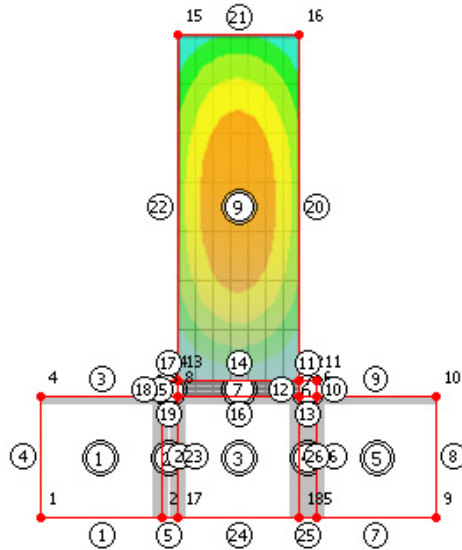




LUND
UNIVERSITY



SIMULERING AV BETONG UNDER HÄRDNING

HENRIK SJÖBECK

Structural
Mechanics

Master's Dissertation

Department of Construction Sciences
Structural Mechanics

ISRN LUTVDG/TVSM--06/5146--SE (1-116)
ISSN 0281-6679

SIMULERING AV BETONG UNDER HÄRDNING

Master's Dissertation by
HENRIK SJÖBECK

Supervisors:

Ola Dahlblom, Professor,
Div. of Structural Mechanics

Manouchehr Hassanzadeh, PhD,
Vattenfall utveckling AB

Copyright © 2006 by Structural Mechanics, LTH, Sweden.
Printed by KFS I Lund AB, Lund, Sweden, January, 2007.

For information, address:
Division of Structural Mechanics, LTH, Lund University, Box 118, SE-221 00 Lund, Sweden.
Homepage: <http://www.byggmek.lth.se>

Abstract

Concrete hardens as a result of chemical reactions between water and cement. Cement is a hydraulic binder, in the reaction the cement binds water-molecules. This is an exothermic process, heat is produced during the reactions. How fast this process proceeds is much depending of the temperature.

The amount of heat produced during the hardening of the concrete is also depending on the thickness of the structure. While heat is produced in the concrete the material will expand but when the concrete is becoming cooler the shrinkage is prevented. This results in tension stresses at the surface of the concrete. This phenomenon is particularly common in large structures where the temperature-distribution is nonuniform.

There are several measures which can be used to avoid cracks in concrete. One method is to replace some of the concrete's water with ice and thereby get a material with a decreased temperature. Nowadays there are computer-programs, like Hacon, capable of performing simulations of the temperature and stress development.

In order to receive a good and reliable result from the computer-calculations it is required to have good knowledge about the concrete used. Every property of the material is in the program described by several parameters. For example the development of the compressive-strength is described by four parameters.

Temperature measurements in newly placed concrete have been carried out at Vattenfall Research and Development AB. On the basis of these measurements parameters that describe the development of the hydration for two types of cement have been calculated.

The temperature-development in large concrete walls have been calculated using Hacon. The result has been compared with measured temperatures and the resemblance is very good.

Sammanfattning

Betong hårdnar på grund av de kemiska reaktioner som sker då klinkerkomponenterna i cementet reagerar med vatten. Cement är ett hydrauliskt bindemedel, det reagerar kemiskt med vatten både i vatten och i luft. I reaktionen binder cementkornen vattenmolekyler, de hydratiserar. Härifrån kommer namnet på processen där cement reagerar med vatten, hydrationsprocess. Denna process är en exoterm process, det avges värme vid reaktionen. Hur snabbt denna process sker beror mycket på den temperaturen.

Beroende på konstruktionens tjocklek kommer mängden utvecklad värme att variera. Medan värme utvecklas i betongen kommer materialet att expandera. Men när betongen vill återgå till sin ursprungliga volym förhindras denna krympning och därmed uppstår dragspänningar vid ytan. Detta fenomen är särskilt tydligt i grova konstruktioner där temperaturfördelningen över tvärsnittet blir ojämn.

Det finns ett antal olika åtgärder som kan vidtas för att minska risken för sprickbildning. Exempelvis kan en viss del av betongens blandvatten bytas ut mot is. Numera finns det även datorprogram som kan simulera både temperatur- och spänningsutvecklingen. Ett sådant program är Hacon.

För att få ett bra resultat av datorberäkningarna krävs god kännedom om betongen som används. Varje egenskap hos materialet beskrivs i programmet av ett antal olika parametrar. Dessa parametrar tillsammans bestämmer hur materialets tryckhållfasthet utvecklas eller med vilken hastighet cementreaktionerna sker.

Temperaturmätningar på nygjuten betong har genomförts på Vattenfall Research and Development AB. Utifrån dessa mätningar har parametrarna som styr hydratationen för två cementtyper beräknats med Hacon.

Temperaturutvecklingen hos stora betongväggar har simulerats med Hacon. Resultatet har jämförts med uppmätta temperaturer och överensstämmelsen är mycket god.

Förord

Denna rapport är en del av ett examensarbete som utförts på avdelningen för byggnadsmekanik vid Lunds Tekniska Högskola i samarbete med Vattenfall Research and Development AB. Arbetet har utförts under sommaren och hösten 2006.

Först och främst skulle jag vilja tacka mina två handledare professor Ola Dahlblom på avdelningen för byggnadsmekanik och universitetslektor Manouchehr Hassanzadeh vid Vattenfall Research and Development AB som under hela arbetets gång hjälpt och stöttat mig. Dessutom skulle jag vilja tacka Elforsks betongtekniska program gentemot vattenkraften, som sponsrat projektet.

Jag skulle också vilja tacka Bo Zadig som hjälpt mig med rapportens layout.

Lund, december 2006

Henrik Sjöbeck

Innehåll

1	Introduktion	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Syfte	1
1.3	Arbetets omfattning	2
2	Betong under härdning	3
2.1	Värmeutveckling i betong	3
2.1.1	Studie av parametrar som påverkar beskrivningen av betongens utveckling	8
2.2	Trykhållfasthetsutveckling i betong	12
2.2.1	Studie av parametrar	15
2.3	Draghållfasthetsutveckling i betong	19
2.3.1	Studie av parametrar	20
2.4	Elasticitetsmodulens utveckling i betong	23
2.4.1	Studie av parametrar	26
3	Parameterstudie	31
3.1	Förutsättningar	31
3.2	Parametrar som styr beskrivningen av cementets utveckling	34
3.3	Parametrar som styr beskrivningen av trykhållfasthetsutvecklingen	38
3.4	Parametrar som styr beskrivningen av draghållfasthetsutvecklingen	38
3.5	Parametrar som styr elasticitetsmodulens utveckling	41
3.6	Parametrar som styr betongens kryptöjning	44
3.7	Yttre parametrar som styr betongens utveckling	48
3.7.1	Gjuttemperaturens inverkan	48
3.7.2	Vindhastighetens inverkan	50

3.7.3	Olika gjutformars inverkan	51
3.7.4	Inverkan då olika gjut- och lufttemperaturer kombineras	56
4	Simulering av fullskaleförsök	63
4.1	Förutsättningar	63
4.2	Modellering	65
4.3	Resultat	66
5	Experimentellt arbete	73
5.1	Förutsättningar	73
5.2	Tillvägagångssätt	74
5.3	Resultat	76
6	Slutsatser	85
	Litteraturförteckning	87
	Appendix A	89
	Betongrecept vid experiment	89
	Appendix B	91
	Simulering i Hacon	91
	Hur den fysiska modellen ritas upp	91
	Definiering av modellens material	92
	Definiering av modellens randvillkor	93
	Genomförande av beräkningar	93
	Analys av resultat	94
	Appendix C	95
	Exempel på simulering i Hacon	95
	Introduktion	95
	Hur man skapar modellen i Hacon	95
	Hur modellens material definieras	101
	Hur modellens randvillkor definieras	104
	Genomförande av beräkningen	106
	Hur man visar resultatet av simuleringen	107

Kapitel 1

Introduktion

1.1 Bakgrund

Betong härdar på grund av de kemiska reaktioner som sker i materialet då cement och vatten reagerar. Vid denna reaktion kommer samtidigt värme att utvecklas, det är en exoterm process. Beroende på konstruktionens tjocklek kommer mängden utvecklad värme att variera. För grova konstruktioner kommer följderna av detta bli en ojämn temperaturfördelning över tvärsnittet. Detta medför i sin tur att dragspänningar uppstår vid ytan då betongen förhindras att krympa [1]. Detta kan leda till sprickbildning.

Denna sprickbildning kan till exempel undvikas genom att tillsätta is i betongens tillsatsvatten eller gjuta in kylrör i konstruktionen. För att kunna planera denna typ av åtgärder så att de kan genomföras med önskat resultat behöver temperatur- och spänningsutvecklingen i materialet simuleras med dator.

1.2 Syfte

Programmet Hacon [2] är ett finita elementprogram som kan simulera både spännings- och temperaturutvecklingen i betongkonstruktioner. I programmet finns möjligheten att antingen räkna tvådimensionellt eller axisymmetriskt. Detta är en begränsning eftersom den tredimensionella effekten inte tas med i beräkningarna på ett helt tillfredsställande sätt. Däremot kan modellens tjocklek anges, men spänningar och töjningar i den tredje dimensionen

kan fortfarande inte beräknas. Används programmet till att räkna på exempelvis en dammbyggnad används med fördel analystypen plan töjning och då blir resultatet bra även om programmet inte kan räkna i tre dimensioner.

Med god kännedom om materialet ska man med hjälp av detta program kunna undvika eventuell sprickbildning. Syftet med detta arbete är att dels genomföra en parameterstudie för att klargöra varje materialparameters inverkan på resultatet och dels att verifiera programmets reliabilitet.

1.3 Arbetets omfattning

I arbetet genomförs en parameterstudie som ska visa hur variationen av de olika parametrarna dels påverkar beskrivningen av respektive materialegenskap och dels temperatur- och spänningsutvecklingen. Syftet med denna studie var att undersöka hur viktigt valet av parametrar är. Studiens omfattning har begränsats till de parametrar som ansetts vara av störst värde att undersöka. Anledningen till detta är att övriga parametrar inte är så betydande för detta arbete samt att tiden inte fanns att fördjupa sig ytterligare. Vilka parametrar som undersökts framgår i rapporten.

I arbetet genomförs dessutom ett experiment vid Vattenfalls provningsanläggning i Älvkarleby. Vid experimentet mäts temperaturen kontinuerligt i materialet och därefter beräknas cementets mognadsparametrar med hjälp av programmet Hacon.

Slutligen jämförs resultatet från ett fullskaleförsök genomfört i Ringhals [3] med det från en simulering.

Kapitel 2

Betong under härdning

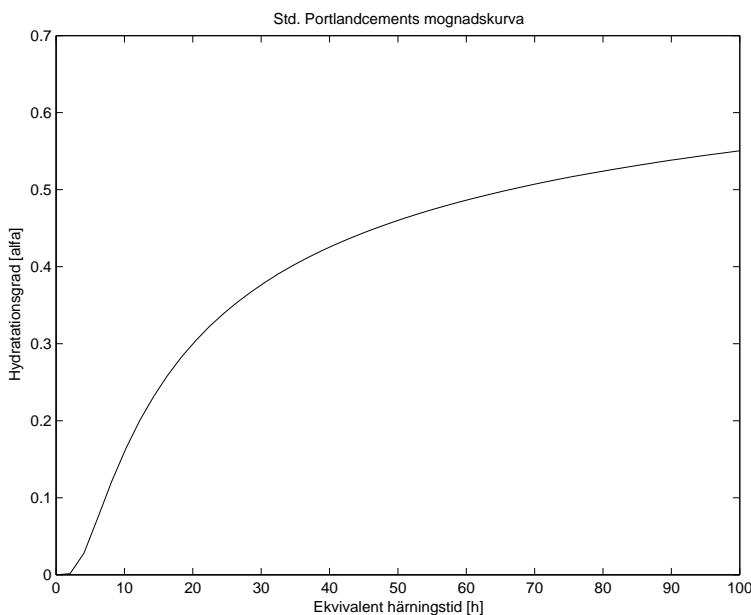
2.1 Värmeutveckling i betong

Cement hårdnar på grund av de kemiska reaktioner som sker då klinker-komponenterna i cementet reagerar med vatten. Cement är ett hydrauliskt bindemedel, det reagerar kemiskt med vatten både i vatten och i luft. I reaktionen binder cementkornen vattenmolekyler, de hydratiserar. Härifrån kommer namnet på processen där cement reagerar med vatten, hydratationsprocess. Denna process är en exoterm process, det avges värme vid reaktionen. Hur snabbt denna process sker beror bland annat på cementets finhet. Ju mindre cementkornen är desto större blir cementets specifika yta och desto snabbare går då hydratationen. Men reaktionshastigheten är beroende av många fler faktorer, en som också är väldigt viktig att nämna är temperaturen.

Värmeutvecklingsförloppet är olika från cement till cement. Men värmeutvecklingen är ett direkt resultat av hur långt de kemiska reaktionerna mellan cementkomponenterna och vattnet har gått. Därför finns det också ett mått på hur långt reaktionerna gått, detta kallas för hydratationsgraden. Detta mått brukar betecknas med α och är kvoten mellan mängden fullständigt hydratiserad cement och den totala mängden cement. Genom att anta att förutsättningarna är konstanta under hela hydratationen kan man även uttrycka hydratationsgraden som kvoten mellan utvecklad värme vid en viss tidpunkt och värmeutvecklingen vid fullständig hydratation. På samma sätt kan hydratationsgraden även uttryckas med hjälp av cementets relativa håll-

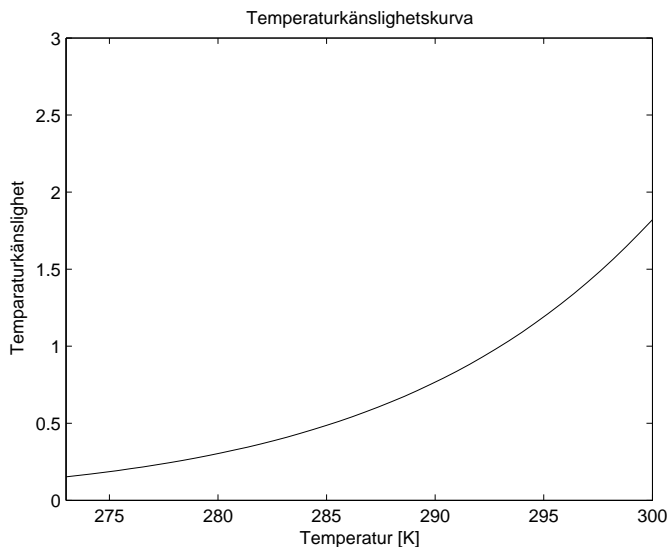
fasthet. Det är väldigt svårt att praktiskt ta reda på hur mycket cement som hydratiserats fullständigt, därför används ofta den relativa hållfastheten som ett mått på hur långt reaktionerna har gått, hållfastheten är inte så svår att kontrollera.

Cementets hydratation är inte konstant med tiden. I början ökar hydratationen långsamt för att sedan öka kraftigt upp till en viss punkt, därefter blir hydratationsgraden mer eller mindre konstant. Hur sambandet mellan hydratationsgrad och tid kan se ut redovisas i figuren 2.1.



Figur 2.1: Standard Portlandcements mognadsutveckling

Detta samband kan på ett bra sätt uttryckas med hjälp av en exponentiell funktion. Hur snabbt kemiska reaktioner fortlöper kan uttryckas med hjälp av en Arrheniusfunktion. Detta innebär att derivatan av hydratationsgraden med avseende på tiden kan uttryckas som en exponentiell funktion. I denna funktion ingår tre parametrar, en referenstemperatur, temperaturen vid en viss tidpunkt och en materialparameter, θ_0 . Sambandet som beskriver hur cementreaktionerna förändras vid en förändrad temperatur redovisas i figur 2.2.



Figur 2.2: Exempel på en betongs temperaturkänslighetskurva

Detta samband brukar kallas för temperaturkänslighetskurva eller β_T -kurva. Matematiskt ser sambandet ut enligt nedan [1].

$$\frac{(d\alpha/dt)_T}{(d\alpha/dt)_{20}} = e^{\theta_0(\frac{1}{T_{20}} - \frac{1}{T})} \quad (2.1)$$

Här används 293K (20°C) som referenstemperatur. θ_0 är en materialparameter som inte är beroende av temperaturen.

Enligt ovan kan sambandet mellan relativa reaktionshastigheten likställas med den relativa hållfasthetsförändringen och den relativa värmeutvecklingen. Alltså följer både hållfasthets- och värmeutvecklingen cementets hydratationsgrad. Detta beskrivs närmare senare i rapporten.

Om hydratationsgraden stiger snabbt vid en tidig ålder innebär detta att

mycket värme utvecklas strax efter gjutningen. Samtidigt kommer betongens hållfasthet att öka snabbt. Detta cement kan vara ett så kallat snabbhärdande cement (SH-cement). I vissa sammanhang, exempelvis vid tillverkning av prefab-element, önskas en hög hållfasthet hos betongen vid en tidig ålder. Med ett SH-cement kan detta åstadkommas. Men detta görs på bekostnad av att väldigt mycket värme utvecklas på en gång, som i sin tur kan leda till sprickbildning.

För att kunna översätta en härdning vid en annan temperatur än vid referenstemperaturen 293K används begreppet mognadsålder. Detta är ett sätt att översätta ett cements mognad, vid en temperatur som är skild från referenstemperaturen, till en som svarar mot den vid 293K. Mognadsåldern kallas också för ekvivalent härdningstid. Enkelt uttryckt är denna ekvivalenta härdningstid den tid som cementet behöver härda för att uppnå samma hydratationsgrad som vid den aktuella temperaturen och tiden.

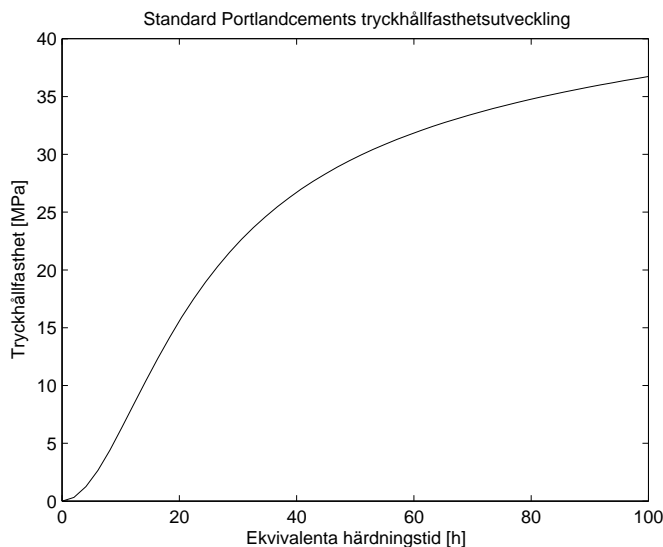
Den ekvivalenta härdningstiden kan beräknas med kännedom om ett temperaturkänslighetssamband. Detta samband ger i varje enskild punkt på kurvan en faktor som beskriver den relativa hastigheten hos de kemiska reaktionerna. Detta blir samma sak som att faktorn beskriver den relativa tiden vid härdning i 293K. Exempelvis om β_T -faktorn vid en viss temperatur är 0,5 innebär detta att härdningshastigheten vid denna temperatur är hälften så hög som den vid referenstemperaturen 293K. Vid denna specifika temperatur motsvarar två timmars härdning alltså bara en timme vid 293K.

Genom att i varje enskild punkt på temperaturkänslighetskurvan multiplicera faktorn med den tid som cementet får härda under detta förhållande erhålls ett antal tidsintervall inom vilka temperaturförhållandena är konstanta. Om alla tidsintervall summeras fås den totala mognadsåldern eller ekvivalenta härdningstiden t_e som denna också kallas. Matematiskt skulle detta kunna uttryckas som att man integrerar temperaturkänslighetskurvan med avseende på tiden [1].

$$t_e = \int_0^T \beta_T dt \quad (2.2)$$

Bestämning av ett cements temperaturkänslighet görs med fördel utifrån

tryckhållfastheten. Ett antal olika prover härdas under olika temperaturförhållanden. Därefter bestäms provernas tryckhållfasthet med jämna tidssteg. Mätresultaten ritas upp med hållfastheten på y-axeln och tiden på x-axeln enligt figur 2.3.



Figur 2.3: Betongens tryckhållfasthetsutveckling

I ett visst antal punkter på respektive kurva (en kurva för varje härdningstemperatur) beräknas kurvans lutning och jämförs med referenskurvas lutning vid samma hållfasthet (293K). Därefter förs denna relativa kurv lutning in i ett annat diagram. Varje relativ lutning motsvarar då en temperaturkänslighet vid den temperatur som kurv lutningen beräknats för. Då kan β_T -faktorn vid respektive temperatur beräknas genom [1]:

$$\beta_T = \frac{(df/dt)_T}{(df/dt)_{20}} = e^{\theta_0(\frac{1}{T_{20}} - \frac{1}{T})} \quad (2.3)$$

Här är ytterligare en obekant materialparameter, θ_0 . Den senare beskrivningen av β_T är en så kallad Arrheniusfunktion. Denna funktion är endast tillämpbar om aktiveringsenergin (E) är konstant med en varierad temperatur. Studier har emellertid visat att aktiveringsenergin varierar något med

temperaturen och att funktionen istället kan uttryckas som [1]:

$$\beta_T = e^{\theta_0(\frac{1}{T_{20}} - \frac{1}{T})} \quad (2.4)$$

$$\theta = \theta_0 \left(\frac{30}{T + 10} \right)^{\kappa_0} \quad (2.5)$$

θ_0 och κ_0 är två materialparametrar som varierar med olika cement. Resultatet av detta resonemang är att även om ett cement gjuts vid 293K kommer temperaturen i provkroppen att stiga och alltså kommer ett nytt värde på faktorn β_T erhållas. Därför krävs en speciell metod för att bestämma dessa två parametrar. Den metod som används kallas för minsta kvadratmetoden.

Jonasson [4] har föreslagit ett samband som beskriver relationen mellan den ekvivalenta mognadsåldern och hydratationsgraden

$$\alpha = e^{-\lambda_1(\ln(1 + \frac{t}{t_1}))^{\kappa_1}} \quad (2.6)$$

I detta samband ingår tre obekanta materialparametrar, λ_1 , t_1 och κ_1 . Värdena på dessa parametrar bestäms experimentellt och varierar beroende på cementtyp. I nästa kapitel diskuteras valet av dessa parametrar.

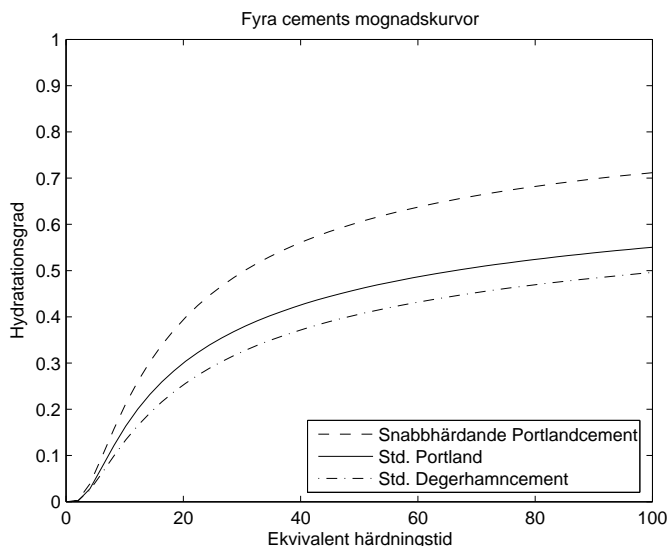
Betongens värmeutveckling beskrivs av:

$$W = CW_{co}\alpha \quad (2.7)$$

där W är mängden värme som utvecklats, W_{co} mängden utvecklad värme vid fullständig hydrataion och α hydratationsgraden. Formeln visar att mängden utvecklad värme är ett direkt resultat av hydratationsgraden. Därför är denna parameters utveckling viktig att kunna förutse.

2.1.1 Studie av parametrar som påverkar beskrivningen av betongens utveckling

De tre parametrarna som nämns ovan styr helt beskrivningen av cementets mognad. Olika typer av cement har olika värden på dessa parametrar. Ur pro-



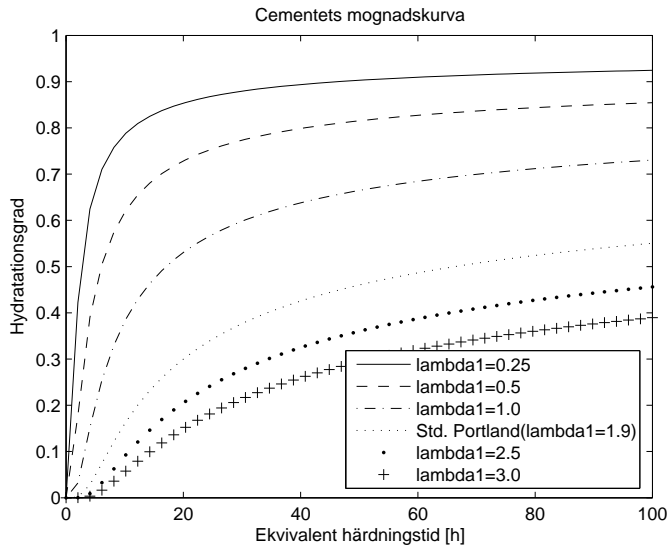
Figur 2.4: *Tre standardcements mognadskurvor.*

grammet Hacon har parametrarna från tre standardcement hämtats. Parametrarnas värden redovisas i tabell 2.4. Med hjälp av den matematiska beskrivningen som redovisades ovan och indata från tabell 2.4 har de tre cementens mognadskurvor ritats upp i figur 2.4.

Parameter	Std. Portland	SH-Cement	Std. Degerhamn
λ_1	1.9	0.379	1.3
t_1	5.52	47.4	13
κ_1	1.07	0.862	0.8

Tabell 2.1: *Standardcements parametervärden*

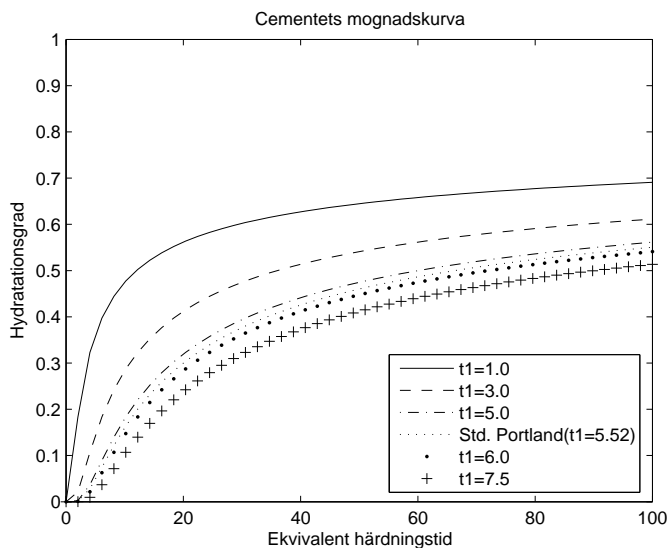
Det syns en tydlig uppdelning av kurvorna. En kurva är betydligt brantare vid en tidig ålder och två är lite flackare i samma intervall. Om kurvorna är branta i början innebär detta att cementet härdar snabbt. Slutsatsen är att valet av dessa tre parametrar helt dominerar kurvans utseende. Ur tabellen med parametervärden kan vissa skillnader direkt urskiljas, exempelvis är första parametern betydligt mindre för det snabbare cementet. Men hur parametrarna inverkar på kurvans utseende har närmare undersökts och resultatet redovisas nedan.



