet hos flygaskabetong och Portlandcementbetong.

5.1.1 Kalorimetri

Värmeutvecklingen som sker i samband med att cement hydratiserar är en bra parameter att studera för att få en överblick av cementets hydratationsprocess [36]. Kalorimetri är en generell metod när det gäller mätning av värmeproduktion och utveckling av värme. Det finns olika typer av kalorimetrimetoder som kan användas för att undersöka hydratiseringen av cement [27]:

- Lösningsskalorimetri: här mäts energiinnehållet hos ohydratiserat respektive hydratiserat cement och skillnaden mellan de två utgör den totala värmemängden som producerats under hydratationen. Mätningen utförs genom att provkroppar löses upp i syra och värmeutvecklingen registreras under tiden detta sker. Denna typ av kalorimetri har visat sig fungera mindre bra på

blandcement och utförs inte i Sverige på grund av att syrorna som används är mycket farliga.

- Semi-adiabatisk kalorimetri: här mäts temperaturförändringen hos ett välisolerat prov. Resultatet omvandlas därefter med hjälp av kunskap om aktiveringsenergi, värmekapacitet och isoleringsgrad till en värmeutveckling som gäller för isoterma förhållanden.
- Adiabatisk kalorimetri: här mäts temperaturförändringen hos ett prov där ingen värme tillåts lämna provet. Denna typ av kalorimetrisk mätning används främst när man vill undersöka temperaturförändring och värmeutveckling i massiva konstruktioner som medför att värmen bibehålls inuti konstruktionen och där det utvecklas höga temperaturer. Precis som för semi-adiabatisk kalorimetri måste resultatet omvandlas så det gäller för isoterma förhållanden.
- Isoterm kalorimetri: här mäts värmeutvecklingen hos små provkroppar, utan att temperaturen ändras. Denna metod används även inom exempelvis läkemedelsbranschen, för mikrobiologiska undersökningar och inom cementkemin [36].

Både isoterm kalorimetri och semi-adiabatisk kalorimetri används för att kvantifiera värmeutvecklingen vid cementshydratation. Eftersom isoterm kalorimetri enbart går att använda för små provkroppar och det dessutom visats sig att mätningen av värmeutveckling ger mer detaljerad data jämfört med mätningen av temperaturförändring, är isoterm kalorimetri bäst lämpad för utveckling och fördjupad undersökning av cement. Semi-adiabatisk och adiabatisk kalorimetri går att använda för att undersöka hydratationen hos cementpasta och cementbruk (cirka 500-1000 g cementpasta eller 10 kg betong) vilket är fördelaktigt för undersökningar i fält av gjuten betong och även för betongtillverkare [27].

Utifrån litteraturen ovan valdes isoterm kalorimetri i detta projekt. En mer detaljerad beskrivning av hur isoterm kalorimetri fungerar följer här. Provet som ska undersökas hålls i en isoterm miljö tack vare att värmen som utvecklas då provet hydratiserar leds bort genom flödessensorer till ett metallblock, som kallas "heat sink"[36]. Alla isoterma kalorimeterar har två prover, ett referensprov (icke-aktivt prov) och ett aktivt prov, där resultatet som erhålls motsvarar skillnaden mellan dessa två. Det resultat som registreras av flödessensorn är en spänning, som sedan omvandlas till en värmeeffekt genom en kalibreringskoefficient. Värmeeffekten är kopplad till hastigheten hos hydratiseringsprocessen och värmeutvecklingen till hur långt processen fortskridit [37].

Kalorimetern som har använts är en prototyp till en I-Cal Flex från Calmetrix. Kalorimetern (Bild 1) är utrustad med relativ fuktighetsgivare till varje provampull (Bild 2), vilket innebär att förändringen i RF-nivå för provet mäts samtidigt som värmeeffekten registreras. Kalorimetern är en åtta-kanalers kalorimeter med åtta referenser. Referensproven ska ha samma värmekapacitet som provet som skall testas i undersökningen. I denna kalorimeter är referensproven gjorda av rostfritt stål.

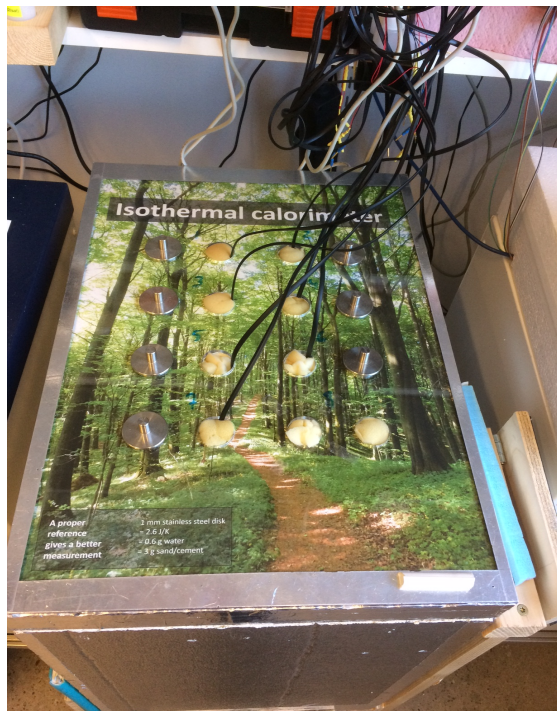


Bild 1. Kalorimetern, utrustad med RF-sensorer, som använts i projektet.



Bild 2. Provampull försedd med RF-sensor. Ampullerna placerades i kalorimetern med RF-sensorer enligt denna bild.

Kalibrering

Då den isoterma kalorimetern kalibreras fastställs två parametrar. Den första är den koefficient som omvandlar spänningen till värmeeffekt. Den andra är baslinjen, som motsvarar den spänning då ingen värme produceras av provet. I de flesta fall är isoterma kalorimetrar stabila instrument som klarar av att bibehålla relativt konstanta parametervärden över lång tid. Kalibrering är dock viktigt att genomföra för att säkerställa att kalorimetern fungerar som den ska och ger korrekta mätningar [27]. Det är rimligt att genomföra totala kalibreringar med tre månaders mellanrum och kalibrering av baslinjen varje gång temperatur eller provets massa förändras [37]. Det finns flera andra faktorer som kan påverka metodens noggrannhet och tillförlitlighet, såsom rumstemperaturens variation, kalibreringen av parametrar och noggrannheten hos referensproven [27].

I detta projekt kalibrerades kalorimetern innan de laborativa undersökningarna påbörjades och efter att de slutförts. Mätningensintervall valdes till två mätningar i minuten, då det ansågs rimligt för mätning över flera dygn. Cementpastaprovens värmekapacitet omvandlades till en massa för det rostfria stålet som utgör referensproven. Detta så att värmekapaciteten för att både testprov och referensprov är densamma. Effekten av detta blir att referensprovet minimerar bruset i mätningarna. Beräkningarna för att kalibrera baslinjen utfördes enligt följande:

För det aktuella instrumentet gäller att 1 mm rostfritt ståldisk motsvarar 2,6 J/K, 0,6 g vatten och 3 g sand/cement. Värmekapaciteten för vatten är 4,2 J/gK och 0,8 J/gK för cement.

Varje prov av cementpasta som testades hade en massa motsvarande 8 g. De flesta av cementpastorna har $v_{bt} = 0.45$. Detta ger följande massa av cement respektive vatten:

$$m_v = 0,45m_{cfa} \quad (6)$$

$$m_v + m_{cfa} = 8 \text{ g} \quad (7)$$

$$\rightarrow m_v = 2,48 \text{ g} \quad (8)$$

$$m_{cfa} = 5,52 \text{ g} \quad (9)$$

Värmekapaciteten för provet blir då:

$$c_{\text{Prov}} = 2,48 \text{ g} \cdot 4,2 \frac{\text{J}}{\text{gK}} + 5,52 \cdot 0,8 \frac{\text{J}}{\text{gK}} = 14,8 \text{ J/K} \quad (10)$$

Detta motsvarar cirka 6 mm rostfritt stål i referensen.

För att kalibrera koefficienten som omvandlar spänning till värmeeffekt, seriekopplades flödessensorerna i kalorimeterkanalerna med resistansen 100 Ohm. Därefter leddes en ström genom de seriekopplade flödessensorerna, denna avläses till 11,063 mA. Strömmen leds genom sensorerna i 600 s varpå den stängs av i 3600 s. Detta upprepas i några timmar. Då ström (I) och resistans (R) är kända, kan effekten beräknas genom följande formel;

$$P = R \cdot I^2 \quad (11)$$

Kalibreringskoefficienten, (ε , mW/mV), beräknas därefter med formel (12):

$$\varepsilon = \frac{Q}{\int U dt} \quad (12)$$

Kalibreringen beskriven ovan utfördes enligt en standardmetod [38]. Vid kalibreringen som gjordes efter samtliga mätningar avlästes strömmen 11,070 mA och kalibreringskoefficienterna som erhöles hade en avvikelse på maximalt $\pm 0,02$, vilket inte anses påverka resultatet nämnvärt.

Felkällor

En felkälla kopplat till undersökningen som gjorts är att under blandningen av cementpastan har en hand hållits om provampullerna och då avgett lite värme till proven, innan de placerats i kalorimetern. Då undersökningen i fråga inte haft sitt största fokus på den omedelbara reaktionen i början av hydratationen anses detta kunna bortses från. En annan felkälla är temperaturen i laboratoriet. Rumstemperaturen hölls stabil kring 20,5 °C mellan mitten av januari till mitten av februari, med en variation på cirka $\pm 0,2$ °C. Därefter höjdes av okänd anledning temperaturen tvärt till 21,5 °C och hölls stabil till slutet av april med en variation på $\pm 0,3$ °C. Denna temperaturhöjning påverkar hydratationsförloppet. Proverna är dock placerade i kalorimetern under de första tio dagarna av hydratationen som konstant genom hela undersökningsperioden haft en temperatur på 20 °C. Efter de första tio dagarna har den största delen av de temperaturkänsliga reaktionerna skett och temperaturvariationen i

laboratoriet anses därmed inte påverka testresultaten särskilt mycket. Undersökningens fokus ligger dessutom på de första tio dagarna av hydratationen.

Då resultaten från de olika mätserierna erhöles upptäcktes ett märkligt utseende på vissa av värmeutvecklingskurvorna som genererats av proverna. Värmeutvecklingen var lägre än normalt. Av denna anledning utfördes även ett tjugofyratimmarstest av samtliga mätserier. Detta för att kunna jämföra topparna som erhålls efter bara några timmars mätning. Resultaten från tjugofyratimmar smätningarna gav ett normalt utseende på värmeutvecklingskurvorna. Det uppdagades att en del prover inte nått vialerna i botten av kalorimetern, utan på grund av RF-givarsladden hängt något i luften ovanför, i kalorimetern. Detta faktum medför att kalibreringskoefficienten som beräknats för kalorimetern inte stämmer för de prover som inte nått botten på kanalerna. För att korrigera dessa värmeutvecklingskurvor jämfördes maxvärdena för värmeutvecklingskurvan från tiodygsmätningen med tjugofyratimmar smätningen. Kvoten mellan dessa två maxvärden multiplicerades sedan med värdet för tiodygsmätningen. Denna operation medför en något större osäkerhet till resultaten, men hur stor är okänt. Utseendet på kurvorna ser normalt ut och värdena är rimliga. Problemet med att proven inte nått ned till botten på kanalerna förekom i totalt 15 fall av totalt 42 testade prov. I övriga fall var kvoten mellan de två maxtopparna nära 1, med en variation på ± 3 %. Korrigeringen gjordes dock för samtliga tester.

5.1.2 Mätning av relativ fuktighet

RF-mätningar i betongkonstruktioner syftar ofta till att bestämma fuktnivån i materialet och klargöra om fuktnivån är under den kritiska gränsen för beläggning av ett ytskikt, exempelvis en golvmatta. Den kritiska RF-gränsen är den högsta RF-nivån som ytskikt materialet klarar utan risk för fuktskador och emissioner och varierar därmed beroende på vad det är för typ av ytskikt som ska placeras på betongen.

Idag används en metod för RF-mätning i betong som innebär att ett hål borras i betongen och att en RF-givare förs in i hålet. RF-nivån är högre längre in i konstruktionen, då konstruktionens yta ställer snabbt in sig till omgivande lufts RF-nivå medan det tar längre tid för mitten av konstruktionen att torka ut, eftersom fukten ska färdas en längre väg. Det mätdjup som testet genomförs på beror av om betongen tillåts att torka ut från ett eller två håll. Borrhålet som därefter borras ned till mätdjupet förses med ett mätrör där RF-givaren sedan placeras. RF-givaren ska vara monterad i mät hålet tills både fuktjämvikt och temperaturjämvikt uppstått mellan botten på mät hålet och givaren. Mätning förfarandet beror på vilken typ av givare som används för testet, men för exempel Vaisala-givare måste man vänta tre dygn efter borrning tills givaren får föras ned och därefter vänta minst tre dygn på att jämvikt ska inställa sig. Den avlästa RF-nivån måste korrigeras mot en kalibreringskurva för att korrekt RF-värde ska kunna fås [39]. Denna metod användes för att mäta RF-nivån på de betongprov som analyserades i projektet.

I detta projekt testades även en ny metod som innebär att RF-givare placeras i ampullen där cementpastaprovet befinner sig, under kalorimetertestet. Detta ger RF-värden över tid och kan erhållas direkt från dataloggern som används för att omvandla signalen från givarna till RF-värden. Precis som för dagens metod på betong måste givarna kalibreras före och efter testet. Från kalibreringen fås en kalibreringskurva som används för korrigering av RF-nivån. De givare som används är kapacitiva givare.

