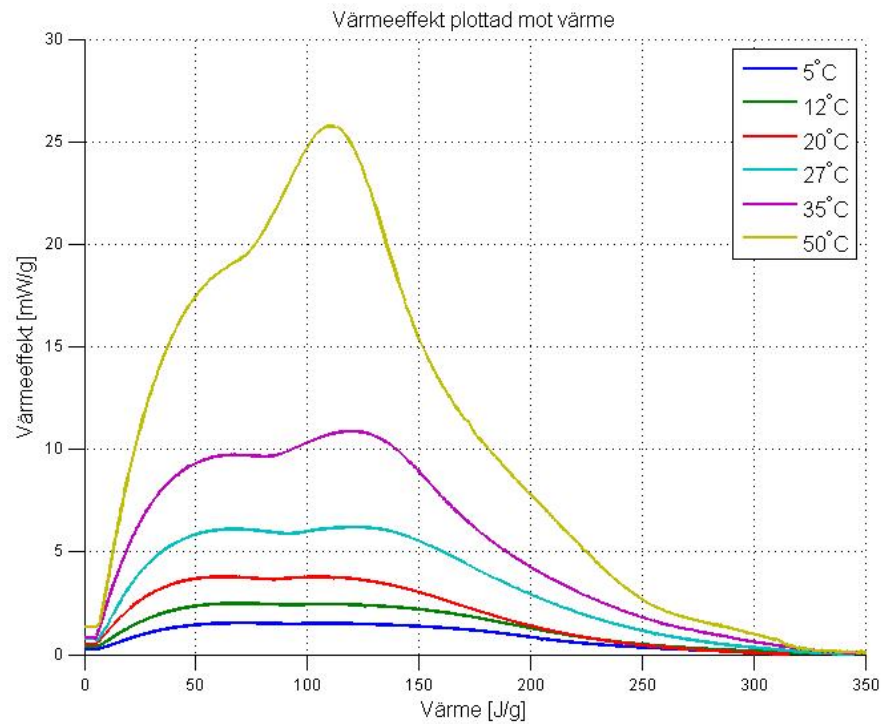


Temperaturberäkningar i härdande betongkonstruktioner med indata från isoterm kalorimetri



Minni Flemark

Copyright © Minni Flemark, 2017

Institutionen för Bygg- och Miljöteknologi,
Avdelningen för Byggnadsmaterial, Lunds Tekniska Högskola, Lund

ISRN LUTVDG/TVBM-17/5110-SE (1-55)

ISSN 0348-7911

Lunds Tekniska Högskola

Institutionen för Bygg- och Miljöteknologi

Byggnadsmaterial

Box 118

SE-221 00 LUND

<http://www.byggnadsmaterial.lth.se>

Förord

Denna rapport är en del av ett examensarbete på civilingenjörsutbildningen Väg- och Vattenbyggnad vid Lunds Tekniska Högskola. Examensarbetet skrevs för avdelningen för Byggnadsmaterial tillsammans med avdelningen för Byggnadsmekanik. Projektet har handledts av Lars Wadsö och examinerats av Katja Fridh. Arbetet har bestått av dels en litteraturstudie och dels en laborativ del, vilken genomfördes på LTH i avdelningens laboratorium.

Jag vill tacka min handledare Lars Wadsö för all praktiskt hjälp och för dina insatser som bollplank under arbetets gång. Vidare vill jag även tacka Oskar Linderoth, Bengt Nilsson och Stefan Backe från Avdelningen för Byggnadsmaterial för deras hjälp vid arbete i LTH:s laboratorium, samt John Mac, Jonas Lindeman och Ola Dahlblom för deras arbete med utvecklingen av beräkningsprogrammet.

Minni Flemark
Lund, Maj 2017

Abstract

Because of the significant release of carbon dioxide from the production of cement, the industry has developed several new types of cement. These new cements contain different types of supplementary cementitious materials that give different characteristics. To fully understand the characteristics of these cements and products made from them, more research is needed. An example of such a characteristic is heat development, which is important to be able to predict, especially in massive structures, because of the risk of cracking.

The method used today to calculate temperatures in concrete structures has input parameters measured with semi-adiabatic calorimetry. The use of this method is limited by the need to make many tests to evaluate the compressive strength as a function of temperature. In this report a calculation program that use input parameters measured with isothermal calorimetry is evaluated to investigate if it can complete with or replace some of the traditional measures.

A concrete structure with temperature sensors was casted to evaluate if the calculation programs could describe the temperature development during the hydration of a real structure. The calculation program with semi-adiabatic parameters could be adapted to the real process with realistic assumptions, but not the calculation program with isothermal parameters. The result from the "isothermal version" of the program was different depending on the conditions. In the temperature range of 20-40 °C the results were almost the same as with the semi-adiabatic calculation, but when the concrete temperature exceeded about 45 °C the calculated temperatures were exaggerated. These differences can partly be explained if the cement reactions have a history dependence that means that different reaction products are formed depending on the previous temperatures during the hydration. Generally the temperature curve calculated with isothermal parameters was offset in time. This can however be the result of the method used when preparing the isothermal curves for the calculation program. If this is the case a method probably could be developed to adjust for this problem.

Sammanfattning

De höga koldioxidutsläpp som cementtillverkning medför har lett till att industrin har behövt ta till nya metoder för att minska dessa. Detta resulterar i att det kommer nya cementsorter där delar av cementet bytts ut mot tillsatsmaterial. Koldioxidutsläpp från tillsatsmaterialens framställning belastar inte cement- och betongindustrin då dessa ofta är industriella restprodukter, vilket innebär att användning av dessa inte bidrar till ytterligare utsläpp. Tillsatsmaterialen påverkar dock cementets egenskaper vilket leder till att man behöver göra tester på de nya cementsorterna för att kartlägga deras egenskaper. En av de egenskaper som påverkas av inblandning av tillsatsmaterial är värmeutvecklingen, vilket är en viktig faktor för att kunna förutsäga temperaturutvecklingen vid gjutning av grova konstruktioner för att t.ex. undvika sprickbildning.

Den metod som används idag för att beräkna temperaturer i gjutna betongkonstruktioner använder indata som är framtagna med semi-adiabatisk kalorimetri. Användningen av denna metod begränsas bland annat på grund av att den kräver en stor mängd hållfasthetsprov för att ta fram hur reaktionshastigheten påverkas av temperaturen. Tryckhållfastheten mäts därför regelbundet under härdningsprocessen för att man ska få reda på hur långt reaktionen har kommit vid olika tider och temperaturer. I detta exjobb har ett beräkningsprogram med indata som istället är framtagen med isoterm kalorimetri undersökts för att se om detta kan komplettera eller ersätta delar av de traditionella mätningarna. Med isoterm kalorimetri mäts den utvecklade värmen för små prov av cement och vatten eller bruk, vilken är proportionell mot hållfastheten. Detta innebär att endast enstaka hållfasthetsprov behöver utföras.

En cirkulär pelare med diametern 34,6 cm, höjden 100 cm och 21 ingjutna termoelement göts i en betong med vct 0,55 för att kunna bedöma beräkningsprogrammets möjlighet att beräkna temperaturutvecklingen i en härdande betongkonstruktion. Beräkningsprogrammet med semi-adiabatiska indata kunde anpassas till mätningen med realistiska antaganden som innebar att vindhastigheten sattes till 6 m/s, men det kunde inte beräkningsprogrammet med isoterma indata. Resultatet visade att beräkningsprogrammet med isoterma indata gav resultat med varierande kvalitet beroende på förutsättningarna. I temperaturer mellan 20 och 40 °C blev resultaten ganska lika, inom 3 °C från resultaten beräknade med semi-adiabatisk indata, men

vid högre temperaturer blev de beräknade temperaturerna med isoterma indata betydligt högre. Skillnaderna kan möjligtvis förklaras med att cementreaktioner har ett historieberoende. Detta skulle kunna vara att reaktionsprodukterna får lite olika innehåll beroende på vilka temperaturer betongen haft tidigare. Om det sker en reaktion med en viss värmeutveckling vid härdning vid konstant temperatur på 50 °C så kan en reaktion vid naturligt temperaturförlopp se lite annorlunda ut vid samma temperatur och ge lite annorlunda temperaturutveckling. Resultaten visar att det verkliga temperaturförloppet ger en lägre maxtemperatur än den borde enligt beräkningsmodellen för programmet med isoterma indata. Beräkningen med isoterma indata blev också generellt förskjuten i tiden. Detta kan bero på hur man hanterar den isoterma indatan i modellen. Eftersom proven inte hade samma temperatur som kalorimetrarna blir första delen av kurvorna störda och behöver justeras för att kompensera för den uppvärmning respektive nerkyllning som sker. Man borde kunna hitta en metod för att bättre kunna hantera denna kompensation.

Innehåll

1	Inledning	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Frågeställningar	2
1.3	Avgränsningar	2
2	Teori	3
2.1	Cement	3
2.1.1	Portlandcement	3
2.1.2	Tillsatsmaterial	4
2.2	Upplösning av cement	7
2.3	Värmeutveckling	7
2.3.1	Cementreaktionens faser	8
2.3.2	Värmebalans	9
2.3.3	Aktiveringsenergi	10
2.3.4	Problem vid temperaturökning	10
2.3.5	Åtgärder	11
2.4	Isoterm kalorimetri	12
2.4.1	Fördelar	13
2.4.2	Nackdelar	13
2.5	Semi-adiabatisk kalorimetri	13
2.5.1	Fördelar	14
2.5.2	Nackdelar	14
2.6	Beräkningsprogram	15
3	Metod och material	17
3.1	Betongrecept	17
3.2	Isoterm kalorimetri	18
3.2.1	Kalorimetrar	18
3.2.2	Isoterm mätmetod	18
3.2.3	Cementhalt	19
3.2.4	Utvärdering av resultat	19
3.3	Referenskonstruktion	19
3.3.1	Utformning	19

3.3.2	Gjutning	21
3.4	Temperaturberäkningar	22
3.4.1	Termiska egenskaper	22
3.4.2	Indata till beräkningsprogrammen	23
3.5	Kontrollberäkning	24
4	Resultat	25
4.1	Isoterm kalorimetri	25
4.1.1	Cementhalt	25
4.1.2	Indata till Hacon B	26
4.2	Temperaturberäkningar	30
4.2.1	Termiska egenskaper	30
4.3	Jämförelse av mätnings- och beräkningsresultat	30
4.3.1	Temperaturjämförelse i samma punkter	30
4.3.2	Temperaturjämförelse vid samma tid	34
4.3.3	Maxtemperatur	37
4.4	Kontrollberäkning	39
5	Diskussion	41
5.1	Isoterm kalorimetri	41
5.1.1	Cementhalt	41
5.1.2	Indata till Hacon B	41
5.2	Temperaturberäkningar	42
5.2.1	Termiska egenskaper	42
5.2.2	Optimering av Hacon A	42
5.3	Referenskonstruktion	43
5.3.1	Gjutform	43
5.3.2	Temperaturmätning i gjuten konstruktion	44
5.4	Jämförelse av mätnings- och beräkningsresultat	44
5.4.1	Skillnader i resultatet mellan Hacon A och B	44
5.4.2	Kontrollräkning	45
5.5	Slutsatser	45
5.6	Förslag till fortsatta studier	46
	Litteraturförteckning	47

1 Inledning

Nedan beskrivs bakgrunden och syftet med arbetet. Det ges några exempel på andra undersökningar och rapporter som skrivits inom samma eller angränsande områden samt en kortfattad beskrivning av detta examensarbete och rapportens disposition.

1.1 Bakgrund

För att minska klimatpåverkan måste utsläppen av växthusgaser minska. Inom cementindustrin arbetas det för att ta fram alternativ till det traditionella Portlandcementet vilkas tillverkningsprocesser inte innebär lika höga koldioxidutsläpp. I nuläget används tillsatsmaterial, som flygaska, granulerad masugnsslagg och silikastoft, för att dryga ut cementet. Detta leder till att det kommer flera olika typer av cementsammansättningar med olika egenskaper som måste fastställas. Egenskaper, som kan påverkas av inblandning av tillsatsmaterial är hållfasthet, värmeutveckling, självtorkning, sprickbildningsrisk etc [8].

Traditionellt har mätningar med semi-adiabatisk kalorimetri gjorts på cementet för att ta fram indata för att beräkna temperaturutvecklingen i betongkonstruktioner under härdningsförloppet, se avsnitt 2.5. Idag är det, förutom att cementet i sig kan innehålla tillsatsmaterial, tillåtet att vid betongblandningen tillsätta ytterligare tillsatsmaterial vars inverkan då eventuellt inte tas hänsyn till vid exempelvis temperaturberäkningar. Detta gör att beräkningarna riskerar att bli missvisande eftersom inblandning av tillsatsmaterial kan påverka betongens värmeutveckling så den inte följer samma mönster som det använda cementet. Exakt hur olika mängder av olika tillsatsmaterial påverkar cements och betongs egenskaper är av stort intresse och mycket arbete läggs på att försöka förstå detta och skapa fungerande modeller [23][2][12][25][21] [27].

I detta examensarbete skall det undersökas om man genom isoterm kalorimetri kan ta fram indata för att uppskatta värmeutvecklingen i större betongkonstruktioner. Detta görs som en fortsättning på Philip Bybergers examensarbete [3] där mindre provkroppar göts i cementbruk för att utvärdera enklare temperaturberäkningar med indata från isoterm kalorimetri. Resultaten var inte entydiga och anledningarna till detta antogs vara antingen att cementshärdning nog är mer komplex än

att värmeutvecklingen endast beror på temperatur och utvecklad värme vid höga temperaturer eller att antagandet om att det gick att extrapolera det uppmätta sambandet för värmeeffekt utanför den högsta mätta temperaturen som var 35 °C.

Detta arbete inleddes med en jämförande litteraturstudie av halv-adiabatisk kalorimetri och isoterm kalorimetri. Sedan gjordes en laborationsdel. Laborationsdelen inleddes med att värmeutvecklingen för en betong mättes med isoterm kalorimetri. Resultatet av denna mätning användes som indata till en beräkning av temperaturutveckling i en större konstruktion. Som verifikation göts denna konstruktion med ingjutna temperaturmätare. Avslutningsvis jämförs temperaturen i den gjutna konstruktionen med beräkningarna gjorda med indata från halv-adiabatisk- respektive isoterm kalorimetri. För beräkningarna användes beräkningsprogrammet Hacon som utvecklades vid avdelningen för byggnadsmekanik på LTH. För beräkningarna med isoterm indata används en ny version av Hacon som utvecklades i ett parallellt examensarbete [20]. Målet med arbetet var att utvärdera om detta tillvägagångssätt kunde komplettera eller till viss del ersätta de halv-adiabatiska mätningarna som är praxis idag. Att undersöka möjligheten att använda mätningar med isoterm kalorimetri som indata vid temperaturberäkningar i större konstruktioner är något som bland annat Wadsö [29] föreslår vidare undersökningar inom.