Figur 2.5: *Hur mognadskurvan varierar med olika värden på λ_1 enligt ekvation (2.6). $t_1=5.52$ och $\kappa_1=1.07$.*

Först har parametern λ_1 undersökts. I programmet Matlab har hydrationsfunktionen ritats upp med olika värden på λ_1 . Övriga parametrar har värdena enligt ett standard Portlandcement, se tabell (2.1). Som jämförelse finns därför detta cement också uppritat i samma diagram. I figur 2.5 finns sex kurvor uppritade med olika värden på λ_1 . Det syns tydligt att samtidigt som värdet på parametern λ_1 sjunker ökar kurvans lutning de första 10 timmarna av hydratationen. Med värdet 0.25 på λ_1 har cementet nästan uppnått 80% hydratationsgrad, medan std. Portlandcement samtidigt bara uppnått en hydratationsgrad på cirka 15%.

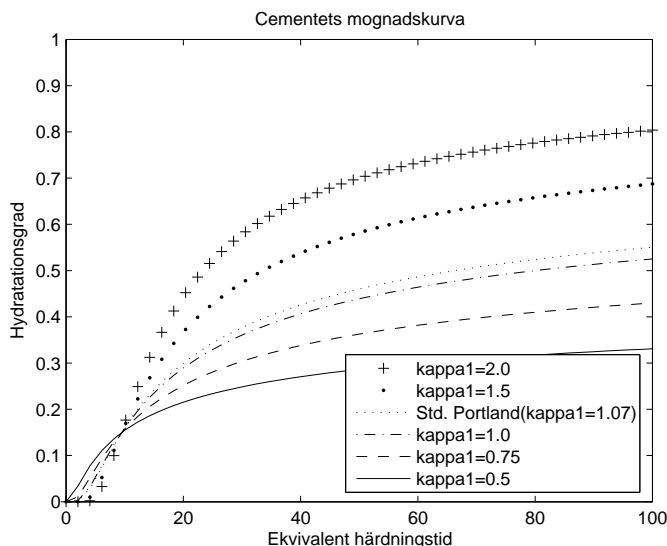
Den andra parametern som undersökts är t_1 . Tillvägagångssättet är detsamma som då λ_1 undersöktes. Resultatet visar detsamma som innan, det vill säga att ett mindre värde på parametern ger en brantare kurva i ett tidigt skede, figur 2.6.



Figur 2.6: *Hur mognadskurvan varierar med olika värden på t_1 enligt ekvation (2.6). $\lambda_1=1.9$ och $\kappa_1=1.07$.*

Den sista parametern att undersöka är κ_1 . Figur 2.7 visar att kurvans form ändras helt då parametern varieras. Vissa kurvor har förlorat sin karakteristiska S-form.

Hur varje parameter inverkar på simuleringen av ett cements mognadskurva har redan presenterats. Något som direkt observeras i tabell 2.1 är att alla tre cementen har värden på parametern κ_1 som ligger mellan 0.8 och 1.1. Om värdet på denna parameter höjs gör det väldigt mycket för kurvans lutning den första tiden, kurvan är i stort sett vertikal upp till 1.0 då κ_1 sätts lika med 10.



Figur 2.7: Hur mognadskurvan varierar med olika värden på κ_1 enligt ekvation (2.6). $\lambda_1=1.9$ och $t_1=5.52$.

2.2 Tryckhållfasthetsutveckling i betong

Betongens tryckhållfasthet är ett direkt resultat av den hållfasthet cementpastan uppnått, därför är cementets hållfasthetsutveckling av stort intresse. När cement och vatten blandas startar reaktionerna nästan direkt. Cementkornen reagerar med vatten och bildar då en cementgel. Ju längre reaktionerna har gått desto mindre blir utrymmet mellan cementkornen. Pastans hållfasthet beror framförallt på gelens hållfasthet och hur stor del av cementgelen som är ihopvuxen. Byfors [5] beskriver cementpastans tryckhållfasthet som funktion av hydratationsgraden. Detta innebär att vid en ökning av hydratationsgraden kommer detta att resultera i en motsvarande ökning av pastans hållfasthet.

Förändringen av hållfastheten med avseende på tiden kan också relateras till förändringen av hydratationsgrad. För att detta förhållande ska kunna överföras till ett temperaturkänslighetssamband måste två villkor uppfyllas,

nämligen:

$$\frac{(df/d\alpha)_T}{(df/d\alpha)_{20}} = 1$$

Detta innebär att varje del ny gel som bildas bidrar lika mycket till hållfastheten, oberoende av härdningstemperaturen

$$\frac{(df/dt)_{20}}{(d\alpha/dt)_{20}} = \textit{konstant}$$

Detta villkor säger att hållfastheten är en linjär funktion av hydratationsgraden

Cementreaktionerna är som tidigare nämnts temperaturberoende. I formelerna nedan som beskriver relativa värme-/hållfasthetsutvecklingar görs en jämförelse med utvecklingen vid en referenstemperatur. På det viset erhålls hela tiden ett relativt värde på utvecklingen.

Med förutsättningarna enligt ovan kan en temperaturkänslighetskurva eller β_T -kurva ritas upp som beskriver hur temperaturen inverkar på cementets hållfasthetsutveckling. Dessa samband blir då [1]:

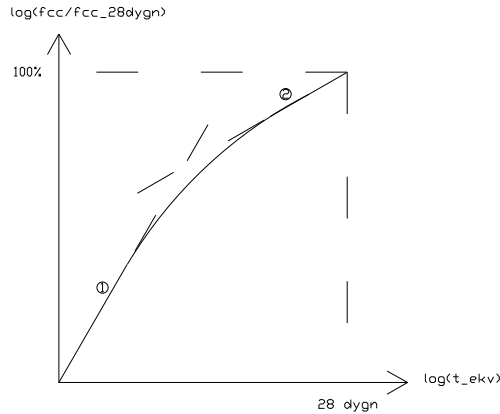
$$\frac{(df/dt)_T}{(df/dt)_{20}} = \frac{(df/d\alpha)_T}{(df/d\alpha)_{20}} \frac{(d\alpha/dt)_T}{(d\alpha/dt)_{20}} \quad (2.8)$$

Där f är funktion beroende av hydratationsgraden, som beskriver cementpastans hållfasthet. Enligt det första villkoret ovan och ekvation 2.1 kan sambandet skrivas om som:

$$\frac{(df/d\alpha)_T}{(df/d\alpha)_{20}} = 1 \rightarrow \frac{(df/dt)_T}{(df/dt)_{20}} = \frac{(d\alpha/dt)_T}{(d\alpha/dt)_{20}} = e^{\theta_0(\frac{1}{T_{20}} - \frac{1}{T})} \quad (2.9)$$

Sambandet som beskriver temperaturberoendet vid cementets hållfasthetsutveckling är alltså detsamma som för utvecklingen av hydratationsgraden.

Betongens tryckhållfasthetsutveckling kan även uttryckas matematiskt. Detta görs med kännedom om materialets 28-dygns hållfasthet. I figur 2.8 finns



Figur 2.8: Förhållandet mellan den logaritmerade, relativa tryckhållfastheten och den logaritmerade ekvivalenta tiden.

sambandet mellan den relativa hållfastheten och den ekvivalenta härdningstiden uppritat. Dessutom är värdena på både x- och y-axeln logaritmerade [5].

I början och slutet av kurvan är sambandet linjärt och kan där uttryckas enligt: [5]

$$\eta_c = a_i t^{b_i} \quad (2.10)$$

De båda kurvdelarna lutar olika mycket och har olika värden på de båda obekanta parametrarna a_i och b_i . Men för att kunna beskriva intervallet mellan de linjära delarna krävs ytterligare ett samband. Byfors [5] beskriver hur man kan ta fram ett sådant uttryck för den relativa hållfastheten och föreslår följande uttryck:

$$\eta_c = \frac{a_{1c} \left(\frac{t_e}{t_r}\right)^{b_{1c}}}{1 + \frac{a_{1c}}{a_{2c}} \left(\frac{t_e}{t_r}\right)^{(b_{1c}-b_{2c})}} \quad (2.11)$$

Där η_c = relativa hållfastheten, t_e = ekvivalent mognadsålder, t_r = referenstiden 28 dygn och a_{1c} , a_{2c} , b_{1c} och b_{2c} = materialparametrar

Tidigare undersökningar gjorda av Byfors [5] visar att tryckhållfasthetstillväxten beror på vattencementtalet. Dessutom visar undersökningarna att efter en viss tid är hållfasthetstillväxten oberoende av vattencementtalet och att väldigt ung betongs tillväxthastighet är oberoende av vattencementtalet.

Dessa två förenklingar medför att vattencementtalet inte förändrar tillväxtkurvans utseende utan endast förflyttar denna längs x-axeln. En annan viktig slutsats som kan dras ur det matematiska sambandet är att endast en av parametrarna, nämligen a_{1c} , är beroende av vattencementtalet. Byfors [5] presenterar också ett samband som tydligt visar att värdet på a_{1c} minskar med ökat vattencementtal, vilket i sin tur medför en långsammare hållfasthetsutveckling.

En undersökning har genomförts i syfte att klarlägga varje parameters inflytande på simuleringen av hållfasthetsutvecklingen. Nedan presenteras figurer som visar hur var och en av parametrarna påverkar utvecklingen. I varje figur är tre av parametrarna konstanta. Den fjärde parametern varieras och resultatet blir sex olika kurvor som visar hållfasthetsutvecklingen. En av kurvorna visar ett standardcement (Standard Portlandcement) och de övriga fem visar hur den undersökta parameters värde påverkar kurvans utseende.

2.2.1 Studie av parametrar

Undersökningen har gjorts utifrån den matematiska framställningen av betongens tryckhållfasthetsutveckling. Sambandet som beskriver utvecklingen är [5]:

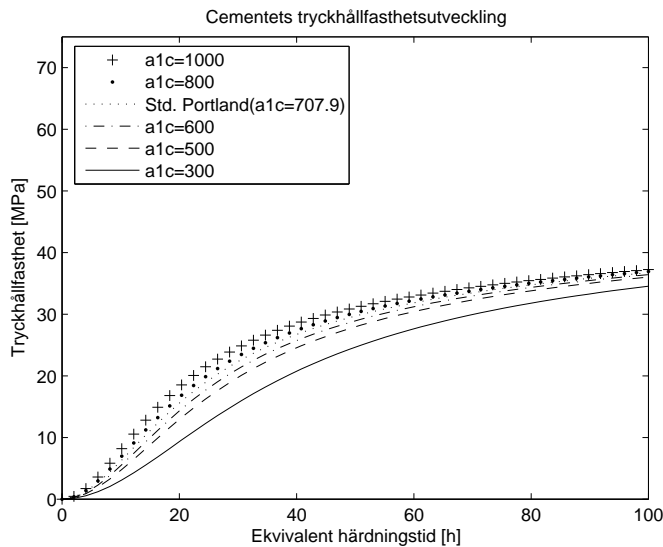
$$f_c = f_{co}\eta_c \quad (2.12)$$

Där f_{co} = tryckhållfastheten efter 28 dygn och η_c = relativa hållfasthetsutvecklingen

Den senare termen beskriver hur utvecklingen i cementet sker. Uttrycket för denna term står beskrivet i föregående avsnitt. Termen innehåller fyra obekanta parametrar. Parametrarna har undersökts var för sig i syfte att

klargöra hur respektive påverkar beskrivningen av utvecklingen. Undersökningen har genomförts genom att den matematiska beskrivningen av hållfasthetsutvecklingen har ritats upp i programmet Matlab. I programmet har sedan de olika parametrarna varierats för att visa hur de påverkar beskrivningen av utvecklingen.

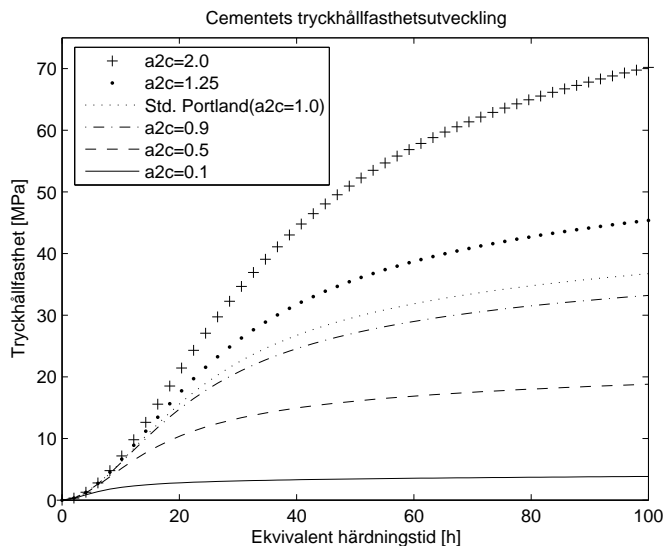
Första parametern att undersökas är a_{1c} . Som tidigare nämnts beror denna parameter på betongens vattencementtal. I figur 2.9 finns sex kurvor varav en tillhör ett standard Portlandcement. Kurvorna visar att hållfasthetsutvecklingen sker snabbare då värdet på a_{1c} ökar. Men det är också tydligt att betongen inte är så beroende av denna parameter vad gäller tryckhållfasthetsutvecklingen.



Figur 2.9: Hur hållfasthetsutvecklingen varierar med olika värden på a_{1c} enligt ekvation 2.11 och 2.12. $a_{2c}=1.0$, $b_{1c}=2.0$ och $b_{2c}=0.14$

Den andra parametern att undersökas är a_{2c} . Denna parameter är inte beroende av betongens vattencementtal och styrs inte av någon direkt betongegenenskap utan fungerar mer som en kurvanpassning. Ur diagrammet i figur 2.10 syns att hållfasthetsutvecklingen är ganska beroende av storleken på denna parameter. Sänks parametervärdet från 1.0 till 0.9 så händer inte mycket med

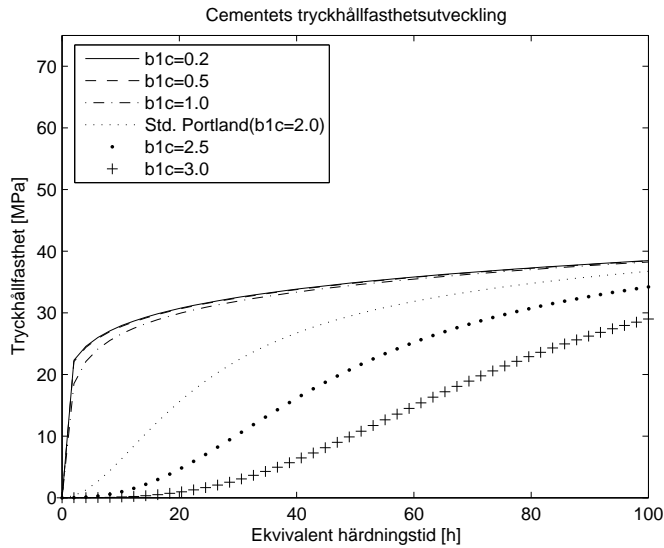
kurvans utseende i början men efter 50 timmars ekvivalent härdningstid är skillnaden i hållfasthet nästan 5 MPa. Halveras eller dubblas parametervärdet blir skillnaden i utveckling väldigt stor.



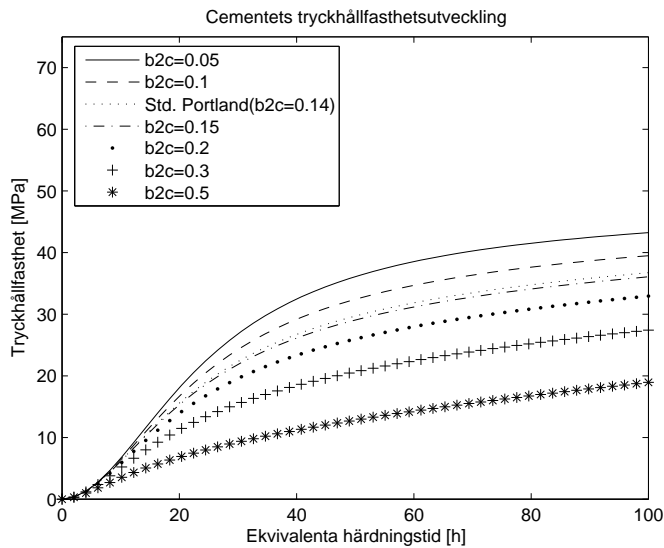
Figur 2.10: Hur hållfasthetsutvecklingen varierar med olika värden på a_{2c} enligt ekvation 2.11 och 2.12. $a_{1c}=707.9$, $b_{1c}=2.0$ och $b_{2c}=0.14$

Den tredje parametern i uttrycket som ska undersökas är b_{1c} . Även denna parameter är oberoende av betongens vattencementtal. Hur denna parameter inverkar på hållfasthetsutvecklingen redovisas i figur 2.11. Diagrammet visar att denna parameter är väldigt viktig för kurvans utseende. Redan då parametervärdet höjts från 2.0 till 2.5 är det väldigt stor skillnad på kurvan. En annan slutsats som kan dras är att då b_{1c} sätts till 1.0, eller mindre så blir resultatet en orimlig hållfasthetsutveckling. Denna parameter bör alltså väljas med noggrannhet.

Den fjärde och sista parametern som beskriver tryckhållfasthetsutvecklingen är b_{2c} . Liksom de två föregående parametrarna är denna också oberoende av vattencementtalet. Parametrarnas inverkan på kurvans utseende redovisas i figur 2.12.



Figur 2.11: Hur hållfasthetsutvecklingen varierar med olika värden på b_{1c} enligt ekvation 2.11 och 2.12. $a_{1c}=707.9$, $a_{2c}=1.0$ och $b_{2c}=0.14$



Figur 2.12: Hur hållfasthetsutvecklingen varierar med olika värden på b_{2c} enligt ekvation 2.11 och 2.12. $a_{1c}=707.9$, $a_{2c}=1.0$ och $b_{1c}=2.0$

Ur figuren dras slutsatsen att ju mindre parametern är desto långsammare hållfasthetsutveckling. Skillnaden mellan kurvorna som har parametervärdet 0.15 och 0.14 är väldigt liten, så liten att det kanske inte spelar någon roll om parametern skulle sättas till 0.15 istället.

2.3 Draghållfasthetsutveckling i betong

Betongens egenskaper då materialet utsätts för dragspänningar har inte studerats alls i samma omfattning som vid tryckspänningar. Detta beror framförallt på att tester som mäter dragkraftskapaciteten är komplicerade att utföra. Tidigare undersökningar [5] har visat att förhållandet mellan betongens drag- och tryckkraftskapacitet inte är linjärt, den senares tillväxt är betydligt högre och det slutliga värdet dessutom större.

Det finns flera vanliga metoder för att testa dragkraftskapaciteten. På grund av olika testmetoder erhålls ofta olika testresultat på kapaciteten. Detta medför att det kan vara lite vanskligt att direkt jämföra olika testvärden med varandra. Enligt tidigare undersökningar påverkar dessutom betongsammansättningen och omgivningen testet genomförs i testets resultat. Exempelvis medför en ökad storlek på ballasten ett minskat värde på draghållfastheten. Men betongens draghållfasthetstillväxt påverkas i stort sett av samma faktorer som tryckhållfastheten, därför jämförs ofta denna hållfasthet med tryckhållfastheten.

Byfors [5] har genomfört undersökningar för att visa hur tryck- och draghållfastheten förhåller sig till varandra för olika betonger. Enligt denna undersökning är förhållandet mellan de båda hållfastheterna linjärt upp till en viss gräns ($f_{cc} = 20\text{MPa}$), därefter råder ett olinjärt samband. Dessutom visar testerna att förhållandet i hållfasthet inte påverkas av betongsammansättningen, vilket tidigare ansetts vara fallet [5].

Regressionsanalyser har lett fram till följande två uttryck som beskriver förhållandet mellan de båda hållfastheterna i olika delar av diagrammet: [5]

$$f_{cc} \leq 20 \text{ MPa}$$

$$f_{ct} = 0.15f_{cc} - 0.22 \quad (2.13)$$

$f_{cc} \geq 20$ MPa

$$f_{ct} = 0.105(f_{cc} - 20)^{0.839} + 0.22 \quad (2.14)$$

Som tidigare nämnts påverkas draghållfasthetens utveckling av samma faktorer som tryckhållfastheten, dessutom byggs hållfastheten upp på ett liknande vis i materialet. Därför kan draghållfastheten uttryckas på samma sätt som tryckhållfastheten, det vill säga med hjälp av ett värde på hållfastheten efter 28 dygn (ekvivalent tid) och en faktor som beskriver den relativa tillväxten. Uttrycket redovisas nedan. [5]

$$f_{ct} = f_{t0}\eta_t \quad (2.15)$$

Där f_{t0} = draghållfastheten efter 28 dygn och η_t = relativa hållfastsutvecklingen.

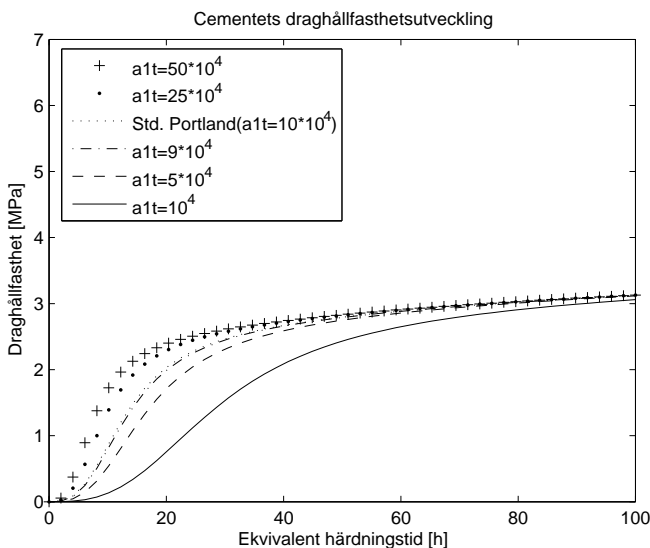
$$\eta_t = \frac{a_{1t} \left(\frac{t_e}{t_r}\right)^{b_{1t}}}{1 + \frac{a_{1t}}{a_{2t}} \left(\frac{t_e}{t_r}\right)^{(b_{1t}-b_{2t})}} \quad (2.16)$$

Där η_t = relativa hållfastheten, t_e = ekvivalent mognadsålder, t_r = referenstiden 28 dygn och a_{1t} , a_{2t} , b_{1t} och b_{2t} = materialparametrar.

2.3.1 Studie av parametrar

En undersökning har genomförts för att visa hur de olika parametrarna i den matematiska beskrivningen påverkar draghållfasthetsutvecklingen. Tillvägagångssättet är detsamma som i tidigare kapitel det vill säga varje parameter har undersökts var för sig i syfte att på ett så enkelt sätt som möjligt visa hur varje parameter påverkar hållfasthetsutvecklingen.

Första parametern som undersökts är a_{1t} . I figur 2.13 redovisas resultatet. Alla kurvorna i detta försök är relativt samlade. Det är bara en kurva, möjligtvis två, som avviker från de övriga. Parametern hamnar i storleksordningen 10^5 men kan avvika med högst en faktor 10.

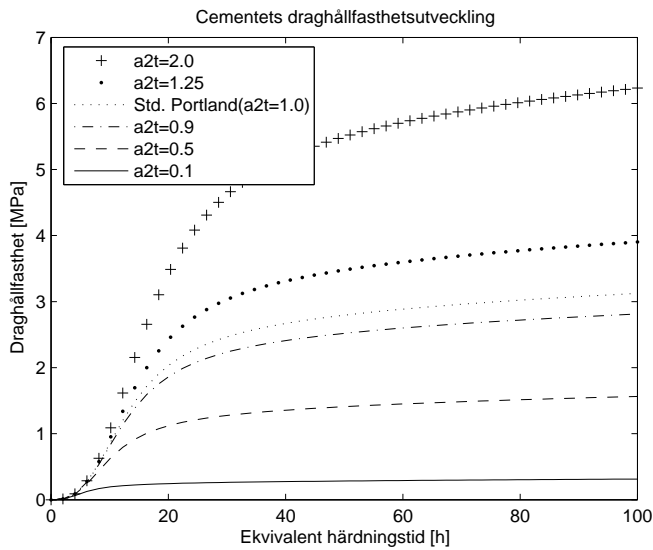


Figur 2.13: Hur hållfasthetsutvecklingen varierar med olika värden på a_{1t} enligt ekvation 2.15 och 2.16. $a_{2t}=1.0$, $b_{1t}=3.0$ och $b_{2t}=0.14$

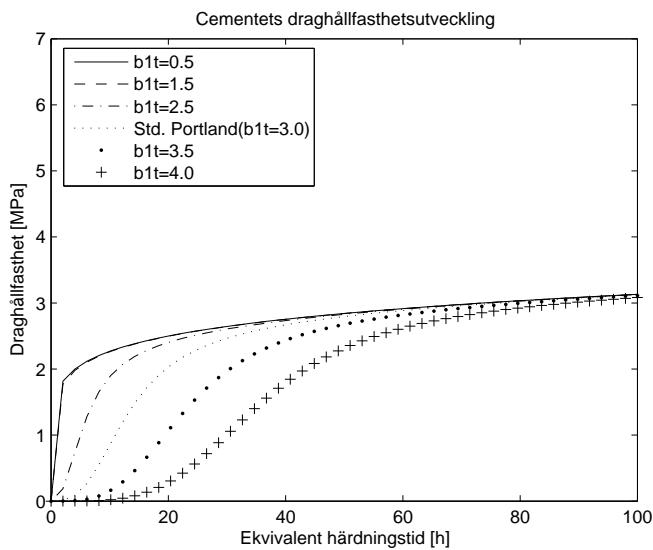
Den andra parametern som undersökts är a_{2t} . Resultatet redovisas i figur 2.14.

Det är tydligt att hållfasthetskurvan är betydligt mer känslig för valet av denna än förra parametern. Redan då parametervärdet är dubbelt så stort avviker kurvan ordentligt från referenskurvan. Det är med andra ord av stor vikt att denna parameter väljs med omsorg.