En kapacitiv givare är uppbyggd av en sensor som är en liten kondensator. Kondensatorn är uppbyggd av två elektroder som är åtskilja av ett dielektriskt materialskikt (ofta en polymer). Ett dielektriskt material är ett material som kan polariseras av ett elektriskt fält. När fuktinnehållet förändras i polymerern förändras också kapacitansen och därmed signalen som registreras. På så vis kan den relativa fuktigheten i materialet som undersöks följas [40]. De RF-givare som använts i detta projekt är av modellen SHT71 respektive SHT10 (Sensirion, Schweiz). Givarna är digitala kapacitiva fuktighetssensorer som beroende på omgivningsklimatet absorberar eller desorberar vattenmolekyler och på så sätt kan ge information om den relativa fuktighetsnivån som råder i det aktuella fallet. SHT71 har en noggrannhet på $\pm 3\%$ och modell SHT10 har en noggrannhet på $\pm 4,5\%$. Tillverkaren redovisar andra givare med bättre noggrannhet, $\pm 1,8\%$, i sitt sortiment [41].

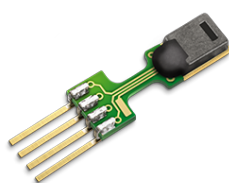


Bild 3. RF-givare modell SHT71 [42].

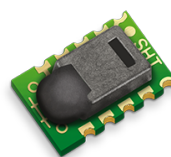


Bild 4. RF-givare modell SHT10 [42].

Kalibrering och felkällor

RF-givarna har kalibrerats med mättade saltlösningar före och efter respektive mätserie i projektet. De salter som användes för kalibreringen används normalt för detta användningsområde [43] och ses i Tabell 5. Samtliga resultat av kalibreringen kan ses under avsnitt 6.4.1. RF-givarna kalibrerades under cirka två timmar mot respektive RF-nivå för att säkerställa att givarna hann nå jämvikt med RF-nivån i saltlösningen.

Tabell 5. Kalibreringssalterna som användes i projektet.

Benämning	Beteckning	RF-nivå (%)	Avvikelse i 20 °C
Kaliumsulfat	K_2SO_4	97,6	$\pm 0,5\%$
Kaliumnitrat	KNO_3	94,6	$\pm 0,7\%$
Kaliumklorid	KCl	85,1	$\pm 0,3\%$
Natriumklorid	NaCl	75,5	$\pm 0,1\%$
Magnesiumnitrat	$Mg(NO_3)_2$	54,4	$\pm 0,2\%$

Tillverkarna av givarna, Sensirion, rapporterar om ett "drift-beteende" hos sina RF-givare som utsätts för höga nivåer av relativ fuktighet ($>80\%$) under mer än 60 timmar. Sensorerna tenderar i dessa lägen att driva mot högre RF-värden än vad som speglar verkligheten [41]. Detta operativa problem uppdagades efter två mätserier vilket behandlas vidare under avsnitt 6.4.1.

5.1.3 Blandning och behandling av prov

Metoden som användes för att förbereda proven för kalorimetriundersökningen beskrivs nedan och baseras till viss del på en internationell standard metod framtagen för denna typ av undersökningar [38];

1. Kalorimetern och RF-givarna kalibrerades (se sidan 22 & 25).
2. Bindemedlet vägdes upp i provampull. Mängden cement respektive flygaska hade beräknats utifrån vilken typ av mätserie som skulle köras. Detta beräknades på samma sätt som tidigare beskrivits i avsnitt 5.1.1. Bindemedlet vägdes upp med en tusendels noggrannhet och avvek som mest $\pm 0,005\text{g}$. Under en mätserie byttes flygaskan ut mot sand. Se punkt 12 för speciellt tillvägagångssätt.
3. Kalorimetermätningen startades
4. Rätt uppmätt mängd vatten tillsattes provampullen med hjälp av pipett (Bild 6). Vattnet vägdes upp med en hundraedels noggrannhet och avvek som mest $\pm 0,05\text{g}$.
5. Provet blandades i en vortex-blandare (Bild 7) i 60 s på 1600 rpm
6. Provampullen placerades i kalorimetern
7. Proceduren upprepades för samtliga 7 provampuller varpå proven mättes i tio dygn. Att ladda kalorimetern med en mätserie (7 provampuller) tog cirka 30 minuter.
8. Därefter placerades proven i ett rum med 20 °C, temperaturen i rummet mäts konstant och varierar med cirka $\pm 0,3$ °C.
9. Efter 27 dygn mättes RF-nivån igen på respektive prov för att erhålla kunskap om självtorkningen hos proven efter längre tid.
10. För att kontrollera trovärdigheten hos resultatet, undersöktes viktförändring hos samtliga prov i mätserie 4 vid blandning, efter 10 dygns- och innan 27 dygnsmätningen genomfördes. Detta för att kontrollera att proven inte avgav fukt genom provbehållaren och gav ett felaktigt resultat.
11. När sand ersatte flygaska i en av mätserierna hade sanden siktats (Bild 5) med maskvidder som medförde att sanden delades in i fraktioner som flygaskan byggdes upp av. Detta för att kunna efterlikna kornfraktionen i flygaskan så bra som möjligt. Siktningen blev dock förenklad på grund av att alla maskvidder som byggde upp den aktuella flygaskan inte kunde erhållas i labbet. Siktningen resulterade i fyra fraktioner av sanden och ansågs efterlikna flygaskan bra. Därefter vägdes respektive kornfraktioner upp i respektive prov så att slutresultatet blev att sanden representerade flygaskans kornstorleksfördelning så bra som möjligt. Därefter upprepades de övriga stegen med start från punkt 2.



Bild 5. Sikten som användes i projektet.



Bild 6. Bild på pipetten som användes för att mäta upp rätt mängd vatten till varje prov.



Bild 7. Vortex-blandaren som blandade samtliga prov innan de fördes ned i kalorimetern.

5.1.4 Bindetid

Syftet med bindetidstestet är att bestämma bindetid och volymbeständighet hos olika cementpastor. Bindetid är den tid det tar innan betongen börjar hårdna, vilket brukar inträffa någon timme efter blandning. Testet genomförs enligt standard SS-EN 196-3:2016 och kan kortfattat beskrivas enligt följande metodbeskrivning;

1. 500 g bindemedel vägs upp
2. Mängden blandningsvatten antas för att uppnå standardkonsistens på provet. Blandningsvattnet består av destillerat vatten.
3. Bindemedel och blandningsvatten blandas i en blandare i 90 sekunder, tiden mäts med en timer.
4. Provet rörs därefter om manuellt i 30 s för att blanda ner den pastan som fästs på kanterna av behållaren som pastan placerats i under blandningsfasen.
5. Provet blandas återigen i en blandare under 90 sekunder
6. Provet testas i en konsistensmätare som består av en nål som låts falla ner över provet, nålen löper längs en stång (Bild 8). Om verktyget ger ett utslag på mellan 30 & 35 är konsistensen på provet godkänd för vidare test, i annat fall måste en ny provsats göras med korrigerad mängd vatten.
7. Därpå nedsänks provet i vatten i en Vicatapparat av modell Toni Compact automatic (Toni Technik GmbH, Tyskland). Vicatapparaten mäter motstånd i provet med ett regelbundet tidsintervall (Bild 9). Då motståndet nått ett särskilt gränsvärde anses bindetiden ha nåtts och denna tid från det att provsatsen blandats motsvarar bindetiden.

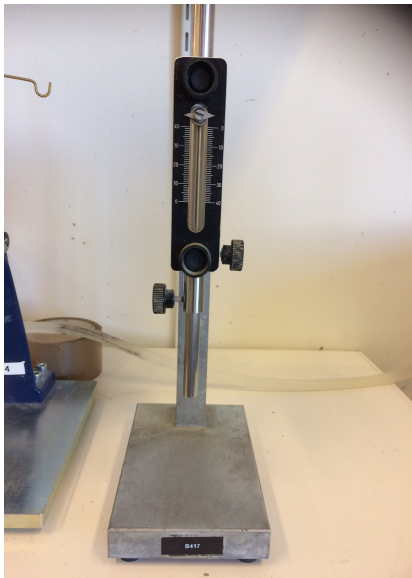


Bild 8. Apparaten som användes för att mäta konsistensen.

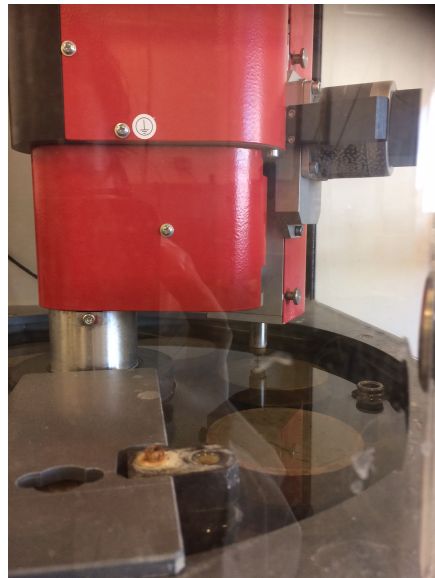


Bild 9. Vicat-apparaten som användes.



Bild 10. Lufthaltsmätaren som användes.

5.2 Test med betong

Testerna på betong utfördes för att jämföra RF-mätningarna på cementpasta med mätningar på betong. Förhoppningen med jämförelsen var att kunna ge svar på om den nya metoden där RF undersöks på cementpastaprov ger en bra överensstämmelse med motsvarande test på betongprover. Förutom RF-nivå undersöktes även hållfasthet på betongproven.

5.2.1 Gjutning av betongprover

Fyra olika recept användes vid gjutningen, vilka ses i Tabell 6-9. Provkropparna av betong bestod av kuber (100×100 mm) respektive hinkar fyllda med betong, med tätförslutet lock. Testerna som sedan gjordes på provkropparna var mätning av hållfasthet vid 28 dygn (kuber) och relativ fuktighetsmätning efter 28 dygn (hinkar). Recepten motsvarar de olika mätserier av cementpasta som testas i kalorimetern. Recepten ses i Tabellerna 6-9. I samband med gjutningen kontrollerades lufthalten med en lufthaltsmätare. En lufthaltsmätare är ett tryckkärl med två ventiler (Bild 10), som fylls till bredden med betong. Därefter försluts kärlet och vatten fylls på genom den ena ventilen tills att det rinner ut genom den andra. Ventilerna stängs, ett tryck pumpas upp och lufthalten i betongen kan läsas av på mätaren. Densitet kontrollerades genom vägning av en viss volym av betongen. Resultaten från dessa test ses i Tabell 10.

Tabell 6. Betongrecept för 100 % Portlandcement (CEM I 52,5 R) som användes vid gjutning av betong.

Material	Andel (%)	Vikt (kg)	Densitet (kg/m ₃)	Volym (m ₃)	Labbrecept (kg)
Vatten	18	180	1000	0,18	3,691
SH-cement Slite	12,8	400	3125	0,128	8
Tillsatsmaterial					
Flyttillsats Sikament 56	0,22	0,88	1080	0,0008	0,0176
Ballast	67,1				
Luft	2			0,02	
Ballast:					
Baskarp 15	11	196	2650	0,0738	3,91
Baskarp 95	20	356	2650	0,1342	7,11
Råda 3-5	12	211	2620	0,0805	4,22
Jehnander 4-8	12	216	2680	0,0805	4,32
Jehnander 8-16	45	828	2740	0,302	16,55
				∑ 0,9998	

Tabell 7. Betongrecept för 85 % Portlandcement (CEM I 52,5 R) + 15 % flygaska.

Material	Andel (%)	Vikt (kg)	Densitet (kg/m ₃)	Volym (m ₃)	Labbrecept (kg)
Vatten	18	180	1000	0,18	3,697
SH-cement Slite	10,88	340	3125	0,1088	6,8
Flygaska Klass F	2,61	60	2300	0,0261	1,2
Flyttillsats Sikament 56	0,08	0,27	1080	0,0008	0,0054
Ballast	66,5				
Luft	2			0,02	
Ballast:					
Baskarp 15	11	194	2650	0,0731	3,8
Baskarp 95	20	352	2650	0,133	7,05
Råda 3-5	12	209	2620	0,0798	4,18
Jehnander 4-8	12	214	2680	0,0798	4,28
Jehnander 8-16	45	820	2740	0,2992	16,4
				∑ 1,0006	

Tabell 8. Betongrecept för 80 % Portlandcement (CEM I 52,5 R) + 20 % flygaska.

Material	Andel (%)	Vikt (kg)	Densitet (kg/m ₃)	Volym (m ₃)	Labbrecept (kg)
Vatten	18	180	1000	0,18	3,696
SH-cement Slite	10,24	320	3125	0,1024	6,4
Flygaska Klass F	3,481	80	2300	0,03481	1,6
Flyttillsats Sikament 56	0,1	0,32	1080	0,0003	0,0064
Ballast	66,25				
Luft	2			0,02	
Ballast:					
Baskarp 15	11	193	2650	0,0729	3,86
Baskarp 95	20	351	2650	0,1325	7,02
Råda 3-5	12	208	2620	0,0795	4,17
Jehnander 4-8	12	213	2680	0,0795	4,26
Jehnander 8-16	45	817	2740	0,2981	16,34
				∑1,00001	

Tabell 9. Betongrecept för 65 % Portlandcement (CEM I 52,5 R) + 35 % flygaska.