1.2 Frågeställningar

- Går det att implementera en modell med data framtagen med isoterm kalorimetri i Hacon?
- Får man liknande resultat med ett beräkningsprogram med isoterma indata som med semi-adiabatiska indata?
- Under vilka förutsättningar kan temperaturutveckling i betong beräknas med indata från isoterm kalorimetri?
- Bör man förvänta sig samma resultat med de båda versionerna av Hacon?

1.3 Avgränsningar

- Endast en betongtyp har undersökts.
- Antalet temperaturer som undersöktes begränsades av antalet tillgängliga kalorimetrar och tidsbegränsning.

2 Teori

Nedan beskrivs teorin som behövs för att förstå och tolka resultaten av de gjorda försöken och för att besvara de givna frågeställningarna. Första delen handlar om cementkemi och effekterna av olika tillsatsmaterial, vilket framförallt kan ses som förklaring till varför det kan bli missvisande att bara använda det rena cementets egenskaper vid temperaturberäkningar. Sedan beskrivs de olika faserna vid värmeutveckling, vilka problem för höga eller för låga temperaturer kan medföra, samt hur dessa problem hanteras. Till sist beskrivs och jämförs metoderna för halv-adiabatisk- och isoterm kalorimetri, deras för- och nackdelar samt en kort beskrivning av det beräkningsprogram som användes.

2.1 Cement

Cement är idag inget entydigt begrepp, utan kan ha olika sammansättning. Traditionellt är den i Sverige mest använda cementsorten Portlandcement. Idag består många cementsorter av Portlandcement uppblandat med tillsatsmaterial, ofta industriella restmaterial. Anledningen till inblandning av dessa tillsatsmaterial kan både vara att man vill minska behovet av Portlandcement och därmed minska den miljöpåverkan som tillverkningen av Portlandcement medför [8] och att man vill förbättra betongens egenskaper. För att klara av att minska cementanvändningen finns det flera angreppssätt. Bland annat behöver man utveckla sätt att kunna använda högre andelar tillsatsmaterial och hitta nya typer av tillsatsmaterial [25].

Med cementreaktion menas den process där en blandning av cement och vatten reagerar och går från lös konsistens till fast material utan att det krävs en omgivande temperaturändring och under minimal volymändring. Denna reaktionstyp kallas även hydratation [25].

2.1.1 Portlandcement

Portlandcement är en blandning av Portlandklinker och gips. Klinkern tillverkas genom att kalksten och lera bränns i roterande ugnar vid 1450 °C, vilket är en

mycket energikrävande process som medför stora koldioxidutsläpp [15]. Hälften av koldioxidutsläppen kommer från den reaktion då kalkstenen avger koldioxid, vilken kallas kalcinering, och hälften kommer från förbränningen. De viktigaste klinker-komponenterna listas nedan, (de förkortade beteckningarna används normalt inom cementområdet).

C_3S	alit
C_2S	belit
C_3A	aluminat
C_4AF	ferrit

där

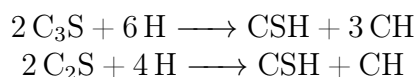
$C = CaO$

$S = SiO_2$

$A = Al_2O_3$

$F = Fe_2O_3$

Hållfastheten byggs upp av att C_3S och C_2S reagerar med blandningsvattnet, som betecknas H, och bildar CSH (kalciumsilikathydrat) och CH (kalciumhydroxid) [15]. C_3S och C_2S utgör ca 80% av Portlandklinkern. Reaktionsformlerna är inte balanserade då CSH kan ha olika sammansättning.



Reaktionshastigheten skiljer dessa båda åt genom att C_3S reagerar betydligt fortare än C_2S . Det vill säga att det är framförallt C_3S som bygger upp den tidiga hållfastheten [19]. Det är CSH i cementpastan som ger hållfastheten och CH, som ger den alkaliska miljön vilken passiverar armeringsjärnen [15]. Kalciumhydroxiden kan även reagera med de puzzolanska tillsatsmaterialen och bilda ytterligare CSH som då ger ökad hållfasthet, men minskad alkalitet [16].

2.1.2 Tillsatsmaterial

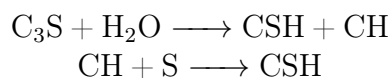
För att klara av att minska koldioxidutsläppen ifrån cementindustrin utan att behöva kompromissa med beständigheten kommer man behöva hitta nya tillsatsmaterial som går att använda i större utsträckning. De tillsatsmaterial som används idag finns i begränsad mängd och är inte tillgängliga överallt. Material som är aktuella att undersöka närmare är bland annat naturliga puzzolaner och aktiverade leror. Man skulle dessutom behöva utveckla fler klinkertyper som inte kommer från ett råmaterial med samma kalkstensinnehåll [25].

Historiskt har det varit utmanande att hitta intresse och motivera utveckling inom cement- och betongindustrin eftersom det handlar om ett relativt billigt material i en konservativ bransch där man dessutom har krav på att konstruktioner ska ha en livslängd på 100 år med näst intill inget underhåll [25]. Hur beständigheten påverkas av tillsatsmaterialen är inget som man kan veta säkert eftersom de inte har använts under speciellt lång tid i Sverige i förhållande till hur länge en betongkonstruktion förväntas hålla [8]. Forskning pågår för att öka förståelsen och hitta fungerande modeller för tillsatsmaterialens påverkan på betongens egenskaper både i tidiga skedet och på lång sikt [10] [18] [21].

I Sverige används idag granulerad masugnsslagg, flygaska och silikastoft som alla är industriella restprodukter [16]. Vanligt är att material med amorf eller glasig struktur är mer reaktiva än de som är kristallina och att alkali ökar reaktionshastigheten för amorfa ämnen [25]. Generellt sett brukar tillsatsmaterial minska reaktionshastigheten såvida det inte har väldigt små partiklar och då fungerar som filler [23].

Fillereffekten innebär att en tillsats av väldigt finfördelat material kan öka klinkerns reaktivitet, utan att reagera själv, genom att dels skapa mer plats för klinkern att reagera, då det blir mer vatten per cementkorn, och dels genom att bidra med större ytor där kärnbildning av CSH kan ske [18] [11]. Detta betyder att man kan tillsätta en del ickereaktivt, inert, material och ändå öka reaktiviteten. Vid tillsats av silikastoft och flygaska, vilka har större specifik yta än cement, kan man se ökad reaktivitet under de första dagarna utan att deras egna reaktioner startat [18] [12] [10].

Flygaska och silikastoft räknas till de puzzolanska tillsatsmaterialen. Detta innebär att de reagerar med kalciumhydroxid i lösning och bildar liknande reaktionsprodukter som cementet, det vill säga att de bidrar till hållfastheten [16]. Dock minskar alkaliteten i betongen eftersom CH förbrukas, vilket kan ge förkortad livslängd på grund av att armeringen kan rosta tidigare. Dessa reaktioner kallas puzzolanreaktioner [16]. Reaktionsformlerna är inte balanserade eftersom CSH kan ha olika sammansättning.



De puzzolanska tillsatsmaterialen kan antingen användas utöver cementet och få en ökad hållfasthet eller som substitut för en del av cementet för att uppnå samma hållfasthet.

Det är svårt att säga hur mycket av tillsatsmaterialen som reagerat och vad som beror på fillereffekten. Men om man normaliserar andelen portlandit $\text{Ca}(\text{OH})_2$ per klinkerkomponent kan man se en minskning och på så sätt se att de puzzolanska tillsatsmaterialen reagerat [18].

Granulerad masugnsslagg är ett latenthidrauliskt material, vilket innebär att det reagerar med vatten på liknande sätt som hydrauliska material, men behöver ak-

tiveras för att reaktionen ska komma igång. Latenthydrauliska material aktiveras av en alkalisk miljö. I detta fall av kalciumhydroxid eftersom det bildas naturligt i cementreaktionen [16].

Ickereaktiva material bidrar inte i de kemiska reaktionerna direkt, men de ökar den specifika ytan så det blir lättare för de reaktiva materialen att reagera [16].

2.1.2.1 Granulerad masugnsslagg

Masugnsslagg är en restprodukt från stålindustrin som räknas till de latenthydrauliska tillsatsmaterialen. Det bildas i masugnen när järnmalm, koks och kalksten smälts ihop. Järnet sjunker till botten och det som blir kvar på toppen är slaggen. När denna kyls av snabbt får den en amorf struktur vilket gör att den mer reaktiv. Sedan mals slaggen så den får liknande kornstorlek som cementet [16]. Slaggens reaktivitet ökar med ökande förhållande mellan CaO/SiO_2 och ökande glasighet. Glashalten bör överstiga 90% [16].

Tillsats av masugnsslagg ger långsammare hållfasthetstillväxt, men sluthållfastheten kan bli högre än vid ett rent Portlandcement. Slaggcement har större temperaturkänslighet än rent Portlandcement, dvs skillnaden i reaktionshastighet blir större vid en temperaturändring [15]. Värmeutvecklingen blir mindre under de första dyggen, eftersom reaktionen sker långsammare, men det betyder inte att risken för temperatursprickor minskar, eftersom även draghållfastheten utvecklas långsammare [16].

2.1.2.2 Flygaska

Flygaska är ett puzzolanskt tillsatmaterial som är en restprodukt från pulvereldade kolkraftverk. Det finkorniga obrännbara materialet skiljs från rökgaserna med filter. Detta filterdamm av kolaska kallas flygaska [16]. Det är inte alla typer av flygaska som får användas i cementtillverkning, utan man har vissa krav på sammansättningen för att det ska få användas.

Precis som masugnsslagg så ger flygaskan större temperaturberoende och långsammare hållfasthetsutveckling än rent Portlandcement [15]. Inblandning av flygaska minskar värmeutvecklingen, men det är inte säkert att det minskar risken för temperatursprickor i samma utsträckning eftersom även utvecklingen av draghållfastheten sker långsammare [16].

Inblandning av flygaska ger mycket mer komplicerad hydratationsmekanism på grund av den kombinerade effekten av cementhydratationen, fillereffekten och puzzolanreaktionen [12]. De första dagarna påverkar flygaskan framförallt genom fillereffekten, efter det kan puzzolanreaktionen påvisas [24].

2.1.2.3 Silikastoft

Silikastoft är ett puzzolanskt tillsatsmaterial och en restprodukt som erhålls vid filtrering av rökgaser vid framställning av kiselmetall och ferrokisel som används i stålindustrin som legeringsämnen.

Silikastoft har generellt en högre reaktivitet än flygaska och slagg på grund av dess mindre partikelstorlek. Dock är dess reaktivitet och reaktionshastighet kraftigt påverkad av tillgången på portlandit. Silikans långsamma reaktion kan pågå under flera månader [21].

Silikastoft har mycket hög specifik yta, ca 100 gånger större än cementets, vilket gör att den kan fungera som filler under de första dagarna innan puzzolanreaktionen startar [33]. Silikastoft används till högpresterande betong då det ger möjlighet till en tätare betong. För att kunna få den tätare betongen måste dock flyttillsatsmedel eller vattenreducerande tillsatsmedel användas för att uppväga för det ökade vattenbehov som silikainblandningen medför [16].

2.2 Upplösning av cement

Om man har en härdad betong eller ett härdat bruk kan man bestämma hur mycket cementpasta respektive ballast den innehåller genom att först mekaniskt finfördela och sedan lösa upp det härdade cementet med syra [9]. Undersökningar med olika syror har gjorts och man har visat att utspädd salt- eller salpetersyra fungerar bra. Även organiska syror kan användas, men kräver mycket små prov och mycket syra under lång tid. För användandet av de starka syrorna har det visat sig att de fungerar bra vid spädning 1:5 HCl (2 M) [1]. Högre koncentration riskerar att det upplösta cementet bildar andra olösliga biprodukter som då inte går att filtrera bort, som kolloidal silika, och lägre koncentrationer riskerar att inte klara av att lösa upp cementet [1]. För att undersöka hur väl denna metod fungerar har man löst upp bruk med känd sammansättning och jämfört resultatet med god överensstämmelse [22]. Notera att metoden enbart fungerar med ballast som inte löses upp i syran.

2.3 Värmeutveckling

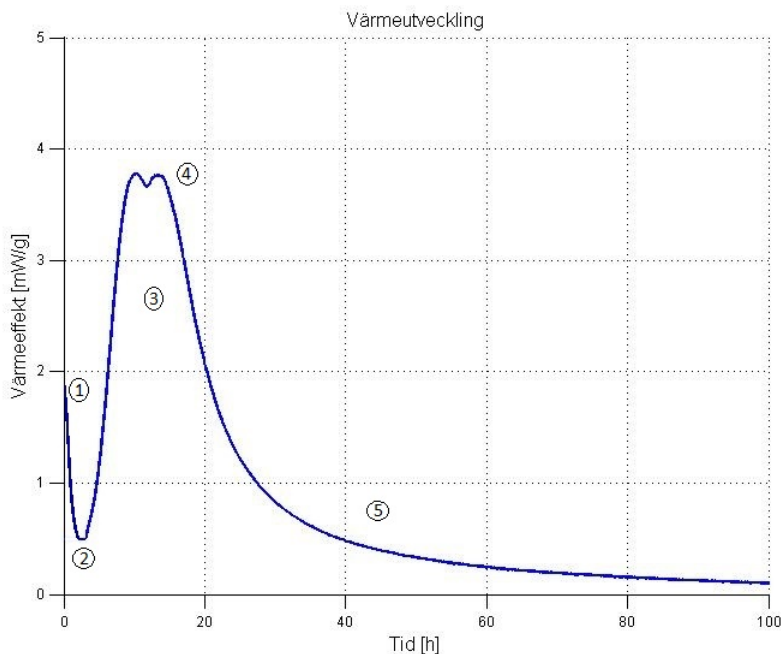
Värmeutveckling används ofta som ett verktyg för att mäta reaktioner. I cementhydratation är det svårt att utvärdera varje reaktion för sig då de olika reaktionerna påverkar varandra. Detsamma gäller att när ett tillsatsmaterial används kan det inte bara reagera själv, utan även påverka cementreaktionerna genom fillereffekten. På grund av denna typ av komplexitet väljer man ofta inom forskning att antingen

bara titta på C_3S reaktion då denna dominerar värmeutvecklingen i de tidiga stadierna [19], eller att man undersöker skillnaden i den sammanlagda reaktionen för ett cement utan tillsatsmaterial och samma cement med något tillsatsmaterial [2].

De klinkerkomponenter som mest bidrar till värmeutvecklingen är C_3S och C_3A [28], vilket beror på att de reagerar betydligt fortare än C_2S och C_4AF [19]. Tillsatser av flygaska och slagg minskar reaktionshastigheten, men det är inte säkert att den minskar den totala värmeutvecklingen [23].