Den tredje parametern som undersökts är b_{1t} . Detta resultat illustreras med hjälp av figur 2.15. Även denna parameter verkar vara känslig då kurvorna avviker en hel del så fort värdet på parametern förändras. Redan då parametern höjs eller sänks med 0.5 enheter avviker hållfasthetskurvan ordentligt. Det står också klart att hållfasthetsutvecklingen blir orimlig då parametervärdet understiger 2.5. Vid värde över 3.5 blir kurvans tillväxt väldigt långsam i början. Alltså bör värdet på denna parameter ligga mellan 2.5 och 3.5 då övriga förutsättningar är enligt referensfallet. Den fjärde och sista parametern som undersökts är b_{2t} . Resultatet redovisas i figur 2.16.



Figur 2.14: Hur hållfasthetsutvecklingen varierar med olika värden på a_{2t} enligt ekvation 2.15 och 2.16. $a_{1t}=10^5$, $b_{1t}=3.0$ och $b_{2t}=0.14$



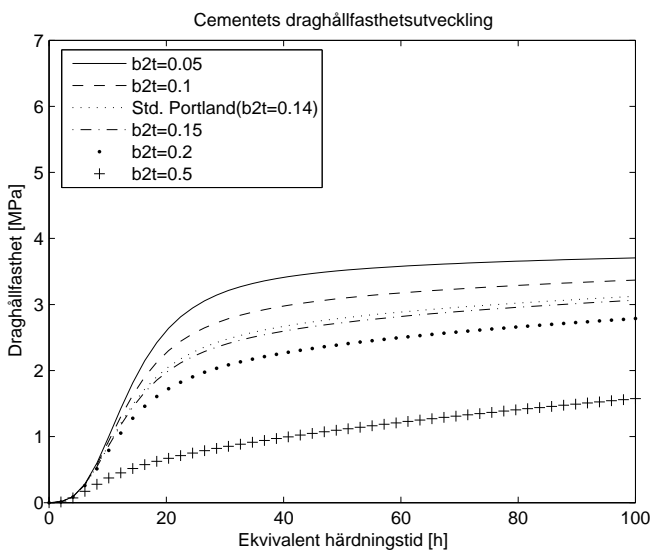
Figur 2.15: Hur hållfasthetsutvecklingen varierar med olika värden på b_{1t} enligt ekvation 2.15 och 2.16. $a_{1t}=10^5$, $a_{2t}=1.0$ och $b_{2t}=0.14$

I figuren avviker framförallt en kurva, den då värdet på parametern är 0.5. Denna hållfasthetskurva ligger en bra bit under de övriga fram till ungefär 700 timmars ekvivalent härdningstid då alla kurvor möts i en punkt. Värdet 0.5 är alltså lite orimligt att använda för att beskriva betongens draghållfasthet. Övriga kurvor är rimliga och de följs åt hela vägen.

2.4 Elasticitetsmodulens utveckling i betong

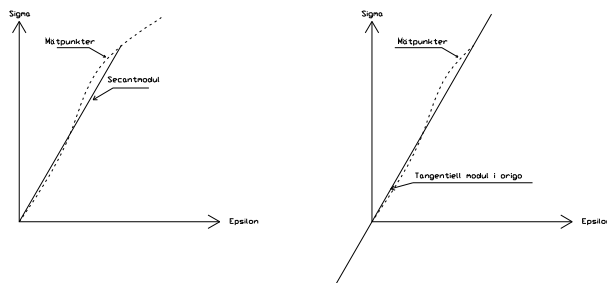
Betong är inte ett rent elastiskt material. Detta innebär att spänning-töjnings-sambandet är olinjärt. Dessutom har materialet en benägenhet att krypa. Av denna anledning finns det två typer av elasticitetsmoduler, statisk och dynamisk. Den statiska modulen kan i sin tur definieras genom två olika moduler, en tangentiell modul i origo och en så kallad sekantmodul, figur 2.17.

Vid framtagningen av den statiska modulen belastas en provkropp relativt långsamt. Därefter registreras ett spännings-töjningssamband. Provkroppen belastas upp till en viss specificerad nivå. Vid försök som presenteras av By-



Figur 2.16: Hur hållfasthetsutvecklingen varierar med olika värden på b_{2t} enligt ekvation 2.15 och 2.16. $a_{1t}=10^5$, $a_{2t}=1.0$ och $b_{1t}=3.0$

fors [5] har sekantmodulen bestämts då en provkropp har belastats till $1/3$ av tryckhållfastheten. Därefter dras en linje mellan origo och slutpunkten i försöket. Lutningen på denna linje utgör sekantmodulen. Kurvans lutning vid origo utgör den tangentiella modulen i origo.



Figur 2.17: Illustration av de två typerna av elasticitetsmodul. Figurerna visar spännings-töjnings samband

Eftersom provningsförsöket sker relativt långsamt kommer en viss krypning att ske i materialet. Då betongen är ung påverkas den extra mycket av krypning. Därför kommer resultatet av den beräknade statiska modulen att ge ett något tveksamt resultat då betongen är väldigt ung.

Dynamiskt bestämd elasticitetsmodul är däremot inte beroende av krypeffekter. Vid denna metod för bestämning av modulen belastas provkroppen med så korta tidsintervall att krypning inte påverkar resultatet nämnvärt. Men skillnaden mellan statisk och dynamisk modul är inte så stor. Då betongen härdat ordentligt är den dynamiska modulen ungefär 20% större. Men då betongen är väldigt ung spelar som sagt krypningen en större roll och detta syns även på skillnaden i modulen. Den dynamiska är då hela 60% större än den statiska.

Normalt beskrivs den statiska modulen av secantmodulen och den statiska modulen används för att beskriva en betongs elasticitetsmodul.

Betongens utveckling av elasticitetsmodulen brukar beskrivas utifrån materialets uppnådda tryckhållfasthet. Anledningen till detta är att modulen ändå erhålls då tryckhållfastheten kontrolleras. Byfors [5] presenterar flera diagram som visar sambanden mellan tryckhållfasthet och elasticitetsmodul. Ur diagrammen har regressioner gjorts så modulen ska kunna uttryckas utifrån hållfastheten. Ett exempel på ett sådant uttryck är:

$$E_{cc} = a f_{cc}^b \quad (2.17)$$

Med $f_{cc} = 1kN/m$, $a=6.5 \cdot 10^3$ och $b=0.5$ erhålls $E_{cc}=6500 N/mm^2$. Men detta uttryck är en alltför grov förenkling. I själva verket kan sambandet enligt Byfors [5] delas upp i tre delar. På första och sista kurvstycket kan elasticitetsmodulen uttryckas på ett sätt som liknar det enligt ovan:

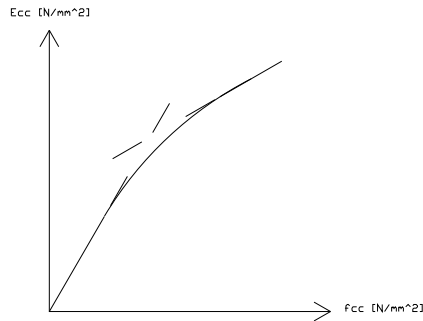
$$E_{cc} = E_o^i f_{cc}^{a_i} \quad (2.18)$$

där de båda parametrarna E_o^i och a_i är olika för de båda linjära kurvstyckena. På den mittersta delen av kurvan kan uttrycket för modulen uttryckas matematiskt enligt:

$$E_{cc} = \frac{E_o^i f_{cc}^{a_i}}{\left[1 + \frac{E_o^1}{E_o^2} f_{cc}^{(a_1 - a_2)}\right]} \quad (2.19)$$

Sambandet mellan elasticitetsmodulen och tryckhållfastheten kan då rent schematiskt ha utseendet enligt figur 2.18.

Det faktum att sambandet mellan elasticitetsmodul och tryckhållfasthet består av tre kurvstycken medför att ytterligare ett samband måste tas fram. Detta uttryck ska kunna beskriva samtliga delar av kurvan på ett tillfredsställande sätt. Byfors [5] föreslår ett uttryck som liknar det för tryck- och draghållfastheten.



Figur 2.18: Förhållandet mellan elasticitetsmodulen och tryckhållfastheten. Sambandet består av tre kurvstycken

$$E_{cc} = E_o \eta_E \quad (2.20)$$

Där E_o är elasticitetsmodulen efter 28 dygn och η_E är den relativa utvecklingen i betongen. Den senare koefficienten kan uttryckas enligt nedan.

$$\eta_E = \frac{a_{1E} \left(\frac{t_e}{t_r}\right)^{b_{1E}}}{1 + \frac{a_{1E}}{a_{2E}} \left(\frac{t_e}{t_r}\right)^{b_{1E} - b_{2E}}} \quad (2.21)$$

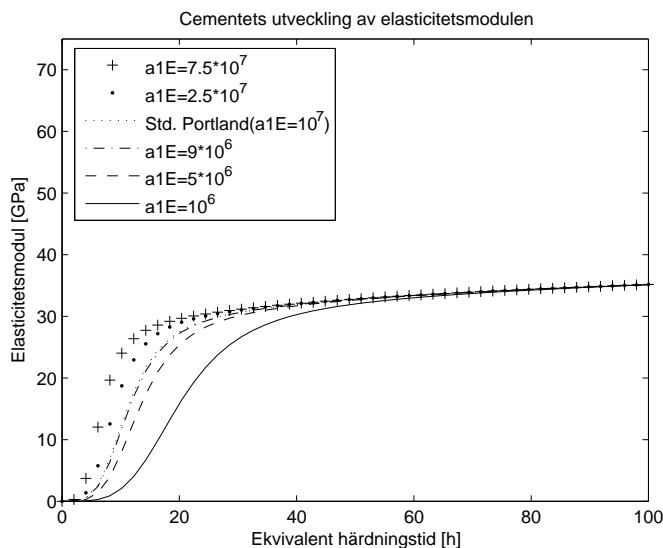
2.4.1 Studie av parametrar

Undersökningen har gjorts utifrån den matematiska framställningen av betongens tryckhållfasthetsutveckling. Sambandet som beskriver utvecklingen ges av (2.20).

En undersökning har genomförts i syfte att klargöra hur varje parameter

påverkar materialets utveckling. Undersökningen har genomförts på samma sätt som för tryckhållfastheten.

De olika materialparametrarna har undersökts i samma ordning som i tidigare kapitel. Den första parametern som undersökts är alltså a_{1E} .



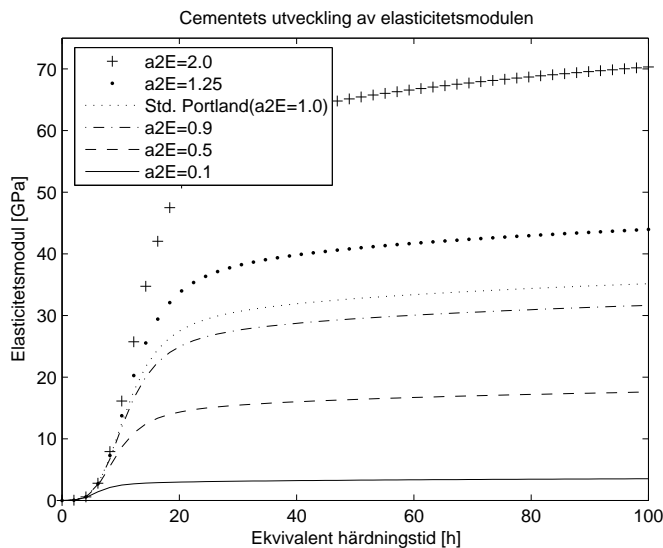
Figur 2.19: Hur utvecklingen av elasticitetsmodulen varierar med olika värden på a_{1E} enligt ekvation 2.20 och 2.21. $a_{2E}=1.0$, $b_{1E}=4.0$ och $b_{2E}=0.1$

Ur diagrammet syns att kurvans utseende inte är så beroende av denna parameter. Det är först när parametervärdet är en tiondel av referensvärdet som kurvan börjar avvika ordentligt. En annan slutsats som kan dras utifrån diagrammet är att om parametervärdet ökas sker utvecklingen av betongens elasticitetsmodul snabbare vid en tidig ålder. Däremot är materialets elasticitetsmodul efter 100 timmar detsamma, oavsett värdet på denna parameter. Detta innebär alltså att parametern a_{1E} kan styra hastigheten med vilken elasticitetsmodulen utvecklas utan att påverka värdet efter 100 timmar.

Den andra parametern som studerats är a_{2E} . I figuren nedan redovisas undersökningen på liknande sätt som innan. Figuren visar att kurvan är betydligt

känsligare för valet av denna parameter, jämfört med föregående resonemang.

Redan då parametrarnas värde halveras eller dubblas avviker kurvan oroligt ifrån referenskurvan. Kurvan vars parameter är en tiondel så stor som referensvärdets är helt orimlig. Samtliga dessa tre kurvor är orimliga, både vad gäller materialets utveckling av elasticitetsmodulen och värdet efter 100 timmar.

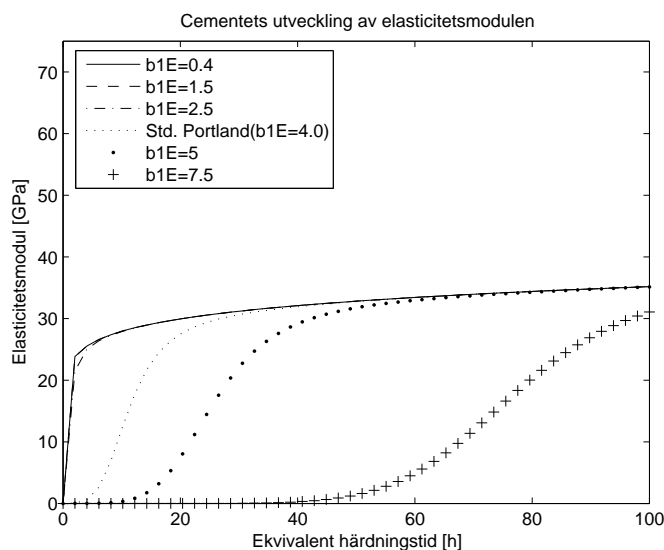


Figur 2.20: Hur utvecklingen av elasticitetsmodulen varierar med olika värden på a_{2E} enligt ekvation 2.20 och 2.21. $a_{1E} = 1.0^7$, $b_{1E} = 4.0$ och $b_{2E} = 0.1$

Den tredje parametern som undersökts är b_{1E} . I figuren nedan redovisas resultatet av undersökningen. Det är tydligt att detta parametervärde är väldigt viktigt för materialets utveckling. Redan då parametervärdet höjs från 4.0 (för referensmaterialet) till 5.0 ändras kurvans utseende mycket. Om värdet på parametern höjs till 7.5 blir kurvan helt orimlig och uppnår inte samma värde på elasticitetsmodulen som övriga kurvor förrän efter ungefär 150 timmar.

När värdet på parametern b_{1E} sjunker till 2.5 sker egenskapsutvecklingen

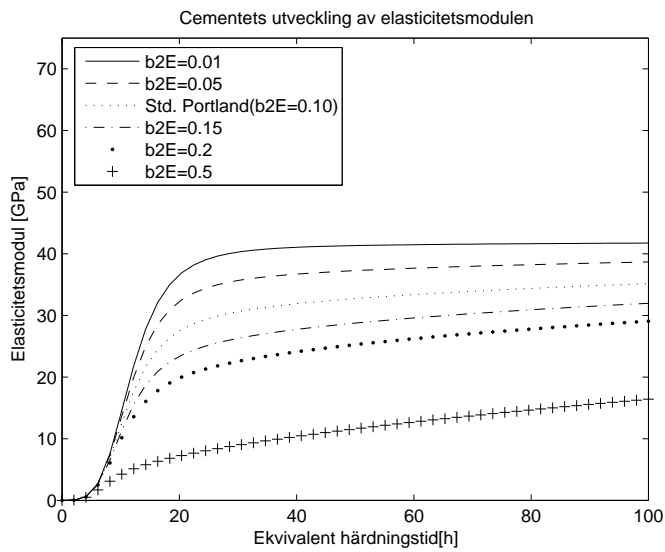
orimligt snabbt i början. Redan efter fem timmar har materialet uppnått en elasticitetsmodul på cirka 27GPa vilket kan jämföras med referensmaterialet som samtidigt endast har uppnått 1GPa.



Figur 2.21: Hur utvecklingen av elasticitetsmodulen varierar med olika värden på b_{1E} enligt ekvation 2.20 och 2.21. $a_{1E} = 1.0^7$, $a_{2E} = 1.0$ och $b_{2E} = 0.1$

Sista parametern som undersökts är b_{2E} . Resultatet från undersökningen redovisas i figur 2.22. Det är egentligen bara en kurva som är orimlig och det är den då parametervärdet är fem gånger större än referensmaterialet. Materialets utveckling av elasticitetsmodulen sker då betydligt långsammare än för de övriga parametermaterialen. Först efter knappt 700 timmar har detta material uppnått samma värde på modulen som de övriga.

För övrigt är skillnaden mellan de olika kurvorna inte lika stor. Trots att en parameter är en tiondel så stor som referensmaterialet är kurvan bara lite brantare i början. Denna kurva kommer dock hela tiden vara lite högre upp i figuren än referensmaterialet.



Figur 2.22: Hur utvecklingen av elasticitetsmodulen varierar med olika värden på b_{2E} enligt ekvation 2.20 och 2.21. $a_{1E} = 1.0^7$, $a_{2E} = 1.0$ och $b_{1E} = 4.0$

Kapitel 3

Parameterstudie

3.1 Förutsättningar

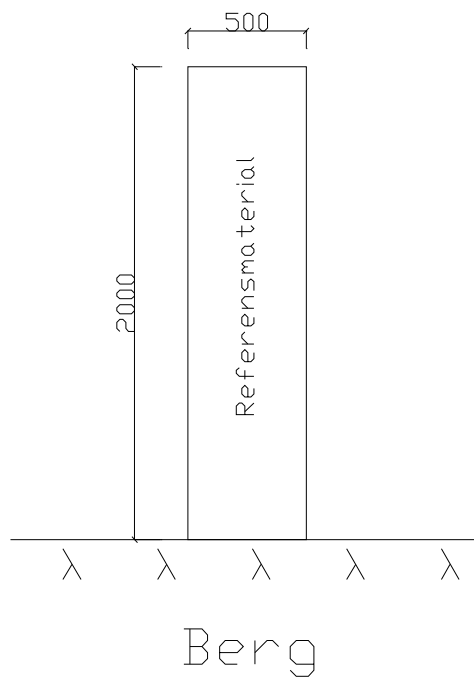
Utöver den studie av de parametrar som styr cementets härdning har även en undersökning genomförts som syftar till att klargöra hur de olika parametrarna påverkar beskrivningen av den hydratiserande betongen. Den stora skillnaden mellan denna och föregående undersökningar är att innan studerades hur själva hydratiseringsprocessen fortlöpte med varierande parametrar medan denna undersökning syftar till att få fram konsekvenserna av olika parametervärden. Det som undersökts är hur valet av parameter påverkar följande:

- Maximalt utvecklade temperatur under härdning
- Största temperaturskillnad över tvärsnittet
- Maximal spänning
- Största kvoten mellan spänning och hållfasthet

Vid studien har ett basfall använts. Som detta basfall har ett referensmaterial använts med ingående parametrar enligt programmet Hacon. Dessutom har randvillkoren angivits för basfallet. Dessa villkor är enligt nedan.

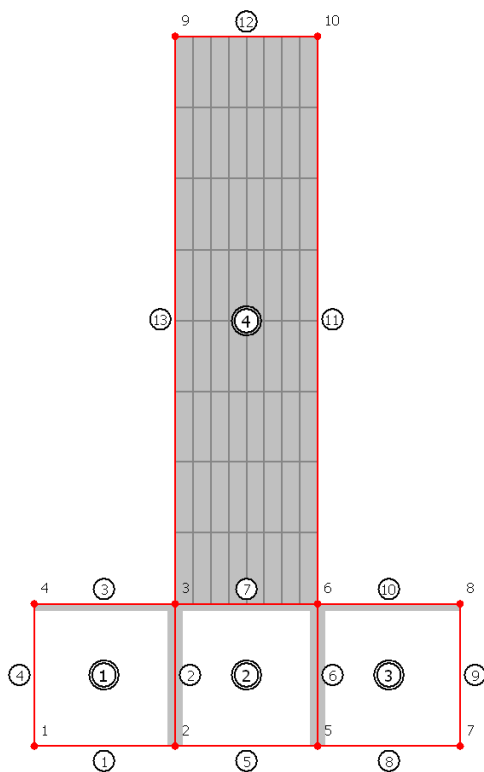
- Simuleringsintervall: 0-100 (h)
- Gjuttemperatur: 20°C
- Stålförstärkning med tjockleken 5mm
- Vindhastigheten är konstant 5(m/s) på båda sidor om betongen
- Yttretemperaturen är konstant 20°C under hela simuleringsperioden
- Materialet under betongen består av berg

Kroppen som valts för studien är en rektangulär vägg för att göra det så enkelt som möjligt. Väggen är en halv meter tjock och två meter hög. Det kommer inte att vara kroppens form som avgör hur parametrarna påverkar resultatet, därför har inga avancerade former valts. I figurerna 3.1 och 3.2 redovisas beräkningskroppens förutsättningar och utseende.



Figur 3.1: Modellens förutsättningar

Själva undersökningen började med att basfallet konstruerades i programmet Hacon. Därefter gjordes en beräkning där maximala temperaturen och spänningen, största temperaturskillnaden och maximala kvoten mellan spänningen och hållfastheten antecknades. Resultatet användes som jämförelse då parameterstudien genomfördes. Följande resultat erhöles då beräkningar på



Figur 3.2: Beräkningsmodell

basfallet genomfördes:

$$T_{max} = 40.46^{\circ}C$$

$$\Delta T_{max} = 10.3^{\circ}C$$

$$\sigma_{max} = 2.52MPa$$

$$\max\left(\frac{\sigma}{f}\right) = 69.89\%$$

I programmet definieras en ruta in som täcker hela provkroppen. Inuti denna ruta plockas hela tiden de maximala värdena ut. I och med att denna ruta täcker in hela provkroppen plockas hela tiden modellens maximala värden ut.

3.2 Parametrar som styr beskrivningen av cementets utveckling

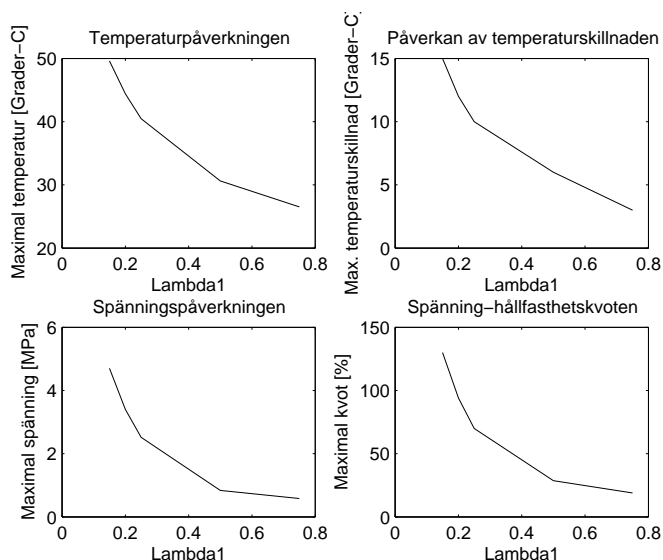
Denna studie omfattar fler parametrar än tidigare. Anledningen till detta är att i programmet Hacon beskrivs cementets hydratation av ytterligare två parametrar, dessa två parametrar används som kurvanpassningar. Totalt är det alltså fem stycken parametrar som undersökts. Dessa är: λ_1 , t_1 , κ_1 , θ_0 och κ_0 . Själva undersökningen har gått till så att en parameter har studerats åt gången. Övriga parametrar har varit samma som för basfallet. Den parameter som undersökts har därefter varierats och temperaturer och spänningar har antecknats. Sammanställningen av resultatet har gjorts med hjälp av Matlab. I detta program har de olika parametervärdena ritats upp mot respektive resultat.

I tabell 3.1 redovisas värdena på de parametrar som styr basfallets cementsreaktioner.

Parameter	Parametervärde
λ_1	0.25
t_1	74.6
κ_1	0.878
θ_0	5400
κ_0	0.48

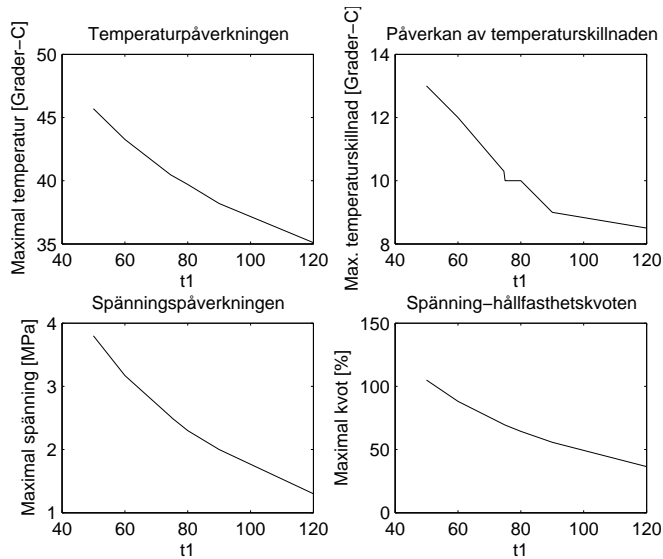
Tabell 3.1: *Referensmateriallets parametervärden*

I figur 3.3-3.7 redovisas hur valet av dessa parametrar påverkar temperatur- och spänningsutvecklingen.