Material	Andel (%)	Vikt (kg)	Densitet (kg/m ₃)	Volym (m ₃)	Labbrecept (kg)
Vatten	18	180	1000	0,18	3,699
SH-cement Slite	10,24	260	3125	0,0832	5,2
Flygaska Klass F	3,481	140	2300	0,0609	2,8
Flyttillsats Sikament 56					
Ballast	65,61				
Luft	2			0,02	
Ballast:					
Baskarp 15	11	191	2650	0,0722	3,82
Baskarp 95	20	348	2650	0,1312	6,95
Råda 3-5	12	206	2620	0,0787	4,12
Jehnander 4-8	12	211	2680	0,0787	4,22
Jehnander 8-16	45	809	2740	0,2952	16,18
				∑ 1,0001	

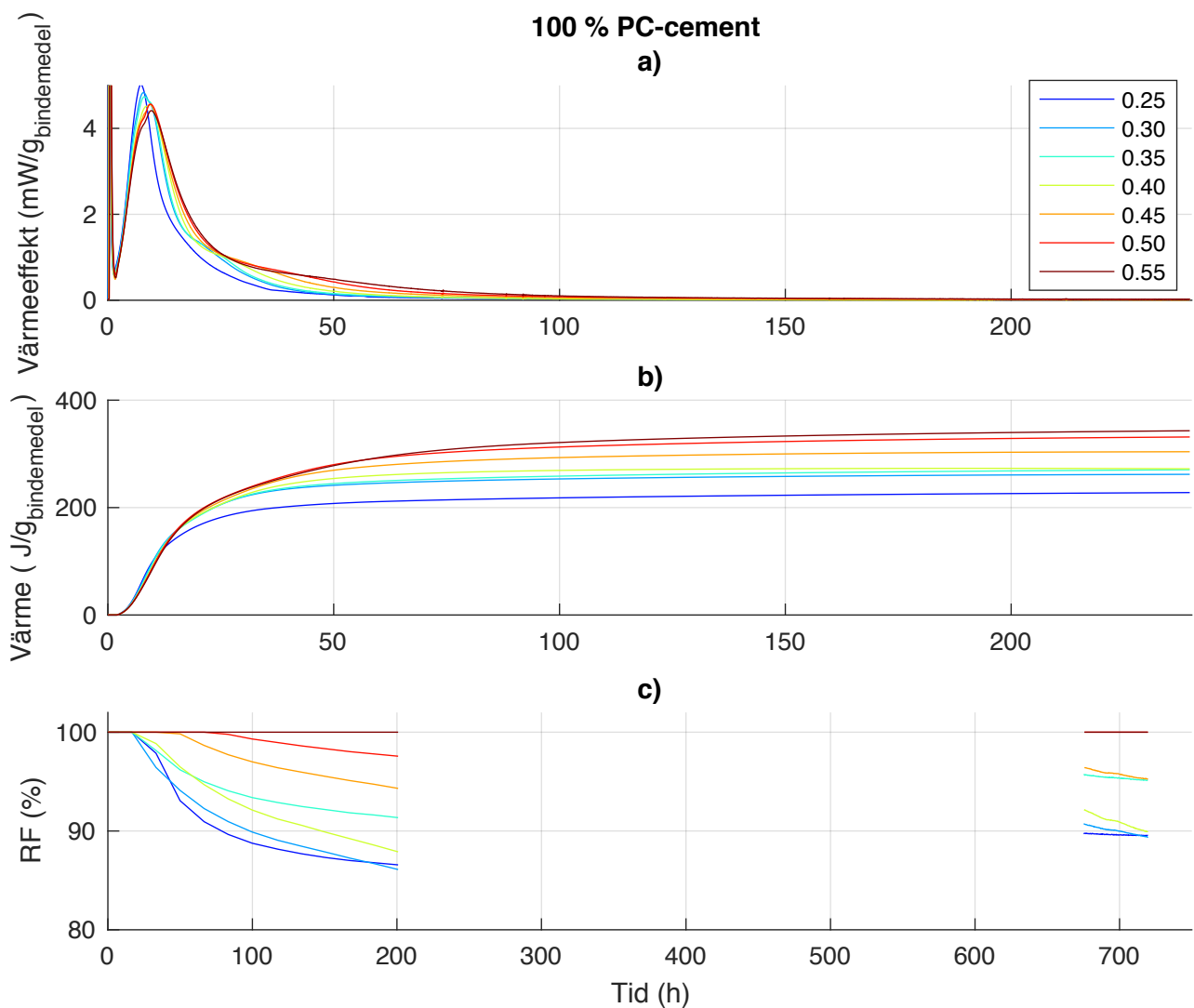
Tabell 10. Densitet och luftporhalt för de olika betonger som gjordes. PC= portlandcement. FA= flygaska.

Betongrecept	Densitet (kg/m ₃)	Lufthalt (%)
100 % PC	2440	1,7
85 % PC + 15 % FA	2430	1,2
80 % PC + 20 % FA	2325	1,9
65 % PC + 35 % FA	2400	0,9

6 Resultat och diskussion

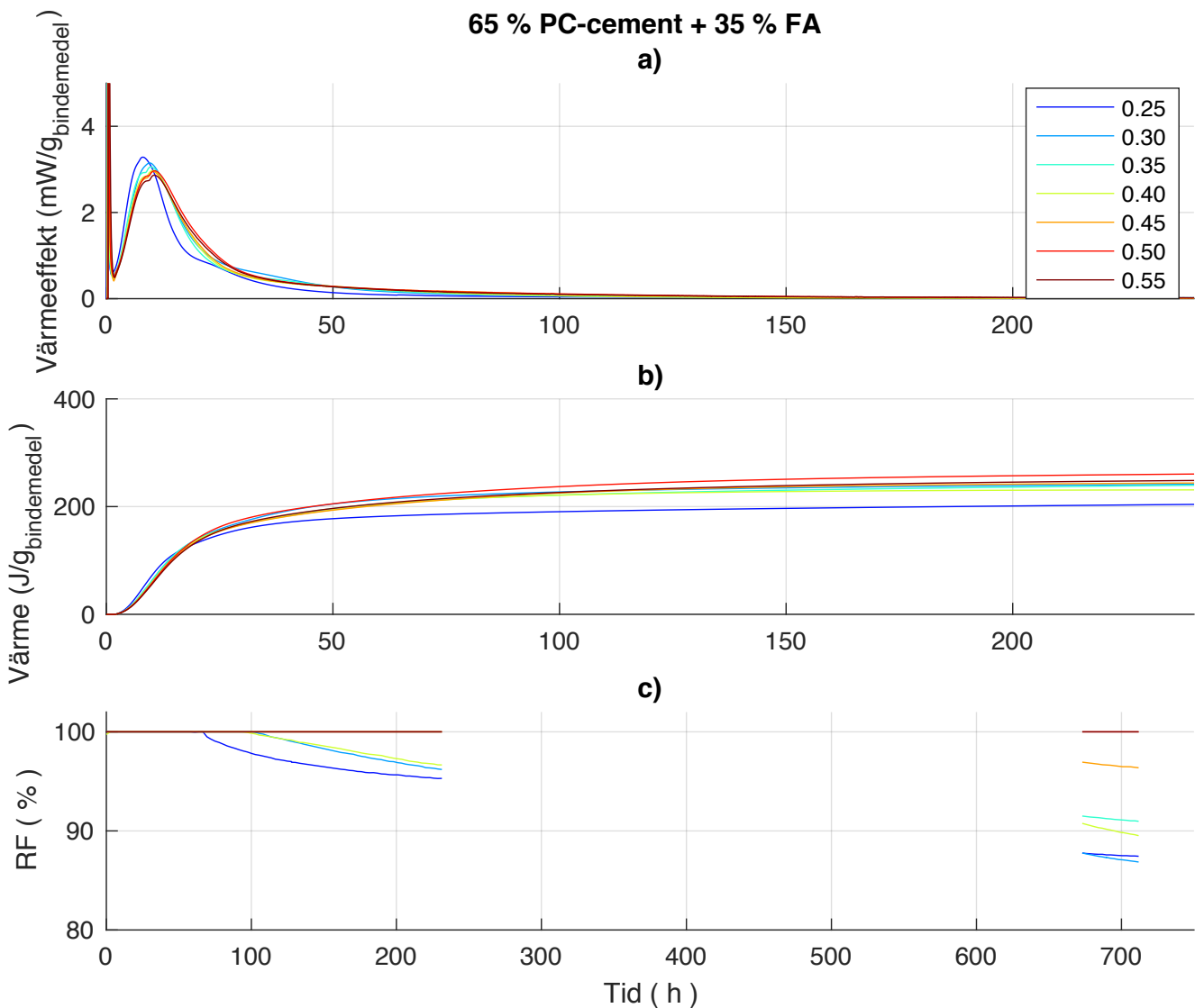
6.1 Värmeutveckling och självtorkning

Här presenteras resultaten av undersökningarna gällande värmeutveckling och självtorkning. Resultaten presenteras för respektive genomförd mätserie, i samma figur. Delfigur a) redovisar värmeutvecklingen per gram bindemedel över tio dygn, delfigur b) redovisar den kumulativa värmeutvecklingen per gram bindemedel över tio dygn och delfigur c) redovisar RF-nivån i provet över tio dygn samt efter 27 dygn i form av en uppföljningsmätning. Tidsaxeln på delfigur c) skiljer sig därmed från tidsaxlarna på de två andra delfigurerna.



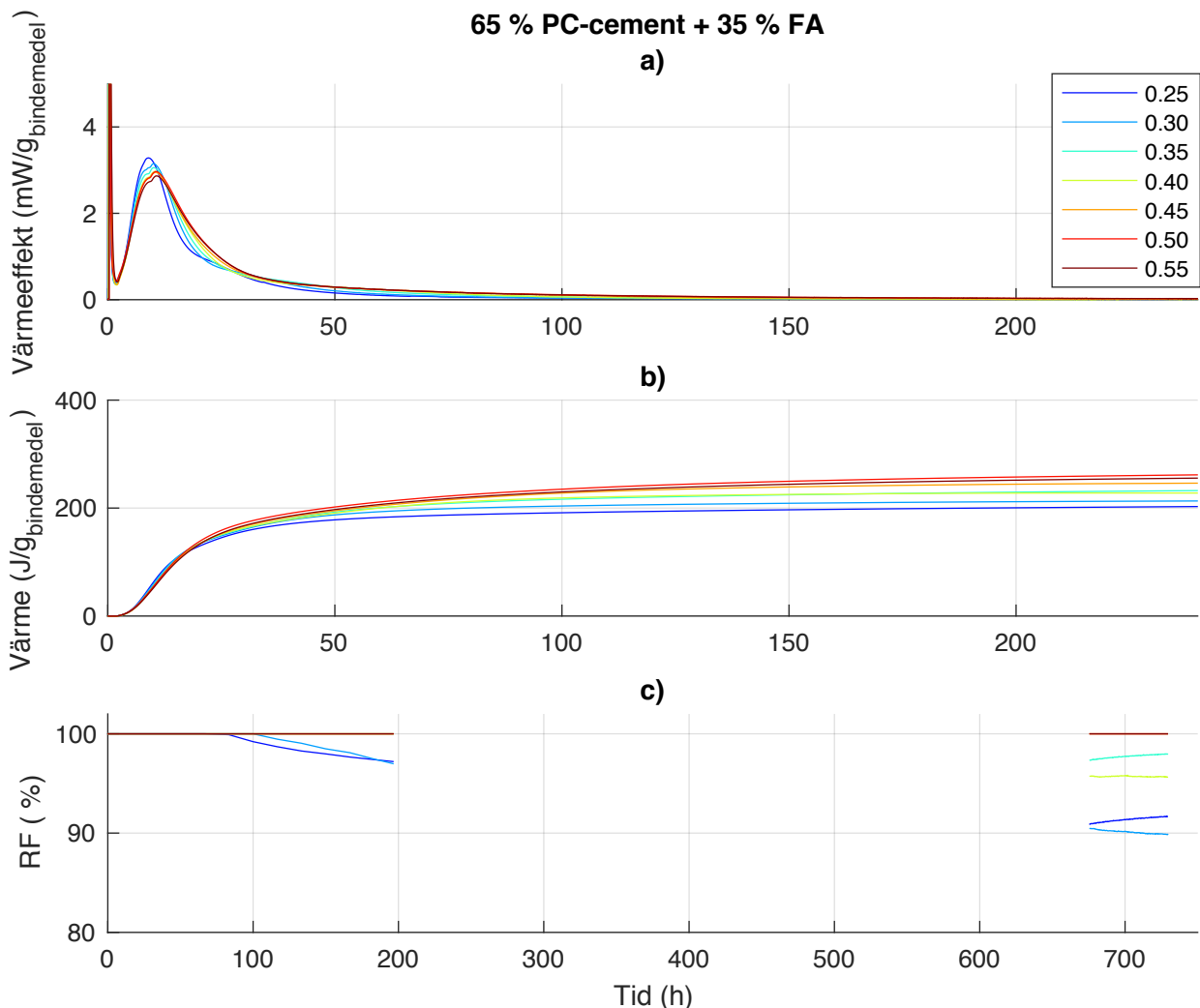
Figur 10. Värmeutveckling och RF-nivå för mätserie 5 där bindemedlet bestod av 100 % Portlandcement. Observera att det är en annan tidsaxel på delfigur c).