2.3.1 Cementreaktionens faser

Värmeutvecklingen för cementreaktionen kan delas in i olika steg [31], se figur 2.1.



Figur 2.1: Schematisk värmeutveckling i betong

1. Direkt när cement och vatten kommer i kontakt börjar aliten lösas upp i vattnet med en hög hastighet som sedan minskar i takt med att koncentrationen i lösningen ökar [25]. Det sker dessutom kortvariga och snabba reaktioner mellan aluminat från C_3A och sulfat, ofta från anhydrit ($CaSO_4$) och gips ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) som ger värmeutveckling [19]. Utan denna reaktion hade det inte blivit någon viloperiod utan betongen hade härdat direkt, vilket gjort den oanvändbar [31] [2] [25]. Flera läroböcker menar att viloperioden uppkommer av att ettringit bildar ett tätt lager kring cementkornen som gör att de inte kan reagera. Men eftersom ettringit är nålformigt så verkar detta osannolikt [25].

2. Under denna vilofas sker ingen hållfasthetsutveckling, utan den låga värmeutveckling som syns i figuren kommer av upplösning av cementet, framförallt alit, och på så sätt sker en koncentrationsökning av joner i blandningsvattnet. Denna fas gör att betongen kan transporteras och gjutas i formar [13]. Fasen kan förlängas genom att retarders tillsätts.
3. Detta är huvudreaktionen där betongen tappar sin arbetsbarhet genom att C_3S reagerar och bildar CSH som utvecklar hållfastheten [31]. Hastigheten för denna reaktion styrs framförallt av ledig yta att reagera på. Först ökar den i takt med att kornen byggs på, och sedan minskar när kornen börjar växa ihop. Man är inte helt klar över vad det är som triggar igång denna reaktion, men en teori är att koncentrationen av upplöst alit måste komma över en viss nivå för att stabila CSH-kärnor ska bildas [25].
4. Huvudreaktionen fortgår samtidigt som att när den fria sulfaten är slut reagerar de sulfatrika föreningar, vars uppkomst beskrevs under första punkten, och ger denna andra topp i värmeutvecklingen.
5. Huvudreaktionen fortsätter, men eftersom CSH framförallt bildas runt cementkornen och växer ut i det fria utrymmet mellan kornen, minskar hastigheten på grund av att det tar längre och längre tid för vattnet måste ta sig in till cementkornet för att lösa ut joner som kan reagera [25]. Reaktionshastigheten under denna fas är alltså till stor del diffusionskontrollerad. [31] [12]. Ytterligare anledningar till att minskning i reaktionshastighet sker är att små partiklar konsumerats [25], platsbrist eller brist på fritt vatten [2].

2.3.2 Värmebalans

En värmebalans fungerar ungefär som en kraftjämvikt för värme. På vänstersidan beskrivs den temperaturändringshastighet som sker i provet eller konstruktionen och på högersidan beskrivs värmeutveckling och värmeförlust till omgivningen.

Värmebalans [17]:

$$\rho c \frac{dT}{dt} = \frac{dQ}{dt} - q \quad (2.1)$$

där

ρ = densitet för betong, cementbruk eller cementpasta, kg/m^3

c = specifik värmekapacitet för betong, cementbruk eller cementpasta, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$

T = kroppens temperatur, $^\circ\text{C}$

Q = utvecklade hydratationsvärme per volymenhet, J/m^3

q = värmeförlust från kroppen till omgivningen, W/m^3

För att mäta hydratationsvärme används adiabatisk kalorimetri, semi-adiabatisk kalorimetri eller isoterm kalorimetri. För att förklara dessa angreppssätt kan man titta på ekvation 2.1. Ur värmebalansen kan man se att vid adiabatiska förhållande är $P=0$ och vid isoterma förhållanden är $\frac{dT}{dt} = 0$. För semi-adiabatisk kalorimetri kan P beräknas utifrån att isoleringsförhållandena är kända eller genom flödesmätningar [15]. På grund av att man kan få väldigt höga temperaturer med adiabatiska mätningar är de inte alltid användbara. Halv-adiabatisk kalorimetri och isoterm kalorimetri beskrivs utförligare nedan.

2.3.3 Aktiveringsenergi

Cementhydratation består av flera olika reaktioner som påverkar varandra. Därför är det inte till någon fördel att veta aktiveringsenergin för varje reaktion. Istället använder man en skenbar aktiveringsenergi, som kan ses som en parameter som beskriver temperaturberoendet för det cementhydratationens sammanlagda reaktioner.

Arrheniusekvation har visat sig beskriva reaktioners temperaturberoende väl.

$$k = Ae^{-E_a/RT} \quad (2.2)$$

där

k = reaktionshastigheten

A = konstant

E_a = aktiveringsenergi, J/mol

R = Allmänna gaskonstanten, 8,314, J/(mol·K)

T = Temperatur, K

Med isoterm kalorimetri kan man mäta aktiveringsenergin direkt och behöver alltså inte bestämma den på förhand eller uppskatta den. Aktiveringsenergin varierar med kemiskt innehåll, vct, temperatur etc [32]. Aktiveringsenergin ökar med ökande flygaskainnehåll och ökande andel vattenreducerande tillsatsmedel [32]. Andra tillsatsmedel har visat olika resultat [14].

2.3.4 Problem vid temperaturökning

Värmeutvecklingen vid betonghärdning kan öka temperaturen så mycket att den färdiga konstruktionen inte får de förväntade egenskaperna. De temperaturrelaterade krav som måste uppfyllas beskrivs nedan.

- Betongens maximala temperatur får inte överstiga den kritiska temperaturen. Denna är specifik för varje betongtyp, men vanligt är att man håller sig under 60 °C. Överskridande av den kritiska temperaturen får konsekvenser som att

andra reaktionsprodukter bildas, vilket kan ge ökad porositet och minskad hållfasthet [7].

- Betongen måste ha utvecklat tillräcklig hållfasthet innan tiden för formrivning. Betongen härdar långsammare vid låga temperaturer. En betong som inte härdar på förväntad tid kan skapa stora problem i form av olyckor eller stora förseningar i produktionen.
- Om temperaturen i konstruktionen blir för hög under härdning riskerar man att få temperatursprickor. Dessa kan delas in i två huvudgrupper. Genomgående sprickor och ytsprickor. Genomgående sprickor uppkommer ofta under avsvainingskedet på grund av att det uppkommer dragspänningar i konstruktionen på grund av temperaturrörelser i hårdnade betongen. Ytsprickor uppkommer på grund av att temperaturprofilen över konstruktionens tvärsnitt är ojämn. När härdningsförloppet startar blir det varmare i mitten av konstruktionen än vid kanterna. Då expanderar mitten mer än kanterna och ytan spricker. Stora temperaturskillnader över tvärsnittet, som leder till ytsprickor, kan också uppkomma vid avformning [17].

2.3.5 Åtgärder

Att kunna förutsäga och kontrollera temperaturökningen i betongkonstruktioner är av stort intresse för att förhindra ovanstående problem [26]. Idag utförs beräkningar, speciellt på grövre konstruktioner och om den beräknade temperaturen blir för hög finns det ett antal åtgärder man kan vidta för att minska denna. Exempelvis kan man sänka temperaturen när man blandar betongen genom att ha kall ballast eller ha i delar av blandningsvattnet i form av is. Man kan också kyla betongen under härdningsprocessen genom att gjuta in vattenrör där man spolar in kallvatten för att kontrollera temperaturutvecklingen. Man kan också använda en cementsort som reagerar långsammare för att plana ut värmeutvecklingskurvan.

För att man ska kunna göra något åt en för hög temperaturutveckling så måste man veta om att det kommer att hända innan man gjuter. I detta examensarbete ska isoterma indata tas fram för att användas i beräkningsprogrammet Hacon 3.5 för att se om det är ett bra alternativ till de halv-adiabatiska indata man använder idag.

Genom att skapa modeller för hur olika tillsatsmaterial påverkar värmeutvecklingen jämfört med rent Portlandcement kan man genom en serie mätningar med isotherm kalorimetri avgöra hur mycket värme som skapas för en ny kombination av cement och tillsatsmaterial och på så sätt beräkna temperaturutvecklingen och sprickrisken [26].

2.4 Isoterm kalorimetri

En mätning med isoterm kalorimetri innebär att man låter ett ämne reagera medan man mäter värmeflödet från provet som krävs för att bibehålla en förutbestämd temperatur under reaktionsförloppet.

Små prover av pasta eller bruk (1-100 g) placeras i små ampuller i en isoterm kalorimeter [29]. Man kan inte ha så mycket större prov eftersom det då blir svårt att hålla isoterma förhållanden [29]. För varje prov finns även en referensampull med inert material med liknande värmekapacitet som provet (vatten eller sand). Under hydratationen loggas skillnaden i värmeflöde från provet och från referensen. Detta gör att små skillnader från omgivningen inte registreras då dessa påverkar både provet och dess referens [29]. Värmeflödessensorerna ger spänningar som är proportionella mot värmeflödet. För att omvandla spänning, U (V) till värmeeffekt P (W) dras först baslinjen av. Baslinjen U_0 (V) är den spänningsnivå som erhålls då inert material körs som både testmaterial och referensmaterial, det vill säga den visar en nollnivå då ingen reaktion sker. Sedan multipliceras med en, för kalorimetern och dess förutsättningar, unik kalibreringskoefficient, ϵ (W/V), som man utvärderat från en elektrisk kalibrering [30] och divideras med cementinnehållet, C (g) för att få effekt per gram cement enligt ekvation 2.3. Kalibreringskoefficienten är ofta relativt stabil så om mätningar görs vid samma temperatur är det ofta tillräckligt att kalibrera kalorimetern ca en gång per kvartal [29]. Utdata från en mätning med isoterm kalorimetri är värmeeffekt över tid. Genom integration fås värme över tid som sedan kan plottas mot effekten för att beskriva reaktionshastigheten som funktion av värmets (hydratationsgraden) och temperaturen.

$$P = \frac{(U - U_0) \cdot \epsilon}{C} \quad (2.3)$$

Eftersom provningen görs på små prover finns potentiellt möjligheten att testa varje bindemedelstyp, det vill säga blandningen av cement och tillsatsmaterial och på så sätt fånga upp eventuella skillnader som tillsatsmaterialen ger och genom detta få säkrare temperaturberäkningar. Man kan också få ut den relativa hållfasthetsutvecklingen, eftersom den ackumulerade värmeutvecklingen är proportionell mot tryckhållfastheten [4]. Genom att göra ett mindre antal tryckhållfasthetsprov kan man då koppla hållfastheten till värmeutvecklingen för ett visst betongrecept. Man behöver alltså inte utföra tryckhållfasthetsprov i samma utsträckning som för den semi-adiabatiska kalorimetern.

Det finns de som förespråkar semi-adiabatisk kalorimetri av anledningen att den ger en liknande temperaturökning som också erhålls i en betongkonstruktion. Men skillnaden är att i en riktig betongkonstruktion finns en temperaturgradient, dvs olika temperatur på olika ställen i konstruktionen. Isoterm kalorimetri är det mer

väldefinierade metoden för att beskriva hydratationen. Det mest fördelaktiga sättet att utföra dessa isoterma mätningar är vid flera olika temperaturer [29].

2.4.1 Fördelar

- Små provkroppar
- Modellfri metod
- Mätningarna används direkt, utan omräkningar och antaganden
- Man behöver inte veta aktiveringsenergin
- Man kan beräkna aktiveringsenergin
- Mäter direkt genererad värmeeffekt och ger då teoretiskt korrekt underlag för studier på hur hydrationshastigheten påverkas av temperaturen. [17]
- Färre tryckhållfasthetsprov krävs

2.4.2 Nackdelar

- Kan inte mäta på betong direkt, utan grov ballast måste siktas bort, vilket kan ge problem med att veta cementinnehållet.
- Man behöver ta reda på cementinnehållet om man tar prov från en större blandning.
- Mer avancerad utrustning
- Endast en mätning kan utföras åt gången i en isoterm kalorimeter.

2.5 Semi-adiabatisk kalorimetri

Semi-adiabatisk kalorimetri innebär att man gjuter in en temperaturmätare i en isolerad form och loggar temperaturen som funktion av tiden. Isoleringen ska vara tillräcklig för att det inte ska bli några märkbara temperaturgradienter inom provkroppen och dess värmekonduktivitet, λ måste vara känd [29]. Då isoleringens värmekonduktivitet och temperaturskillnaden på de olika sidorna av isoleringen är känd kan man beräkna värmeförlusten, q i värmebalansen, och därmed kompensera för denna då man beräknar hur mycket värme som bildats under hydratationen. Omräkning från temperaturändring till värme sker via densiteten och värmekapaciteten enligt ekvation 2.1

Den matematiska modellen som används vid semi-adiabatisk kalorimetri är att hydrationsvärmets är proportionellt mot hydrationsgraden enligt ekvation 2.4. Där hydrationsgraden, α modelleras enligt ekvation 2.5 [17]. Modellens parametrar bestäms så att kurvan passas efter den semi-adiabatiska mätningen. Dessa parametrar är sedan de semi-adiabatiska indata i beräkningsprogrammet.

$$q_{cem} = \alpha \cdot q_u \quad (2.4)$$

där

q_{cem} = totalt utvecklade hydrationsvärme per cementmängd, J/kg

α = cementets hydrationsgrad

q_u = cementets hydrationsvärme efter fullständig hydrationsgrad, J/kg

$$\alpha = e^{-\lambda_1 \cdot [\ln(1 + \frac{t_e}{t_1})]^{-\kappa_1}} \quad (2.5)$$

där

t_e = ekvivalent mognadsålder, vilket motsvarar tiden betongen skulle härda vid en konstant temperatur, ofta 20°C, för att nå samma mognadsgrad

α_1, t_1, κ_1 = matematiska anpassningsparametrar

De semi-adiabatiska mätningarna är enkla att göra, men de blir ganska omfattande att utvärdera eftersom man behöver bestämma aktiveringsenergi i separata försök, vilket görs genom att mäta tryckhållfastheten vid olika temperaturer. Detta kräver att man trycker ett stort antal provkroppar löpande under härdningsprocessen. Metoden bygger på modell som antas fungera även vid inblandning av tillsatsmaterial samt krävs det en hel del beräkningar som beskrivits ovan. På grund av att provningsmetoden kräver en hel del arbete och material, som kostar pengar, utförs de bara för varje cementtyp och hänsyn tas inte om tillsatsmaterial tillsätts vid betongblandningen, vilket riskerar att bli missvisande vid användning av tillsatsmaterial, då dessa kan påverka reaktionsförloppet [8].