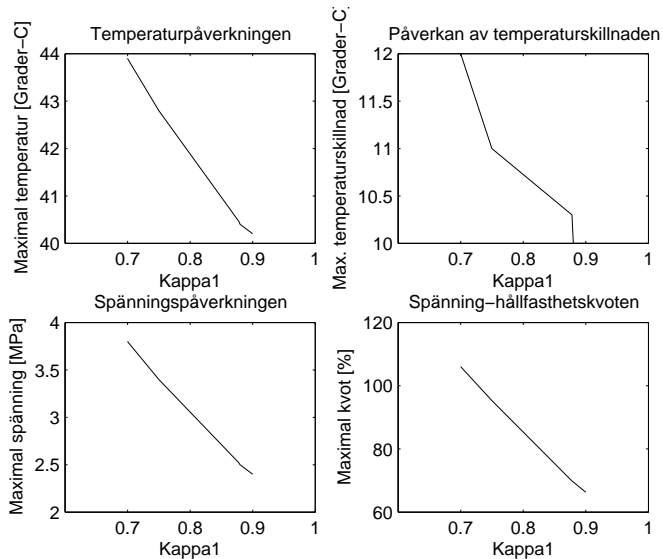


Figur 3.3: Hur parametern λ_1 , enligt ekvation 2.6, inverkar på temperatur- och spänningsutvecklingen

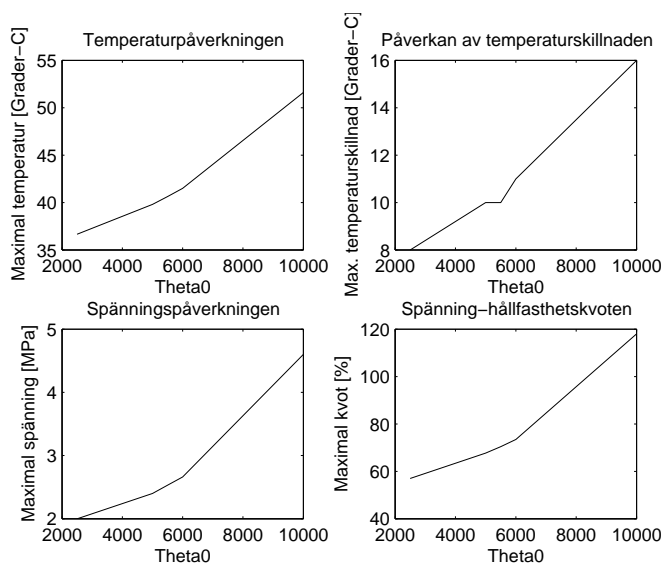
Diagrammen visar tydligt hur varje parameter påverkar cementreaktionerna. För vissa parametrar innebär ett ökat värde att temperaturen och spänningen ökar och för andra parametrar det motsatta. Generellt gäller att temperaturen och spänningen följs åt. En ökad temperaturutveckling medför att spänningarna i materialet ökar.



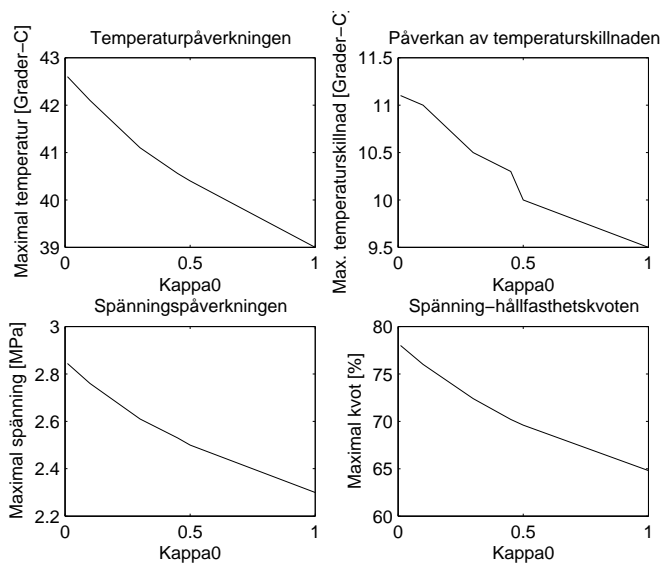
Figur 3.4: Hur parametern t_1 , enligt ekvation 2.6, inverkar på temperatur- och spänningsutvecklingen



Figur 3.5: Hur parametern κ_1 , enligt ekvation 2.6, inverkar på temperatur- och spänningsutvecklingen



Figur 3.6: Hur parametern θ_0 , enligt ekvation 2.6, inverkar på temperatur- och spänningsutvecklingen



Figur 3.7: Hur parametern κ_0 , enligt ekvation 2.6, inverkar på temperatur- och spänningsutvecklingen

3.3 Parametrar som styr beskrivningen av tryckhållfasthetsutvecklingen

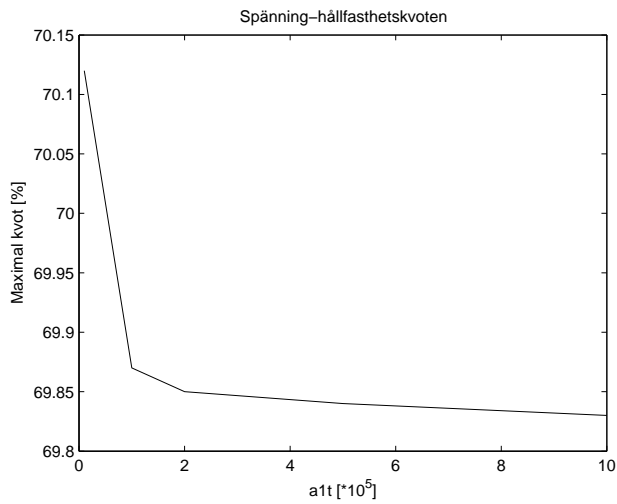
Parametrarna som styr tryckhållfasthetsutvecklingen påverkar inte temperaturutvecklingen, den maximalt uppnådda spänningen i materialet eller kvoten mellan spänning och hållfasthet. Detta beror på följande:

- En högre hållfasthet påverkar inte hur mycket värme som bildas
- En högre hållfasthet påverkar inte vilken spänning som bildas i materialet
- Draghållfastheten som är betydligt lägre än tryckhållfastheten är den parameter som används av programmet för att beräkna kvoten mellan spänning och hållfasthet

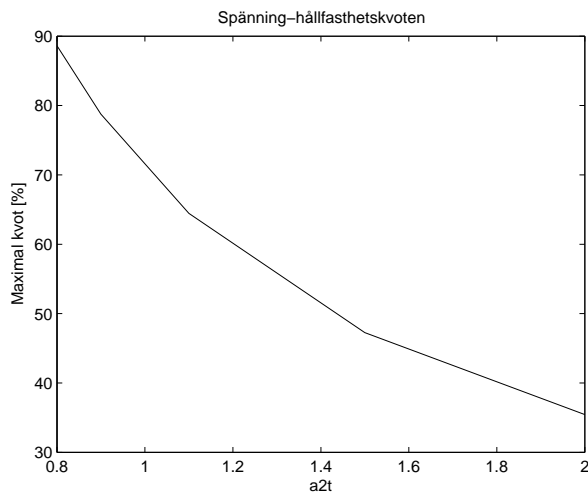
3.4 Parametrar som styr beskrivningen av draghållfasthetsutvecklingen

Liksom tryckhållfastheten påverkar inte denna materialegenskap temperatur- eller spänningsutvecklingen då betongen härdar. Däremot påverkas givetvis hållfastheten i materialet och i detta fallet förändras spännings-hållfasthetskvoten allteftersom de ingående materialparametrarna ändras. Det är viktigt att inse att det inte är spänningen som ändras i denna kvot utan endast hållfastheten. Resultatet blir att om draghållfastheten f ökar minskar kvoten $\frac{\sigma_{max}}{f}$.

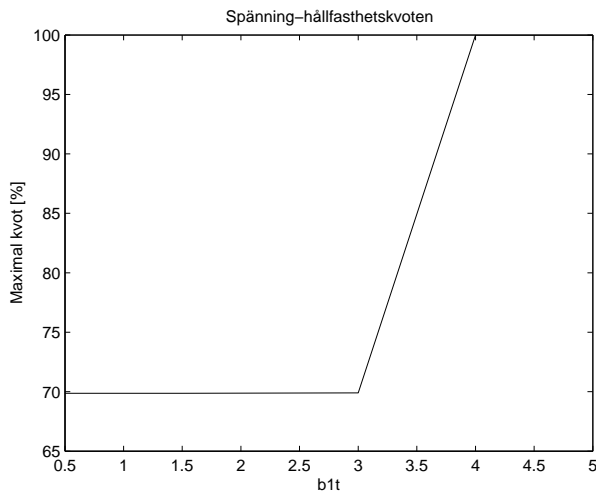
En undersökning har genomförts i syfte att visa hur denna kvot förändras då var och en av parametrarna ändras. Tillvägagångssättet vid denna undersökning är detsamma som innan. Resultatet av försöket redovisas i figur 3.8-3.11.



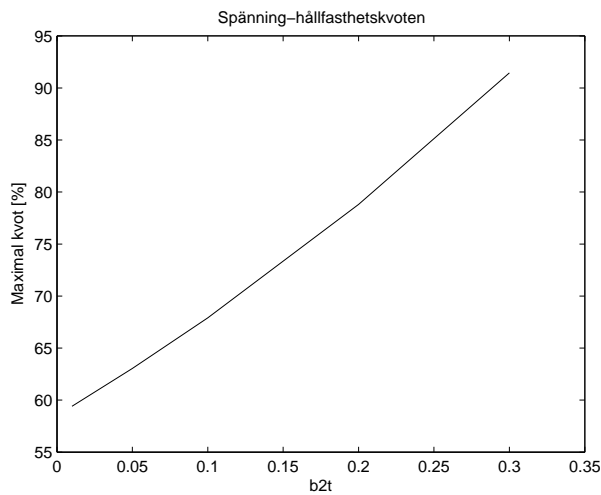
Figur 3.8: Hur parametern a_{1t} , enligt ekvation 2.15 och 2.16, inverkar på spänningsutvecklingen



Figur 3.9: Hur parametern a_{2t} , enligt ekvation 2.15 och 2.16, inverkar på spänningsutvecklingen



Figur 3.10: Hur parametern b_{1t} , enligt ekvation 2.15 och 2.16, inverkar på spänningsutvecklingen



Figur 3.11: Hur parametern b_{2t} , enligt ekvation 2.15 och 2.16, inverkar på spänningsutvecklingen

Figur 3.9 och 3.11 uppvisar ett nästan linjärt samband mellan parametern a_{2t} respektive b_{2t} och spänning-hållfasthetskvoten medan de andra två figurerna

är uppdelade i två delar, en del där kvoten förändras med en förändrad parameter och en närmast horisontell del.

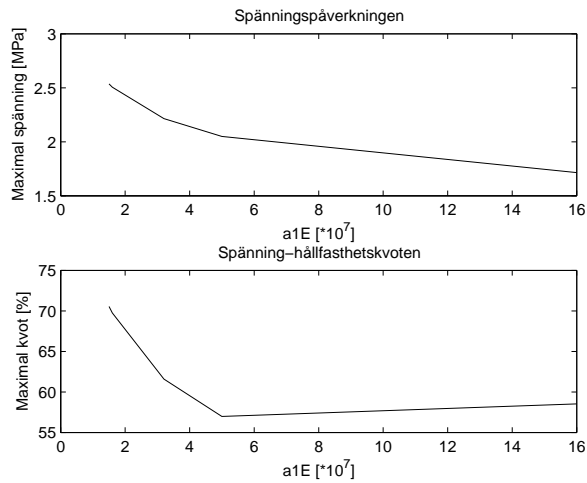
3.5 Parametrar som styr elasticitetsmodulens utveckling

Denna studie har genomförts med samma förutsättningar och på samma sätt som beskrivits tidigare i avsnittet 3.1. Skillnaden mot studien av cementutvecklingen är att denna studies ingående parametrar inte påverkar temperaturutvecklingen. Det är med andra ord ingen idé att redovisa något resultat ifrån temperaturstudierna. Därför finns det endast med två olika faktorer som respektive parameter påverkar, nämligen den maximala spänningen i betongen och den största kvoten mellan spänningen och materialets hållfasthet. I tabell 3.2 nedan redovisas referensmaterialets parametrar som styr utvecklingen av elasticitetsmodulen.

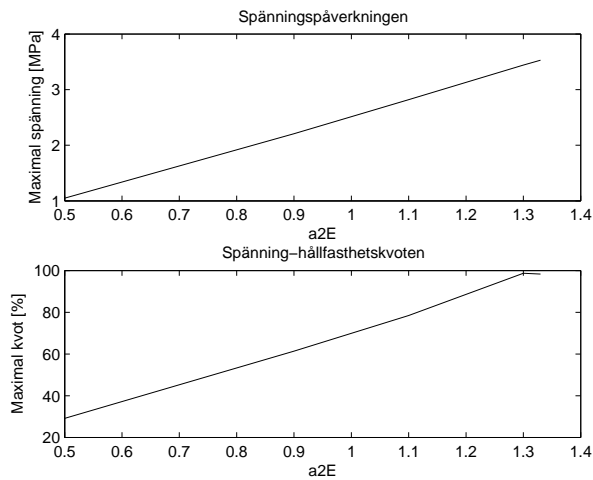
Parameter	Parametervärde
a_{1E}	$1.585 \cdot 10^7$
a_{2E}	1.0
b_{1E}	4.0
b_{2E}	0.1

Tabell 3.2: *Referensmaterialets parametervärden*

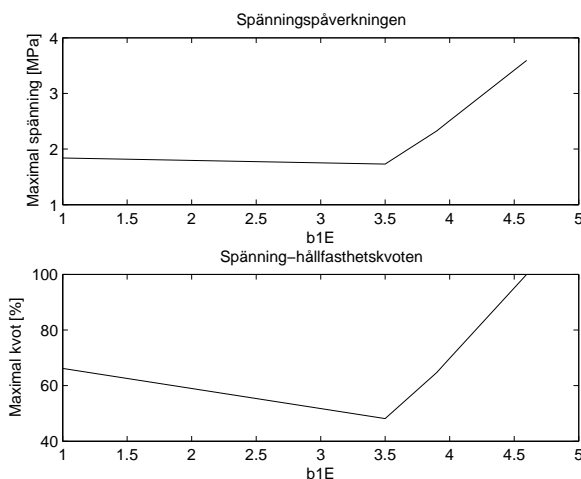
I figur 3.12-3.15 redovisas hur valet av dessa parametrar påverkar spännings- och hållfasthetsutvecklingen.



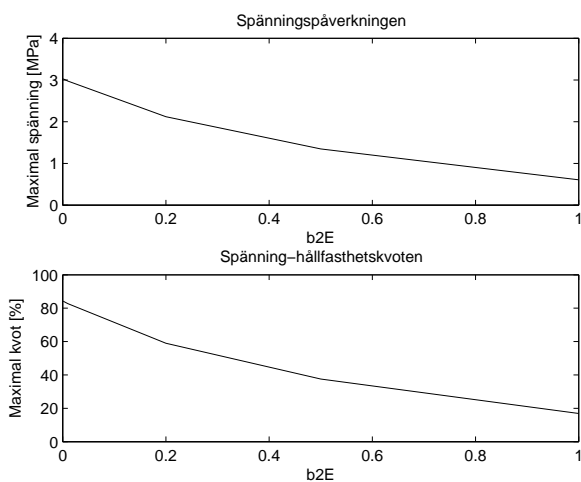
Figur 3.12: Hur parametern a_{1E} , enligt ekvation 2.20 och 2.21 inverkar på temperatur- och spänningsutvecklingen



Figur 3.13: Hur parametern a_{2E} , enligt ekvation 2.20 och 2.21 inverkar på temperatur- och spänningsutvecklingen



Figur 3.14: Hur parametern b_{1E} , enligt ekvation 2.20 och 2.21 inverkar på temperatur- och spänningsutvecklingen



Figur 3.15: Hur parametern b_{2E} , enligt ekvation 2.20 och 2.21 inverkar på temperatur- och spänningsutvecklingen

Ur figurerna framgår det tydligt att spänningskurvan och spännings-hållfasthetskurvan följs åt. Det vill säga om en parameter ändras så att spänningen i materialet blir större ökar samtidigt kvoten.

3.6 Parametrar som styr betongens kryptöjning

Tidsberoende töjningar i material kallas för kryptöjningar, eller bara kryptöjning. Denna töjning får antas vara proportionell med spänningen i materialet. Vid ett en-axligt spänningstillstånd och med konstant spänning kan töjningen uttryckas på följande sätt [2]:

$$\epsilon_c = C\sigma \quad (3.1)$$

där C är en faktor som bestäms av tre saker:

- Betongsammansättningen
- Ekvivalenta tiden, t_e
- Tiden då pålastning sker, t'

Faktorn C kan uttryckas enligt [2]:

$$C = \frac{1}{E}\phi_0\phi'_t\phi_t \quad (3.2)$$

Här är E betongens elasticitetsmodul, ϕ_0 och ϕ_t är materialparametrar som antingen kan hämtas ur exempelvis Betonghandboken [6] eller beräknas enligt metoden nedan.

I programmet Hacon erfordras 17 parametrar för att beskriva betongens kryptöjningar på ett tillräckligt bra sätt. Nedan görs en snabb genomgång som tar upp var alla parametrar kommer ifrån och vad de innebär.

Faktorn ϕ_o kan beräknas enligt [2]:

$$\phi_o = \phi_{01}\frac{w_0}{C} - \phi_{02} \quad (3.3)$$

där ϕ_{01} och ϕ_{02} är två parametrar som bestäms experimentellt och kvoten $\frac{w_0}{C}$ är betongens vattencementtal.

ϕ_t kan beräknas med hjälp av en Dirichlet-serie. Detta är ett uttryck som beräknas som en summa av N stycken uttryck [2].

$$\phi_t = \sum_{n=1}^N \phi_n [1 - e^{-\frac{t-t'}{\tau_n}}] \quad (3.4)$$

I programmet Hacon beräknas denna parameter med hjälp av fem serier.

Den sista parametern är ϕ'_t som beaktar betongens ekvivalenta ålder vid pålastning. Parametern beräknas enligt [2]:

$$\phi'_t = \left(\frac{t_c}{t_r}\right)^{-\phi'_{t1}} \quad (3.5)$$

Om spänningen i materialet inte är konstant (enligt resonemanget ovan) måste den totala töjningen beräknas som summan av alla kryptöjningar vid respektive spänningsnivå. Denna summering görs genom att integrera uttrycket ovan med avseende på tiden t' [2].

$$\epsilon_c = \int_0^t C \frac{d\sigma}{dt'} dt' \quad (3.6)$$

Detta uttryck kan sedan skrivas mer generellt som [2]:

$$\epsilon_{ij}^c = \sum_{n=1}^N \int_0^t C_{ijkl}^{cn} [1 - e^{-\frac{t-t'}{\tau_n}}] \frac{d\sigma}{dt'} dt' \quad (3.7)$$

Förutsatt att materialet är isotropt ges tensorerna C_{ijkl}^{cn} i sin tur av:

$$C_{ijkl}^{cn} = \rho_{cn} \delta_{ij} \delta_{km} + \kappa_{cn} (\delta_{ik} \delta_{jm} + \delta_{im} \delta_{jk}) \quad (3.8)$$

δ är konstanter som kallas för Kronecker's delta medan ρ_{cn} och κ_{cn} är två kryppparametrar som ges av [2]:

$$\rho_{cn} = -\frac{\nu_{cn}}{E_{cn}} \quad (3.9)$$

$$\kappa_{cn} = 1 + \frac{\nu_{cn}}{2E_{cn}} \quad (3.10)$$

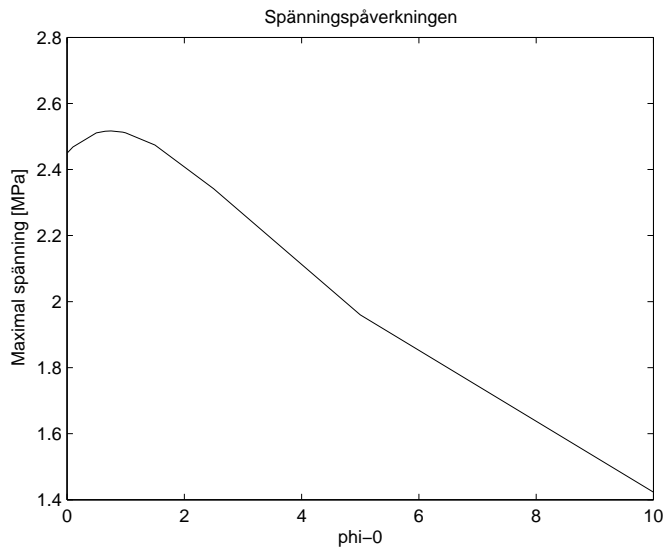
ν_{cn} är en parameter som påminner om materialets tvärkontraktionstal och måste anges i programmet. Om exakta, experimentellt framtagna värden fattas på denna parameter kan det vara rimligt att materialets vanliga tvärkontraktionstal istället används.

Själva parameterstudien har skett på samma sätt som beskrivits i tidigare avsnitt. Denna studie har syftat till att visa hur krypningen påverkar spänningsutvecklingen i materialet. Som tidigare nämnts bestäms kryptöjningen av spänningen i materialet och en krypfaktor C . I parameterstudien har undersökts hur denna krypfaktor påverkar spänningsutvecklingen i materialet. Enligt ovan bestäms C av 3.2

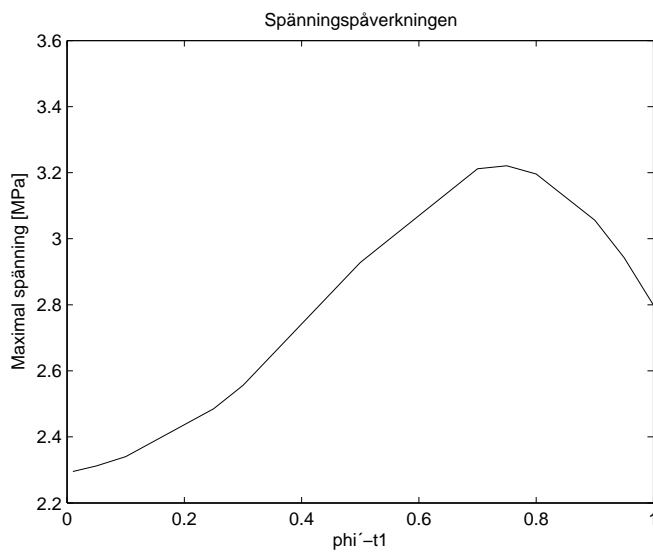
I programmet Hacon har simuleringar gjorts och parametrarna ϕ_0 och ϕ'_{t1} har varierats för att se hur spänningarna i sin tur förändras.

I figur 3.16 redovisas hur olika värden på parametern ϕ_0 inverkar på spänningarna i betongen.

Den andra parametern som undersökts är ϕ'_{t1} . Resultatet av denna undersökning redovisas i figur 3.17 och visar delvis samma sak som föregående parameter visade. För denna parameter innebär ett minskat värde på faktorn ϕ'_t att spänningen blir högre. Indirekt innebär detta faktum enligt ekvation 3.5 att ett högre värde på ϕ'_{t1} ger ett högre värde på ϕ'_t , så länge kvoten är mindre än ett. Detta stämmer delvis överens med figur 3.17. Upp till ett visst värde på parametern ϕ'_{t1} ökar spänningen i materialet för att därefter sjunka något. Detta tyder på att spänningen och kryptöjningen beror av varandra. I detta fallet visar figur 3.17 att det inte går att direkt dra slutsatsen att spänningen kommer att öka vid ett ökat värde på parametern ϕ'_{t1} . Att så är fallet beror på att en ökande spänning kommer att öka krypningen endast upp till en viss gräns då en spänningsrelaxation sker i materialet och spänningen alltså åter sjunker.



Figur 3.16: Hur ϕ_0 inverkar på spänningsutvecklingen i betongen



Figur 3.17: Hur ϕ'_{t1} inverkar på spänningsutvecklingen i betongen

3.7 Yttre parametrar som styr betongens utveckling

Förutom alla parametrar som matematiskt beskriver cementets olika egenskaper är även de yttre faktorerna avgörande för hur cementutvecklingen ska ske. Med de yttre faktorerna menas framförallt väderförhållandena.

Själva studien har genomförts på samma sätt som beskrivits i tidigare avsnitt. De parametrar som undersökts har i basfallet värden enligt tabell 3.3 nedan.

Paramter	Parametervärde
$T_{gjutning}$	$20^{\circ}C$
v_{ref}	5 m/s
$T_{omgivning}$	$20^{\circ}C$
Form	Stål ($\lambda = 45 W/mK$)

Tabell 3.3: *Basfallets parametervärden*

Simuleringarnas resultat redovisas i avsnitten nedan. För att ha något att jämföra med redovisas referensmaterialets temperatur- och spänningsutveckling nedan.

$$T_{max} = 40.46^{\circ}C$$

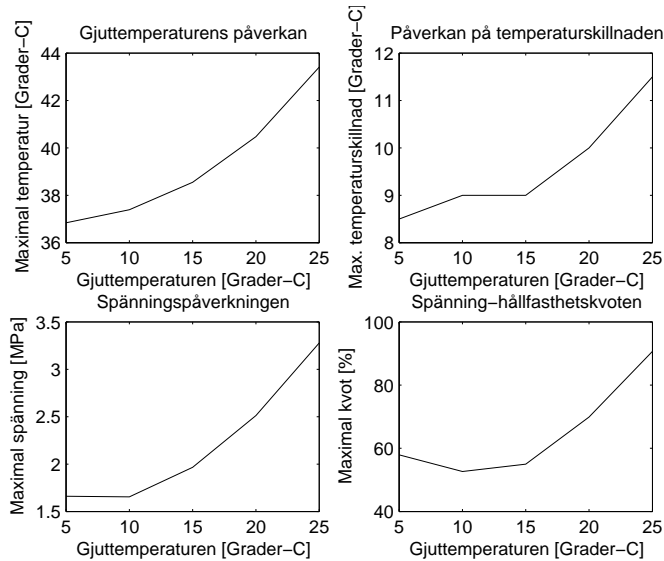
$$\Delta T_{max} = 10.3^{\circ}C$$

$$\sigma_{max} = 2.52MPa$$

$$max(\frac{\sigma}{f}) = 69.89\%$$

3.7.1 Gjuttemperaturens inverkan

Det första som undersökts är hur gjuttemperaturen påverkar materialets utveckling. Resultatet redovisas i figur 3.18 nedan.



Figur 3.18: *Hur gjuttemperaturen inverkar på temperatur- och spänningsutvecklingen*

Resultatet är tydligt, en ökad gjuttemperatur medför att såväl temperaturen som spänningen i betongen stiger. För att bättre skapa en uppfattning om hur mycket gjuttemperaturen verkligen påverkar temperatur- och spänningsutvecklingen redovisas nedan ett mått på gjuttemperaturens inverkan med vad som kan tolkas som kurvans lutning. Storlekarna på respektive kurvlutning kan relateras till varandra och därigenom ge en uppfattning om hur mycket varje yttre faktor verkligen påverkar temperatur- och spänningsutvecklingen i betongen.