Resultatet från mätserie 5 där endast Portlandcement utgjorde bindemedlet i proverna ses i Figur 10. Maximal värmeutveckling uppgår till 4-5 mW per gram bindemedel. Detta stämmer bra överens med resultat från andra tester på Portlandcement [31, 44]. Delfigur två redovisar den kumulativa värmen som proven avgett, där lägst vct genererat lägst värmeenergi, varpå proven utvecklade större mängd värme med stigande vct. Detta är rimligt då lägre vct medför att hydratationen avstannar tidigare och därmed utvecklar mindre värme jämfört med proven med högre vct där mer tillgång på vatten medför att reaktionen fortskrider under en längre tid och alltså utvecklar mer värme. Resultatet av den relativa fuktigheten i proven sjunker kraftigt under de första tio dyggen, för att sedan börja på en högre startnivå efter tjugofyra dygn. Grafernas utseende skulle kunna förklaras av ett läckage i silikonmassan som täcker hålet i locket där RF-givaren förts genom. Det skulle i så fall ha medfört att fukt kan avgått ur provampullen och RF-givarna registrerat en lägre RF-nivå än vad som är korrekt. När provampullerna därefter försetts med hela, täta lock utan RF-givare fram tills uppföljningsmätningen efter tjugofyra dygn har RF-nivån ställt in sig och skulle förklara varför RF-givarna visar en högre, korrekt nivå under den senare mätningen.



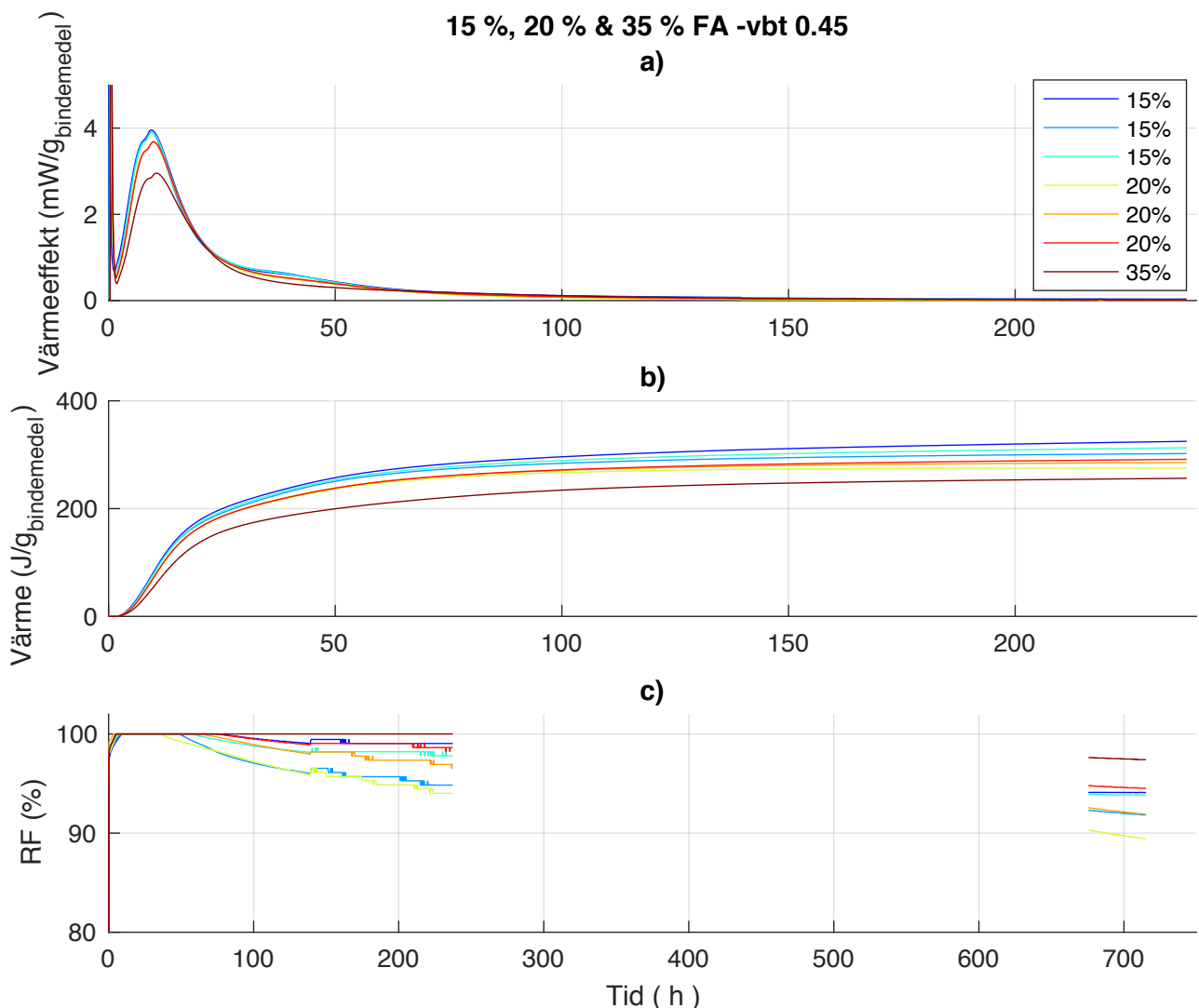
Figur 11. Värmeutveckling och RF-nivå för mätserie 1 där bindemedlet bestod av 65 % Portlandcement och 35 % flygaska. Observera att delfigur c) har en annan tidsaxel.

I Figur 11 presenteras resultatet av mätserie 1, som utgörs av prov med 35 % flygaskainblandning och med olika vbt. Vid jämförelse med kurvorna i Figur 10 är värmeutvecklingen lägre, då 35 % flygaska ersatt Portlandcementet. Även den totala värmen som utvecklas under de 10 dagarna som undersöks är lägre då man jämför den kumulativa värmen för mätserie 5 och mätserie 1. För 100 % cement ökar den kumulativa värmen mer under de femtio första timmarna, vilket är rimligt då flygaskan inte medverkar i den puzzolana reaktionen förrän efter tre till sju dagar. Utseendet på grafen stödjer påståendet att fillereffekten inte påverkar alitreaktionen nämnvärt, eftersom accelerationstoppen och den kumulativa värmen är lägre. I Figur 11 ses att högre vct medför att induktionsperioden, fas 2 blir längre och längre. Accelerationen sker efter något längre tid med stigande vct. Detta skulle kunna förklaras av teorin gällande geokemisk upplösning som tas upp i litteraturstudien. En större mängd vatten ger en utspädningseffekt och en lösning som tar längre tid att mätta och därmed längre tid innan accelerationen sker.



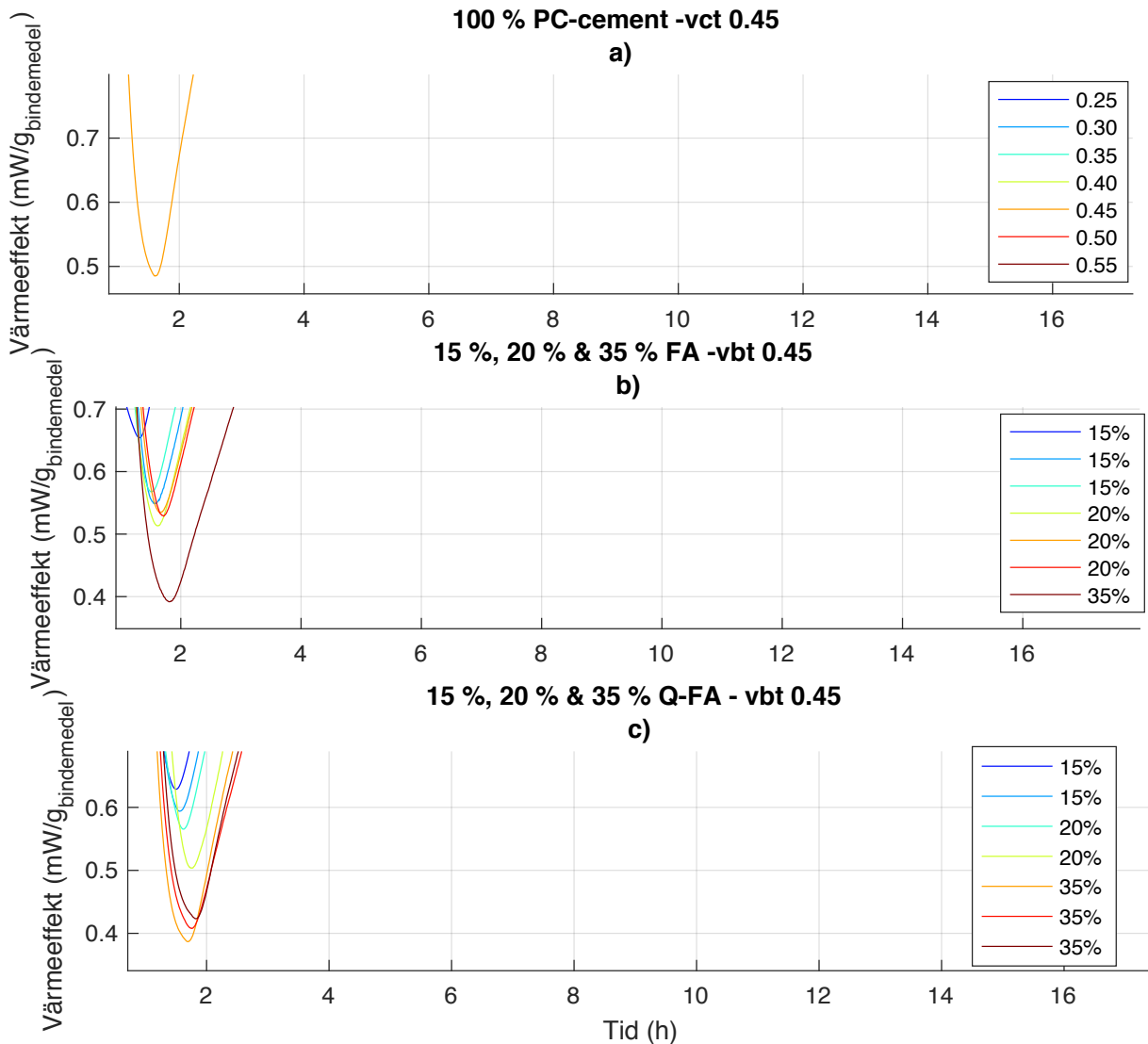
Figur 12. Värmeutvecklingen och RF-nivån för mätserie 6 där bindemedlet bestod av 65 % Portlandcement och 35 % flygaska, precis som i föregående figur. Observera att delfigur c) har en annan tidsaxel.

I Figur 12 ses resultatet av mätserie 6, som precis som Figur 11 redovisar resultatet av 65 % Portlandcement och 35 % flygaska. Resultatet från de båda mätserierna överensstämmer väl gällande värmeutveckling, men skiljer sig något gällande självuttorkning. Resultaten av mätserie 6 redovisar en i snitt 2-4 % högre RF-nivå för respektive prov jämfört med mätserie 1. Detta kan förklaras av dels att olika typer av RF-givare användes vid de olika mätserierna, dels av att noggrannheten hos RF-givarna som användes uppgår till $\pm 3-4,5\%$. I resultaten av mätserie 1 följer RF-kurvorna en förväntad följd, där lägst vbt medför lägst RF-nivå och högre vbt motsvarar högre RF-nivå. Detta kan ses i Figur 11. Men för mätserie 6 erhålls inte denna förväntade ordningsföljd. Grafen som representerar vbt 0,4 har exempelvis en lägre RF-nivå än grafen som representerar 0,35. Detta skulle kunna förklaras av läckage i provampullerna, i anslutningen mellan lock och RF-givare som tätats med silikon. Det skulle även kunna vara en indikation på att RF-givarna behöver förbättras och ges en bättre noggrannhet.