2.5.1 Fördelar

- Kan mäta på betong direkt
- Kan utföras med enkel utrustning

2.5.2 Nackdelar

- Stora provkroppar, ca 10 kg

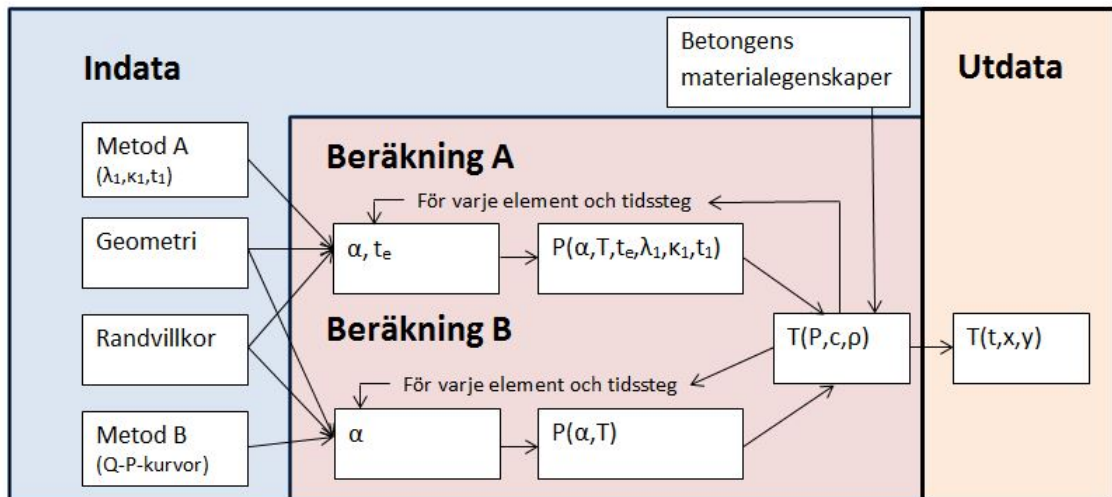
- Mycket beräkningar, antaganden och modeller
- Kräver många hållfasthetsprov

2.6 Beräkningsprogram

För att beräkna temperaturutvecklingen i betongkonstruktioner finns idag ett antal beräkningsprogram, till exempel HETT och Hacon[5]. Hacon som är utvecklat vid avdelningen för Byggnadsmekanik vid Lunds universitet användes för dessa beräkningar. I sin ursprungsversion använder programmet indata framtagna med semi-adiabatisk kalorimetri, se avsnitt 2.5 [17]. Beräkningarna sker genom att utvecklad värme beräknas enligt ekvation 2.5 och 2.4 samt att värmeförlusterna beräknas med avseende på de randvillkor som anges för omgivningen. Värmen räknas om till temperatur genom att använda värmeledningsförmågan och värmekapaciteten för betongen.

I ett parallellt examensarbete vid avdelningen för byggnadsmekanik reviderades programmet för att möjliggöra beräkningar med indata framtagna med isoterm kalorimetri. Den isoterma indatan består av mätkurvor där värmeeffekten är plottad mot den utvecklade värmen för de olika uppmätta konstanta temperaturerna. För att få ut värmeeffekten som funktion av utvecklad värme och temperatur interpolerar programmet mellan de olika kurvorna för konstant temperatur. Sedan används samma metod som i ursprungsversionen av programmet för att ta hänsyn till randvillkor och räkna om värmen till temperatur. Beräkningsmodellen innebär att värmeeffekten bara är beroende av den utvecklade värmen och temperaturerna.

I denna rapport benämns originalversionen av Hacon med semi-adiabatiska indata Hacon A och den reviderade versionen med isoterma indata benämns Hacon B. En översikt över hur programmen hanterar de olika typerna av indata visas i figur 2.2.



Figur 2.2: Flödesschema för hur Hacons båda versioner fungerar. Beräkning A visar hur Hacon A med semiadiabatiska indata fungerar och Beräkning B visar hur Hacon B med isoterma indata fungerar.

3 Metod och material

Här beskrivs metoderna för de olika delförsöken samt de olika materialen som använts. Först redovisas betongreceptet och sen metoden för mätningen med isoterm kalorimetri och sist beskrivning av gjutform samt tillvägagångssättet vid gjutning av konstruktionen.

3.1 Betongrecept

Betongen som användes vid både försöken med isoterm kalorimetri och för gjutningen av referenskonstruktionen blandades enligt receptet i tabell 3.1. Vattenhalten i ballasten av typen Björnstorp 0/2 mättes och receptet korrigerades för detta. 120 liter blandades i tvångsblandare under ca 3 minuter.

Tabell 3.1: Betongrecept, vct 0,55

	kg/m ³
Bascement	350,0
Vatten	192,5
Silikament Evo26	1,12
Ballast:	
Björnstorp 0/2	927,6
BML 8/11	927,6

De två ballastfraktionerna blandades med cementet under ca en minut innan vatten tillsattes för att blandningen skulle homogeniseras. Hälften av flyttillsatsmedlet tillsattes med blandningsvattnet och resten efter någon minuts blandning. Flytmedlet har en retarderande inverkan på betongen det vill säga att det tar lite längre tid innan den börjar reagera. Konsistensklass s4 eftersträvades, vilket innebär ett sättmått mellan 160-210 mm. Denna konsistensklass kallades tidigare för halvflyt.

3.2 Isoterm kalorimetri

Med detta försöket tas indata till Hacon B fram. Genom att låta betong härda i kalorimetrar under konstanta temperaturer erhålls information om hur mycket värme som reaktionerna avger. För att kunna normalisera detta görs även försök för att bestämma cementhalten i proven.

3.2.1 Kalorimetrar

Sex olika isoterma kalorimetrar användes: två TAM Air (Thermometric, Järfälla; numera TA Instruments, USA), två ICal 2000 HPC (Calmetrix, USA) och två ICal Flex (Calmetrix, USA). För TAM Air och Flex-kalorimetrarna användes 20 ml plastvialer; för ICal 2000 HPC användes 125 ml plastkoppar. Samtliga dessa kalorimetrar fungerar enligt värmeledningsprincipen; den enda större skillnaden är att ICal 2000 HPC har ca 6 gånger större vial och lägre känslighet än de andra kalorimetrarna. För att kompensera för detta användes ca 6 gånger större prov i de stora vialerna.

3.2.2 Isoterm mätmetod

Resultaten som kommer från de isoterma kalorimetrarna erhålls som en spänning (mV). För att resultaten från mätningen skulle kunna räknas om till värmeeffekt (mW) måste först en kalibreringskoefficient och en baslinje mätas.

3.2.2.1 Kalibrering

Först ställdes kalorimetrarna in på de olika mättemperaturerna; sedan mättes dessa med en kalibrerad precisionstermometer så att kalorimetrarna kunde justeras så att de var inom 0.1 K från 5, 12, 20, 27, 35 och 50 °C. Efter detta kalibrerades kalorimetrarna elektriskt och baslinjerna mättes [30].

3.2.2.2 Mätning

Kalorimetrarna startades samtidigt, innan betongen blandades. Tiden då blandningsvattnet hälldes i betongblandaren antecknades för att kunna dra av denna tiden på mätresultaten. Den blandade betongen siktades manuellt genom en 8 mm och en 4 mm sikt för att få bort den grova ballasten. Sedan skedades ca 10 g (20 ml vial) respektive 70 g (125 ml vial) av den siktade betongen ner i varje ampull. Ampullerna vägdes både före och efter betongen skedats i. Proven placerades i kalorimetrar vid 5, 12, 20, 27, 35 och 50 °C. Reaktionernas värmeutveckling loggades under tre veckor och resultaten redovisas i figur 4.1.

3.2.3 Cementhalt

För att bestämma cementhalten löstes fyra betongprov upp i saltsyra (1:5) [1]. För att finfördela proven mortlades de innan de blandades med ca en liter av saltsyralösningen. Suspensionen blandades under ca en timme innan den filtrerades. Resten torkades i 105 °C innan den vägdes.

3.2.4 Utvärdering av resultat

Resultaten från isoterm kalorimetri ges som en spänning, U (mV). Baslinjen, L (mV) dras av och för att få ut värmeeffekten, P (W), multipliceras med kalibreringskoefficienten, ϵ (W/V). För att få effekt per gram cement divideras med cementinnehållet, c (g).

$$P = \frac{(U - L) \cdot \epsilon}{c} \quad (\text{W/g}) \quad (3.1)$$

För att få den ackumulerade värmeutvecklingen (värmem) integrerades värmeeffekten.

$$Q = \int P dt \quad (\text{J/g}) \quad (3.2)$$

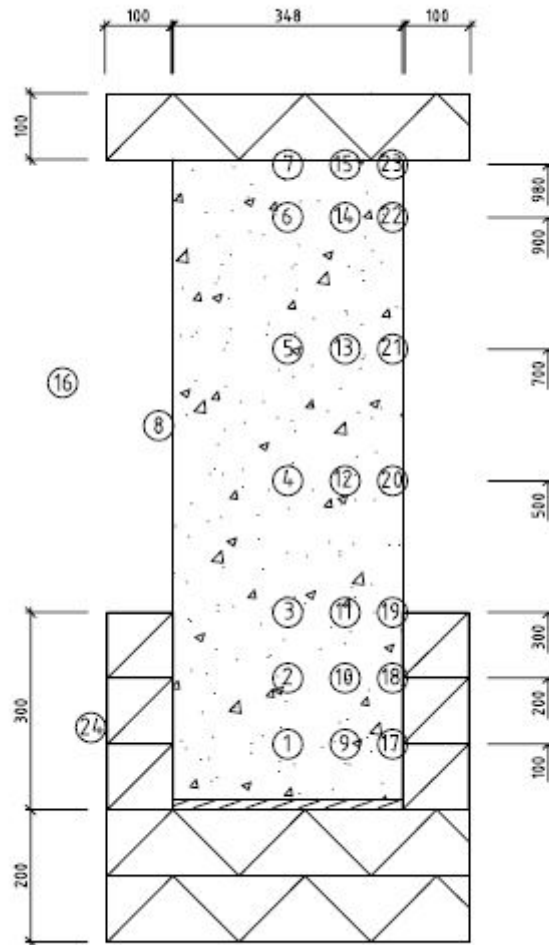
Det slutgiltiga resultatet som ska användas som indata i beräkningsprogrammet fås genom att värmeeffekten plottades mot den ackumulerade värmeutvecklingen.

3.3 Referenskonstruktion

För att koppla beräkningarna till verkligheten göts en referenskonstruktion med ingjutna temperaturmätare. Dessa uppmätta temperaturer användes för att utvärdera beräkningsprogrammen.

3.3.1 Utformning

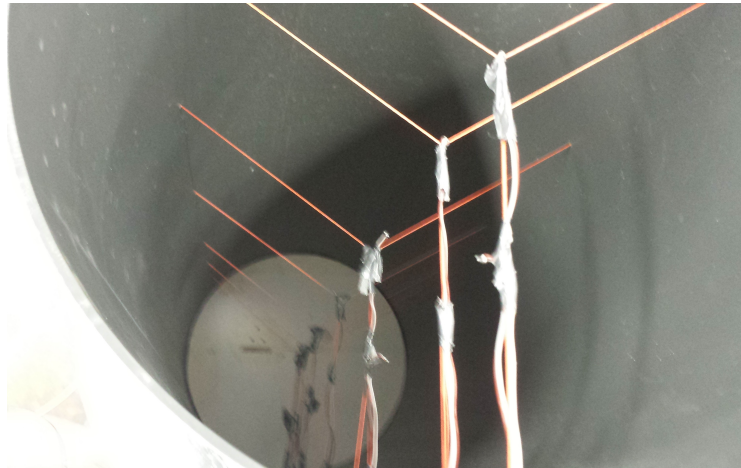
Hacon hanterar 2D och cylindersymmetriska geometrier. Därför togs beslut om att referenskonstruktionen skulle utformas som en cirkulär pelare. För att få stor variation mellan temperaturer i olika delar av konstruktionen simulerades olika alternativ i Hacon A. Figur 3.1 visar en principskiss av referenskonstruktionens dimensioner med isolering samt temperaturmätarnas benämning och placering.



Figur 3.1: Skiss över pelaren och termoelementens placering

3.3.1.1 Material och utrustning

Som gjutform användes ett grovt plaströr med tunna väggar (3,5 mm), med innerdiametern 34,6 mm, och som isolering användes 100 mm cellplast från Finja. Små hål borrades i röret och ett skelett av dåligt värmeledande tråd (dacron) monterades för att kunna fixera temperaturmätarna, se figur 3.2. En botten av spånskiva skruvades fast. För att minska värmeläckage mellan isoleringsskivorna tejpades dessa ihop, se figur 3.3. För temperaturmätningarna användes tre "TC-08 serial" (PicoTechnology) samt programmet Picolog for Windows.



Figur 3.2: *Montering av termoelementen*



Figur 3.3: *Uppställd pelare*

3.3.2 Gjutning

Betongen blandades enligt avsnitt 3.1 på samma sätt som vid gjutningen till de isoterma mätningarna. Under gjutningen av pelaren vibrerades betongen efter hand med vibrationsstav. Temperaturmätningen startades 26 minuter efter inblandning av vattnet och loggade sedan temperaturerna var 10e sekund under ca en vecka, tills temperaturkurvorna hade planat ut. En fläkt placerades vid pelaren för att minska värmeövergångsmotståndet, se figur 3.3.

3.4 Temperaturberäkningar

Temperaturberäkningarna utförs i Hacon A och B med de materialparametrar som tagits fram i detta exjobb. Indata till beräkningarna redovisas i denna rapport. Utförligare information om beräkningsprogrammen hittas i John Macs examensarbete [20].

3.4.1 Termiska egenskaper

För att öka noggrannheten för beräkningsprogrammet gjordes mätningar på volu-
metrisk värmekapacitet, värmeledningsförmåga och densitet för betongen och cell-
plasten istället för att använda tabellvärden.

För mätningen används en HotDisk 2500S. För cellplasten gjordes dubbelsidiga mät-
ningar med 50 mW under 40 s med sensorn 4922. För betongen gjordes ensidiga
mätningar med cellplasten på andra sidan, och med 1,0 W under 360 s med
sensorn 5599. Sensorn 5599 är den största sensorn som finns tillgänglig, vilken an-
vändes eftersom mätning över en större yta minskar variationerna i resultatet på
grund av att betong inte är ett homogent material. Densiteten på cellplasten och
betongen mättes genom vägning och volymbestämning, se tabell 3.2.

3.4.2 Indata till beräkningsprogrammen

I tabell 3.2 redovisas indata till beräkningsprogrammen.