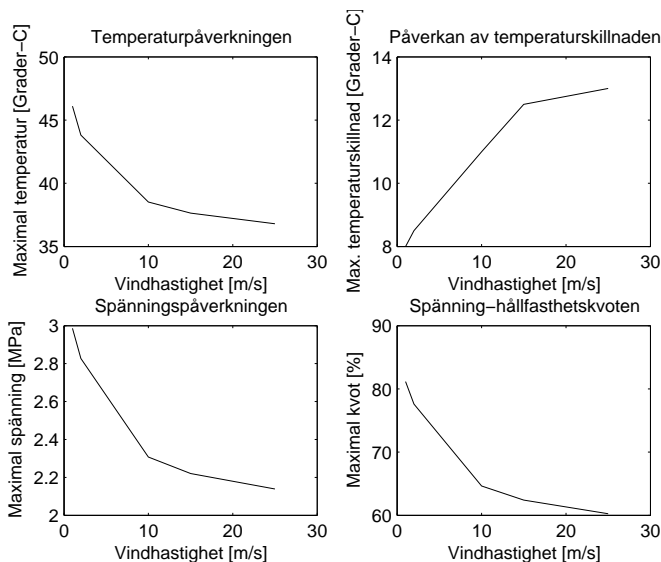
$$\frac{\Delta T_{max}}{\Delta T_{Gjutning}} = \frac{43.41 - 37.39}{25 - 10} = 0.4 [^{\circ}C / ^{\circ}C]$$

På samma sätt erhålls följande gradient i spänningsdiagrammet:

$$\frac{\Delta \sigma_{max}}{\Delta T_{Gjutning}} = \frac{3.277 - 1.654}{25 - 10} = 0.108 [MPa / ^{\circ}C]$$

3.7.2 Vindhastighetens inverkan

Den andra faktorn som undersökts är hur vindhastigheten påverkar betongen. Resultatet av undersökningen visas i figur 3.19 nedan.



Figur 3.19: *Hur vindhastigheten inverkar på temperatur- och spänning-utvecklingen*

Figuren visar att en ökad vindhastighet resulterar i en minskad maximal temperatur och spänning. Men en kurva avviker från de andra genom att stiga med ökad vindhastighet. Denna kurva visar att den maximala temperaturskillnaden mellan betongens mitt och den yttre kanten är som störst då vindhastigheten är som störst. Detta beror på att vinden vid höga hastigheter kyler av betongens yttre rand mer än värmetilskottet, på grund av cementreaktionerna, lyckas värma upp ytan.

På samma sätt som innan har spännings- och temperaturgradienten beräknats då vindhastigheten förändras.

$$\frac{\Delta T_{max}}{\Delta v} = \frac{43.81 - 36.8}{2 - 25} = -0.305 [^{\circ}C \cdot s/m]$$

Förändringen i spänning blir:

$$\frac{\Delta\sigma_{max}}{\Delta v} = \frac{2.827-2.139}{2-25} = -0.03[MPa \cdot s/m]$$

Minustecknen innebär helt enkelt att kurvorna har negativ lutning, det vill säga att en ökad vindhastighet innebär en reducerad temperatur och spänning i materialet.

3.7.3 Olika gjutformars inverkan

En undersökning som visar hur olika gjutformar med olika tjocklekar påverkar temperatur- och spänningsutvecklingen har genomförts. De olika materialen som använts i formarna redovisas i tabell 3.4.

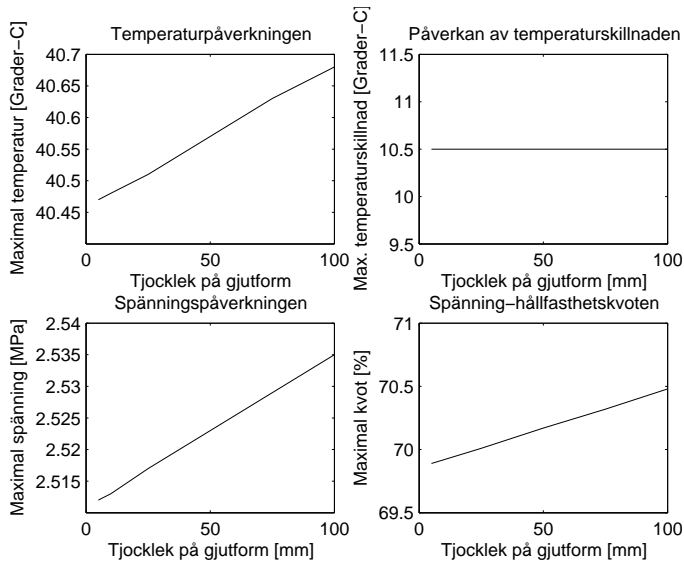
Gjutformens material	λ (W/mK)
Stål	45
Trä	0.14
Mineralull	0.055
Cellplast	0.055
Plast	0.38

Tabell 3.4: *Gjutformar som undersökts*

Dessutom har olika tjocklekar på respektive form använts vid simuleringarna. Dessa tjocklekar är: 5, 10, 25, 50, 75 och 100. (millimeter)

Första formtypen som undersökts är stålformen. I figur 3.20 redovisas hur betongen utvecklas beroende på vilken formtjocklek som används.

Det syns direkt att tjockleken spelar en minimal roll för betongens utveckling. Det spelar exempelvis ingen större roll för temperaturutvecklingen då gjutformens tjocklek ändras från 5 till 100 millimeter, temperaturen i betongen stiger bara med någon tiondels grad. Stålform kan alltså med fördel användas



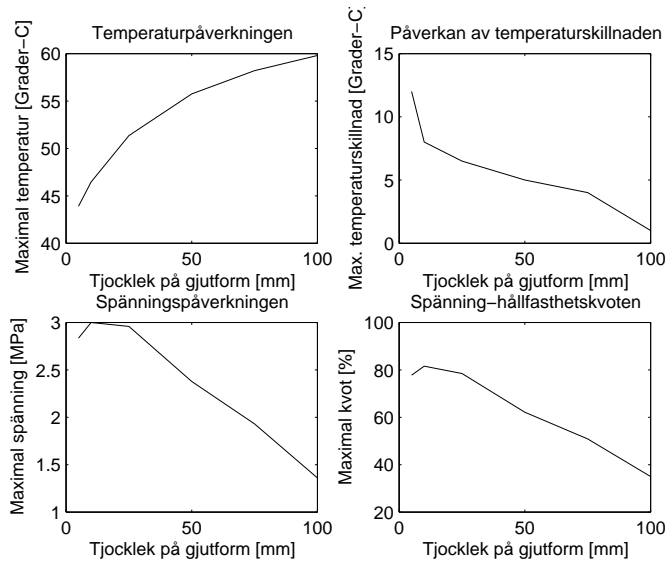
Figur 3.20: Hur stålformens tjocklek inverkar på temperatur- och spänningsutvecklingen

då någon form av påverkan, till exempel en temperaturhöjning i materialet, inte är önskvärd. Nedan visas också att kurvans gradient är väldigt låg.

$$\frac{\Delta T_{max}}{\Delta t_{Gjutform}} = \frac{40.68 - 40.47}{100 - 5} = 0.0022 [^{\circ}C/m]$$

$$\frac{\Delta \sigma_{max}}{\Delta t_{Gjutform}} = \frac{2.535 - 2.512}{100 - 5} = 0.00024 [MPa/m]$$

Den andra formtypen som använts är av trä. Samma tjocklekar har använts vid försöket.



Figur 3.21: Hur träformens tjocklek inverkar på temperatur- och spänning-utvecklingen

Denna typ av form har en helt annan inverkan på bland annat materialets temperaturutveckling. Ju tjockare träform desto bättre isolerar denna. Detta resulterar i en högre temperatur i materialets inre samtidigt som temperaturskillnaden över tvärsnittet reduceras. De nedre figurerna visar att en hög temperatur i betongen inte nödvändigtvis innebär en hög spänning. Efter en maximal spänning på ungefär 3 MPa, vid en formtjocklek på runt 10-20 millimeter, sjunker spänningen konstant med en ökad tjocklek på gjutformen. Detta har att göra med att skillnaden över tvärsnittet minskar även om den maximala temperaturen i materialet ökar. Denna typ av form kan användas då krav på isoleringsförmåga hos gjutformen är önskvärd. Detta kan exempelvis vara aktuellt då gjutning sker vintertid.

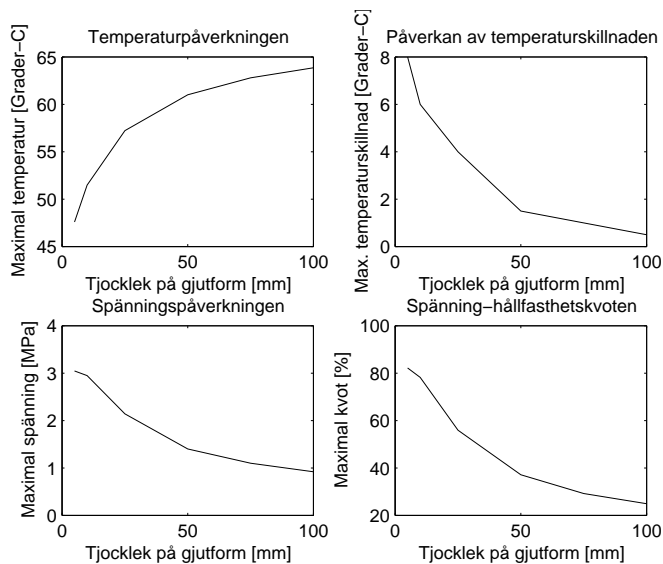
Kurvornas förändring i temperatur och spänning blir:

$$\frac{\Delta T_{max}}{\Delta t_{Gjutform}} = \frac{59.8-43.9}{100-5} = 0.167[{}^{\circ}C/m]$$

$$\frac{\Delta \sigma_{max}}{\Delta t_{Gjutform}} = \frac{1.36-2.835}{100-5} = -0.0155[MPa/m]$$

Resultatet av gradientberäkningarna visar att temperatur- och spänningskurvan är i motsatt riktning vilket också bekräftas av figur 3.21.

Den tredje typen av gjutform som undersökts är gjord av mineralull alternativt cellplast som antas ha samma värmeledningsförmåga. Resultatet redovisas i figur 3.22.



Figur 3.22: Hur mineralulls- och cellplastformens tjocklek inverkar på temperatur- och spänningsutvecklingen

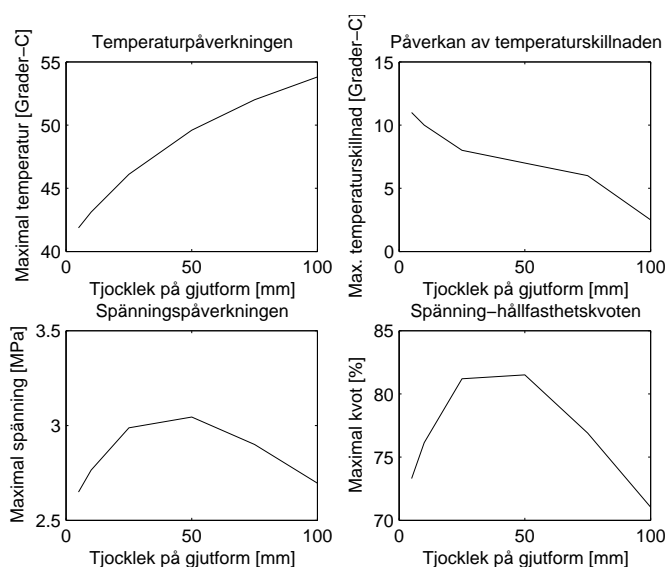
Kurvornas utseende påminner om de vid föregående undersökning av träformar. Resonemanget enligt ovan blir ännu tydligare med dessa kurvor. Även dessa kurvor visar tydligt att det inte är själva temperaturen i materialet som påverkar spänningen utan temperaturskillnaden över tvärsnittet som är avgörande. Detta syns väldigt tydligt i figuren ovan där temperaturskillnadskurvan och spänningskurvan har samma form. Kurvan som beskriver spännings-hållfasthetskvoten påverkas både av att spänningen sjunker och av att hållfastheten faktiskt ökar med tiden. Även denna typ av form är väldigt bra att använda vid gjutning vintertid då krav på en lägsta temperatur i betongen föreligger. Samtidigt kan det vara farligt att använda en form som ger för hög temperatur i materialet eftersom detta då kan få försämrade egenskaper.

Förändringen av gradienten i temperatur- och spänningsdiagrammet blir:

$$\frac{\Delta T_{max}}{\Delta t_{Gjutform}} = \frac{62.8-51.48}{75-10} = 0.174[{}^{\circ}C/m]$$

$$\frac{\Delta \sigma_{max}}{\Delta t_{Gjutform}} = \frac{1.1-2.949}{75-10} = -0.0284[MPa/m]$$

Den sista gjutformen som undersökts är tillverkad av plast. Denna undersöknings resultat redovisas i figur 3.23.



Figur 3.23: Hur plastformens tjocklek inverkar på temperatur- och spänningsutvecklingen

För den sista typen av gjutform följer inte längre spänningskurvan temperaturskillnadskurvan. De översta två kurvorna har samma typ av form som i tidigare undersökningar medan de två undre kurvorna ser annorlunda ut. Först stiger spänningen upp till ett maximalt värde för att därefter åter sjunka. Varför inte temperaturskillnads- och spänningskurvan följs åt hela tiden beror sannolikt på att de maximala värdena är hämtade vid olika tidpunkter.

Förändringen av gradienten i temperatur- och spänningsdiagrammet blir:

$$\frac{\Delta T_{max}}{\Delta t_{Gjutform}} = \frac{53.81-41.87}{100-5} = 0.126[{}^{\circ}C/m]$$

Spänningskurvans form gör att det är inte meningsfullt att ta fram ett värde på kurvans lutning. Däremot kan kurvan delas in i två intervall, upp till 50 mm tjocklek på gjutformen och över 50 mm tjocklek. De båda gradienterna blir då:

$$0 \leq t \leq 50[mm] \\ \frac{\Delta \sigma_{max}}{\Delta t_{Gjutform}} = \frac{3.045-2.649}{50-5} = 0.0088[MPa/m]$$

$$50 \leq t \leq 100[mm] \\ \frac{\Delta \sigma_{max}}{\Delta t_{Gjutform}} = \frac{2.696-3.045}{100-50} = -0.00698[MPa/m]$$

3.7.4 Inverkan då olika gjut- och lufttemperaturer kombineras

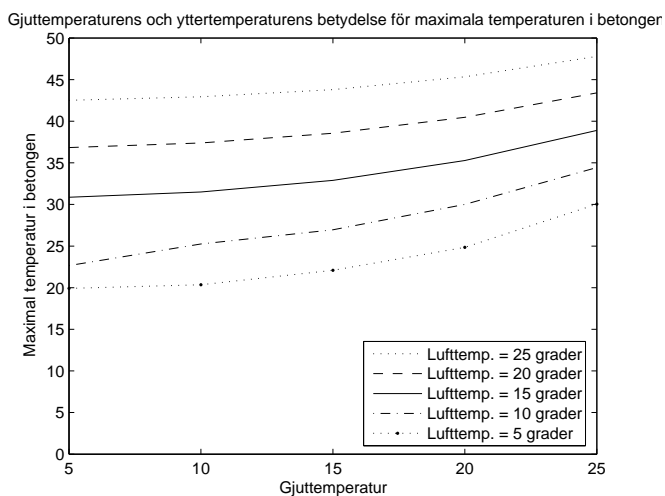
Till sist har en undersökning genomförts för att i en enda figur visa hur den maximala spänningen varierar med olika värden på gjut- och lufttemperaturen. Samma undersökning har genomförts för att visa hur den resulterande temperaturen i betongen påverkas.

Undersökningen har genomförts för fyra olika typer av formar, nämligen:

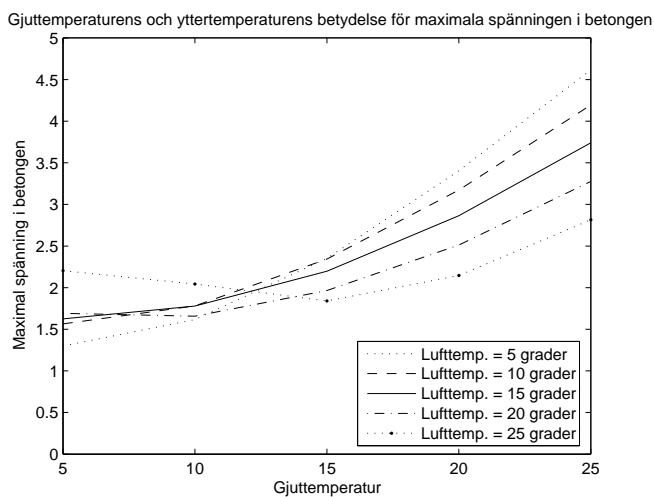
- Stålförm
- Träform
- Mineralulls-/Cellplastform
- Plastform

Den första gjutformen som undersökts är gjord av stål. I figurerna 3.24 och 3.25 nedan redovisas hur temperatur- och spänningsutvecklingen varierar för olika kombinationer av gjut- och lufttemperaturer.

En viktig slutsats som kan dras av de två figurerna är att vid samma gjuttemperatur resulterar en låg lufttemperatur i en jämförelsevis låg maximal temperatur i materialet. För spänningen blir resultatet det omvända.

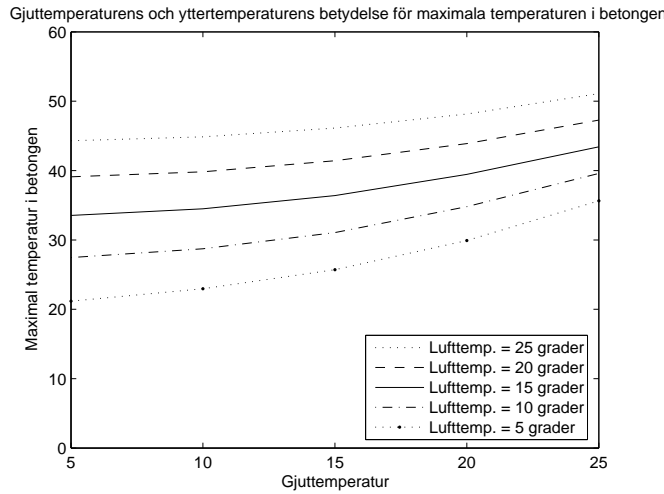


Figur 3.24: Hur stålformens temperaturutveckling påverkas av gjut- och lufttemperaturen

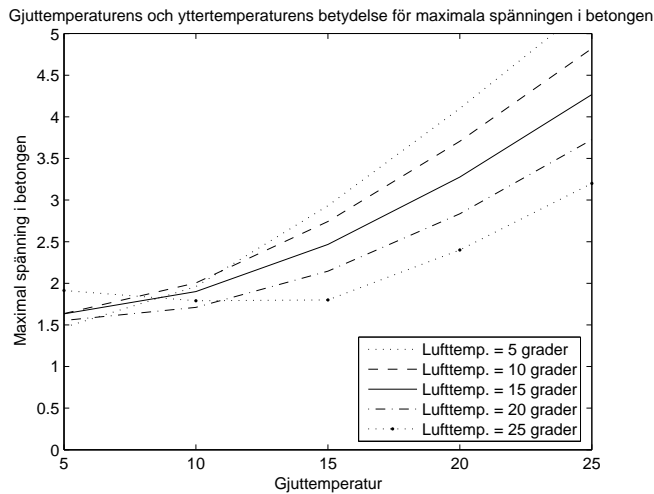


Figur 3.25: Hur stålformens spänningsutveckling påverkas av gjut- och lufttemperaturen

Den andra formen är tillverkad av trä. I figurerna 3.26 och 3.27 redovisas hur sambanden ser ut.



Figur 3.26: Hur träformens temperaturutveckling påverkas av gjut- och lufttemperaturen

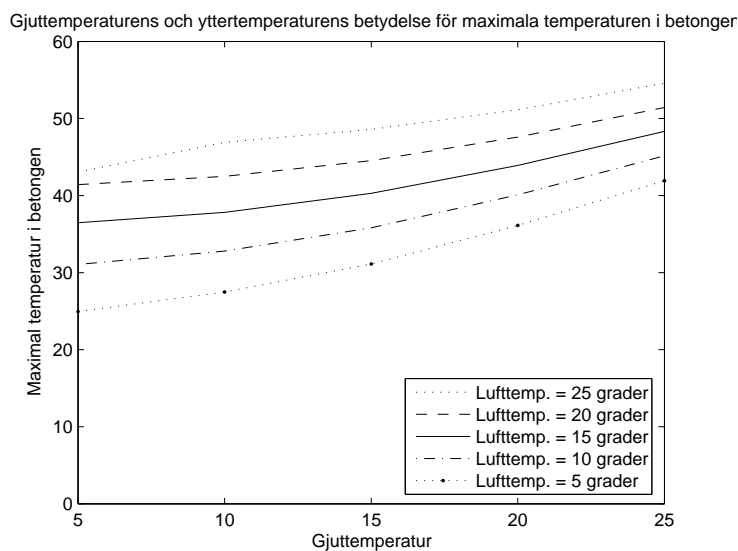


Figur 3.27: Hur träformens spänningsutveckling påverkas av gjut- och lufttemperaturen

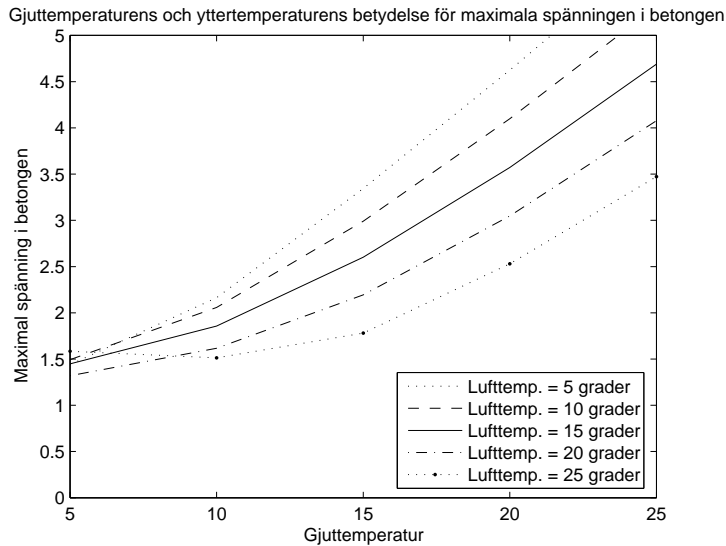
Sambanden med träform är till formen lika de för stålform. Vid samma gjut-

temperatur medför en ökad temperatur i omgivningen en ökad temperatur i materialet, samtidigt som spänningen minskar.

Den tredje typen av gjutform är tillverkad av cellplast/mineralull (de båda typerna har i programmet Hacon samma värmeisolerande egenskaper). I figurerna 3.28 och 3.29 nedan redovisas hur temperatur- och spänningsutvecklingen beror på gjut- och lufttemperaturen.



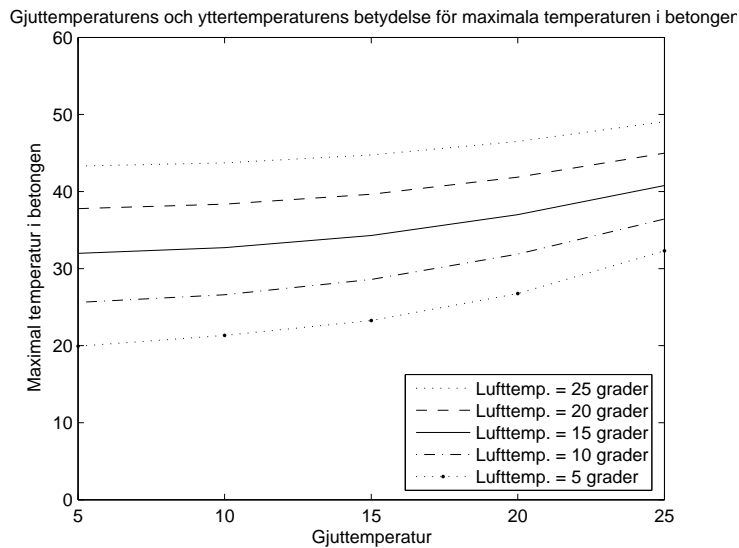
Figur 3.28: Hur cellplast-/mineralullsformens temperaturutveckling påverkas av gjut- och lufttemperaturen



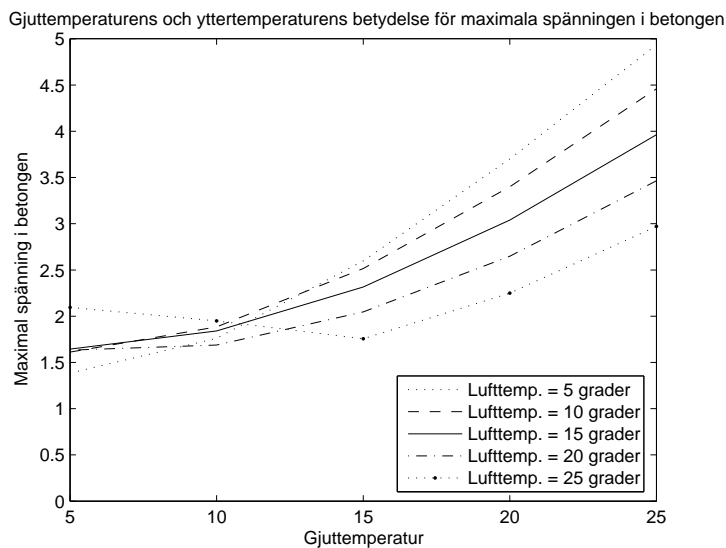
Figur 3.29: Hur cellplast-/mineralullsformens spänningsutveckling påverkas av gjut- och lufttemperaturen

Cellplast- och mineralullsformar uppvisar samma temperaturberoende som de två tidigare formarna.

Den sista typen av gjutformar som undersökts består av plast. På samma sätt som innan redovisas resultatet av undersökningen i figurerna 3.30 och 3.31.



Figur 3.30: Hur plastformens temperaturutveckling påverkas av gjut- och lufttemperaturen



Figur 3.31: Hur plastformens spänningsutveckling påverkas av gjut- och lufttemperaturen

Materialets temperatur- och spänningsutveckling är beroende av gjut- och lufttemperaturen på samma sätt som de tre tidigare undersökningarna visar. Detta beroende borde alltså kunna tolkas som en allmän egenskap hos materialet.

Kapitel 4

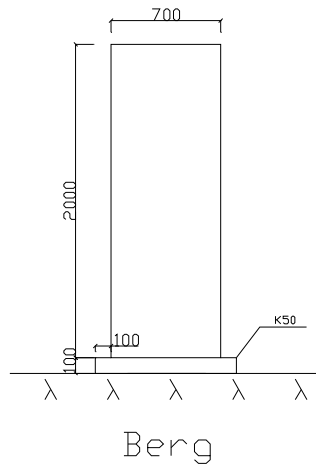
Simulering av fullskaleförsök

4.1 Förutsättningar

Sommaren 1983 genomfördes ett fullskaleförsök i Ringhals [3]. Försökets syfte var att visa skillnaderna i värmeutveckling för ett vanligt Standard Portlandcement och ett anläggningscement. Den senare cementtypen var då en nyhet och hade tagits fram för att man önskade ett cement med lägre värmeutveckling. Meningen med försöket var att undersöka skillnaden i värmeutveckling mellan de båda cementtyperna. Dessutom undersöktes hur Anläggningscementet skulle reagera då man försökte få materialet att spricka. Alla provkroppar göts med så lika randvillkor som möjligt så att omgivningen inte skulle påverka resultatet. I figur 4.1 redovisas de fysiska förutsättningarna vid försöket [3]. Desamma har även använts vid simuleringen.