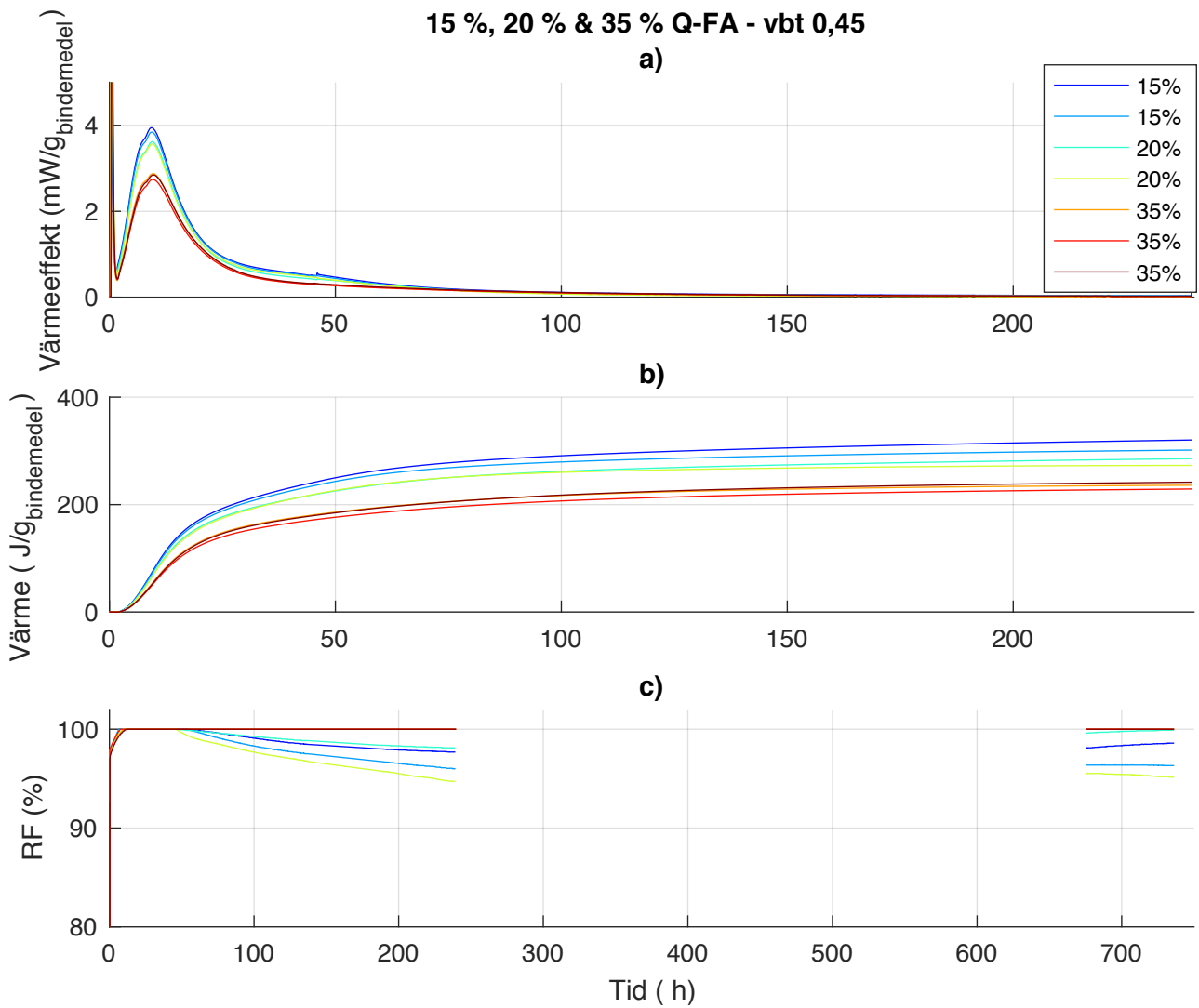
Figur 13. Värmeutveckling och RF-nivå för mätserie 3, där bindemedlet bestod av olika kombinationer av Portlandcement och flygaska, där flygaska inblandningen varierar mellan 15-35 %. Se figuren för vilka linjer som representerar vilken kombination. Observera att tidsaxeln på den delfigur c) skiljer sig från de övriga.

Figur 13 illustrerar resultaten från mätserie 3 där prover med olika flygaskainblandningar och konstant vbt 0,45, testats. Störningarna i diagrammet som redovisar RF-nivån berodde på ett tekniskt problem med loggdatorn, som begränsade upplösningen. RF-graferna följer inte heller här förväntad ordningsföljd, men spridningen i resultatet för respektive fraktion (15, 20 och 30 %) ligger inom intervallet för givarnas noggrannhet på $\pm 4,5$ %. Resultaten gällande värmeutvecklingen är desto mer logisk, där lägst mängd inblandad flygaska genererar en större värmeutveckling och kortare induktionstid. Man ser tendenser av att större mängd inblandad flygaska ger en något längre induktionstid, vilket överensstämmer med resultat från litteraturstudien. Men däremot är den inte flera timmar längre utan cirka 30 min om man jämför med provet med 100 % cement, se Figur 14. Litteraturstudien visade att det inte kunde förklaras av fillereffekt då kvartssandsinblandning inte gav samma fördröjning, vilket resultaten från dessa tester inte heller stödjer. Vid jämförelse av delfigur a), b) och c) i Figur 14 ser kvartssandsproven ut att ge samma induktionstid som flygaskaproven. En förklaring till varför induktionstiden i den aktuella studien inte förlängs lika mycket som i tidigare studier skulle kunna vara skillnaden i mängden flygaskainblandning i cementpastan. I den tidigare studien användes 50 % flygaskainblandning och i denna undersökning maximalt 35 %. Den flygaska som användes i den tidigare studien kan dessutom skilja sig från den som användes i den här undersökningen. Framförallt egenskaper som påverkar reaktiviteten hos flygaskorna kan vara en förklaring till varför resultaten inte stödjer den tidigare studien.

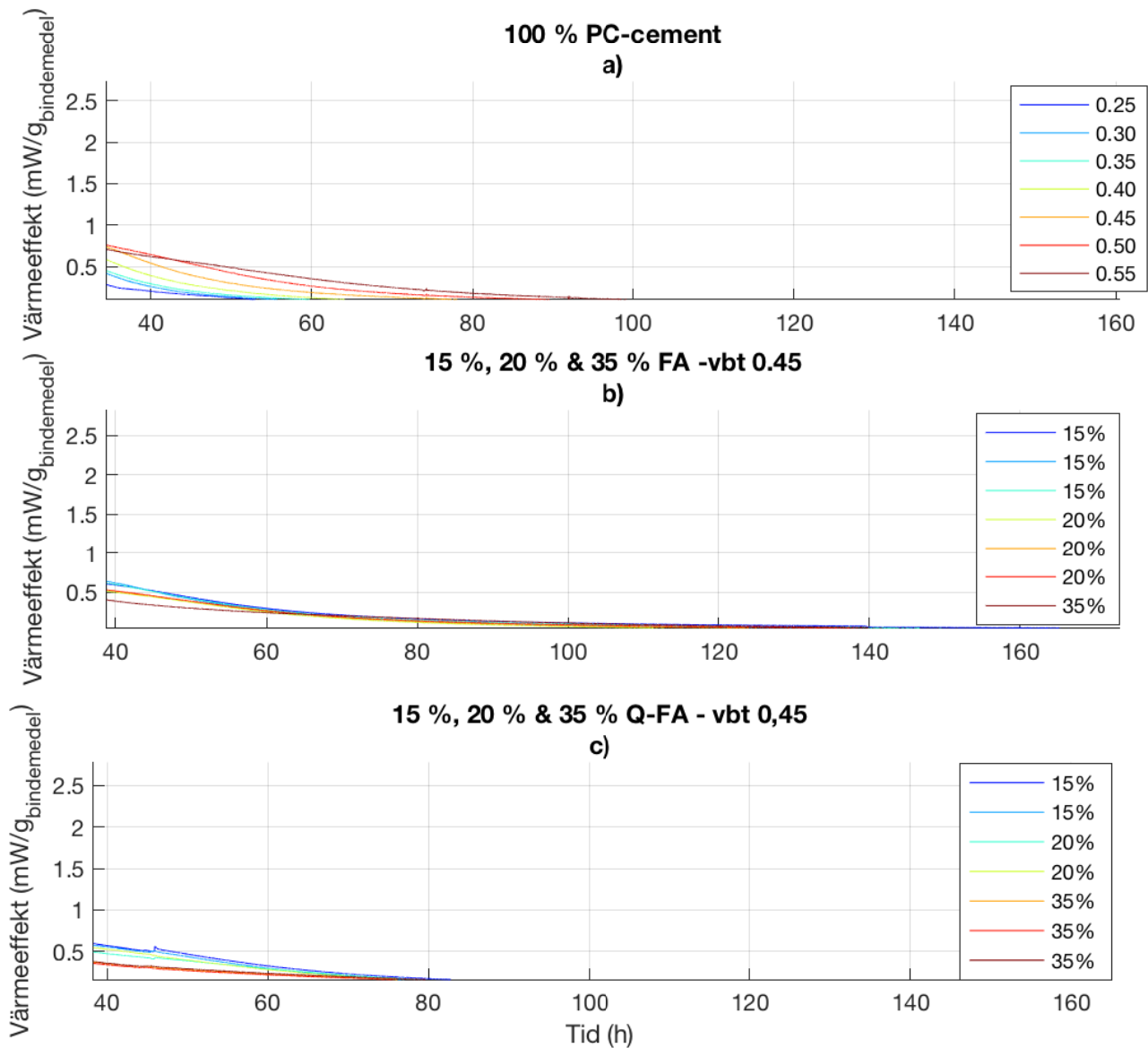


Figur 14. Jämförelse av värmeutveckling under de första timmarna av hydratationen, mellan mätserie 5 - a) 100 % PC-cement, mätserie 3- b) 15-35 % flygaskainblandning och mätserie 4- c) 15-35 % kvartssandsinblandning.

Figur 15 visar resultaten från mätserie 4 där flygaskan som tidigare blandats in som bindemedel nu ersatts av kvartssand för att undersöka skillnad mellan flygaskans fysikaliska och kemiska påverkan på cementpastaproven. Värmeutvecklingskurvorna för mätserie 3 och 4 följer varandra bra fram till cirka 40 timmar efter hydratationens start, se figur 16. Där planar värmeutvecklingen ut snabbare för kvartssandsproverna, då sanden är helt inert och den största delen av mängden cement som finns i proven reagerat vid det laget. Värmen för flygaskacementproverna fortsätter däremot att utvecklas med lågt utslag, vilket kan förklaras av flygaskans puzzolana reaktion. RF-kurvorna i Figur 15 c) följer varandra fint och i förväntad ordning, med undantag för den gula linjen i figuren. Detta förklaras av Tabell 14, där man ser att prov nr 4 i tabellen har en större viktförlust än de övriga proven. Detta tyder på en större otäthet hos den provampull och det lock med RF-sensor som använts för just det provet. Eftersom det skett ett större läckage hos det provet medför det att RF-nivån blir lägre, vilket förklarar varför den gula linjen representerar lägst RF-nivån i figuren när den borde vara placerad mellan blå-grön och orange-röda linjer.



Figur 15. Värmeutveckling och RF-nivå för mätserie 4 där bindemedlet bestod av olika kombinationer av Portlandcement och kvartssand, där inblandningsmängden av kvartssand varierar mellan 15-35 %. Se figuren för vilka linjer som representerar vilken kombination. Observera att delfigur c) har en annan tidsaxel.



Figur 16. Jämförelse av värmeutveckling 40 timmar efter hydratationens start, mellan mätserie 5 - a) 100 % PC-cement, mätserie 3- b) 15-35 % flygaskainblandning och mätserie 4- c) 15-35 % kvartssandsinblandning.

6.2 Bindetid

Resultatet av bindetidstestet ses i Tabell 12. Desto mer flygaska som ersatt cement, desto mindre vatten krävs för att nå samma konsistens som för en betong med enbart portlandcement. Desto längre tid tar det även för pastan att nå bindetiden. Detta stämmer överens med resultaten från litteraturstudien som visat på att flygaska binder till sig i princip hälften så mycket vatten som Portlandcement (54 % enligt [4]). Resultatet från även stöd från litteraturstudien gällande att det tar längre tid för hållfasthetsutvecklingen nå samma värden som det gör för cementpastor och betong med enbart cement. Däremot pekar undersökningar på att flygaskacement kan nå en högre slutlig hållfasthet, vilket kan bero på att flygaskan ger en långsammare, mer homogen strukturutveckling [7].

Tabell 12. Resultatet av bindetidstest. PC= Portlandcement, FA= flygaska.

Betongrecept	Mängd vatten (g)	Bindetid (min)
100 % PC-cement	153	110
85 % PC-cement + 15 % FA	149	135
80 % PC-cement + 20 % FA	148	140
65 % PC-cement + 35 % FA	140	160

6.3 Betongtester

6.3.1 Självuttorkning

I Tabell 11 presenteras resultatet av självuttorkningsmätningarna på dels betongproverna och dels avlästa värden från Figurerna 10-14 som korrigerats med hjälp av uppmätta kalibreringskurvor i avsnitt 6.3.1. Som kan ses i Tabell 11 överensstämmer de korrigerade värdena på betong- och cementpastaproven hyfsat bra med varandra om man tar hänsyn till att givarnas noggrannhet är $\pm 3-4,5$ %. RF-nivåerna som redovisas i Tabell 11 är uppmätta vid 28 dygns ålder (betongproverna) och vid 27 dygns ålder (cementpastaproven). Det finns tre värden från RF-mätningarna på cementpastaproven som avviker mer än de övriga från resultaten på betongproverna och dessa är markerade med en stjärna i tabellen. Dessa avvikelser kan förklaras av olika faktorer, så som av otäthet i provampullerna eller otillräcklig precision hos givarna. Korrigeringen av cementpastaprovens värden är gjord med hjälp av de uppmätta kalibreringskurvorna i avsnitt 6.3.1, vilka utgörs av samband baserade på två punkter. Korrigeringskurvorna kunde därmed haft bättre noggrannhet och kanske lett till andra bättre eller sämre överensstämmande korrigerade värden. För att vara säker på om metoden gällande självuttorkningstest på cementpastaprov verkligen fungerar måste den testas vidare. Vissa förbättringar gällande noggrannheten på givarna och anslutningen av givarna i ampullens lock bör även övervägas.

Tabell 11. Avlästa och korrigerade RF-nivåer i betongprov respektive cementpastaprov. PC= Portlandcement. FA= flygaska.