Tabell 3.2: Indata till beräkningsprogram för Basement

Semi-adiabatiska parametrar		Hacon A	
λ_1		1,000	
t_1		6,55	
θ_0		2715	
κ_0		0	
κ_1		2,18	
Materialparameter		Hacon A och B	
T_{start}	(°C)	20,9	Betongens starttemperatur
ρ	(kg/m ³)	2398	Densitet
λ	(W/mK)	2,189	Betongens värmeledningsförmåga
c	(J/kgK)	873	Betongens specifika värmekapacitet
Q	(J/kg)	328 000	Total värme
C	(kg/m ³)	350	Cementhalt
vct		0,55	
D_{max}	(mm)	16	Maximal ballastfraktion
v	(m/s)	6	Vindhastighet
T	(°C)	20,1	Luftens medeltemperatur

Simuleringen med Hacon A optimerades med avseende på mätningen genom att justera vindhastigheten och därmed övergångstalet. Detta gjordes eftersom den vindhastighet som fläkten vid gjutningen av referenskonstruktionen skapade, inte mättes. Dessutom kom vinden bara från ett håll, dvs inte cylindersymmetriskt. Därför valdes den vindhastighet som gjorde att beräkningen med Hacon A stämde så bra som möjligt med mätningen. Genom att göra antagandet att Hacon A fungerar och att våra indata är rätt kan jämförelser sedan göras mellan Hacon A och Hacon B om man använder samma vindhastighet. Den använda vindhastigheten på 6 m/s motsvarar övergångstalet 18 W/(m²K) på ytan utan isolering.

3.5 Kontrollberäkning

En kontrollberäkning för en 2D kvadrat under adiabatiska förhållande gjordes i både Hacon A och B för att se om de gav samma resultat, se figur 4.10.

4 Resultat

Här redovisas resultaten av mätningarna som gjorts för att ta fram indata till beräkningsprogrammen och i slutet av detta avsnitt redovisas en jämförelse av temperaturmätningen i gjutningen med beräkningarna med de två olika versionerna av Hacon.

4.1 Isoterm kalorimetri

För att få ut indata till Hacon B behövde först cementhalten i proven utvärderas och sedan räknades den uppmätta spänningen om till en värmeeffekt enligt avsnitt 3.2.4 Utvärdering av resultat.

4.1.1 Cementhalt

Genom att anta att siktningen inte påverkade betongens vct, beräknades cementinnehållet i tabell 4.1. Medelvärdet av cementinnehållet bestämt med syraupplösning C/btg var 0,235 och alla resultat var inom $\pm 5\%$ av detta medelvärde. Ballastens vikt subtraherades från betongprovets vikt. Sedan räknades cementinnehållet ut genom att anta oförändrat vct, som var 0,55. För att ha något att jämföra med gjordes motsvarande beräkning utifrån betongreceptet, se tabell 3.1 för mängder. Cementvikten dividerades med den sammanlagda massan av betongen utan den grova ballasten, BML 8/11, se nedan. Motsvarande teoretiska resultat från betongreceptet var 0,238.

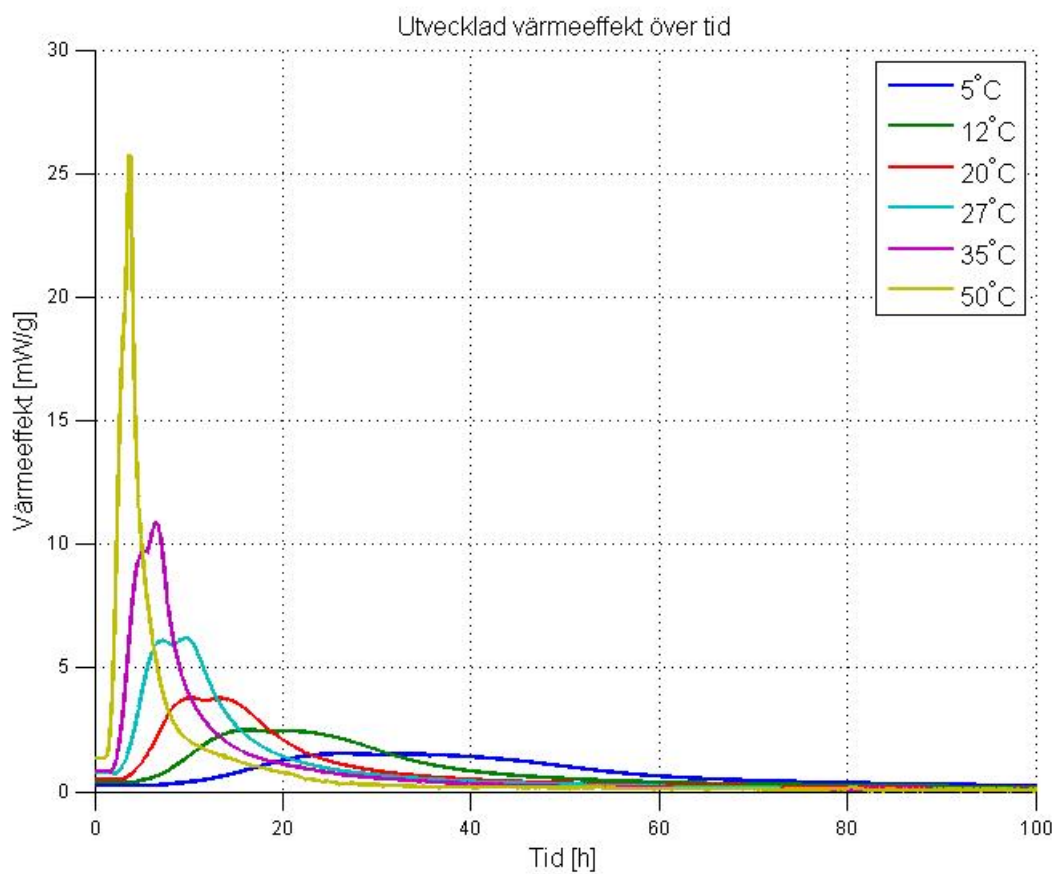
$$\frac{C}{btg} = \frac{350}{350 + 192,5 + 1,12 + 927,6} = 0,238$$

Tabell 4.1: Beräkning av cementhalt

Prov	Btg (g)	Ballast (g)	C+W (g)	C (g)	C/btg (-)
1	8,929	5,718	3,211	2,072	0,232
2	8,616	5,556	3,060	1,974	0,229
3	7,916	5,002	2,914	1,880	0,237
4	11,073	6,944	4,129	2,664	0,241

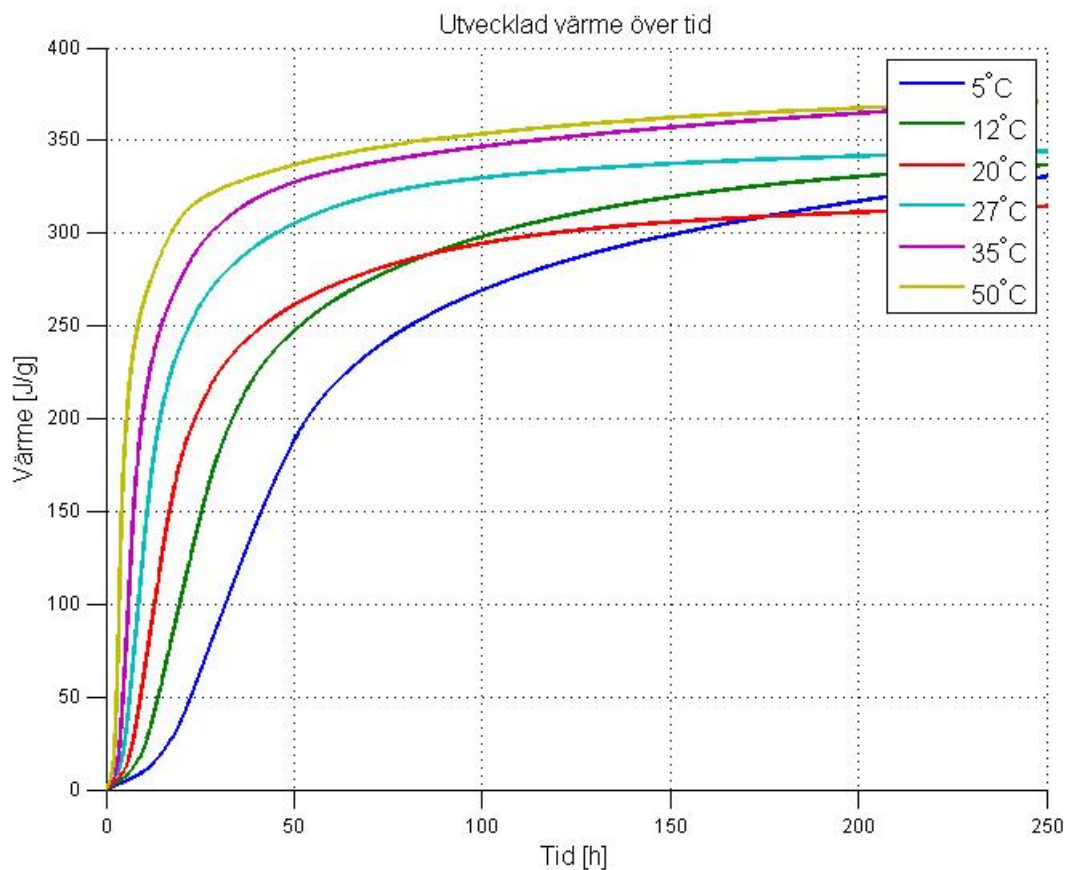
4.1.2 Indata till Hacon B

I detta avsnitt redovisas de utvärderade mätvärdena för värmeutvecklingen vid de olika isoterma temperaturerna enligt avsnitt 3.2.4. Till slut visas effekten plottad mot ackumulerade värmen, vilket användes som indata i Hacon B. I figur 4.1 visas värmeeffekten över tid för de olika isoterma temperaturerna. För temperaturerna 5, 12, 20 och 27 °C gjordes mätningar på 4 prov per temperatur och för 35 och 50 °C gjordes mätningar på 2 prov per temperatur. Resultaten för de olika proverna vid samma temperatur gav väldigt lika resultat. Eftersom det inte går att mäta värmeeffekten från tiden för blandning, särskilt för de prov som har mycket annorlunda temperatur än blandningstemperaturen, antogs att de initiella värmeeffekterna var konstanta fram till det lägsta värdet i vilofasen.



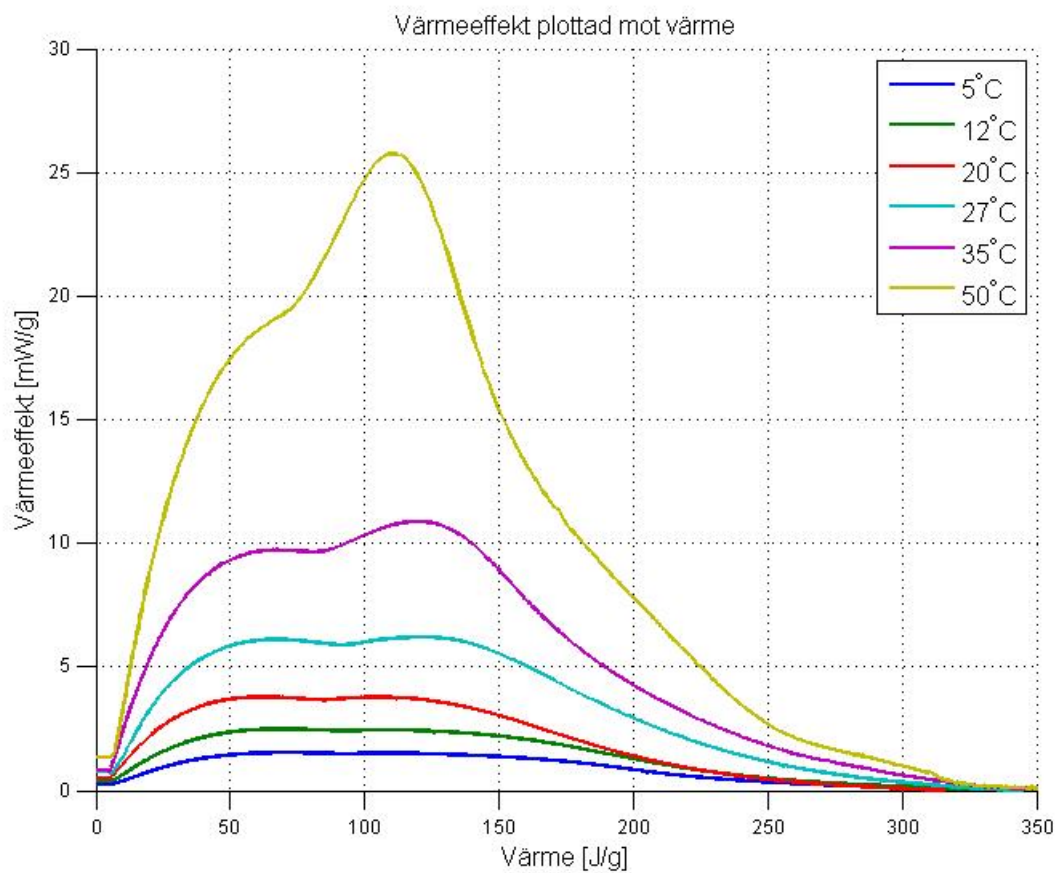
Figur 4.1: Värmeeffekt för de olika temperaturerna från de isoterma kalorimetrimätningarna. 50 °C-kurvan ger den högsta värmeeffekttoppen. De andra temperaturerna ger lägre värmeeffekttopp i fallande temperaturordning.

I figur 4.2 visas den ackumulerade värmen över tid för de olika isoterma temperaturerna som fås genom att integrera kurvorna för värmeeffekt i figur 4.1. Det är något märkligt att resultaten vid 20 ° bryter mönstret man ser i de andra resultaten. Resultaten har dock kontrollerats och verkar vara sanna.



Figur 4.2: Ackumulerad värme för de olika temperaturerna från de isoterma kalorimetrismätningarna. Vid 50 timmar ger 50 °C-kurvan högst utvecklad värme och de andra temperaturerna ger minskande värme i fallande temperaturordning.

I figur 4.3 har värmeeffekten, figur 4.1 plottats mot värmen, figur 4.2 för de olika isoterma temperaturerna. Detta används som indata till beräkningsprogrammet.



Figur 4.3: Värmeeffekt plottad mot värme från de isoterma kalorimetrimätningarna. 50 °C-kurvan ger den översta kurvan och de andra temperaturkurvorna kommer i fallande ordning med 5 °C-kurvan längst ner.

4.2 Temperaturberäkningar

4.2.1 Termiska egenskaper

Medelvärdet av mätningarna med Hotdisk 2500, som beskrivs i avsnitt 3.4.1, redovisas i tabell 4.2. Dessa värden används som inparametrar till beräkningarna i båda versionerna av Hacon.