På grund av bergets ojämnheter göts först en sula av K50-betong. Innan försökens provkroppar göts fick sulan härda under cirka två veckor. Därefter göts försökets provkroppar på sulorna.

Vid fullskaleförsöket göts sex stycken provkroppar med olika förutsättningar. Dessa förutsättningar redovisas i tabell 4.1.



Figur 4.1: Provkropparnas fysiska förutsättningar vid fullskaleförsöket

Provkropp	Cement	C [kg/m^3]	vct	$T_{Gjutning}$	$T_{Omgivning}$
1	Anläggningscement	400	0.4	19	25
2	Std. Portland	400	0.4	20	25
3	Anläggningscement	400	0.4	20	19
4	Std. Portland	400	0.4	20	19
5	Anläggningscement	500	0.4	7	12
6	Anläggningscement	500	0.4	18	12

Tabell 4.1: Försökets förutsättningar

De fyra första proverna skulle visa dels skillnaden mellan de båda cementtyperna och dels hur värmeutvecklingarna påverkas av omgivningens medeltemperatur. De två sista proverna göts avsiktligt under dåliga förhållanden eftersom man ville undersöka om sprickbildning kunde undvikas genom att tillsätta is till den färskbetongen.

De båda materialen som använts vid fullskaleförsöket är som sagt Anläggningscement, eller Standard Degerhamns-cement, och Standard Portlandcement. Det sistnämnda cementet var tillverkat i Skövde. I programmet Hacon finns endast materialdata för Standard Portlandcement tillverkat i Slite men enligt [7] är skillnaden mellan de båda cementens hållfasthetstillväxt inte stor. Är skillnaden mellan de båda hållfasthetstillväxterna liten är med andra ord skillnaden i mognadsutveckling också liten. Detta beskrivs i kapitel 3 och formlerna 2.1 och 2.3. Nedan sammanfattas sambanden i ekvationerna 4.1-4.3. [1]

$$\frac{(d\alpha/dt)_T}{(d\alpha/dt)_{20}} = e^{\theta_0(\frac{1}{T_{20}} - \frac{1}{T})} \quad (4.1)$$

$$\frac{(df/dt)_T}{(df/dt)_{20}} = e^{\theta_0(\frac{1}{T_{20}} - \frac{1}{T})} \quad (4.2)$$

Detta ger följande relation:

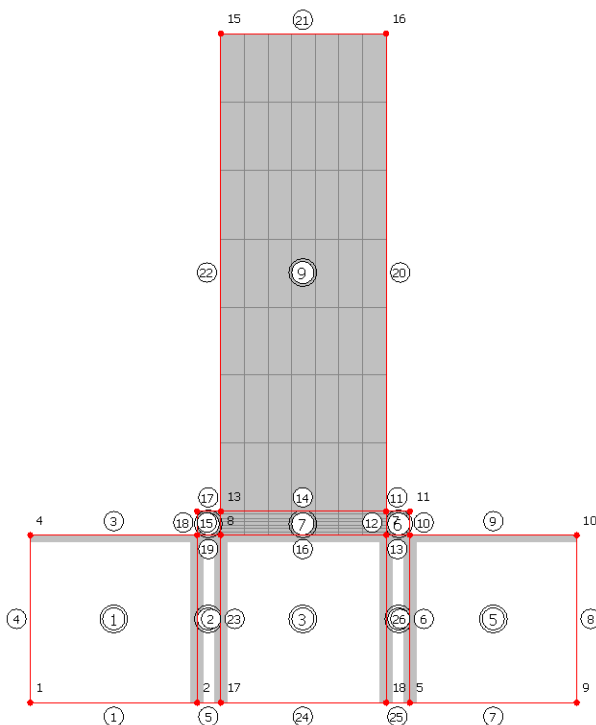
$$\frac{(d\alpha/dt)_T}{(d\alpha/dt)_{20}} = \frac{(df/dt)_T}{(df/dt)_{20}} \quad (4.3)$$

Det sista sambandet kan tolkas som att vid samma temperaturförhållanden kommer tillväxtkurvans lutning i varje punkt att vara samma för både mognads- och hållfasthetskurban. Med andra ord har de båda kurvorna samma form.

4.2 Modellering

Utifrån förutsättningarna redovisade i föregående avsnitt och speciellt figur 4.1 gjordes en beräkningsmodell i programmet Hacon. Denna modell visas i figur 4.2.

Under väggen finns själva sulan. Detta material består av betong som härdat två veckor då väggarna gjuts. Gjutformen som använts vid fullskaleförsöket var gjord av trä. Till modellens randvillkor har därför angetts att en 20 millimeter tjock träform ska användas. Övriga randvillkor och materialförutsättningar finns angivna i figur 4.1 och tabell 4.1.



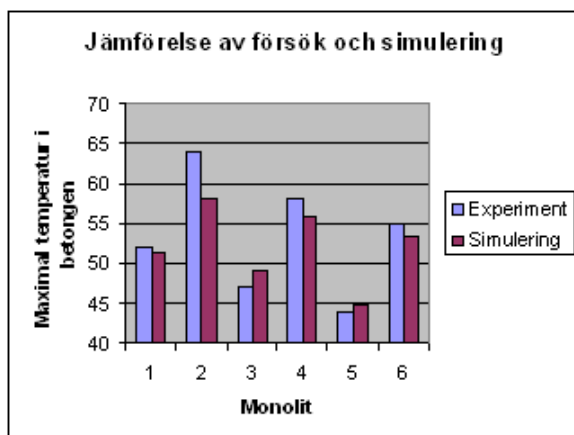
Figur 4.2: Fullskaleförsökets beräkningsmodell

4.3 Resultat

Vid fullskaleförsöket i Ringhals dokumenterades de uppmätta temperaturerna i respektive monolits (d.v.s. provkropp) mittpunkt och ritades upp mot tiden. På så sätt erhålls kurvor som visar de olika cementens temperaturutvecklingar med tiden. Men det är endast för monolit 1,2,5 och 6 som resultatet av detta försök finns redovisat. För monolit 3 och 4 finns endast de maximala temperaturerna redovisade.

I figur 4.3 redovisas och jämförs resultatet av de uppmätta och simulerade maximala temperaturerna.

Som synes är skillnaden i maximalt uppnådd temperatur väldigt liten mellan det experimentella och det simulerade resultatet. Störst skillnad är det för monolit nummer två, där är den experimentellt uppnådda temperaturen



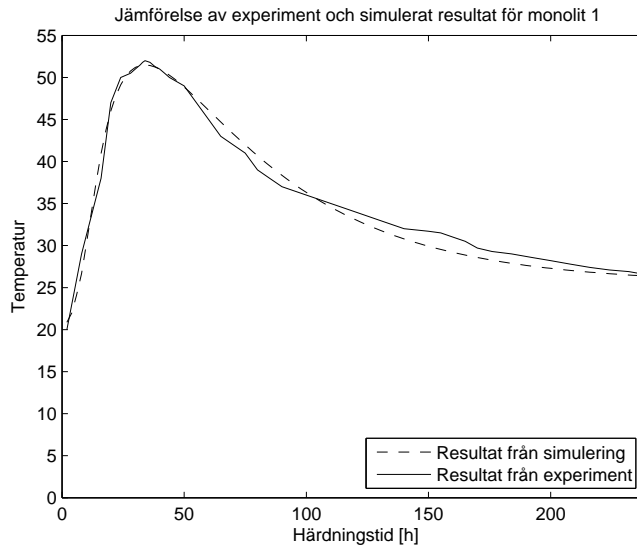
Figur 4.3: Jämförelse av de maximala temperaturerna

är ungefär 5°C högre än den simulerade. För övrigt är överensstämmelsen väldigt bra.

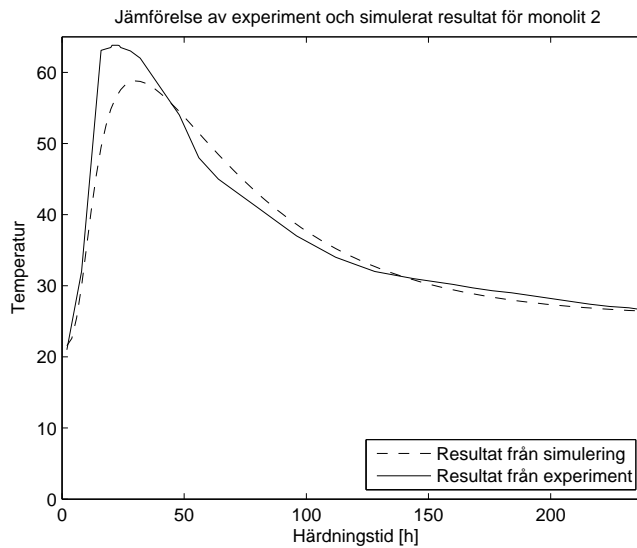
Det är inte bara de maximala temperaturerna som är önskvärda att jämföra, även temperaturkurvorna är intressanta att jämföra. Från försöket vid Ringhals [3] finns ingen data tillgänglig utan bara kurvor. För att kunna jämföra de båda resultaten i samma figur måste därför värden avläsas manuellt ur rapporten ifrån Ringhals. I figur 4.4-4.7 jämförs det experimentella resultatet med det simulerade.

De två första monoliterna har gjutits under samma förhållanden och överensstämmelsen mellan det experimentella och det simulerade resultatet är väldigt bra. För monolit 2 är den maximala temperaturen något högre i experimentet än enligt simuleringen men annars är kurvornas form väldigt lika. Övrigt resultat i form av maximala temperaturer i betongen finns redovisat i figur 4.3.

För monolit 3 och 4 finns inga temperatursamband redovisade. Därför tas endast de maximala temperaturerna upp som jämförelse.

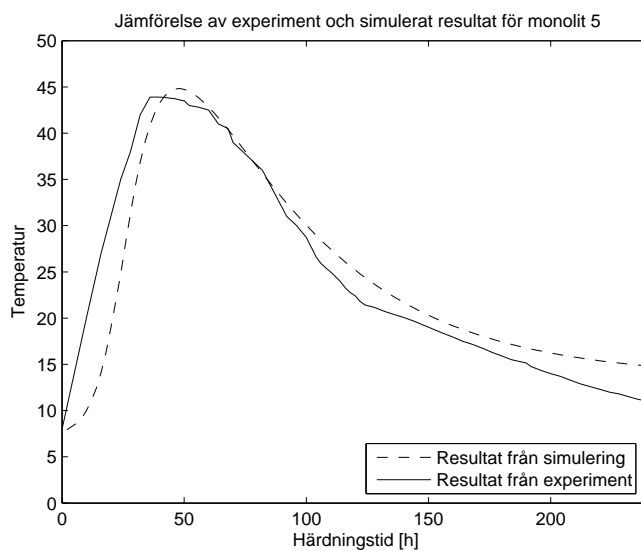


Figur 4.4: Jämförelse av det experimentella och simulerade resultatet för monolit 1

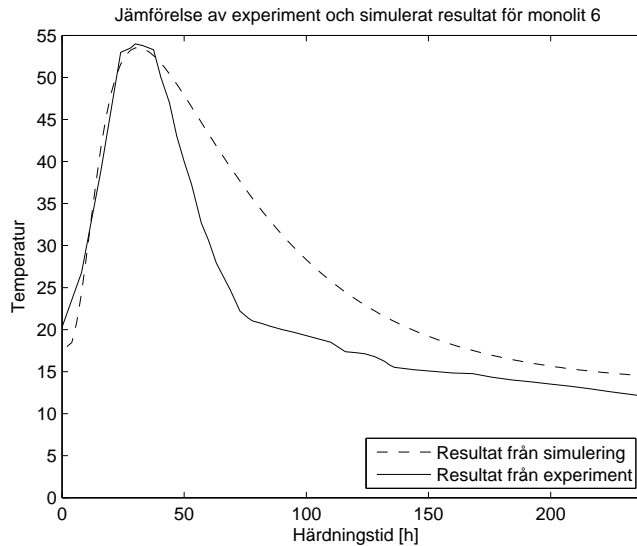


Figur 4.5: Jämförelse av det experimentella och simulerade resultatet för monolit 2

För de två sista monoliterna (nummer 5 och 6) redovisas resultatet av jämförelsen i de två figurerna 4.6 och 4.7.



Figur 4.6: Jämförelse av det experimentella och simulerade resultatet för monolit 5



Figur 4.7: Jämförelse av det experimentella och simulerade resultatet för monolit 6

Här skiljer sig kurvorna åt. De maximala värdena överensstämmer väl mellan de båda kurvorna. Däremot sjunker, framförallt för monolit 6, temperaturen i betongkroppen betydligt snabbare vid experimentet. Anledningen till detta är okänd.

En annan sak som skiljer mellan de båda kurvorna är temperaturen efter 10 dygn. Vid det experimentella försöket har temperaturen i betongen sjunkit till ungefär samma som i omgivningen. Den simulerade kurvan däremot har inte hunnit svalna lika mycket utan temperaturen i betongen är fortfarande ett par grader över omgivningens. Beräkningsmodellens tillförlitlighet kontrollerades genom att se vilken temperatur betongen hade efter lång tid. Det visade sig att temperaturen i betongen efter 100 dygn var samma som i omgivningen (12°C), alltså ska själva beräkningsmodellen vara att lita på och felet ligga någon annanstans.

En sak som är lite oklar är hur temperaturen verkligen såg ut sommaren 1983. För monolit 1 och 2 anges i rapporten att medeltemperaturen är 25°C de fem första dygnen, medan den redovisade temperaturkurvan fortlöper un-

der 10 dygn. Det finns inget angivet hur temperaturen ser ut de fem sista dyggen. I denna rapport har därför antagits att medeltemperaturen är 25°C under 10 dygn. Kurvan från fullskaleförsöket är därför något förändrad så temperaturen i betongen också går mot 25°C , som den gör i verkligheten. För monolit 5 och 6 anges bara att medeltemperaturen är 12°C och alltså inte hur länge detta är fallet. Därför antas även här att medeltemperaturen under alla 10 dygn är 12°C .

Ytterligare en sak som kan tänkas påverka resultatet är att medeltemperaturen anges som konstant under mättiden. I själva verket varierar temperaturen över dygnet. En simulering med linjär temperaturvariation över dygnet har därför genomförts för att ta reda på hur mycket temperaturkurvan skiljer sig ifrån den med konstant dygnstemperatur. Resultatet blev att skillnaden var minimal och det spelade inte någon större roll vilket randvillkor som användes.

Kapitel 5

Experimentellt arbete

5.1 Förutsättningar

Experimentet har genomförts i syfte att beräkna ett cements mognadsparametrar med hjälp av programmet Hacon. Försöket ska dessutom verifiera att beräkningarna med Hacon är tillförlitliga. Experimentet är utfört vid Vattenfalls provanläggning i Älvkarleby.

För att kunna genomföra beräkningarna i Hacon behövs två typer av in-data, materialparametrar och temperaturmätningar. Först och främst måste vissa materialparametrar anges i programmet för att en beräkning ska kunna genomföras. Hur många parametrar som måste anges i programmet beror på hur många okända som ska beräknas. De parametrar som kan beräknas är:

- λ_1
- κ_1
- t_1
- W_{co}

De tre första parametrarna styr utvecklingen av betongens hydratationsgrad enligt ekvation 2.6. Den sista parameter beskriver hur mycket värme som utvecklats i betongen vid fullständig hydratation. Denna parameter kan vara av intresse då denna tillsammans med cementmängden och hydratationsgraden ger ett mått på hur mycket värme som utvecklats i betongen vid en viss tidpunkt. Detta beskrivs av [2]

$$W = CW_{co}\alpha \quad (5.1)$$

Om någon av de ovan nämnda parametrarna är känd behöver inte denna beräknas och då kan man välja att endast beräkna de tre övriga. Efter att detta val är gjort behöver programmet lite kompletterande materialparametrar för att kunna genomföra beräkningen. Detta är mer fysikaliska parametrar såsom massdensiteten, specifika värmekapaciteten, cementinnehållet, två parametrar som beskriver aktiveringsenergin (enligt ekv. 2.5) och en värmeförlustkoefficient.

Då betongen gjuts görs detta i en isolerad låda. Lådans värmeisolerande egenskaper beskrivs av den sistnämnda parameteren. Mer om denna parameter finns beskrivet längre ned i kapitlet.

För att programmet sedan ska kunna beräkna de sökta materialparametrarna måste dessutom temperaturmätningar, sparade i separata filer, hämtas in i Hacon. I indatan ska tre typer av information ingå:

- Tiden betongen härdat
- Temperatur i betongen
- Temperatur i omgivningen

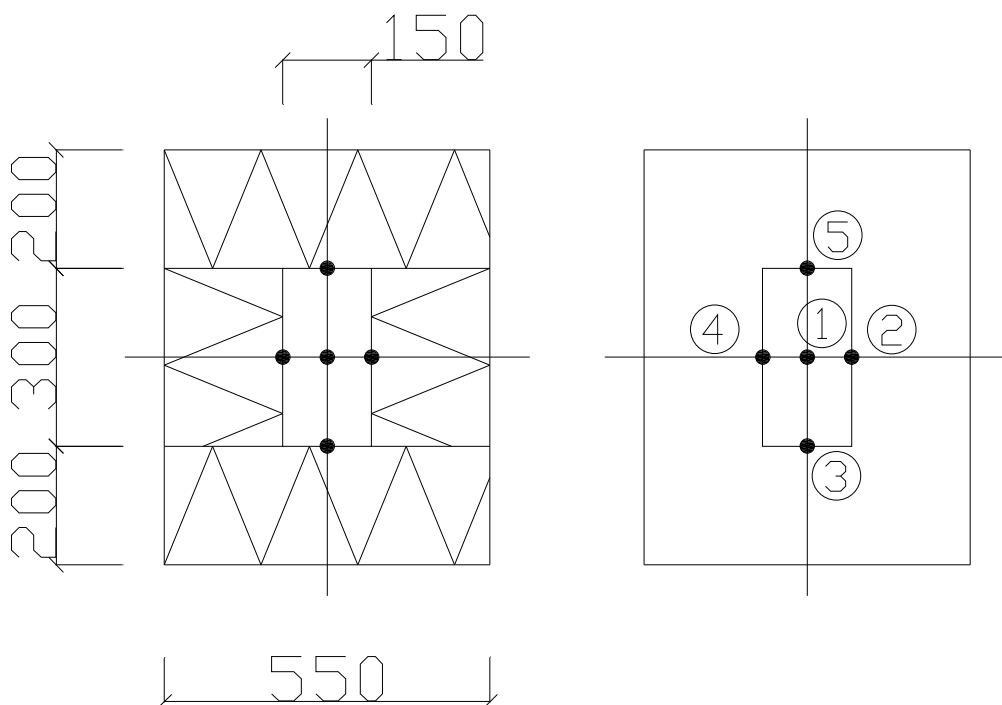
Om all data, enligt ovan, är angiven i programmet är allt klart för att låta Hacon beräkna de sökta materialparametrarna. Nedan beskrivs i mer detalj hur själva experimentet genomförs.

5.2 Tillvägagångssätt

Vid experimentet gjuts en cylinder med diametern 150 millimeter inuti en isolerad box. Eftersom programmet Hacon kan räkna axisymmetriskt görs provkroppen med fördel cylindrisk. I den färska betongen placeras temperaturgivare, enligt figur 5.1. Temperaturgivaren kopplas upp till en dator som registrerar temperaturen i både betongen och rumsluften var trettionde minut. Betongen får därefter härda under ungefär en vecka, tills temperaturkurvan börjar plana ut. Indatan i Hacon består av tre listor med värden på:

- Tiden betongen härdat (sekunder)

- Temperatur i betongen ($^{\circ}\text{C}$)
- Temperatur i omgivningen ($^{\circ}\text{C}$)



Figur 5.1: Illustration av provkroppens utseende

I tidigare undersökningar och mätningar är det inte alltid specificerat var någonstans själva temperaturmätningen är gjord. För att kunna jämföra resultatet med tidigare försök mäts därför dels en maximal temperatur upp och dels mäts temperaturen på mitten av cylinderns samtliga sidor. (se figur 5.1)

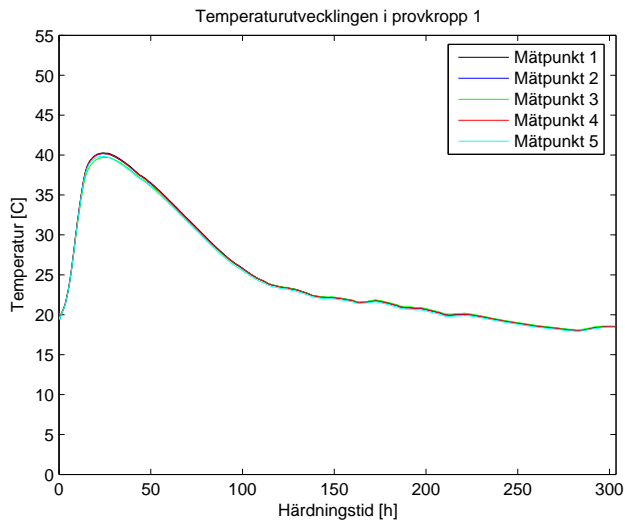
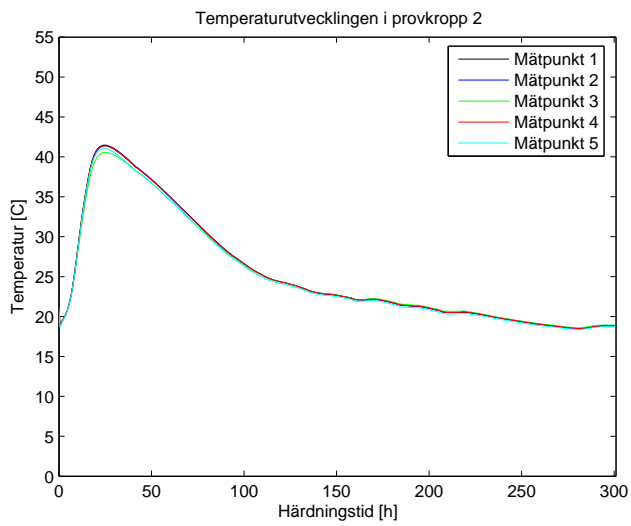
Den maximala temperaturen i provkroppen kommer att uppstå i mitten av cylindern. Därför placeras en temperaturgivare i cylinderns mitt. De övriga fyra är placerade för att täcka in alla möjliga temperaturdifferanser över provkroppen. På så sätt erhålls ett representativt resultat även om oförutsedda klimatförändringar skulle inträffa i omgivningen.

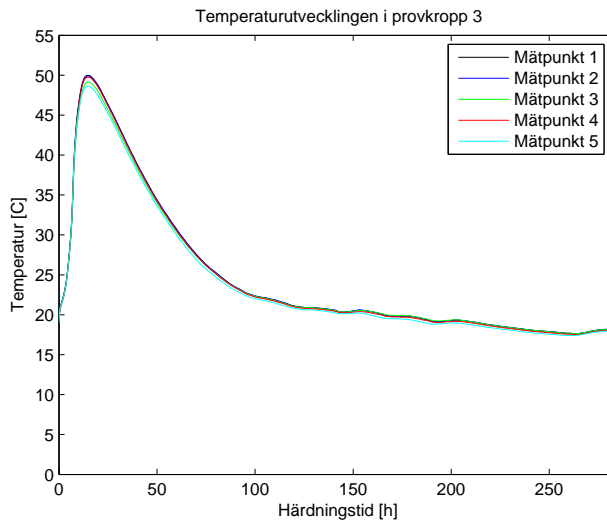
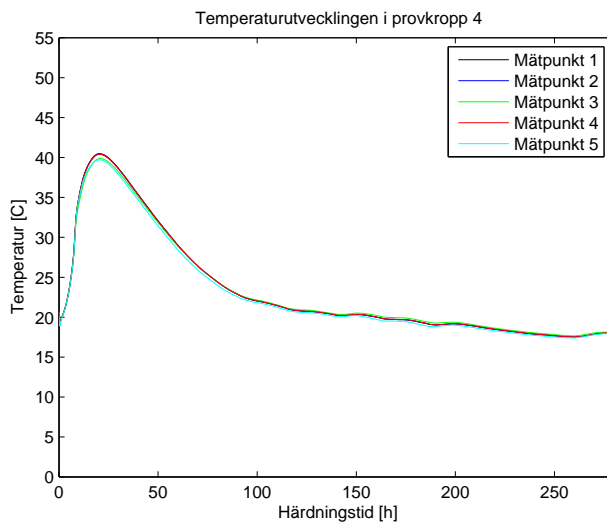
För att en simulering ska kunna genomföras krävs även kännedom om lådans isolerande egenskaper. Denna parameter kan också beräknas med Hacon. För att programmet ska kunna beräkna denna parameter behövs samma typ av indata som beskrivits ovan. Skillnaden är att en betongkropp som har härdat värms upp till cirka 60°C och därefter mäts avsvälningen i materialet. På så sätt erhålls ett mått på lådans isolerande förmåga.

Det är viktigt att betongen inte längre utvecklar några större mängder värme eftersom detta experiment endast ska beräkna lådans värmeisolerande förmåga. Vid experimentet gjuts fyra provkroppar med olika betongsammansättningar. Två av proverna innehåller Anläggningscement och två Standard Portlandcement. De fyra provkropparnas betongsammansättningar finns redovisade i *Appendix*.

5.3 Resultat

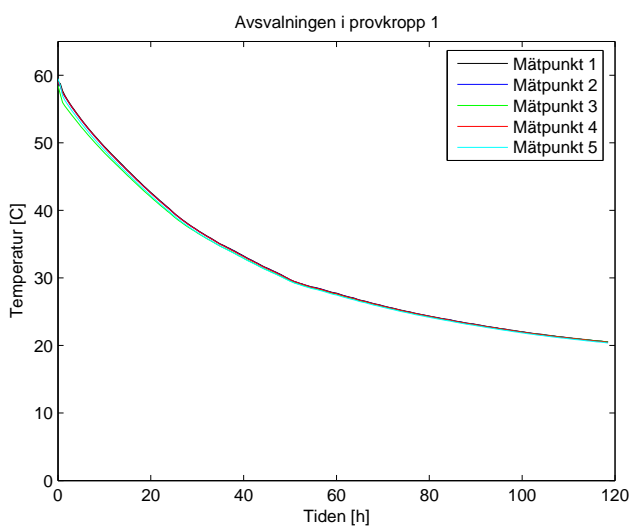
Detta experiment gick ut på att beräkna fyra provkroppars ingående cementparametrar. Vid försöket har två mätningar genomförts. Först uppmättes temperaturutvecklingen i respektive provkropp och därefter avsvälningen. Som tidigare beskrivits har fem stycken temperaturgivare placerats i respektive provkropp för att beakta eventuell avvikelse inuti cylindrarna. I figurerna 5.2-5.5 redovisas resultatet från mätningarna av betongens härdning, men skillnaden i temperatur blir väldigt liten mellan de olika mätpunkterna och därför görs beräkningarna av cementparametrarna endast för en punkt i respektive provkropp. Den punkt som valts är punkt nummer 2 enligt figur 5.1. I cylinderns mitt är temperaturen hela tiden något högre än i de övriga punkterna och i punkterna 3 och 5 är temperaturen något lägre än på övriga ställen. Punkt 2 blir då ett medelvärde och är lämpligt att användas vid beräkningarna (punkt 2 och 4 hade hela tiden ungefär samma temperatur).