Prov	Avl. RF%	Korr. RF%	Avl. RF%	Korr. RF%
	Betong	Betong	Cementpasta	Cementpasta
100 % PC:1	90,9	90,5	95,30	90,3
100 % PC:2	89,9	90,0		
85 % PC+ 15% FA:1	91,8	91,8	94,1	92,1
85 % PC+ 15% FA:2	92,1	92,2	93,8	91,8
85 % PC +15% FA:3			91,80	88,8*
80 % PC+ 20% FA:1	92,6	92,9	94,50	92,5
80 % PC+ 20% FA:2	92,9	92,9	91,90	88,9*
80 % PC+ 20% FA:3			89,40	86,5*
65 % PC+ 35% FA:1	95,7	95,4	97,50	95,5
65 % PC+ 35% FA:2	95,6	95,6	96,50	94,5
65 % PC+ 35% FA:3			100	97

6.3.2 Hållfasthet

De hållfasthetstest som utfördes i form av tryckhållfasthetstest, där de gjutna kuberna trycktes sönder i en press gav de resultat som presenteras i Tabell 13. Testerna utfördes efter 28 dygn och visar på att en högre flygaskainblandning ger en lägre tryckhållfasthet. Trenden kan förklaras av att den puzzolana reaktionen tar fart efter först 3-7 dagar och utvecklar en låg men ihärdig värmeutveckling, sett från resultaten i Figurerna 11-13. Det krävs troligen längre tid än 28 dygn för flygskabetongproven att utveckla samma hållfasthet. Att flygskabetongen når en högre sluthållfasthet ses inte i dessa resultat men de resultat som presenterades i litteraturstudien med avseende på detta var uppmätta efter nittio dagar. Det hade därför varit intressant att komplettera undersökningen med en nittio dagars mätning.

Tabell 13. Uppmätt 28-dygn tryckhållfasthet hos betongproverna. PC= Portlandcement, FA= flygaska.

Betongrecept	Tryckhållfasthet (Mpa)	Tryckhållfasthet (Mpa)	Medelvärde (Mpa)
100 % PC-cement	63,2	61,7	62,45
85 % PC-cement +15 % FA	57,6	55,5	56,55
80 % PC-cement +20 % FA	54,1	51,5	52,8
65 % PC-cement +35 % FA	43,8	41,8	42,8

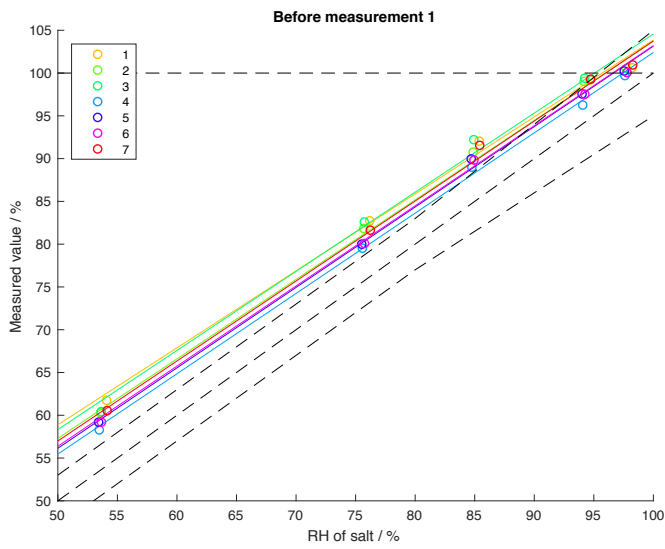
6.4 Metodens tillämpbarhet

6.4.1 Drift-beteende hos RF-givare

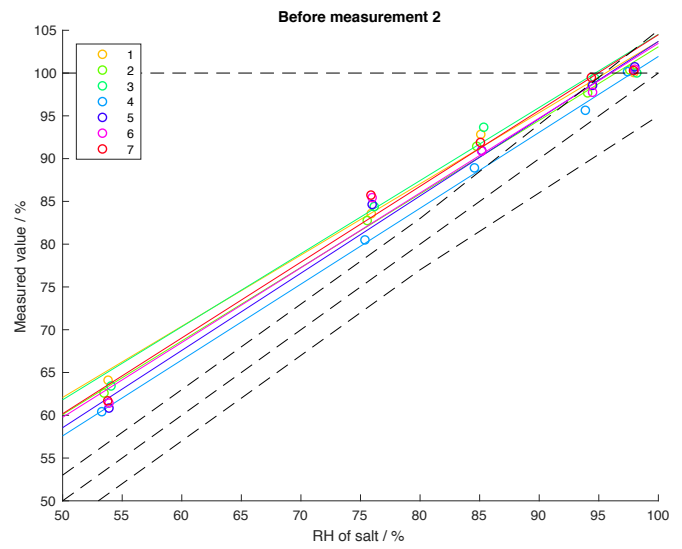
Tillverkarna av givarna, Sensirion, rapporterar om ett "drift-beteende" hos sina RF-givare då de utsätts för höga nivåer av relativ fuktighet (>80 %) under mer än 60 timmar. Sensorerna tenderar i dessa lägen att driva mot högre RF-värden än vad som speglar verkligheten [41]. Detta operativa problem uppdagades efter två mätserier.

Eftersom programmet som användes för att registrera RF-värden över tid inte kan analysera värden över 100 % RF, ges ingen information om hur uttorkningen förändras i det översta fuktintervallet då givarna driver. De givare som användes under de två första mätserierna och uppvisade driftbeteendet var av modell SHT10. För att lösa detta problem användes istället nya RF-sensorer av modellen SHT71, vilka byttes ut vid varje mätserie som återstod att undersöka. En del av sensorerna, både av modell SHT10 och SHT71, återanvändes efter att de regenererats enligt tillverkarens föreslagna metod [45]. Metoden bestod av två steg. Det första steget var att placera givarna i 80-90 °C (RF-nivå motsvarande < 5 %) i 24 h. För att uppnå detta användes ett värmeblock. Steg två innebar att placera givarna i ett klimat med 20-30 °C och en RF-nivå > 74 % i 48 h. Detta uppnåddes i en värmebox med saltlösning av NaCl som ger en RF-nivå på 75,5 %. Både att använda oanvända sensorer (modell SHT71) och att regenerera använda sensorer (modell SHT71 samt SHT10) fungerade bra. Drift-beteendet kvarstod men blev hanterbart genom att kalibrering före och efter mätserierna genomfördes. Problemet var tidigare att driftbeteendet fanns redan innan mätserien startades och att det förvärrades för varje mätserie. Problemet löstes då sensorerna efter utbyte eller regenerering inte uppvisade drift innan mätserierna startades och driften därigenom

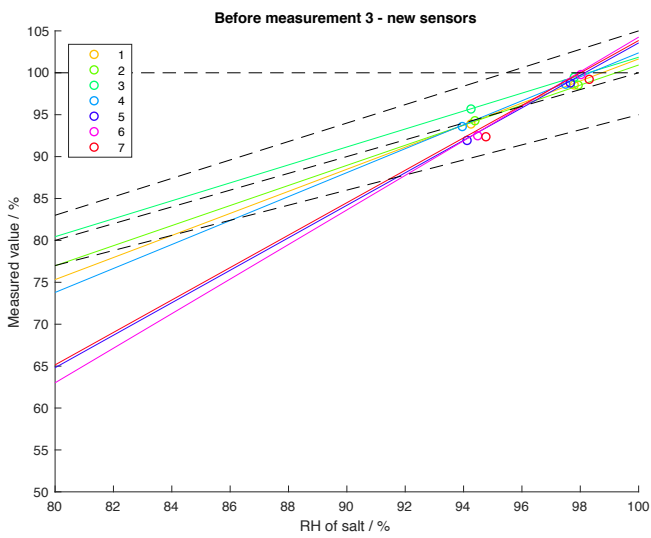
kunde mätas och tas hänsyn till vid utvärdering av RF-kurvorna som presenteras under avsnitt 6.1.



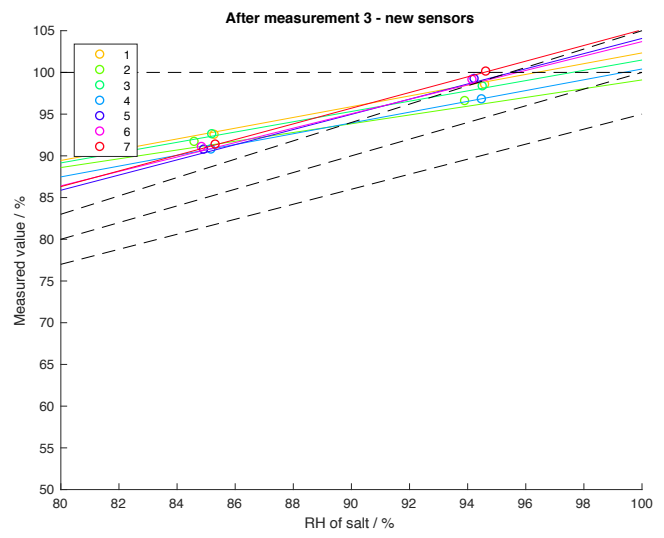
Figur 17. Kalibrering av sensorer före mätserie 1.



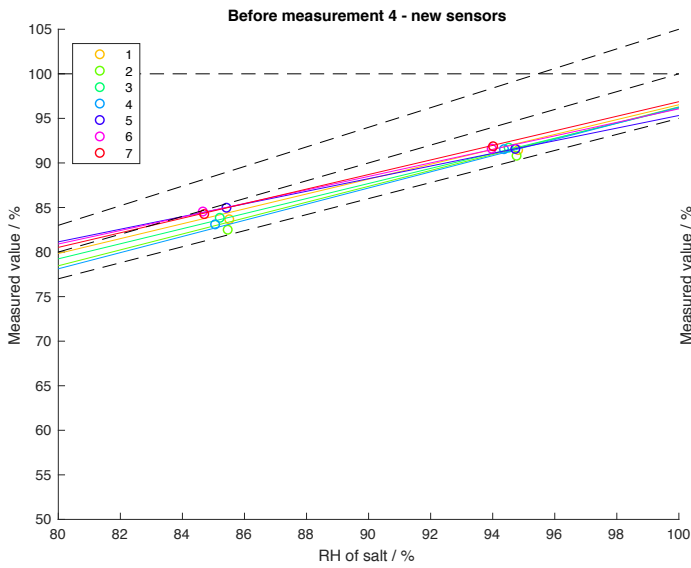
Figur 18. Kalibrering av sensorer före mätserie 2. Används för korrektion av RF-värden för mätserie 1.



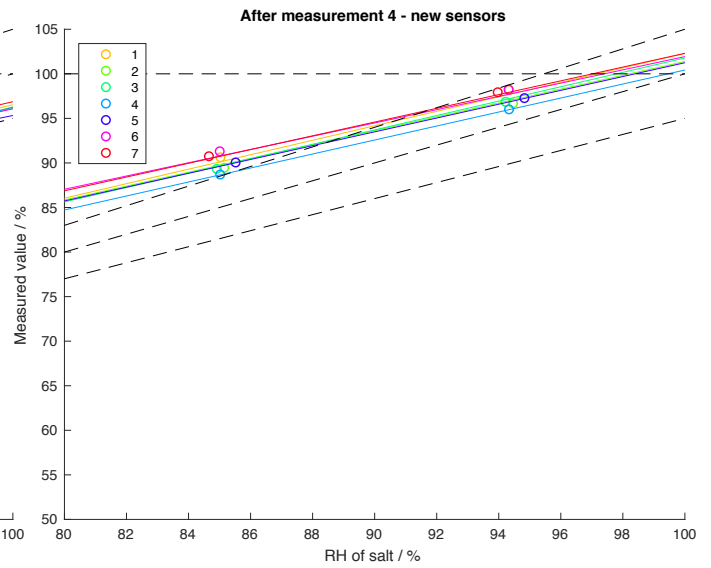
Figur 19. Kalibrering av nya sensorer före mätserie 3.



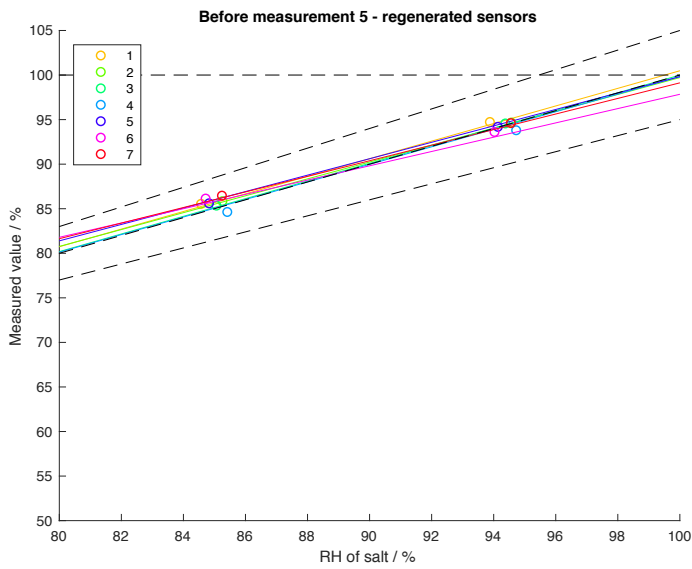
Figur 20. Kalibrering av nya sensorer efter mätserie 3. Används för korrektion av RF-värden för mätserie 3 och uppföljningsmätning av mätserie 1.



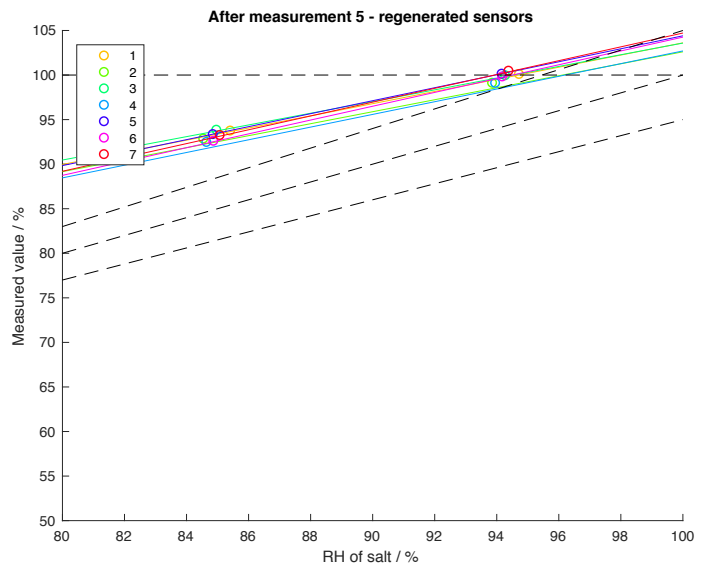
Figur 21. Kalibrering av nya sensorer före mätserie 4.