Tabell 4.2: Termiska egenskaper

Material	Värmeledningsförmåga (W/mK)	Värmekapacitet (MJ/m ³ K)
EPS	0,0291	0,035
Betong	2,189	2,093

4.3 Jämförelse av mätnings- och beräkningsresultat

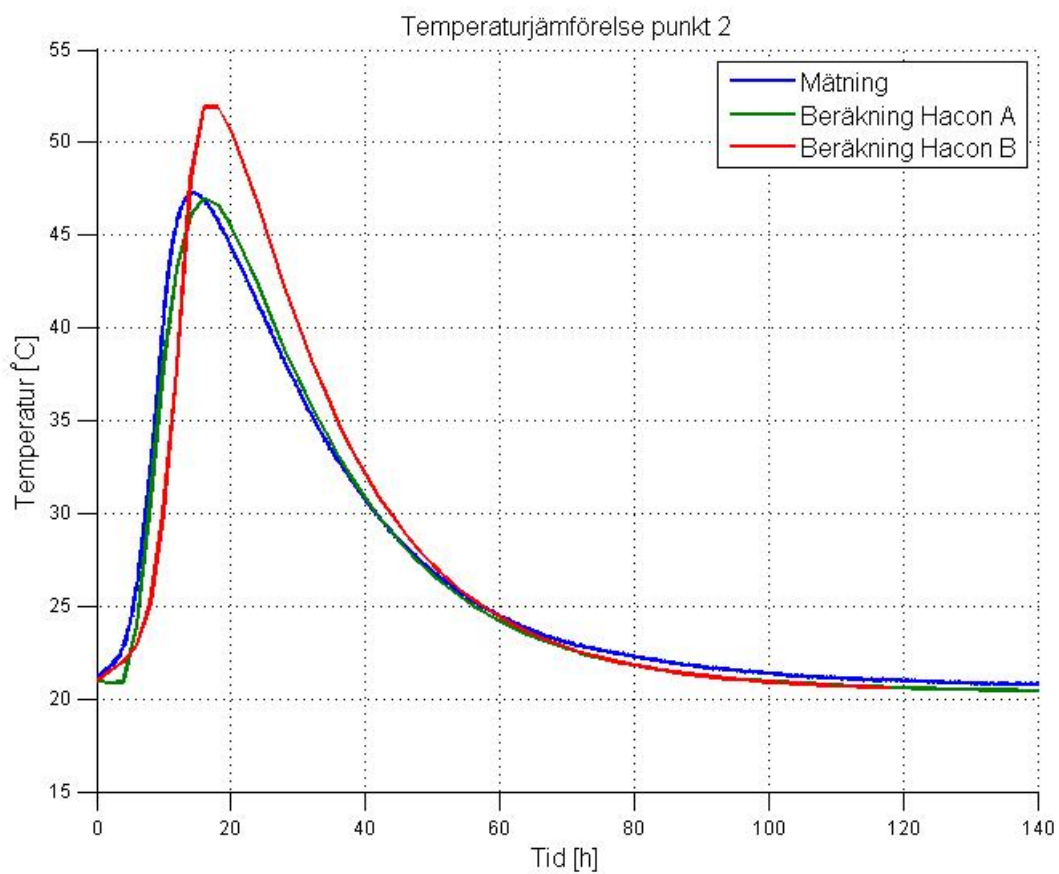
Tre punkter har valts ut för att redovisa temperaturen för både mätningen och de båda beräkningarna under härdningsförloppet.

Valet av punkter gjordes för att kunna visa var och på vilket sätt resultaten korrelerade. Punkt 2 valdes för att visa hur de olika beräkningsmetoderna beskrev temperaturutvecklingen i den nedre isolerade delen av pelaren som nådde höga temperaturer. Punkt 14 valdes för att visa hur de olika beräkningsmetoderna beskrev temperaturutvecklingen i den övre oisolerade delen av pelaren som höll relativt låga temperaturer och punkt 20 valdes för att visa hur beräkningsmetoderna beskrev temperaturutvecklingen nära den oisolerade randen vid PVC-röret.

4.3.1 Temperaturjämförelse i samma punkter

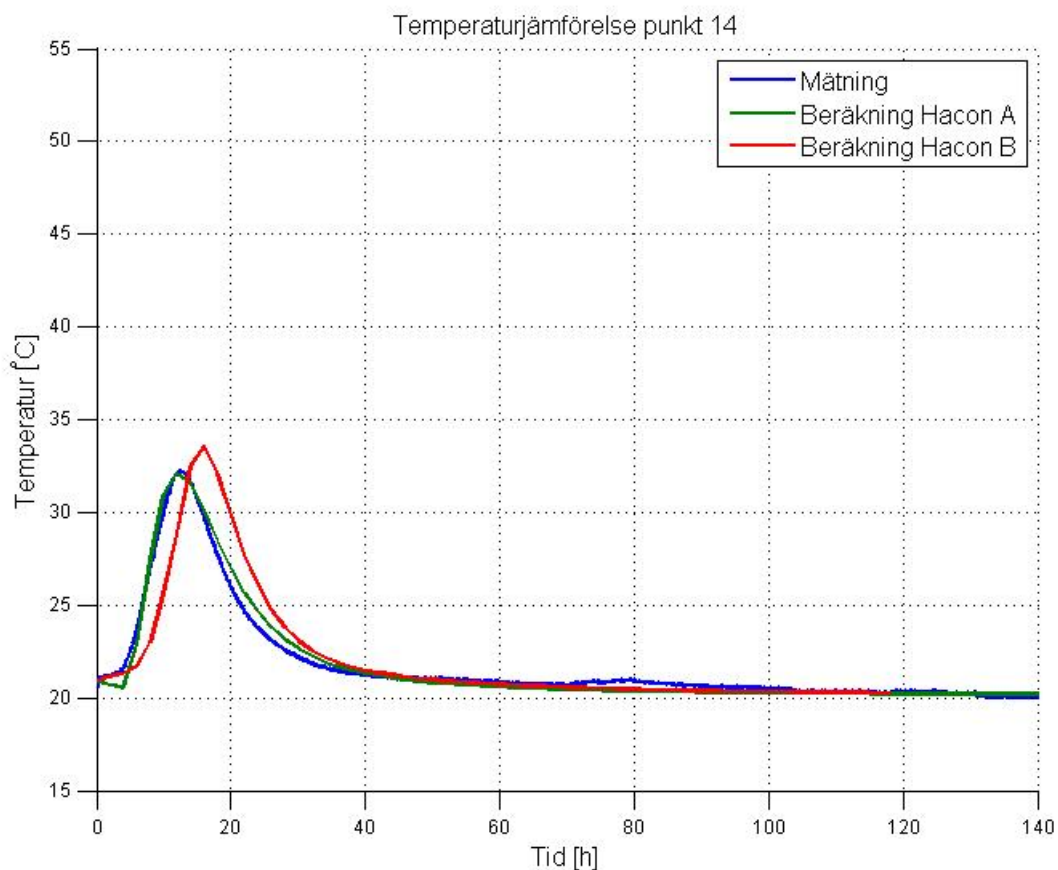
I figur 4.4 visas temperaturutvecklingen från beräkningarna och mätningen i punkt 2, som ligger i mitten av den isolerade delen av pelaren, se figur 3.1.

Den isoterma beräkningen har en högre maxtemperatur och är lite förskjuten i tiden under stora delar av förloppet.



Figur 4.4: Temperaturjämförelse i punkt 2 som ligger i den isolerade delen av pelaren, se figur 3.1. Hacon B ger betydligt högre maxtemperatur än mätningen och Hacon A. Mätningen får sin temperaturtopp lite tidigare än Hacon A och B.

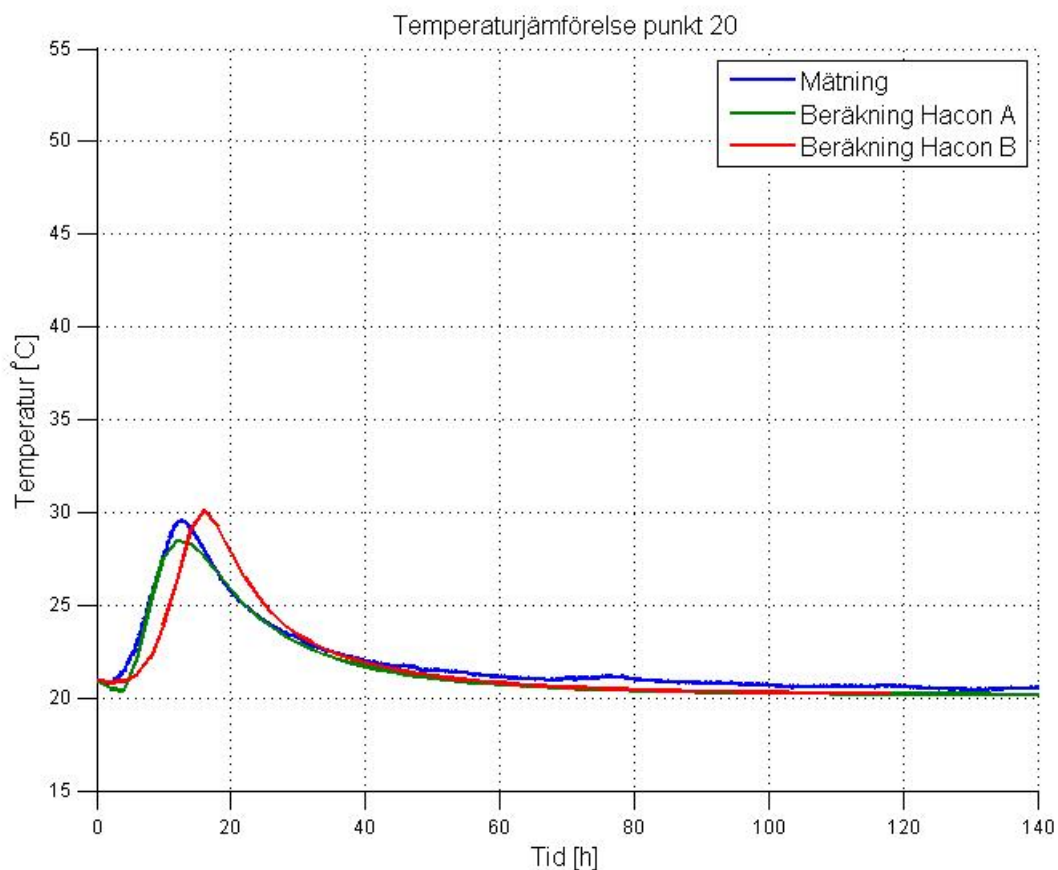
I figur 4.5 visas temperaturerna från beräkningarna och mätningen i punkt 14, som ligger i den oisolerade delen av pelaren, se figur 3.1.



Figur 4.5: Temperaturjämförelse i punkt 14, som ligger i den oisolerade delen av pelaren, se figur 3.1. Hacon B ger lite högre maxtemperatur och är lite förskjuten i tiden jämfört med Hacon A och mätningen som är väldigt lika i denna delen av pelare.

Den isoterma maxtemperaturen är även här högre och förskjuten i tiden.

I figur 4.6 visas temperaturerna från beräkningarna och mätningen i punkt 20, som ligger i den oisolerade delen av konstruktionen nära PVC-röret, se figur 3.1.



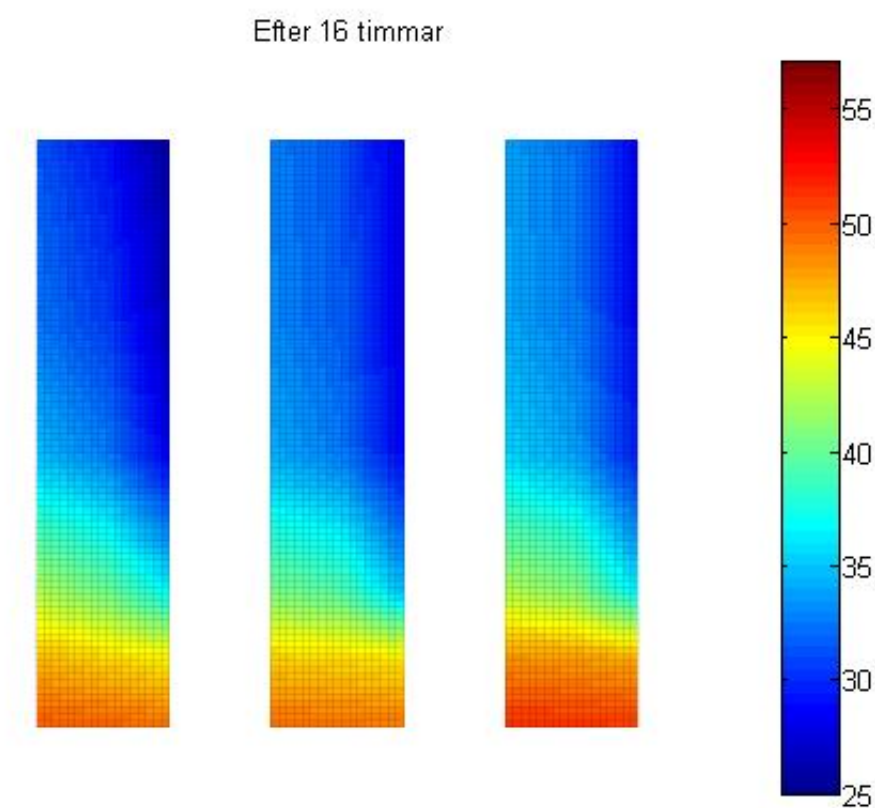
Figur 4.6: *Temperaturjämförelse i punkt 20, som ligger i den oisolerade delen av konstruktionen nära PVC-röret, se figur 3.1. Hacon B ger något högre maxtemperatur och är förskjuten i tiden jämfört med mätningen och Hacon A. Hacon A ger lite lägre maxtemperatur än mätningen, men de ligger väldigt lika i tiden.*

Den isoterma maxtemperaturen ligger bra, men kurvan är även här förskjuten i tiden.