Figur 5.2: *Temperaturutvecklingen i provkropp 1*Figur 5.3: *Temperaturutvecklingen i provkropp 2*

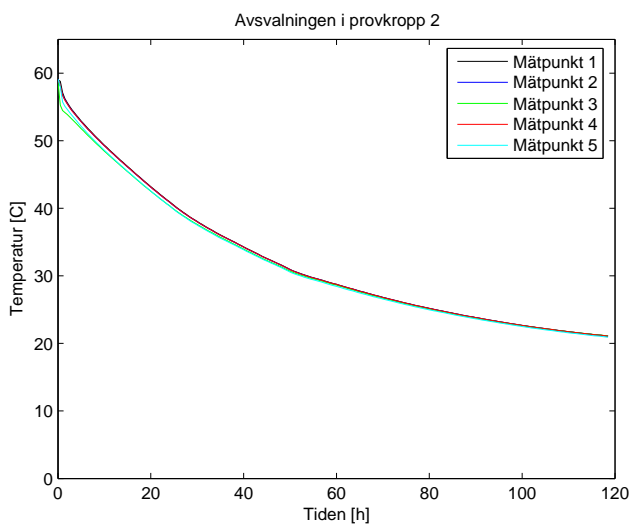
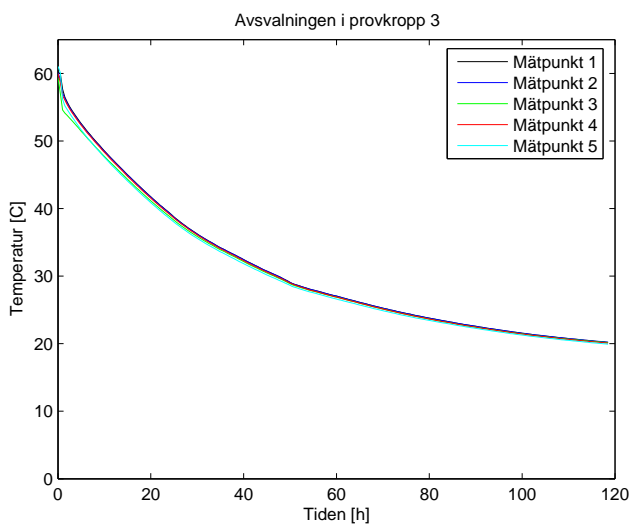
Figur 5.4: *Temperaturutvecklingen i provkropp 3*Figur 5.5: *Temperaturutvecklingen i provkropp 4*

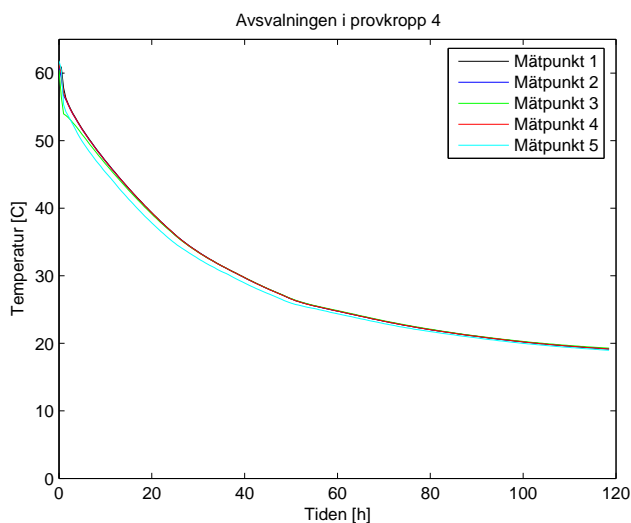
Uppenbarligen är skillnaden i temperatur mellan de olika punkterna väldigt liten. Därför används bara resultatet från mätpunkt 2 vid beräkningarna av respektive provkroppens cementparametrar.

Dessutom har mätningar genomförts för att kunna beräkna den omslutande lådans isolerande förmåga. Hur denna mätning genomförts beskrevs i tidigare avsnitt. I figur 5.6-5.9 och tabell 5.1 redovisas resultatet av mätningarna.



Figur 5.6: *Avsvälningen i provkropp 1*

Figur 5.7: *Avsvalningen i provkropp 2*Figur 5.8: *Avsvalningen i provkropp 3*

Figur 5.9: *Avsvalningen i provkropp 4*

I tabell 5.1 redovisas de beräknade boxparametrarna. Då boxarna är likadana skulle man förvänta sig att värdena var ganska lika, men värdet för box 4 ligger högre än de övriga.

Provkropp	Boxens isoleringsparameter [$\cdot 10^{-6}(s^{-1})$]
1	7.08
2	6.397
3	6.99
4	8.43

Tabell 5.1: *De fyra boxarnas isoleringskonstanter*

Nu finns all nödvändig data för att kunna beräkna de fyra provkropparnas cementparametrar enligt [5].

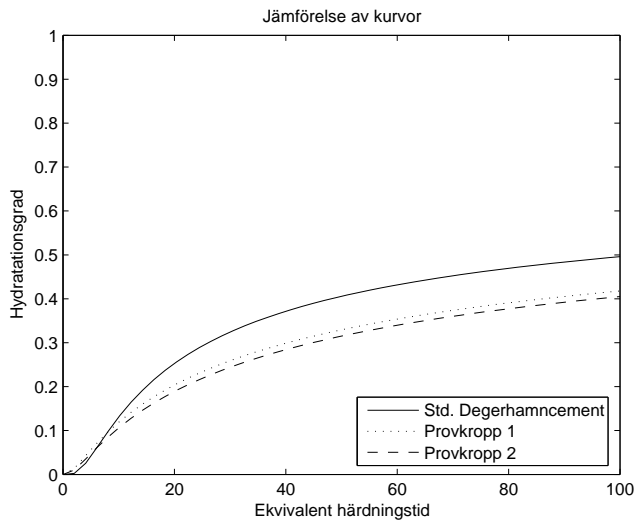
$$\alpha = e^{-\lambda_1(\ln(1+\frac{t}{t_1}))^{\kappa_1}} \quad (5.2)$$

Beräkningarna genomfördes med hjälp av programmet Hacon. Som nämndes ovan genomfördes beräkningarna endast för en punkt i varje provkropp eftersom skillnaden mellan punkterna är så liten. I tabell 5.1 redovisas resultatet av beräkningarna (i punkt 2).

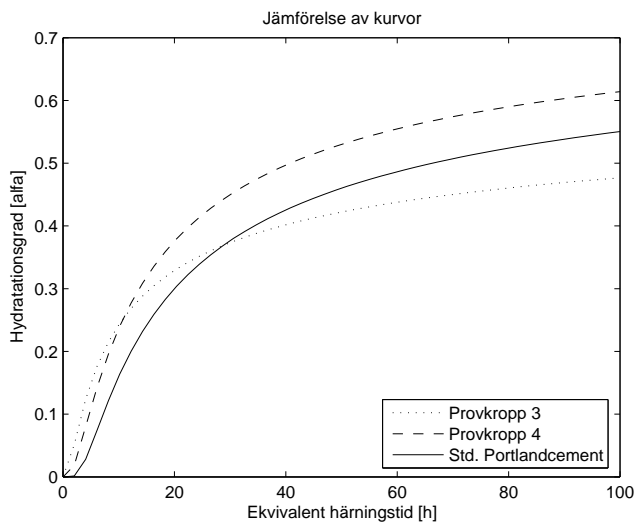
Provkropp	λ_1	t_1	κ_1
1. Anläggningscement	0.74	100	0.45
2. Anläggningscement	0.77	97.5	0.46
3. Std. Portlandcement	1.45	5.5	0.62
4. Std. Portlandcement	0.69	24	0.7

Tabell 5.2: *Resultat av parameterberäkningar gjorda med Hacon*

Värdena verkar rimliga för samtliga provkroppar, men för att se hur de verkligen påverkar hydratationsgradens utveckling har ekvation 5.2 ritats upp i två diagram med parametervärden enligt tabell 5.1. Som jämförelse har även kurvorna med parametervärden enligt Hacon ritats upp. I figur 5.10 är det de två provkropparna med anläggningscement som är uppritade tillsammans med Standard Degerhamns cement (som är en typ av anläggningscement). I figur 5.11 är det uteslutande Standard Portlandcement uppritat.



Figur 5.10: Jämförelse av kurvor med anläggningscement

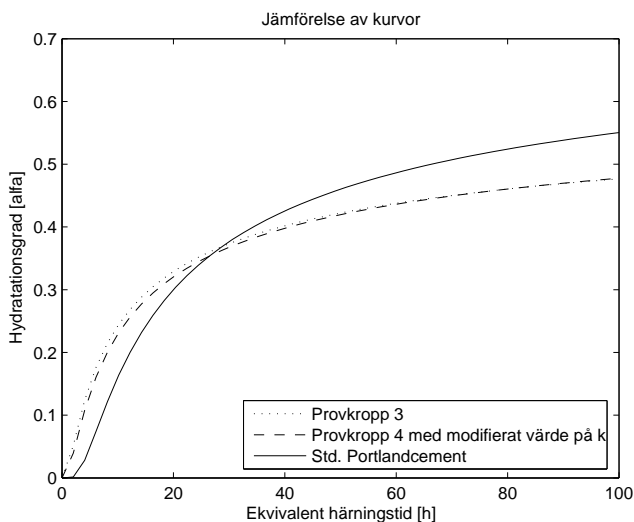


Figur 5.11: Jämförelse av kurvor med Std Portlandcement

I figur 5.11 ligger de båda beräknade kurvorna en bit ifrån varandra. Detta kan förklaras med att den isolerande lådans något högre värde på konstanten k . Om beräkningarna av cementparametrarna för provkropp 4 också genomförs med $k = 7 \cdot 10^{-6}$ blir resultatet istället enligt figur 5.12 och tabell 5.3.

Provkropp	λ_1	t_1	κ_1
3.	1.45	5.5	0.62
4. Med modifierat värde på k	1.51	5.5	0.66

Tabell 5.3: Jämförelse av resultat från parameterberäkningar för provkropp 3 och modifierad provkropp 4



Figur 5.12: Jämförelse av kurvor med modifierat värde på boxens isoleringsförmåga

Nu blev de båda kurvorna väldigt lika. Slutsatsen kan då dras att avvikelserna ligger i den omslutande boxens isoleringsförmåga. Anledningen till att bara det fjärde provets omslutande låda har ett avvikande värde på konstanten k går det bara att spekulera i. Det kan exempelvis vara så att det förekommit lite extra drag från fönstret på just den plats provkropp 4 befunnit sig under avsvalningsförloppet eller att boxen inte var helt tätt försluten i samband med avsvalningsförsöket.

Kapitel 6

Slutsatser

Programmet Hacon är ett användarvänligt finita elementprogram som kan användas för att förutsäga hur en betong kommer att utvecklas under givna förhållanden. Dessutom kan man förutsäga om materialet kommer att spricka. Med manualen till hands är det inga problem att sätta sig in i hur programmet fungerar. Ännu lättare blir det då manualen även innehåller enkla exempel på hur en simulering genomförs. För personer som inte är insatta i finita elementmetoden krävs viss inläsning av hur modellen byggs upp, hur materialen appliceras på denna etc. Men allt finns väl beskrivet i manualen och efter att ett par simuleringar är genomförda blir metodiken i programmet allt klarare.

Detta examensarbete har innehållit flera deluppgifter och resultaten vid varje undersökning har redovisats under respektive kapitel. Kapitel två tar upp hur materialet och dess egenskaper utvecklas utifrån valet av parametrar. Av resultatet från detta kapitel kan man direkt dra slutsatsen att det är kombinationen av parametrarna som tillsammans styr egenskapsutvecklingen. Det är alltså inte någon speciell parameter som är viktigare än dem andra. Dock ger detta kapitel en uppfattning om vilka parametervärden som är direkt orimliga och på vilket sätt olika parametrar inverkar.

I det tredje kapitlet undersöks med hjälp av Hacon hur valet av materialparameter påverkar temperatur- och spänningsutvecklingen. Både parametrar som beskriver någon materialegenskap och mer konkreta parametrar såsom valet av gjutform har undersökts. Utifrån studien av de rena materialparametrarna har snarlika slutsatser kunnat dras som i kapitel två. Mer konkreta faktorer var valet av gjutform, vindhastighetens påverkan, gjuttemperaturen

med mera. Resultatet av dessa faktorer var något som man mer kunde förstå innebörden av. Till exempel så gav en tjockare träform en högre temperatur inuti betongen, vilket var ganska lätt att själv inse var rimligt.

Efter det att alla parameterundersökningar var genomförda återstod att sätta programmet på prov. Först genomfördes en simulering av ett fullskaleförsök genomfört i Ringhals. Resultatet av simuleringen var för nästan alla provkroppar väldigt bra överensstämmelse. Både till den maximala temperaturen i betongen och själva kurvan som beskriver temperaturutvecklingen. Den största skillnaden var att hos två av proverna skiljde temperaturen ett par grader efter mätningens slut. Vad detta beror på är inte klart. I dokumentationen från försöket framgår inte hur dygnstemperaturen varierar, men den är i genomsnitt 12°C . För de andra två provkropparna finns det angivet att medeltemperaturen är konstant 25°C under de första fem dygnen, men inget angående de resterande fem dygn som mätningen pågått. Kanske varierade temperaturen lite över de sista dygnen, detta kan vara en anledning till att temperaturen skiljer sig ifrån den simulerade. Vad skillnaden beror på är inte helt klart.

Till sist har ett praktiskt arbete genomförts i Älvkarleby. Fyra betongprover har gjutits och temperaturutvecklingen mätts upp. Med hjälp av mätningarna har cementens materialparametrar beräknats. För att lättare kunna förstå vad parametrarnas värden innebär har cementens hydratationskurvor ritats upp med respektive parametervärden. Kurvorna är inte exakt likadana men den skillnad som finns är fullt förståelig med tanke på att det även mellan olika cementtillverkare kan finnas små skillnader i materialet. Ett exempel på detta är att cement tillverkat i Slite och Skövde inte har exakt likadana materialutvecklingar.

Utifrån det goda resultatet från kapitel 4 och 5 kan slutsatsen dras att med god kännedom om material och randvillkor är programmet Hacons beräkningar tillförlitliga.

Litteraturförteckning

- [1] Hassanzadeh M., (1998) *Säkerhet vid Betongarbete - Utveckling av bär-förmåga hos armerade betongkonstruktioner i tidig ålder*, SP Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut, Borås, Sverige.
- [2] Dahlblom O. and Lindemann J., (2000) *Hacon. A program for simulation of temperature and stress in hardening concrete*, Lund University, Division of Structural Mechanics, Lund, Sweden.
- [3] Fagerlund G., Jansson S., (1983) *Anläggningscement i fullskaleförsök vid Ringhals*, Cementa och Vattenfall, Sverige.
- [4] Jonasson J-E., (1985) *Slipform Construction - Calculations for assessing Protection Against Early Freezing*, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, Sweden.
- [5] Byfors J., (1980) *Plain concrete at early ages*, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, Sweden.
- [6] (1994) *Betonghandbok - Material*, Svensk Byggtjänst, Stockholm, Sverige.
- [7] Fagerlund G., (1985) *Våra cements hållfasthetstillväxt vid olika temperaturer*, CM RAPPORT T (85015), CEMENTA, Sverige.

Appendix A

Betongrecept vid experiment

Prov 1

vct=0.4

Anläggningscement 450 [kg/m^3]

Vatten (total mängd) 180 [kg/m^3]

Grus 0-8 [mm] 868 [kg/m^3]

Sten 8-16 [mm] 868 [kg/m^3]

Prov 2

vct=0.5

Anläggningscement 450 [kg/m^3]

Vatten (total mängd) 225 [kg/m^3]

Grus 0-8 [mm] 808 [kg/m^3]

Sten 8-16 [mm] 808 [kg/m^3]

Prov 3

vct=0.5

Std. Portlandcement 380 [kg/m^3]

Vatten (total mängd) 190 [kg/m^3]

Grus 0-8 [mm] 897.5 [kg/m^3]

Sten 8-16 [mm] 897.5 [kg/m^3]

Prov 4vct=0.7Std. Portlandcement 279 [kg/m^3]Vatten (total mängd) 195 [kg/m^3]Grus 0-8 [mm] 935 [kg/m^3]Sten 8-16 [mm] 945 [kg/m^3]

Appendix B

Hur en simulering genomförs i Hacon

Syftet med denna bilaga är att gå igenom och väldigt enkelt beskriva steg för steg hur en simulering genomförs. De olika delarna i processen redovisas nedan i olika avsnitt.

Hur den fysiska modellen ritas upp

Det första som måste göras då modellen ska ritas upp i Hacon är att placera ut ett antal noder. Till dessa noder knyts därefter linjer som beskriver modellens yttre begränsningar men också variationer mitt i modellen. Dessa variationer kan vara att man har olika material, olika randvillkor eller andra olikheter inom modellen som påverkar beräkningarna. Sist läggs ett så kallat elementnät ut på modellen. Hur varje steg utförs ska nu redogöras för lite närmare.

Noderna kan placeras ut med två olika metoder. Antingen trycker man med muspekaren på knappen längst till vänster i fönstret där det finns en symbol av en punkt (nod). Hålls muspekaren över knappen kommer texten "Create point" fram. Om denna knapp trycks in är det bara att trycka i geometrifönstret där en nod önskas. Den andra metoden bygger istället på att alla noders koordinater anges i en tabell. Detta görs genom att gå in i det översta verktygsfältet "Topology" och välja "Nodes". I den ruta man får upp (som heter "Nodes") anges varje nods x- och y-koordinater.

När alla noder är utplacerade ska linjer ritas upp som avgränsar modellen. Precis som för noderna kan linjerna ritas manuellt direkt i geometrifönstret

genom att först trycka på den nod linjen ska börja i och därefter på den nod linjen ska sluta i. Alternativet är att liksom innan först välja "Topology" i verktygsfältet och därefter "Curves". I det fönster som kommer upp väljs helt enkelt mellan vilka noder respektive linje ska gå.

Sist ska elementnäten knytas till begränsningslinjerna. Precis som innan finns det två möjligheter att göra detta. Antingen trycker man manuellt på de fyra linjer som ska begränsa en yta eller också anges linjernas nummer i rutan som öppnas i verktygsfältet "Topology". Då elementnäten specificeras är det väldigt viktigt att tänka på två saker:

- Fyra linjer måste väljas till varje ruta
- Linjerna måste väljas i ordning och mot-sols

Vilken metod som används då modellen ska ritas upp är en smak-sak. Men i vilket fall som helst är det en god idé att först rita upp på ett papper hur modellen ska se ut (med noder o linjer inritade).

När elementnätet är definierat måste man välja "Surface properties" längst till vänster i fönstret. Där väljs vilken tjocklek de uppritade elementen (alltså modellen) ska ha samt vilken typ av element som ska användas vid beräkningarna. För ett "vanligt" element ska "Eight node element" väljas men för element som beskriver halv-oändliga ytor ska antingen "five node infinite element" eller "three node infinite element" väljas. Dessa två elementtyper används exempelvis vid definiering av underliggande mark. Gjuts exempelvis en betongvägg direkt på marken ska marken ritas upp först som vanliga ytor och därefter definieras elementtypen som "five node infinite element" direkt under väggen och "three node infinite element" vid sidan om väggen. De två elementtyperna kan tolkas som att "five node infinite element" är oändlig i en riktning medan "three node infinite element" är oändlig i två riktningar.

Definiering av modellens material

I menyn under verktygsfältet finns tre knappar som var och en väljer vilket fönster som visas i Hacon. När ett nytt dokument skapas startar automatiskt Geometry-fönstret. Vid sidan om denna knapp finns två andra, nämligen "Materials" och "Boundary conditions". Om modellens material ska definieras

måste man först trycka på knappen "Materials". Då öppnas modellen i ett nytt fönster. Skillnaden är att modellen nu är helt grå utan något elementnät. Uppe i högra hörnet av detta fönster finns en knapp som heter "Edit materials". Trycker man på denna kommer ett litet fönster upp med en tom lista dit material antingen kan hämtas in ifrån programmets databas eller skapas utifrån ett eget material. Enklast är att använda ett material från databasen. Då trycker man bara på den tredje översta knappen som heter "New from database". Ännu ett nytt fönster öppnas med en liten lista på tillgängliga material. Om ett material markeras och man trycker på "Add material" läggs detta material till i den lilla rutan "Materials". Markeras detta material åter är det bara att trycka på modellen med muspekaren där detta material önskas.

Definiering av modellens randvillkor

Liksom då modellens material definierades måste man först välja att randvillkor ska föreskrivas. Detta görs under verktygsfältet med knappen "Boundary conditions". I det nya fönstret finns också en knapp längst uppe till höger. Trycker man på denna öppnas ett nytt litet fönster som i standardfallet heter "Conditions - Temperature", temperaturrandvillkor kan då föreskrivas. Först måste man trycka på "Add condition" och namnge sitt randvillkor. Därefter kan temperaturens variation med tiden anges. Dessutom finns det en knapp där typen av gjutform kan väljas.

Men längst till vänster i programmet har verktygsfältet också förändrats. Där finns nu knappar som var och en beskriver en typ av randvillkor som kan föreskrivas. Exempelvis så kan "Displacement" väljas, vilket innebär att modellens upplagsförhållanden kan föreskrivas. När randvillkoren är definierade markeras de och därefter trycker man med muspekaren på den rand där respektive randvillkor är aktuell.

Genomförande av beräkningar

Det enda som återstår att göra innan beräkningarna och simuleringen genomföres är att ange hur stora tidssteg som programmet ska räkna med och hur många timmar simuleringen sker. Dessutom kan man välja om någon annan

typ av analys än plan töjning är aktuell.

När detta också är klart är det bara att trycka på "Calculation" i verktygsfältet och därefter välja "Execute". Simuleringen påbörjas då.

Analys av resultat

När beräkningarna är genomförda trycker man på "Result" i verktygsfältet och därefter på "Show results". Då visas modellen i olika färger. Nu kan man välja att visa resultatet med en färg-skala där tiden manuellt kan förändras eller som en kurva med tiden på x-axeln. Det första resultatet som visas är hur temperaturutvecklingen skett i materialet. Under verktygsfältet finns en knapp som heter "Result type". Trycker man på denna knapp finns det 11 olika beräkningsresultat som kan visas. Exempel på resultat är spännings- och hållfasthetsutvecklingen i materialet.

Appendix C

Exempel på simulering i Hacon

Introduktion

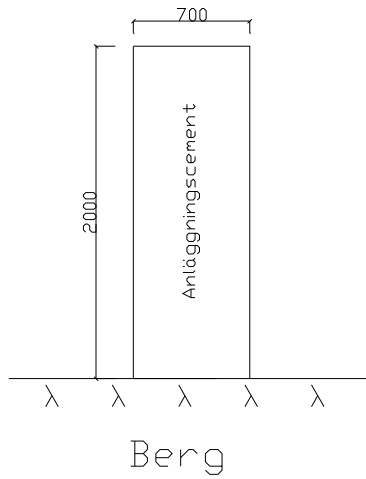
Denna bilaga ska introducera läsaren till programmet Hacon med hjälp av ett enkelt exempel. I exemplet går igenom steg för steg alltifrån hur den fysiska modellen ritas upp till hur man väljer vilket resultat som ska visas av sina beräkningar. Varje steg i processen redovisas i enskilda avsnitt.

En något enklare variant av modellen som användes tidigare i kapitel 5 vid fullskaleförsöket ska användas vid simuleringen. Denna konstruktion har förutsättningarna enligt nedan.

Hur man skapar modellen i Hacon

Detta är den figur som ska ritas upp i Hacon. Först ska modellens geometri ritas upp. Det första som görs är att definiera alla noder. I detta exempel definieras noderna genom att ange respektive nods x- och y-koordinat. I figur 6.2 visas var någonstans man trycker för att få fram listan med nodernas koordinater.

I verktygsfältet Topology kan man ange noders, linjers och ytors egenskaper och placering. I figur 6.2 är alla noder och linjer redan angivna. Men för att ta det steg för steg så börjar man med att ange alla noders koordinater. Om

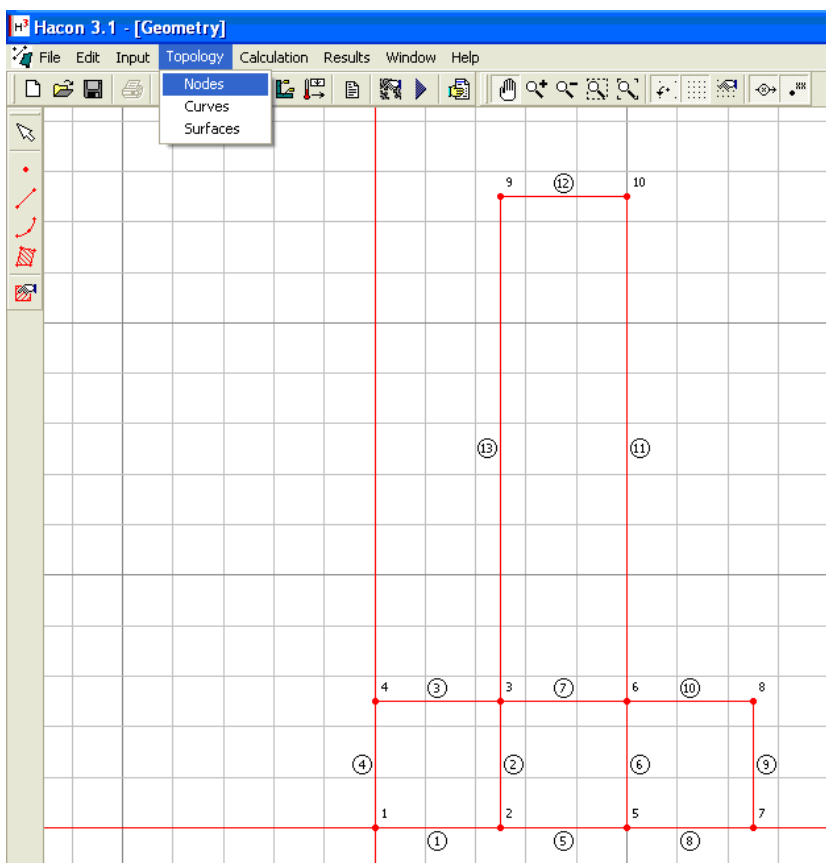


Figur 6.1: Modellens förutsättningar

modellens respektive noder tilldelas koordinaterna enligt tabell 6.1 nedan blir resultatet som följer i figur 6.3. Observera att för att kunna ange en nods koordinater måste man först trycka på "Add" för att skapa noden.