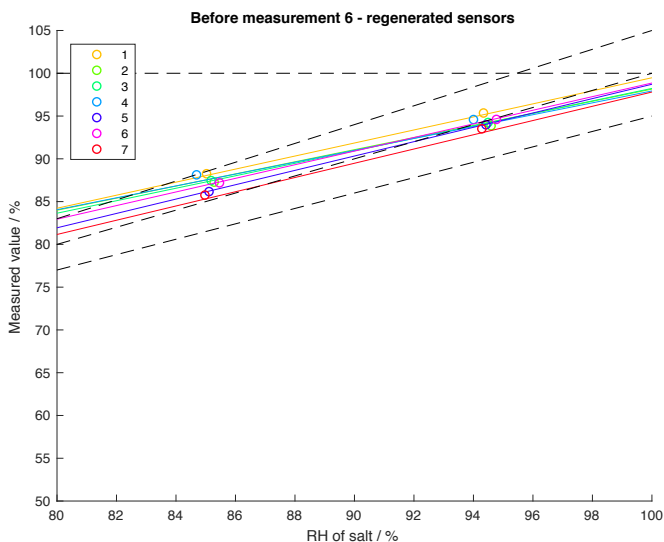
Figur 22. Kalibrering av nya sensorer efter mätserie 4. Används för korrektion av RFvärden för mätserie 4 och uppföljningsmätning av mätserie 3.



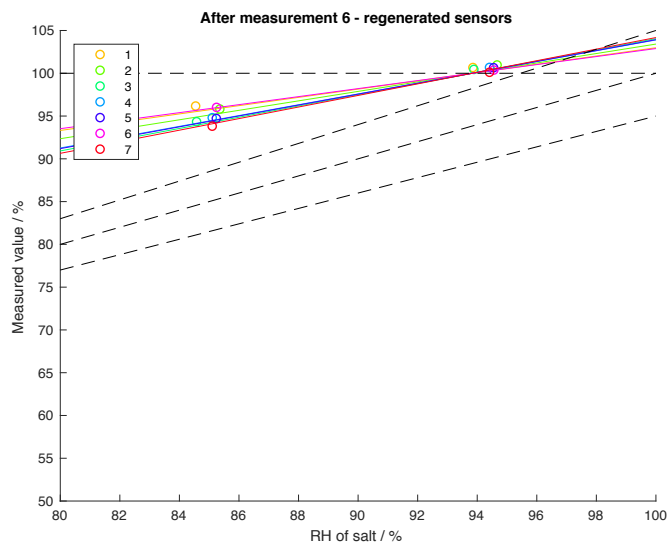
Figur 23. Kalibrering av regenererade sensorer före mätserie 5.



Figur 24. Kalibrering av regenererade sensorer efter mätserie 5. Används för korrektion av RF-värden för mätserie 5 och uppföljningsmätning av mätserie 4.



Figur 25. Kalibrering av regenererade sensorer före mätserie 6.



Figur 26. Kalibrering av regenererade sensorer efter mätning 6. Används för korrektion av RF-värden för mätserie 6 och uppföljningsmätning av mätserie 5.

Kalibreringsdiagrammen, Figur 17-26, visar inom vilken zon värdena från kalibreringen ska befinna sig. Zongränserna utgörs av svarta streckade linjer. Resultatet från kalibreringen av de sju givarna som användes under respektive mätserie presenteras i form av färgade linjer. Övergripande kan ses att sensorerna ger lika värden. I Figur 17 och 18 ses det så kallade "drift-beteendet" hos de första sensorerna (modell SHT10) som användes. Resultaten från mätserie 2 presenteras ej eftersom "drift-beteendet" hos givarna blev allt kraftigare och det blev svårt att tolka RF-mätningarna samtidigt som pålitligheten blev sämre. Figur 19, 21, 23 och 25 visar på att nya sensorer (modell SHT71) och sensorer som regenererats (modell SHT71 samt SHT10) ligger inom gränsvärdena och har bra precision vad gäller korrekt RF-värde, innan mätserierna startas. I Figur 20, 22, 24 och 26 illustreras vidare att samtliga sensorerna uppvisar ett drift-beteende. De kalibrerades med bra överensstämmelse till verkligheten, men driver mot högre RF-värde under mätseriens gång. Kalibreringsresultaten visar att regenererade sensorer kalibreras med samma precision som nya sensorer, men utseendet på graferna i Figur 24 och 26 antyder att regenererade sensorer uppvisar något större drift-beteende jämfört med nya sensorer. Detta faktum har liten betydelse då man kalibrerar före och efter en mätserie, eftersom man då kan se hur omfattande driften är och kan ta hänsyn till detta vid utvärdering och analys av resultaten gällande RF-kurvor under avsnitt 6.4.1.

Som ses i Figur 19 – 26 kalibrerades sensorerna som användes under mätserie 3-6 endast mot två kalibreringssalter. Anledningen till detta är att eftersom sensorerna byttes ut vid varje mätserie (efter mätserie 2) krävdes ett mer omfattande kalibreringsarbete. För att fortfarande kunna hålla tidplanen för projektet kalibrerades sensorerna därefter endast i två salter. De salter som valdes motsvarar en hög RF-nivå eftersom RF-nivåerna i cementpasta under tidig ålder främst har höga värden.

6.4.2 Täta behållare

För att undersöka tätheten hos provampullerna som användes i studien och hur mycket fukt som avgavs till omgivningen under tiden mätningarna pågick, kontrollerades vikten på samtliga prov under en mätserie. Vikten kontrollerades direkt efter blandning av prov, efter tio dagar då den kontinuerliga mätningen avslutats och efter tjugosju dygn. Viktförlusten i enhet procent redovisas i Tabell 14. Som kan ses i tabellen varierar den kraftigt och uppgår som max till 1 %. Viktförlusten kan troligtvis förklaras av den silikonmassa som används som tätningsmedel kring det hål i locket där RF-givaren förts genom. Bevisligen kan detta förbättras och ses som utvecklingspotential hos metoden och utrustningen.

Tabell 14. Viktförlust hos provkroppar i mätserie 4.

Prov nr	m, start (g)	m, 10 dygn (g)	m, 27 dygn (g)	Viktförlust, 10 dygn (%)	Viktförlust, 27 dygn (%)
1	7,993	7,991	7,985	0,025	0,100
2	8,014	7,983	7,97	0,386	0,549
3	7,998	7,985	7,976	0,162	0,275
4	8,003	7,946	7,923	0,712	0,999
5	7,984	7,945	7,929	0,488	0,688
6	7,982	7,955	7,94	0,338	0,526
7	7,996	7,975	7,965	0,262	0,387

6.5 Sammanfattning

Syftet med studien var att undersöka hur självuttorkning och värmeutveckling hos betong- och cementpastaprov påverkas av att en del av cementet ersätts av flygaska. Syftet var även att undersöka om en ny metod för samtidig RF-mätning och värmemätning på cementpastaprov fungerar och ger tillförlitliga svar. Det gjordes både en litteraturstudie och laborativa tester. Det eftersträvades att kunna ge svar på vad fillereffekt, nukleeringseffekt och dispersion är. Vidare även hur den kemiska balansen i porlösningen och vilka effekter som kan förklaras av flygaskans kemiska deltagande i reaktioner respektive fysikaliska medverkan i cementpastan. Nedan följer en sammanfattning av vad litteraturstudien samt de laborativa testerna lett fram till för resultat.

Hur påverkas den kemiska balansen i porlösningen?

Enligt litteraturstudien påverkas den kemiska balansen på olika sätt av olika flygaskor, men generellt minskar förekomsten av kalciumjoner samtidigt som förekomsten aluminiumjoner ökar. Flygaskainblandning medför även att det bildas längre silikatkedjor i C-S-H-gelen, vilket gör att det finns utrymme för fler aluminiumjoner att bindas till kedjorna, jämfört med när enbart Portlandcement hydratiserar.

Vad är fillereffekt, dispersion och nukleering?

Fillereffekt beskrivs som ett samlingsbegrepp för de fysikaliska effekter som tillsatsmaterial har på hydrationsprocessen. En av de fysikaliska effekterna är

dispersion, vilket innebär att tillsatsmaterialet ger en utspädningseffekt där antalet cementkorn blir färre i förhållande till mängden vatten jämfört med när bindemedlet består av 100 % Portlandcement. En annan fysikalisk effekt är nukleering, som innebär att flygaskans partiklar medför fler platser där reaktionen kan ske.

Hur påverkas hydratationsprocessen fysikaliskt av flygaskan?

I likhet med resultat från litteraturstudien förhöjdes inte accelerationstoppen (fas 3), något av flygaska- eller kvartssandsinblandning. Den minskade istället med andelen inblandad flygaska och sand. Men däremot erhöles den andra toppen, som motsvaras av en snabb ettringitbildning för både mätserien med kvartssand och mätserierna med flygaska. Eftersom effekten erhöles för både inert material och flygaska konstateras det vara en fysikalisk effekt av tillsatsmaterialet. Flygaskan som användes i denna studie har en lägre specifik yta än cementet som användes då värdet på d₅₀ (siktstorleken som 50 % av materialets partiklar passerat) är högre. Flygaskan består därmed av en hel del större partiklar jämfört med partikelstorleken hos cementet. En flygaska med mindre partiklar och därmed större specifik yta hade troligtvis gett en större, tydligare fillereffekt än vad flygaskan som användes i projektet gjorde.

Hur påverkas hydratationsprocessen kemiskt av flygaskan?

Den uppmätta värmeutvecklingen verkar stödja teorin om flygaskans puzzolana reaktion. I resultaten från de laborativa undersökningarna med kalorimetri ses en indikation på att den puzzolana reaktionen tar vid efter cirka 70-80 timmar. Då avtar värmeutvecklingen för proverna med 100 % Portlandcement i princip helt och hållet. Proverna med flygaskacement planar ut långsammare och stannar av på ett värde som är lågt, men högre än noll, vilket är en effekt av flygaskans puzzolana reaktion. Detta stödjer resultaten från litteraturstudien om att det tar cirka 3 - 7 dagar innan man kan se effekt av flygaskans medverkan.

Däremot verkar inte den uppmätta värmeutvecklingen stödja teorin om att flygaska medför en längre induktionstid (fas 2) jämfört med Portlandcement. I de uppmätta resultaten ses maximalt en halvtimme längre induktionstid vid 35 % flygaskainblandning. Enligt teorin som presenteras i litteraturstudien skulle aluminiumföreningar i flygaskan reagera med fria kalciumjoner i lösningen och därmed minska kalciumkoncentration och vidare retardera hydratationsförloppet. I Tabell 3 ses att den flygaska som använts i detta projekt består till en fjärdedel av aluminiumföreningar, vilket är betydligt mer än portlandcementets 4,4 %. Trots den ökade förekomsten av aluminium ses ingen nämnbar fördröjning av induktionstiden, resultaten ger därmed inte stöd åt teorin i litteraturstudien.

Hur påverkar flygaska självuttorkningen?

Den uppmätta självuttorkningen verkar stödja teorin om att mindre vatten binds när flygaskan reagerar jämfört med Portlandcementet. Detta då resultaten visar att RF-nivån är högre i flygaskacementproven jämfört med för de prov med 100 % portlandcement. Men att mindre vatten har bundits skulle även kunna förklaras av att flygaskan reagerar mycket långsammare och under de tio dygn som mätningarna pågått har dessutom endast en del av flygaskan reagerat. Mätningmetoden måste utvecklas och förfinas innan man kan dra säkra slutsatser. Resultaten stöds dock av bindetidstestet som genomfördes på betongproven, som pekar på att större inblandning av flygaska kräver

mindre mängd vatten för att nå samma konsistens som för betong med enbart portlandcement.

Hur påverkar flygaskan hållfasthet och hållfasthetsutvecklingen?

Den uppmätta hållfastheten för betongproven gav inte stöd för teorin som presenterats i litteraturstudien om att flygaskainblandning kan ge högre slutlig hållfasthet jämfört med Portlandcement, efter 28 dygn. Det hade varit intressant att göra liknande test på en flygaska av klass C, som är mer reaktiv än den klass F flygaska som använts i detta projekt. Det hade vidare varit intressant att göra en uppföljningsmätning efter 90 dagar, då hade kanske de uppmätta resultaten gett stöd åt teorin, eftersom större andel av flygaskan reagerat vid den tidpunkten.

Hur väl överensstämmer resultat från RF-mätning på cementpasta med resultat från RF-mätningar på betong?

Metoden för att mäta RF-nivå på cementpastaprov i samband med mätning av värmeutveckling måste förfinas och testas vidare för att säkert kunna säga om den är pålitlig eller inte. Men de resultat som jämfördes stämde i de flesta fall bra överens, med hänsyn till givarnas noggrannhet som motsvarade $\pm 3-4,5\%$.

Iakttagelse från de laborativa mätningarna

I samtliga resultat från de mätserier som genomfördes ses att lägre vbt accelererar hydratiseringsprocess. Det innebär att teorin som tas upp i litteraturstudien om att en högre alkalikoncentration leder till en snabbare övergång till en vattenfri fas stöds av resultaten i denna undersökning. Hydratationsprocessen stannar även av tidigare än vid lägre vbt, vilket stödjer teorin i litteraturstudien om att mindre utrymme att växa och mindre tillgång på vatten ger en lägre hydratationsgrad.