4.3.2 Temperaturjämförelse vid samma tid

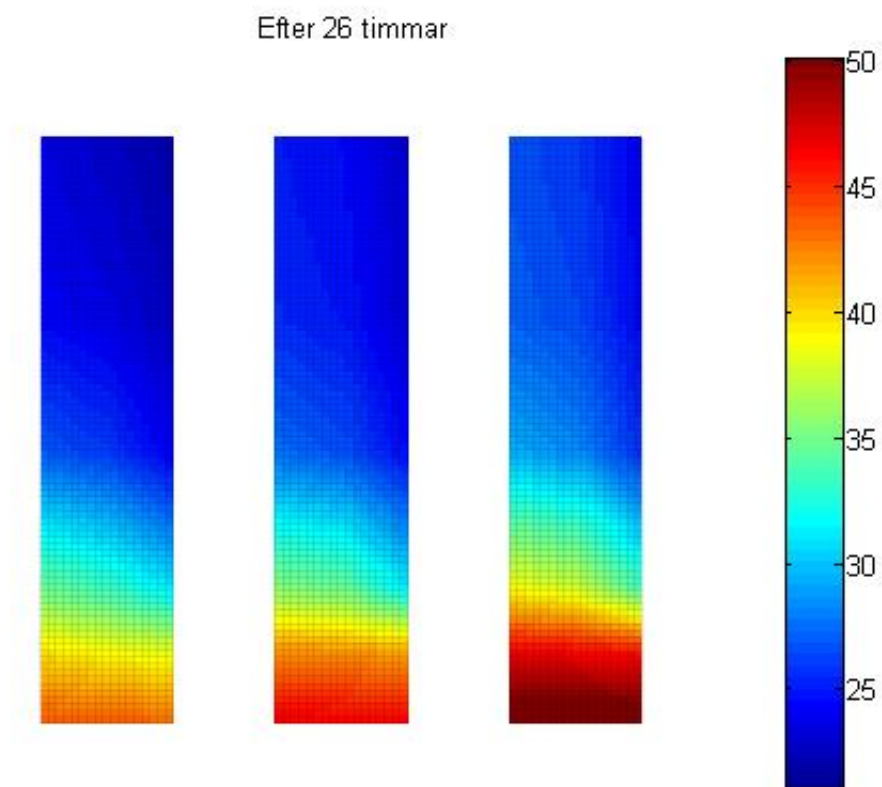
Vid tre tidpunkter visas alla mätpunkter samt resultaten från beräkningarna vid motsvarande tid. Tiderna vid vilka temperaturerna jämförs är efter 16, 26 och 36 timmar. Vid ca 16 ser temperaturen ut att nå sitt max. Innan dess är kurvorna ganska lika så det verkar inte intressant att titta på tidpunkter före temperaturens maxvärde. Sedan visas ytterligare två tidpunkter, 26 och 36 timmar för att se hur skillnaderna mellan mätning och beräkningar ser ut under avsvlningsprocessen.

I figur 4.7 visas temperaturerna från mätningen och beräkningarna efter 16 timmar.



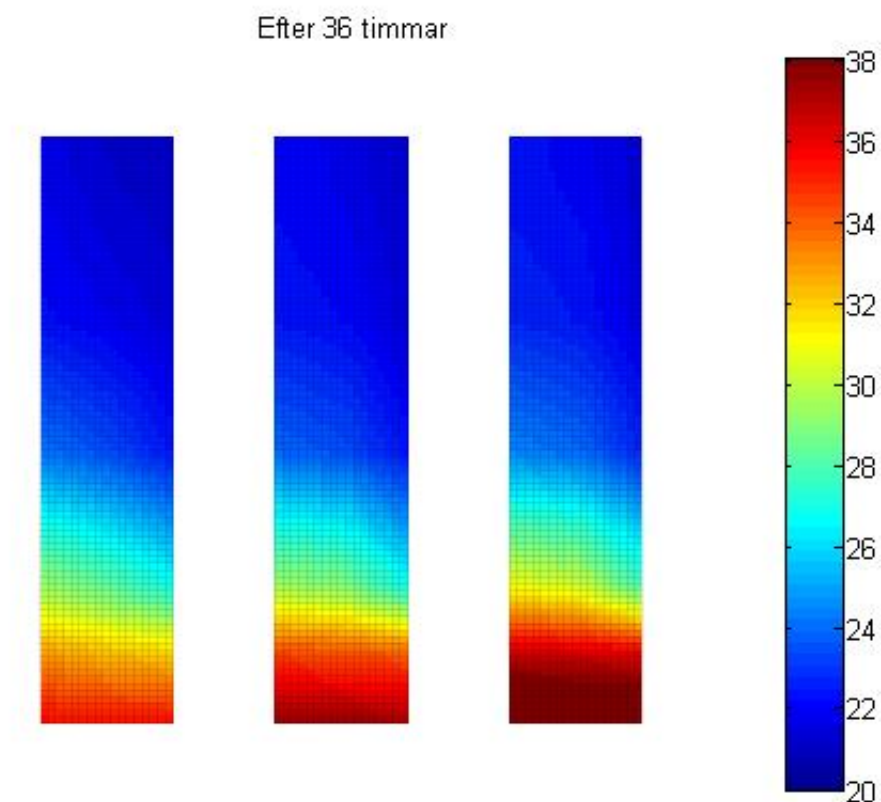
Figur 4.7: *Temperaturjämförelse efter 16 timmar. Till vänster visas resultaten från temperaturmätningen, i mitten visas resultaten från Hacon A och till höger visas resultaten från Hacon B*

I figur 4.8 visas temperaturerna från mätningen och beräkningarna efter 26 timmar.



Figur 4.8: *Temperaturjämförelse efter 26 timmar. Till vänster visas resultaten från temperaturmätningen, i mitten visas resultaten från Hacon A och till höger visas resultaten från Hacon B*

I figur 4.9 visas temperaturerna från mätningen och beräkningarna efter 36 timmar.



Figur 4.9: *Temperaturjämförelse efter 36 timmar. Till vänster visas resultaten från temperaturmätningen, i mitten visas resultaten från Hacon A och till höger visas resultaten från Hacon B*

Överlag ger beräkningen med Hacon B högre temperaturer än beräkningen med Hacon A, speciellt i den nedre delen av pelaren där de högsta temperaturerna uppnås.

4.3.3 Maxtemperatur

I tabell 4.3 redovisas de maximala temperaturerna och tiden då dessa infaller samt skillnader mellan mätningen och beräkningen med Hacon A efter optimeringen och skillnader i maxtemperatur mellan Hacon A och B, se tabell 4.4.

Tabell 4.3: Maxtemperaturer och tider

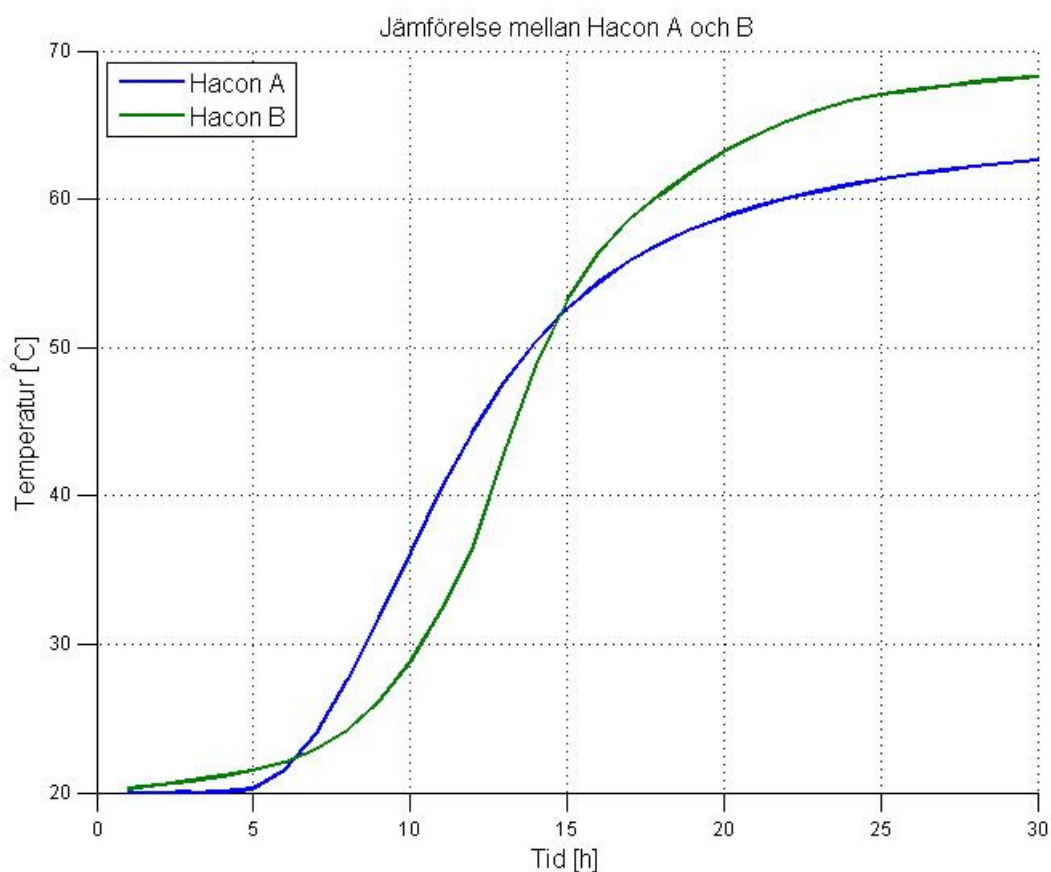
Punkt	Mätning		Hacon A		Hacon B	
	t	T	t	T	t	T
1	15	50	17	50	18	57
2	14	47	16	47	16	52
3	13	43	15	40	16	45
4	13	37	13	34	16	37
5	12	36	12	34	16	36
6	12	35	12	33	16	35
7	12	34	12	33	16	35
9	15	50	17	50	18	57
10	14	46	16	46	17	52
11	13	41	14	39	16	44
12	12	35	12	33	16	36
13	12	33	12	32	16	34
14	13	32	12	32	16	34
15	12	32	12	32	16	34
17	15	49	17	50	18	56
18	14	45	16	46	17	51
19	13	37	15	34	16	38
20	13	30	12	29	16	30
21	12	28	12	28	16	29
22	13	28	12	28	16	29
23	13	27	12	28	16	29

Tabell 4.4: Skillnad i maxtemperatur

Punkt	Hacon A - Mätning	Hacon B - Hacon A
1	0	7
2	0	5
3	-3	5
4	-3	3
5	-2	2
6	-2	2
7	-1	2
9	0	7
10	0	6
11	-2	5
12	-2	3
13	-1	2
14	0	2
15	0	2
17	1	6
18	1	5
19	-3	4
20	-1	1
21	0	1
22	0	1
23	1	1

4.4 Kontrollberäkning

För att undersöka beräkningsprogrammen ytterligare gjordes en förenklad modell med enklast möjliga geometri och utan indata för randvillkoren, vilket tar bort en del möjliga felkällor. Figur 4.10 visar skillnaden mellan beräkningar med Hacon A och B för en 2D kvadrat vid helt adiabatiska förhållanden. Figuren visar att beräkningsmodellerna ger olika temperaturförlopp och olika maxtemperatur.



Figur 4.10: Skillnad i beräkning med Hacon A och B för en 2D kvadrat vid helt adiabatiska förhållanden. Hacon B ger högre maxtemperatur än Hacon A.

5 Diskussion

5.1 Isoterm kalorimetri

I detta avsnitt diskuteras de metoder och resultat som användes för cementhaltsbestämningen och för den isoterma kalorimetrimätningen.

5.1.1 Cementhalt

I beräkningen, se tabell 4.1 gjordes antagandet att vct inte påverkades av siktningen. Detta var ett nödvändigt antagande för att kunna utvärdera cementhalten, men om det var ett korrekt antagande har inte bevisats.

Flygaska löses bara upp till viss del, vilket hade kunnat få stora konsekvenser på mätningen, men dessa konsekvenser bör ha varit små eftersom delar av flygaskan fastnade på magneten som användes vid omblandningen och på så sätt avlägsnades från restmaterialet. Cementhaltsmätningen antas vara trovärdig och hålla relativt hög noggrannhet då det var liten spridning av resultaten, se tabell 4.1. För metoden i sig antas en felmarginal på 5%.

Omräkningen av betongreceptet utan grov ballast gav $C/btg=0,238$, vilket var ett liknande värde som mätningen, vilken gav $C/btg=0,235$. Vilket innebär en skillnad på ca 1 %. Om detta är en bra metod för att utvärdera resultatet finns ingen erfarenhet av, men i detta fallet ges inte någon anledning att misstro det.

5.1.2 Indata till Hacon B

För de temperaturer som ligger långt från betongens blandningstemperatur skulle man kunna förvärma respektive förkyla proven innan de placeras i kalorimetrarna för att minska den störning som det innebär att stoppa in prov som först måste nå rätt temperatur. Detta borde dock bara haft effekt på den första delen av mätkurvan.

I figur 4.1 kan man som förväntat se att reaktionerna går fortare vid högre temperatur. Man ser även sulfatoppen för alla temperaturer utom vid 50 °C. Om detta

beror på att den höga temperaturen gör att andra reaktioner sker eller om sulfat-toppen kommer samtidigt som huvudtoppen så det inte går att urskilja en separat topp är svårt att säga.

Kurvan för 35 och 50 °C kalorimetrarna var brusigare än de andra. Detta kan bero på att instrumenten inte var tillräckligt känsliga. Försök med olika betongmängder borde utföras för denna typ av kalorimetrar för att se om resultaten blir stabilare.

I figur 4.2 korsar 20°C-kurvan 12 - och 5 °C-kurvan, vilket kan tyda på att något gått fel i den kalorimetern. Inget fel har dock gått att hitta för 20 °C-mätningen. Då alla mätningarna med 20°C-kalorimetern visar samma resultat och varken fel i baslinjen eller kalibreringskoefficienten skulle ge denna typen av fel antas mätningen vara rätt och att det är något som gör att cementets värmeutveckling inte följer samma mönster som vid de övriga temperaturerna.

I slutet extrapoleras kurvorna för att de ska anpassas till beräkningskoden. Detta förväntas inte påverka resultaten, då de framförallt är intressanta tidigare under förloppet. Efter så lång tid som detta är aktuellt är ofta inte temperaturutvecklingen intressant att undersöka.

5.2 Temperaturberäkningar

5.2.1 Termiska egenskaper

De termiska egenskaper som uppmättes skiljde sig en del från tabellvärden [17], men då dessa antas vara generella antas de uppmätta värdena vara ett bättre alternativ för de aktuella beräkningarna.

Ett argument för att den semi-adiabatiska metoden ska fungera bra är att man använder värmekapaciteten två gånger, dels när man tar fram de semi-adiabatiska parametrarna och dels när man räknar ut den förväntade temperaturen i en konstruktion. Dock är det ofta svårt att få reda på vilket värde på värmekapaciteten som använts vid framtagning av de semi-adiabatiska parametrarna. Om det använda värdet är ett tabellvärde så borde samma tabellvärde användas vid temperaturberäkning om dessa ska ta ut varandra. Samma gäller om det är ett uppmätt värde för att den efterfrågade effekten, att värmekapacitetens värde ska ta ut varandra, ska uppnås.

5.2.2 Optimering av Hacon A

Något vi inte räknat med var att vindhastigheten eller övergångstalet skulle påverka resultaten så mycket som de gjorde. För att få bra överensstämmelse optimerades resultaten i Hacon A genom att vindhastigheten ändrades. Huruvida denna stämmer

med den verkliga vindhastigheten från fläkten är svårt att säga, men det verkar inte orimligt att fläkten kommer upp i 6 m/s. Dock var inte vindhastigheten vid gjutningen cylindersymmetrisk, vilket gör detta till en osäkerhet. Om man ska se det utifrån ett produktionsperspektiv så sker oftast gjutning av grova konstruktioner i utomhusmiljö, det vill säga med varierande vindhastighet. Det är dock troligt att det inte påverkar lika mycket om man har en gjutform med lite större isolerande förmåga än vårt plaströr. De gjutformar som används vid exempelvis platsgjutning av väggar har ofta någon typ av plywood med ett ramverk av stål för att klara trycket. Plywooden har då lite bättre isolerande förmåga än vårt plaströr, vilket förmodligen gör att inflytandet av vindhastigheten minskar.