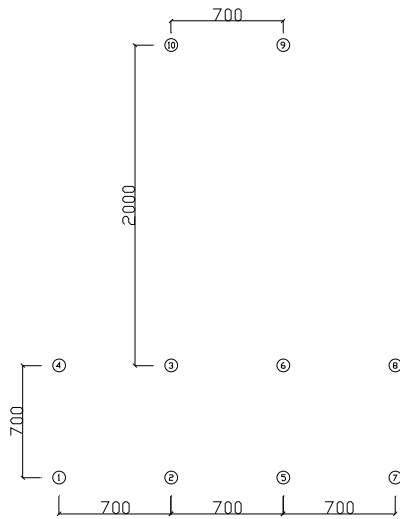
Nod	x-koordinat [m]	y-koordinat [m]
1	0	0
2	0.7	0
3	0.7	0.7
4	0	0.7
5	1.4	0
6	1.4	0.7
7	2.1	0
8	2.1	0.7
9	1.4	2.7
10	0.7	2.7

Tabell 6.1: Nodernas koordinater



Figur 6.2: Modellens förutsättningar

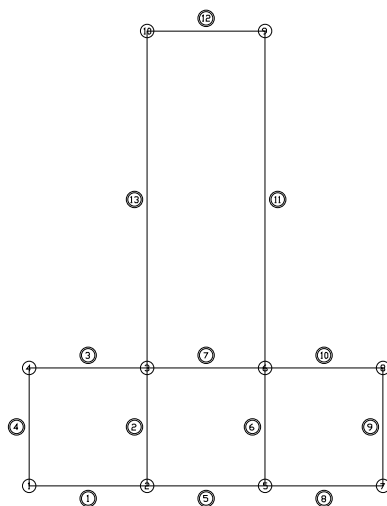
När alla noder är definierade är nästa steg att knyta samman modellen med linjer. Detta görs på liknande vis. I verktygsfältet "Topology" väljes "Curves". Därefter anges linjerna enligt tabell 6.2. Resultatet blir enligt figur 6.3.



Figur 6.3: Nodernas placering

Kurva	Nod 1	Nod 2
1	1	2
2	2	3
3	3	4
4	4	1
5	2	5
6	5	6
7	6	3
8	5	7
9	7	8
10	8	6
11	6	9
12	9	10
13	10	3

Tabell 6.2: Noder som knyter samman linjerna



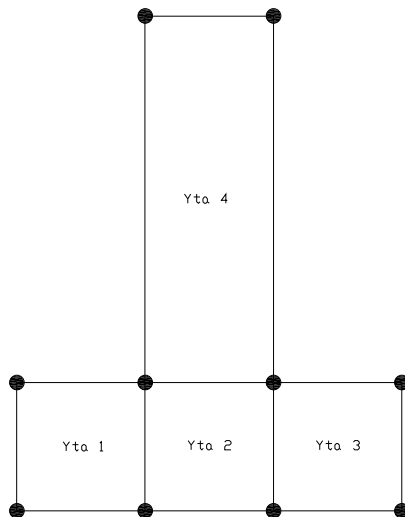
Figur 6.4: Linjernas numrering

Det som sedan återstår innan själva modellen är klar är att lägga på elementnät på de av linjerna begränsade områdena. Definieringen av ytorna görs också i verktygsfältet "Topology". Det finns två saker som är viktiga att tänka på när denna definiering görs. Först och främst måste fyra linjer väljas som begränsar varje del-yta. För det andra måste linjerna väljas i en ordning som är mot-sols (linjerna måste givetvis också väljas i ordning efter vilka som ligger intill varandra). Med angivning enligt tabell 6.3 blir resultatet enligt figur 6.5.

Yta	Kurva 1	Kurva 2	Kurva 3	Kurva 4
1	2	3	4	1
2	7	2	5	6
3	10	6	8	9
4	7	11	12	13

Tabell 6.3: *Linjerna som begränsar varje yta*

När ytorna är skapade måste dessa ges några ytterligare egenskaper. Om



Figur 6.5: De fyra ytorna som bildas

man trycker på knappen ”Surface properties”, som finns underst i verktygsfältet till vänster får man upp en ruta där elementens tjocklek och typen av element ska definieras. Standardinställningen är att elementtjockleken är en meter. Detta behöver inte ändras eftersom tjockleken vanligtvis inte inverkar på simuleringens resultat. Elementtypen däremot måste väljas enligt resonemanget i föregående avsnitt. Enligt resonemanget väljes elementtyperna enligt tabell 6.4 nedan. Ytterligare en sak som ska göras för element av typen ”Eight node element” är att ange hur fint elementnätet ska vara. Ju finare nät desto bättre resultat, men samtidigt tar beräkningarna längre tid att genomföra. Ett förslag är och definiera att ytor där denna typ av element finns ska ha åtta rader och kolonner. Detta val görs också i ”Surface properties”.

Yta	Typ av element
1	Three node infinite element
2	Five node infinite element
3	Three node infinite element
4	Eight node element

Tabell 6.4: *Ytornas elementtyper*

Hur modellens material definieras

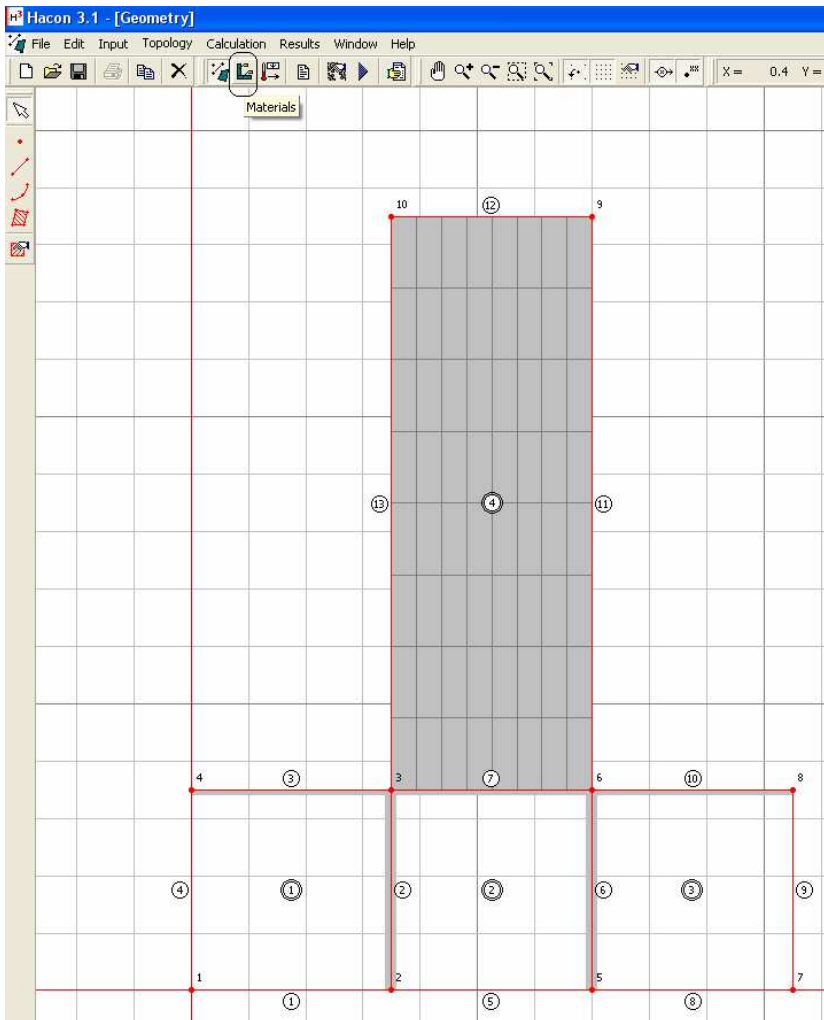
När modellen är definierad är det stora arbetet gjort. I detta exemplet ska färdiga material användas, annars kan man själv skapa material efter tycke. Men det första som måste göras innan man kan börja laborera med olika material är att trycka på knappen som säger att vi ska gå över ifrån att bestämma geometrin till att definiera materialen. Denna knapp finns under det vanliga verktygsfältet. I figur 6.5 illustreras var denna knapp finns.

När man tryckt på denna knapp öppnas ett nytt fönster där modellen finns med men ser lite annorlunda ut, den är helt grå. Längst upp till höger i fönstret finns en liten knapp, trycker man på denna öppnas ett nytt litet fönster som heter "Materials". Till höger i detta fönster finns sex stycken knappar. Den tredje översta knappen trycker man på om man vill hämta ett material från programmets databas. Den översta knappen trycker man på om man vill skapa ett nytt material av standardtyp. I detta exempel ska båda metoderna användas, cementet ska skapas manuellt medan grunden som väggen står på ska hämtas in från databasen.

Först ska grunden skapas. Trycker man på tredje översta knappen öppnas ett nytt fönster med namnet "Material database". I denna ruta markeras "Rock" och därefter trycker man på knappen "Add material", längst ner. Materialet "Rock" läggs då till i det annars tomma fönstret "Materials". Figur 6.7 förtydligar detta.

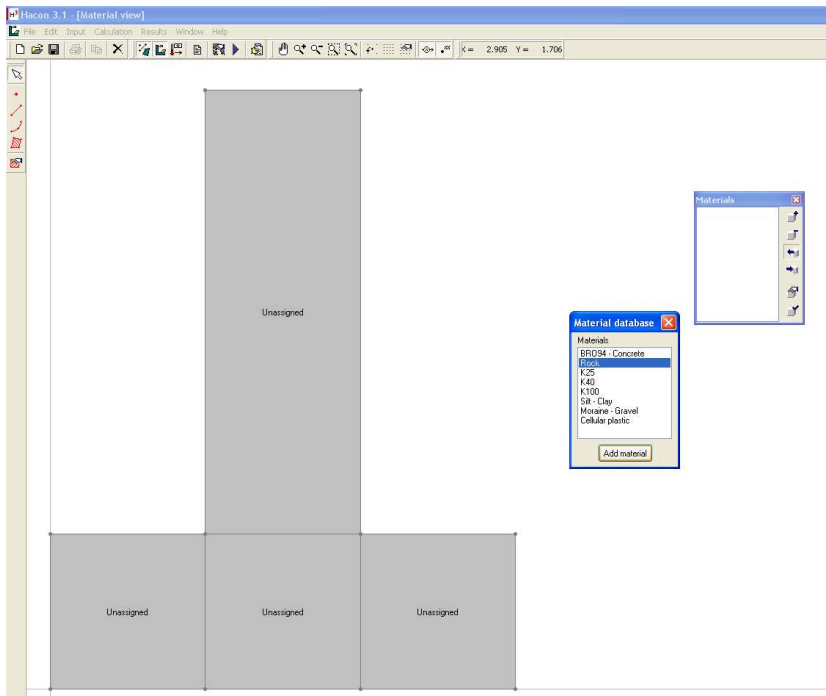
Detta material ska användas på elementen 1-3. Denna applicering görs genom att först markera "Rock" i "Materials"-listan och därefter trycka på element 1-3 i modellen.

Därefter ska ett material skapas. Detta görs genom att trycka på den översta



Figur 6.6: Knapp som byter till material

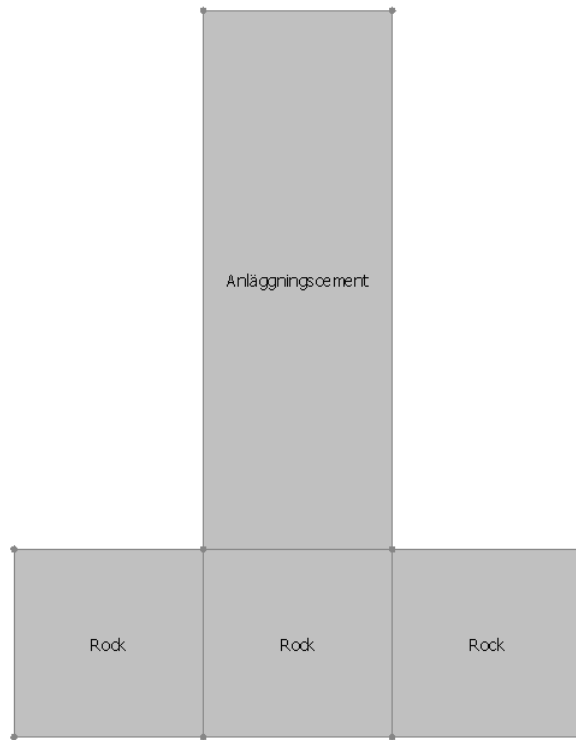
knappen i rutan "Materials". En ny ruta kommer då upp och man ska där namnge sitt material. I detta fallet kan det vara lämpligt att exempelvis välja namnet Anläggningcement. Efter att man skrivit in sitt namn och tryckt på "OK" kommer ytterligare en ny ruta upp. Där kan man specificera önskat cementinnehåll, vattencementtal och typ av cement. I detta exempel görs inga förändringar förutom valet av cement som ska vara Degerhamn Std. P (vilket är det enda anläggningcementet i listan). Efter att man tryckt på "OK" läggs materialet till i listan över material som hämtats in i program-



Figur 6.7: Förtydligande av hur ett material hämtas in i programmet

met. Anläggningscementet appliceras på modellen enligt samma princip som för grunden.

Om allt är rätt ska modellen nu se ut enligt figur 6.8.



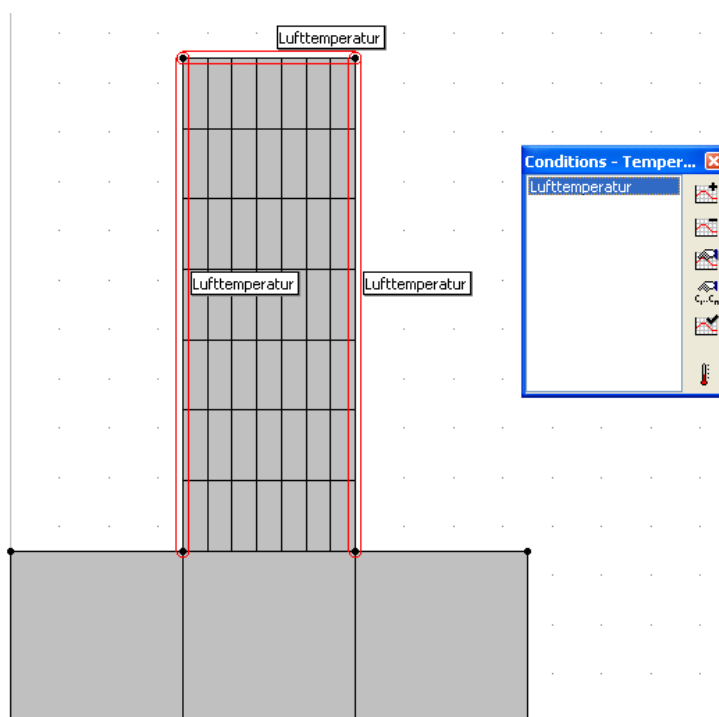
Figur 6.8: Modell med material definierade

Hur modellens randvillkor definieras

För att börja definiera randvillkoren måste verktygsfälten ändras till de för randvillkor. Detta görs precis som då geometrifönstret ändrades till materialfönster genom att trycka på knappen under det översta verktygsfältet.

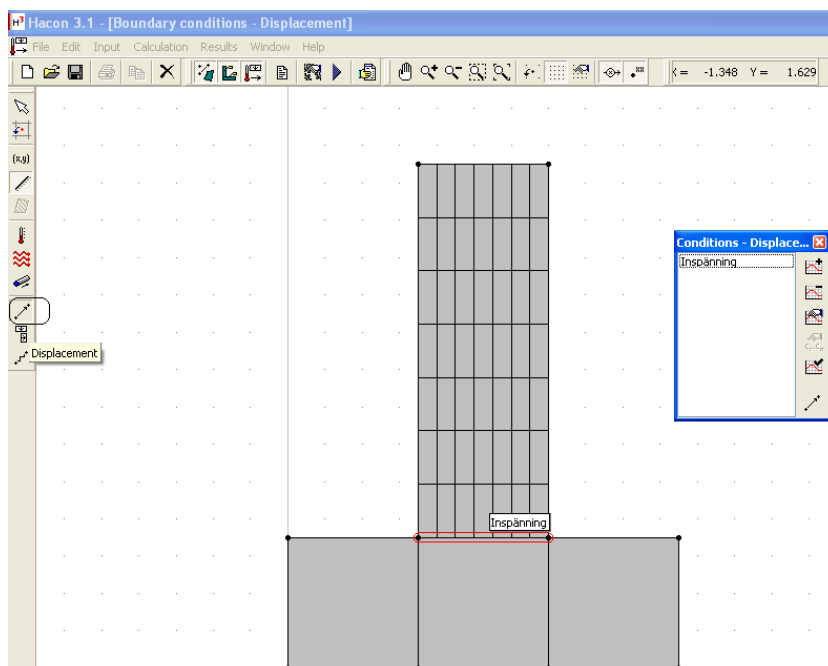
I det nya fönstret som öppnats finns en knapp uppe i högra hörnet. Trycker man på denna öppnas ett litet fönster som heter "Conditions - Temperature". Här kan man lägga till temperaturrendvillkor. Mer om hur detta görs beskrivs i föregående kapitel i detta appendix. För enkelhetens skull antas att medeltemperaturen över dygnet är 19°C under hela simuleringsintervallet. För att definiera detta villkor skapas först ett randvillkor med knappen

”Add condition”. Villkoret namnges och därefter trycker man på knappen ”View history”. I det nya fönstret trycker man längst ner på knappen ”Edit”. Därefter anges först på översta raden att vid tiden noll är temperaturen konstant 19°C . På andra raden skriver man in att vid tiden 100 timmar är temperaturen fortfarande konstant 19°C . Därefter kan detta fönster stängas. Istället trycker man på andra knappen underifrån räknat - ”View constants”. Här väljer man vilken typ av gjutform som används och vilken tjocklek denna har. I detta exempel används en 20 mm tjock träform. Nu är temperaturrandvillkoret definierat och klart att appliceras på modellen. Randvillkoret markeras i listan och därefter trycker man på de linjer som detta villkor är aktuellt. I exemplet ska modellen se ut enligt figur 6.9.



Figur 6.9: Modell med randvillkor

Efter att temperaturrandvillkoret är specificerat ska ett upplagsvillkor anges. Detta görs genom att i verktygsfältet till vänster trycka på tredje knappen underifrån räknat (denna knapp heter ”Displacements”). Figur 6.10 visar var denna knapp finns.



Figur 6.10: Knappen som ändrar randvillkoret till att kunna ange upplagsvillkoren

För att ange upplagsvillkoren gör man på samma sätt som då temperaturvillkoren definierades.

Genomförande av beräkningen

Innan beräkningen kan göras måste först fyra saker definieras:

- Typen av analys (plan töjning används i detta fallet)
- Tjockleken som används (1 meter används här)
- Längden på simuleringsintervallet (100 timmar)
- Tidsstegen mellan varje beräkningspunkt (2 timmar i detta fallet)

Dessa inställningar görs uppe i verktygsfältet "Calculation". I menyn väljer man "Settings". I rutan som öppnas anges de fyra sakerna som beskrivits ovan.

Nu är alla inställningar och definitioner gjorda för att kunna genomföra en simulering. I samma meny på verktygsfältet som beräkningsinställningarna gjordes finns ett val som heter "Execute". Trycker man på denna knapp startar programmets beräkningar.

Hur man visar resultatet av simuleringen

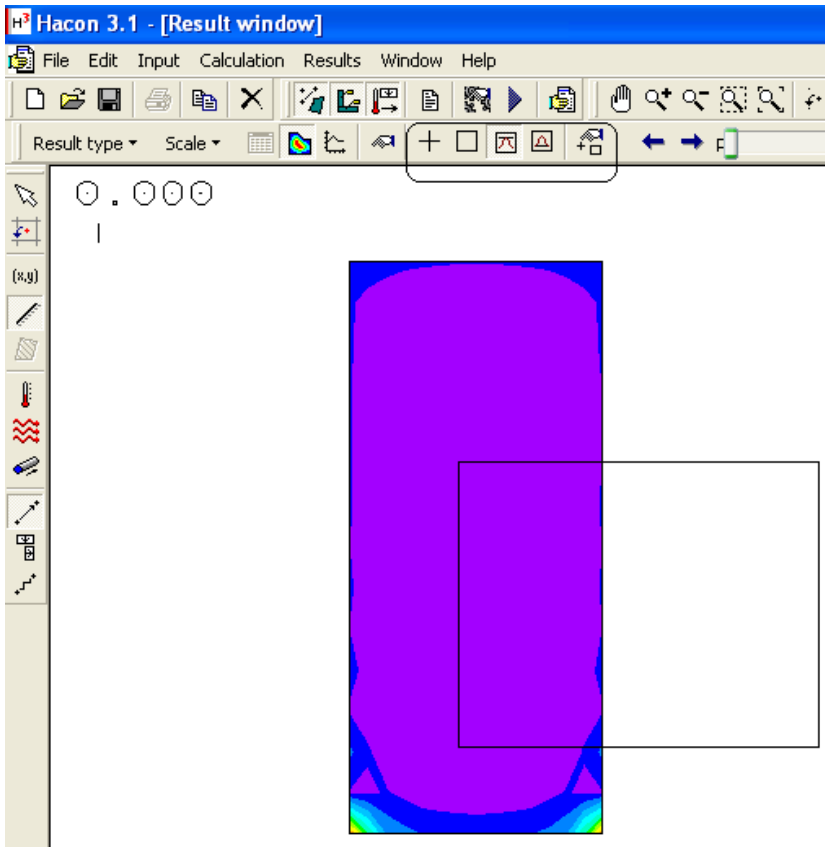
När beräkningen är genomförd trycker man på "Results" uppe i verktygsfältet och därefter på "Show results". Det som då visas är endast väggen och denna framställs i många olika färger. Till höger i fönstret finns en färgskala som berättar vad respektive färg motsvarar för värde på temperaturen, spänningen eller graden av mognad. Därefter kan man välja mellan fyra olika typer av resultatframställning:

- Maximal temperatur
- Minimal temperatur
- Medeltemperaturen
- Temperaturen i en enda punkt

De tre första alternativen innebär att man kan själv välja inom vilket område man vill visa maximala, minimala eller medeltemperaturen. När man väljer att visa resultatet öppnas ett nytt fönster där resultatet visas i en figur. I samma fönster finns nu ett nytt verktygsfält. I detta verktygsfält finns fyra knappar med vilka man väljer vilket resultat som visas. Dessutom finns en knapp som man kan justera området inom vilket resultatet ska plockas ut. I figur 6.11 illustreras var dessa knappar finns någonstans och hur de ser ut.

I detta exemplet ska rutan täcka in hela väggen och visa maximala värdet. För att justera rutan måste man först trycka på "Cursor properties". Rutans placering justeras med pilarna och storleken med x- och y-koordinaterna. Det viktiga är att rutan täcker in hela väggen.

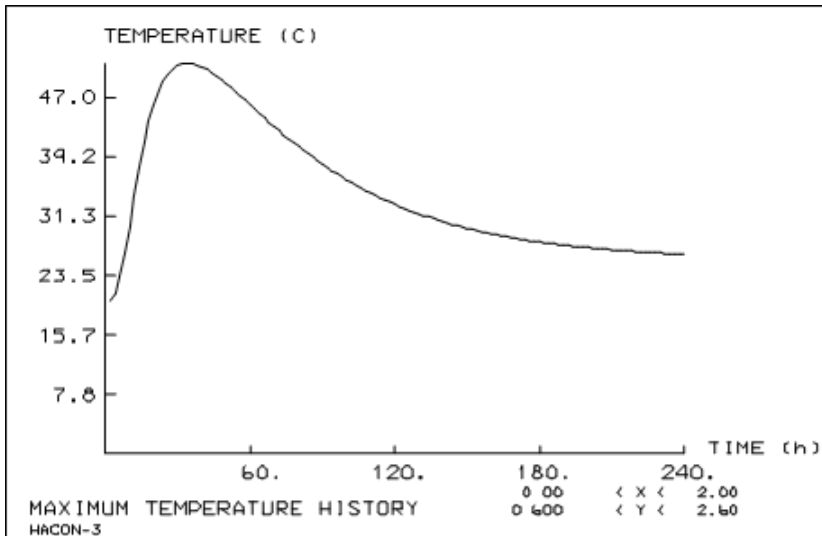
För att visa hur temperaturen i betongen varierar med tiden under de 100 timmarna simuleringen är utförd trycker man på "History", som också finns i resultatfönstrets verktygsfält. Då ändras figuren som visar resultatet till en kurva enligt figur 6.12.



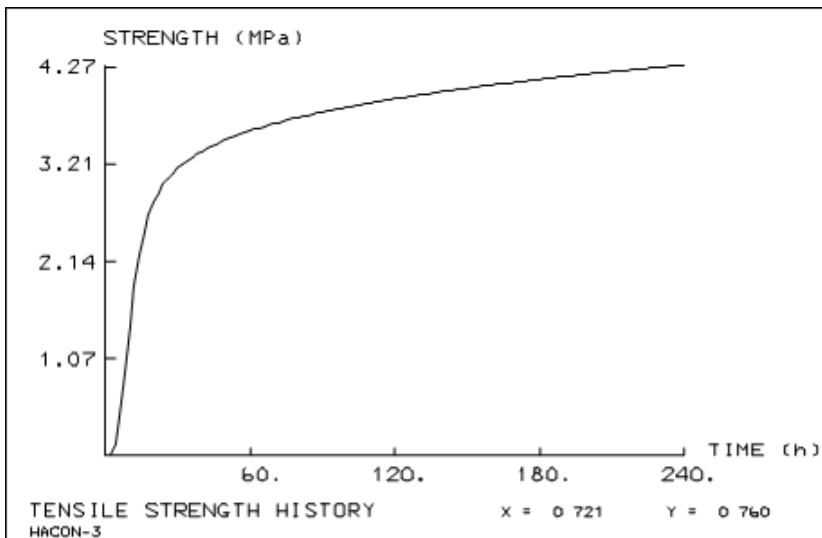
Figur 6.11: Knapparna som väljer vilket resultat som visas är inringade

I verktygsfältet kan man också välja att visa resultatet av temperaturutvecklingen i en tabell. Denna knapp finns i samma verktygsfält som övriga knappar och ser ut som en tabell.

Knappen längst till vänster i resultatfönstrets verktygsfält heter "Result type". Om man trycker på denna kan man välja mellan elva olika resultatframställningar. Väljs resultat av tryckhållfastheten ser utvecklingen ut enligt figur 6.13.



Figur 6.12: Temperaturutvecklingen i betongen



Figur 6.13: Tryckhållfasthetsutvecklingen i betongen