7 Slutsatser

- Flygaska medför att koncentrationen av kalciumjoner minskar samtidigt som koncentrationen av aluminiumjoner ökar, i lösningen som bildas av cement och blandningsvatten
- Flygaska medför att strukturen på C-S-H-gelen som bildas i den puzzolana reaktionen förändras och innehåller fler silikat- och aluminiumföreningar
- Fillerseffekt främjar hydratationen och motsvaras av dispersion samt nukleeringseffekt. Dispersion innebär att cementet späds ut i förhållande till vattenmängden och nukleeringseffekt att flygskapartiklarna ger cementet och vattnet fler platser att reagera på
- Flygaskan som användes i detta projekt ger ingen tydlig fillerseffekt
- En kemisk inverkan från flygaskan på hydrationsprocessen motsvaras den puzzolana reaktionen
- Effekten av den puzzolana reaktionen ses först efter tre till sju dygn
- Flygaska tenderar att kunna ge en längre induktionstid, men hur lång verkar vara förknippat med egenskaperna hos flygaskan som används i studien
- Flygaskacement verkar binda mindre vatten än Portlandcement
- Hållfasthetsutvecklingen sker långsammare för flygskacement jämfört med för Portlandcement, under de första veckorna efter hydratationens start
- I de tester som genomfördes sågs inga tecken på en högre slutlig hållfasthet hos flygskacementproverna, vid 28 dygns ålder
- Metoden för samtidigt RF-mätning och värmeutvecklingsmätning på cementpastaprov tenderar att kunna ge liknande resultat som dagens metod för RF-mätning på betongprov
- Metoden bör testas vidare och förbättras gällande noggrannhet på givare och anslutning mellan givare och provampull
- Resultaten från de laborativa testerna på cementpastaprov visar att lägre vbt tenderar att ge en lägre hydrationsgrad, att hydratationen stannar av fortare. Detta indikerar att teorin gällande att hydratationen styrs av utrymme för hydrationsprodukter att växa på samt vattentillgången skulle kunna stämma

8 Fortsatta studier

För att öka kunskapen om hur självuttorkning och hydratation påverkas av olika kombinationer av cement och tillsatsmaterial så måste fler undersökningar göras inom detta område. Olika flygaskor måste testas med olika cementsorter. Framförallt med fokus på hur egenskaper hos flygaskan såsom specifik yta och glödförlust påverkar reaktiviteten och den porositet som betongen kommer få. Andra tillsatsmaterial såsom silikastoft och slagg borde undersökas, då de också är restprodukter från olika industrier. Det hade därför varit intressant att se om det finns liknande effekter på betongens egenskaper när de tillsatsmaterialen används. På grund av dagens höga produktionstakt borde även undersökningar vid olika temperaturer genomföras, för att kunna erhålla kunskap om hur självuttorkning och hydratation påverkas av härdningstemperatur. Detta eftersom man i dagsläget bygger året om och exempelvis vinterhalvåret medför kallare temperatur.

För att med säkerhet kunna svara på om metoden som använts i projektet är en pålitlig metod bör även flera betongtester göras och därmed fler jämförelser mellan resultat från cementpasta prov och betongprov. Resultaten som redovisats i denna rapport antyder dock att metoden skulle kunna vara tillämpbar om den utvecklas och förbättras gällande läckage hos provampuller och precision hos givare. Då denna metod hade sparat mycket tid och resurser för branschen att använda bör detta utredas vidare.

9 Referenser

- [1] J. Silfwerbrand, "Betonghandbok. Material. D. 1, Delmaterial samt färsk och hårdnande betong," Solna: Svensk byggtjänst, 2017, pp. 17-30.
- [2] M. Emborg, C. A. Carlsson, and J.-E. Jonasson, "Betonghandbok. Material. D. 1, Delmaterial samt färsk och hårdnande betong," 3 ed. Solna: Svensk byggtjänst, 2017, pp. 327-329.
- [3] G. Fagerlund, "Betonghandbok. Material. D. 1, Delmaterial samt färsk och hårdnande betong," 3 ed. Solna: Svensk byggtjänst, 2017, pp. 391-446.
- [4] K. De Weerd, M. Ben Haha, G. Le Saout, K. O. Kjellsen, H. Justnes, and B. Lothenbach, "The effect of temperature on the hydration of composite cements containing limestone powder and fly ash," *Materials and Structures*, vol. 45, no. 7, pp. 1101-1114, 2012.
- [5] C. Ljungkrantz, G. Möller, and N. Petersons, "Betonghandbok. Material," 2 ed. Solna: Svensk byggtjänst, 1997, pp. 1-3.
- [6] P. G. Burström, *Byggnadsmaterial : uppbyggnad, tillverkning och egenskaper*, 2. uppl ed. Lund: Studentlitteratur, 2007.
- [7] I. Löfgren, "Betonghandbok. Material. D. 1, Delmaterial samt färsk och hårdnande betong," 3 ed. Solna: Svensk byggtjänst, 2017, pp. 142-168.
- [8] S. Mindess and J. F. Young, *Concrete* (Prentice-Hall international series in civil engineering and engineering mechanics, 99-0522070-4). Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 1981.
- [9] N. Johansson and I. Löfgren, "Betonghandbok. Material. D. 1, Delmaterial samt färsk och hårdnande betong," 3 ed. Solna: Svensk byggtjänst, 2017, pp. 97-118.
- [10] S.-E. Johansson, "Betonghandbok. Material. D. 1, Delmaterial samt färsk och hårdnande betong," 3 ed. Solna: Svensk byggtjänst, 2017, pp. 31-68.
- [11] S.-E. Johansson, "Cement," in *Betonghandbok. Material*, C. Ljungkrantz, G. Möller, and N. Petersons, Eds. 2 ed. Solna: Svensk byggtjänst, 1994, pp. 33-69.
- [12] E. R. Ylmén, "Early Hydration of Portland Cement," Doctoral Thesis, Chalmers University of Technology, Göteborg, 2013.
- [13] G. Xu, Q. Tian, J. Miao, and J. Liu, "Early-age hydration and mechanical properties of high volume slag and fly ash concrete at different curing temperatures," *Construction and Building Materials*, Article vol. 149, pp. 367-377, 9/15/15 September 2017 2017.
- [14] H. F. W. Taylor, *Cement chemistry*. London: Thomas Telford, 1997.
- [15] A. Xu, *Structure of hardened cement-fly ash systems and their related properties* (Doktorsavhandlingar vid Chalmers tekniska högskola. Ny serie: 899). Göteborg : Division of Building Materials, Chalmers University of Technology, 1992, 1992.
- [16] K. W. Day, *Concrete mix design, quality control and specification*. London: Taylor & Francis, 2006.
- [17] C. Ljungkrantz, G. Möller, and N. Petersons, "Betonghandbok. Material," 2 ed. Solna: Svensk byggtjänst, 1997, p. 8.
- [18] G. Fagerlund, "Betonghandbok. Material. D. 1, Delmaterial samt färsk och hårdnande betong," 3 ed. Solna: Svensk byggtjänst, 2017, pp. 397-446.
- [19] K. L. Scrivener, P. Juilland, and P. J. M. Monteiro, "Advances in understanding hydration of Portland cement," *Cement and Concrete Research*, Review Article vol. 78, no. Part A, pp. 38-56, 12/1/December 2015 2015.

- [20] O. Linderoth, "Binding of Moisture in fly ash blended Portland cement paste and mortar - impact of replacement level and curing temperature," *Building Material*, Lunds University, Lund: Division of Building Materials, Lunds tekniska högskola, 2018, 2018.
- [21] P. Juilland, E. Gallucci, R. Flatt, and K. Scrivener, "Dissolution theory applied to the induction period in alite hydration," *Cement and Concrete Research*, vol. 40, no. 6, pp. 831-844, 2010/06/01/ 2010.
- [22] J. W. Bullard *et al.*, "Mechanisms of cement hydration," *Cement and Concrete Research*, Review Article vol. 41, pp. 1208-1223, 1/1/2011 2011.
- [23] A. Kumar, S. Bishnoi, and K. L. Scrivener, "Modelling early age hydration kinetics of alite," *Cement and Concrete Research*, vol. 42, no. 7, pp. 903-918, 2012/07/01/ 2012.
- [24] S. Bishnoi and K. L. Scrivener, "Studying nucleation and growth kinetics of alite hydration using μic ," *Cement and Concrete Research*, Article vol. 39, pp. 849-860, 1/1/2009 2009.
- [25] W. Pei-ming and L. Xian-ping, "Effect of temperature on the hydration process and strength development in blends of Portland cement and activated coal gangue or fly ash," *Journal of Zhejiang University Science A*, vol. 12, no. 2, pp. 162-170, 2011.
- [26] M. Narmluk and T. Nawa, "Effect of fly ash on the kinetics of Portland cement hydration at different curing temperatures," *Cement and Concrete Research*, Article vol. 41, pp. 579-589, 1/1/2011 2011.
- [27] L. Wadsö, F. Winnefeld, K. Riding, and P. Sandberg, "A practical guide to microstructural analysis of cementitious materials," in *Calorimetry*, K. Scrivener, R. Snellings, and B. Lothenbach, Eds. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2016, pp. 37-74.
- [28] A. Schoöler, B. Lothenbach, F. Winnefeld, M. Ben Haha, M. Zajac, and H. M. Ludwig, "Early hydration of SCM-blended Portland cements: a pore solution and isothermal calorimetry study," *Cement and Concrete Research*, vol. 93, pp. 71-82, 2017.
- [29] Q. Zeng, K. Li, T. Fen-chong, and P. Dangla, "Determination of cement hydration and pozzolanic reaction extents for fly-ash cement pastes," *Construction and Building Materials*, Article vol. 27, pp. 560-569, 1 Januari 2012.
- [30] Z. Chen and C. S. Poon, "Comparative studies on the effects of sewage sludge ash and fly ash on cement hydration and properties of cement mortars," *Construction and Building Materials*, Article vol. 154, pp. 791-803, 15 November 2017.
- [31] F. Deschner *et al.*, "Hydration of Portland cement with high replacement by siliceous fly ash," *Cement and Concrete Research*, Article vol. 42, pp. 1389-1400, 10/1/October 2012 2012.
- [32] G. Baert, S. Hoste, G. De Schutter, and N. De Belie, "Reactivity of fly ash in cement paste studied by means of thermogravimetry and isothermal calorimetry," *Journal of Thermal Analysis & Calorimetry*, Article vol. 94, no. 2, pp. 485-492, 2008.
- [33] X.-Y. Wang and H.-S. Lee, "Modeling of hydration kinetics in cement based materials considering the effects of curing temperature and applied pressure," *Construction and Building Materials*, vol. 28, no. 1, pp. 1-13, 2012/03/01/ 2012.
- [34] A. Scott and M. G. Alexander, "Effect of supplementary cementitious materials (binder type) on the pore solution chemistry and the corrosion of steel in alkaline

- environments," *Cement and Concrete Research*, Article vol. 89, pp. 45-55, 11/1/November 2016 2016.
- [35] A. Vollpracht, B. Lothenbach, R. Snellings, and J. Haufe, "The pore solution of blended cements: A review," *Materials and Structures*, vol. 49, no. 8, pp. 3341-3367, 2016.
- [36] L. Wadsö and M. Arndt, "An international round robin test on isothermal (conduction) calorimetry for measurement of three-day heat of hydration of cement," *Cement and Concrete Research*, Article vol. 79, pp. 316-322, 1/1/January 2016 2016.
- [37] L. Wadsö, "Operational issues in isothermal calorimetry," *Cement and Concrete Research*, Article vol. 40, pp. 1129-1137, 1/1/2010 2010.
- [38] ASTM International. (2018, January 23). *Standard Test Method for Measurement of Heat of Hydration of Hydraulic Cementitious Materials Using Isothermal Conduction Calorimetry*. Available: <https://www.astm.org/Standards/C1702.htm>
- [39] RBK, "Manual- Fuktmätning i betong," 2017-09-07 2017, Available: http://www.rbk.nu/UserFiles/Fuktmatningsmanualen/Flik_2_ver6.pdf
- [40] ROTRONIC AG. (2018, 7 Februari, 2018, 7 Februari). *The capacitive humidity sensor- How it works & attributes of the uncertainty budget*. Available: https://www.rotronic.com/en-ch/humidity_measurement-feuchtemessung-mesure_de_l_humidite/capacitive-sensors-technical-notes-mr/
- [41] Sensirion AG, "Sensors Specification Statement," 1.0, 2010.
- [42] Sensirion AG. (2018, 2 April, 2018, 2 April). *Digital Humidity Sensor SHT7x (RH/T)*. Available: <https://www.sensirion.com/en/environmental-sensors/humidity-sensors/pintype-digital-humidity-sensors/>
- [43] L. Greenspan, "Humidity Fixed Points of Binary Saturated Aqueous Solutions," *National Bureau of Standards-A. Physics and Chemistry*, vol. 81, no. Part A, pp. 89-96, January/1977 1977.
- [44] S. Dittrich, J. Neubauer, and F. Goetz-Neunhoeffler, "The influence of fly ash on the hydration of OPC within the first 44h—A quantitative in situ XRD and heat flow calorimetry study," *Cement and Concrete Research*, vol. 56, pp. 129-138, 2014/02/01/ 2014.
- [45] Sensirion AG, "Testing Guide," 2010.