Valet att optimera Hacon A gjorde att vi inte kan dra slutsatser om vilken version av beräkningsprogrammen som ger bäst resultat, men om man antar att programmets indata är korrekt kan man säga att med Hacon A kan resultat med god överensstämmelse erhållas i hela konstruktionen genom att justera vindhastigheten i beräkningsmodellen. I Hacon B går det inte nå en bra överensstämmelse mellan beräknade och uppmätta temperaturer i hela konstruktionen genom att bara ändra vindhastigheten i beräkningsmodellen.

5.3 Referenskonstruktion

5.3.1 Gjutform

För att uppnå en isolerande förmåga som går att modellera med minimala felkällor användes cellplast. Som alternativ till detta diskuterades mineralull och sprutisolering. Alternativet med mineralull hade fördelen att den lätt skulle kunna formas efter pelarens form, men nackdelen att det var svårt att veta exakt värmeledningsförmåga och tjocklek då den beror på hur packad isoleringen varit och att den hade minskat avsevärt om den blivit fuktig vid gjutningen. Sprutisoleringen hade fördelen att den var lätt att forma och att det inte skulle bli skarvar. Dess nackdelar var bland annat att det då skulle behövas bygga ytterligare en form för isoleringen som hade krävt en mer komplex beräkningsmodell och att värmeisoleringsförmågan antas variera. Cellplasten som användes antogs vara det mest homogena isoleringsmaterialet, som dessutom skulle vara lättast att använda då det är styvt och inte så fuktkänsligt. Nackdelen var framförallt att det skulle bli genomgående skarvar där värme hade kunnat läcka ut. För att minska värmeläckage pressades isoleringsskivorna ihop och tejpades samman. I temperaturmätningarna kunde inget värmeläckage upptäckas då den uppmätta rumstemperaturen gav samma resultat som temperaturmätningen på utsidan av isoleringen.

Som gjutform användes ett PVC-rör. Dess termiska egenskaper testades inte, utan togs från tabeller till skillnad från cellplasten och betongens. Detta kunde ha utgjort en osäkerhet, då spridningen av termiska egenskaper var okänd. För att undersöka

hur detta påverkade beräkningen gjordes simuleringar både med och utan PVC-röret i Hacon och dessa visade att det inte gjorde någon märkbar skillnad.

5.3.2 Temperaturmätning i gjuten konstruktion

För att öka noggrannheten på mätningen kunde en kalibrering av temperaturmätarna gjorts, då de i rumstemperatur skiljde på ca 1,5 °C. Det är dessutom svårt att bevisa att temperaturmätarna sitter exakt där de förväntas göra. Under belastning av betongen eller vibrationerna under gjutningen kan linan gå av eller temperaturmätarna flyttats ur sina lägen. Dock verkade det som linorna satt relativt bra vid gjutningen, så mätpunkterna antas vara relativt rätt i sidled, men eventuellt någon centimeter förskjutna i höjdlid, vilket antas vara inom en acceptabel felmarginal. Dessa eventuella fels storlek borde vara försumbara jämfört med den variation som temperaturmätarna uppvisade i luft.

5.4 Jämförelse av mätnings- och beräkningsresultat

Här analyseras resultaten för att kunna dra slutsatser om kvaliteten på beräkningarna och vad detta beror på. För att ett beräkningsprogram ska anses fungera bra är det rimligt att tillåta ett fel på maximalt 3 °C. I betonghandboken [17] bedöms fel på ≤ 2 °C vara inom godkänd felmarginal och de termoelement som användes vid mätningen hade en spridning på ca 1,5 °C, vilket gör att ett fel på ≤ 3 °C bedöms som godkänt.

5.4.1 Skillnader i resultatet mellan Hacon A och B

I figur 4.7, 4.8 och 4.9 syns att Hacon B ger bra resultat i stora delar av konstruktionen, men ger kraftigt överdrivna resultat i de varma områdena i de nedre delarna av pelaren. I dessa figurer kan man även se att temperaturgradienten är lika i hela konstruktionen, utom i nedersta delen.

Man ser i tabell 4.4 att optimeringen av beräkningen i Hacon A nått godkända resultat då skillnaden mellan mätningen och beräkningsresultaten med Hacon A inte överstiger 3 °C. I samma tabell ses också att Hacon B ger bra, men något högre temperaturer i stora delar av konstruktionen. De delar som inte ger resultat som överensstämmer med beräkningen med Hacon A var det isolerade området. Detta tyder på att Hacon B fungerar under förutsättning att temperaturerna inte blir för höga. Resultaten i tabell 4.4 tyder på att Hacon B ger liknade resultat som Hacon A när temperaturerna understiger ca 45 °C. Vilken temperatur som anger gränsen för var Hacon B fungerar och inte antas vara olika för olika cementsorter. Vad det beror på att Hacon B överdriver temperaturerna vid höga temperaturer kan

ligga i indatan, men om vi förutsätter att indatan är korrekt visar resultaten på att cementshärdningen uppvisar ett historieberoende.

Ett historieberoende skulle kunna betyda att reaktionsprodukterna och därmed värmeutvecklingen inte blir samma för härdning i en hög isoterm temperatur jämfört med en härdning i semi-adiabatiska förhållanden som tidvis når upp till höga temperaturer [6]. Denna teori borde undersökas utförligare för att se om teorin verkar stämma och i så fall om man kan hitta någon gränstemperatur för då detta verkar uppkomma, eller om det finns något annat form av förutsägbart mönster i reaktionsförändringarna.

I tabell 4.3 syns att gemensamt för mätningen och beräkningarna är att temperaturtoppen kommer senare i den isolerade delen av konstruktionen. Om man jämför Hacon A och mätningen ser man att temperaturtoppen kommer senare i beräkningen än i mätningen i den isolerade delen av konstruktionen. I beräkningen med Hacon B är temperaturkurvan förskjuten i tiden i hela konstruktionen. Denna tidsförskjutning kan bero på de justeringar som gjorts i början av kurvorna. Huruvida detta är fallet borde undersökas närmare.

Sammanfattningsvis är det några saker som behöver utredas för att kunna svara på om temperaturberäkningar med indata som är framtagna med isoterm kalorimetri kan beskriva temperaturutvecklingen i härdande betongkonstruktioner. Tidsförskjutningen; kan man genom att justera angreppssättet till initieringsfasen få bättre överensstämmelse med ett verkligt temperaturförlopp? Höga temperaturer; vad är det som gör att beräkningen med isoterm indata överdriver de beräknade temperaturerna vid hög härdningstemperatur? Beror det på indatan, beräkningsprogrammet eller att cementshärdningen har ett historieberoende?

5.4.2 Kontrollräkning

Figur 4.10 visar den beräknade temperaturen i en 2D kvadrat under adiabatiska förhållanden. Denna visar att även vid enklare förutsättningar är Hacon B långsammare i starten men når en högre sluttemperatur. Om detta beror på beräkningsprogrammet, modellen eller indatan borde undersökas närmare, men resultatet tyder på att man inte bör förvänta sig samma resultat med de två beräkningsprogrammen.

5.5 Slutsatser

- Beräkningsmodellen som gick ut på att interpolera mellan Q-P-kurvorna för konstanta temperaturer, framtagna med isoterm kalorimetri, kunde implementeras i beräkningsprogrammet Hacon.

- Hacon B ger liknande resultat som Hacon A vid måttliga temperaturer. Vilka temperaturer detta gäller för antas vara olika beroende på betongens innehåll, men för den använda betongtypen blev resultaten inom felmarginalen 3 °C om betongtemperaturen var mellan 20-45 °C.
- Hacon B ger dålig överensstämmelse med Hacon A om temperaturen överstiger 45 °C för den provade betongen.
- Beräkningsmodellen i Hacon B ger inte samma resultat som Hacon A och verkar inte spegla det verkliga reaktionsförloppet då den går ut på att värmeeffekten endast beror på utvecklad värme och betongens temperatur. Det verkliga temperaturförloppet verkar även bero på vilka temperaturer den unga betongen haft tidigare under härdningsprocessen.

5.6 Förslag till fortsatta studier

- Tidsförskjutningen i Hacon B. Vad beror den på? Kan man hitta ett sätt att generellt lösa problemet?
- Varför fungerar inte Hacon B vid högre temperaturer? Beror det på fel i indatan eller på att cementshärdning har ett historieberoende?
- Hur stora blir felmarginalen för cementupplösningen vid olika inblandningshalter av tillsatsmaterial?
- Hur mycket påverkar förvärmning/förkylning av prov innan de placeras i isoterma kalorimetrar?

Litteraturförteckning

- [1] J I Alvarez, A Martin, P J G Casado, I Navarro, and A Zornoza. Methodology and validation of a hot hydrochloric acid attack for the characterization of ancient mortars. *Cement and Concrete Research*, 29(7):1061–1065, 1999.
- [2] J W Bullard, H M Jennings, R A Livingston, A Nonat, G W Scherer, J S Schweitzer, K L Scrivener, and J J Thomas. Mechanisms of cement hydration. *Cement and Concrete Research*, 41(12):1208–1223, 2011.
- [3] P Byberger. En ny metod att hantera temperaturutveckling i härdande betongkonstruktioner-isoterm kalorimetri används för att mäta värmeutvecklingen i små prover. *Rapport TVBM 5000, Byggnadsmaterial, Lunds tekniska högskola*, 2014.
- [4] ASTM C1702. Standard test method for measuring of heat of hydration of hydraulic cementitious materials using isothermal conduction calorimetry. *ASTM, international*, 2014.
- [5] O Dahlblom and J Lindeman. Hacon - a program for simulation of temperature and stress in hardening concrete. *Rapport TVSM 3057, Structural Mechanics, Lund University*, 2000.
- [6] G De Schutter and L Taerwe. General hydration model for portland cement and blast furnace slag cement. *Cement and Concrete Research*, 25(3):593–604, 1995.
- [7] JI Escalante-Garcia and JH Sharp. Effect of temperature on the hydration of the main clinker phases in portland cements: Part i, neat cements. *Cement and concrete research*, 28(9):1245–1257, 1998.
- [8] G Fagerlund. Mineraliska tillsatsmedel i cement. *Bygg & teknik*, (7):23–29, 2010.
- [9] X Gao, M Cyr, S Multon, and A Sellier. A three-step method for the recovery of aggregates from concrete. *Construction and Building Materials*, 45:262–269, 2013.

- [10] W A Gutteridge and J A Dalziel. Filler cement: The effect of the secondary component on the hydration of portland cement: Part 2: Fine hydraulic binders. *Cement and Concrete Research*, 20(6):853–861, 1990.
- [11] W A Gutteridge and J A Dalziel. Filler cement: the effect of the secondary component on the hydration of portland cement: part i. a fine non-hydraulic filler. *Cement and Concrete Research*, 20(5):778–782, 1990.
- [12] F Han, Z Zhang, J Liu, and P Yan. Hydration kinetics of composite binder containing fly ash at different temperatures. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 124(3):1691–1703, 2016.
- [13] D Jansen, F Goetz-Neunhoeffler, B Lothenbach, and J Neubauer. The early hydration of ordinary portland cement (opc): An approach comparing measured heat flow with calculated heat flow from qxrd. *Cement and Concrete Research*, 42(1):134–138, 2012.
- [14] A R Jayapalan, M L Jue, and K E Kurtis. Nanoparticles and apparent activation energy of portland cement. *Journal of the American Ceramic Society*, 97(5):1534–1542, 2014.
- [15] S Johansson. *Cement, i Betonghandbok, Material*. AB Svensk Byggtjänst, Cementa AB, 1994.
- [16] S Johansson and Redaktionsgruppen. *Tillsatsmaterial, i Betonghandbok, Material*. AB Svensk Byggtjänst, Cementa AB, 1994.
- [17] J Jonasson, M Emborg, and S Bernander. *Temperatur, mognadsutveckling och egenspanningar i ung betong, i Betonghandbok, Material*. AB Svensk Byggtjänst, Cementa AB, 1994.
- [18] B Lothenbach, K Scrivener, and RD Hooton. Supplementary cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, 41(12):1244–1256, 2011.
- [19] B Lothenbach and F Winnefeld. Thermodynamic modelling of the hydration of portland cement. *Cement and Concrete Research*, 36(2):209–226, 2006.
- [20] J Mac. Finite element analysis of temperature in hardening concrete using isothermal calorimetric data. *Rapport TVSM 5221, Structural Mechanics, Lund University*, 2017.
- [21] I Pane and W Hansen. Investigation of blended cement hydration by isothermal calorimetry and thermal analysis. *Cement and concrete research*, 35(6):1155–1164, 2005.
- [22] V A Quarcioni and M A Cincotto. Optimization of calculation method for determination of composition of hardened mortars of portland cement and hydrated lime made in laboratory. *Construction and Building Materials*, 20(10):1069–1078, 2006.

- [23] K A Riding, J L Poole, K J Folliard, M CG Juenger, and A K Schindler. Modeling hydration of cementitious systems. *ACI Materials Journal*, 109(2):225–234, 2012.
- [24] E Sakai, S Miyahara, S Ohsawa, S Lee, and M Daimon. Hydration of fly ash cement. *Cement and Concrete Research*, 35(6):1135–1140, 2005.
- [25] K L Scrivener and A Nonat. Hydration of cementitious materials, present and future. *Cement and concrete research*, 41(7):651–665, 2011.
- [26] N Shanahan, V Tran, and A Zayed. Heat of hydration prediction for blended cements. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, pages 1–13.
- [27] J Stark. Recent advances in the field of cement hydration and microstructure analysis. *Cement and Concrete Research*, 41(7):666–678, 2011.
- [28] H FW Taylor. *Cement chemistry*. Thomas Telford, 1997.
- [29] L Wadsö. An experimental comparison between isothermal calorimetry, semi-adiabatic calorimetry and solution calorimetry for the study of cement hydration. *Nordtest report TR*, 522, 2003.
- [30] Lars Wadsö. Operational issues in isothermal calorimetry. *Cement and Concrete Research*, 40(7):1129–1137, 2010.
- [31] L Wadsö, F Winnefeld, K Riding, and P Sandberg. *Calorimetry, i A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials*. Crc Press, 2015.
- [32] Q Xu, J Hu, J M Ruiz, K Wang, and Z Ge. Isothermal calorimetry tests and modeling of cement hydration parameters. *Thermochimica Acta*, 499(1):91–99, 2010.
- [33] J Zelić, D Rušić, D Veza, and R Krstulović. The role of silica fume in the kinetics and mechanisms during the early stage of cement hydration. *Cement and Concrete Research*, 30(10):1655–1662, 2000.