



**KTH Architecture and
the Built Environment**

APPENDIX A.1

Temperatursprickor i betong

Metodutveckling för sprickbegränsning och uppföljning
av uppsprickning i en tunnelkonstruktion

VILMER ANDERSSON-VASS

Examensarbete
Stockholm, Sverige 2015

September 2015

TRITA-BKN. Examensarbete 470,
Betongbyggnad 2015

ISSN 1103-4297

ISRN KTH/BKN/EX--470--SE

© Vilmer Andersson-Vass 2015
Kungliga Tekniska Högskolan (KTH)
Institutionen för byggvetenskap
Avdelningen för betongbyggnad

KTH ABE-skolan
SE-100 44 Stockholm
Sverige

Sammanfattning

För att reducera risken för temperatursprickor vid motgjutningar kan motgjutna betongkonstruktioner värmas upp för att minska de temperaturdifferenser som orsakar temperatursprickorna. Inom anläggningsbyggandet är ingjutna värmekablar den vanliga metoden för att åstadkomma detta. Två nackdelar med värmekablarna är dels att de måste förberedas för och gjas in vid en tidigare gjutning, dels att de kan gå sönder vid gjutningen och därmed bli obrukbara. Som ett alternativ och komplement till värmekablarna utformades och producerades under 2014 en ny typ av värmematta avsedd för uppvärmning av betongkonstruktioner. Denna nya värmematta är uppbyggd på samma sätt som så kallade tjältiningsmattor men har en lägre elektrisk effekt. Tack vare den lägre effekten ska den utan att överhettas kunna användas kontinuerligt i ett antal dagar och på så vis öka medeltemperaturen i betongen.

I detta arbete undersöks vilken uppvärmande funktion värmemattan har på den underliggande betong som ska värmas upp. Detta undersöktes i fyra fältförsök genom temperaturmätningar på olika höjder i de betongkonstruktioner som värmdes upp. Försöken gjordes på bottenplattor och valv och värmemattorna täcktes vid försöken med 10 mm betongtäckmatta av cellplast. Försöken genomfördes i både soligt och torrt samt molnigt och regnigt väder. Mätdata från dessa försök användes sedan för att ta fram ett förslag för hur värmemattans uppvärmande funktion kan modelleras i programmet Contest. Detta förslag presenteras i avsnitt 5.1.2 och är det huvudsakliga resultatet av detta arbete. Det kan användas för att inkludera värmemattans funktion vid bedömningar av sprickrisk i Contest.

I denna uppsats beskrivs också två verkliga gjutningar av en tunnelkonstruktion där värmemattan använts som sprickbegränsande åtgärd. Slutligen gjordes en ekonomisk betraktelse av värmemattan som sprickriskbegränsande åtgärd där den jämfördes med alternativet att använda värmekablar.

Slutsatsen av denna uppsats är att värmemattans uppvärmande funktion på ett enkelt och ändamålsenligt sätt kan modelleras i programmet Contest genom den metod som föreslås. I förslaget tas hänsyn till att nederbörd och solstrålning påverkar uppvärmningen. Därför kan den verkliga uppvärmningen bli högre än vad som erhålls med förslaget, som ger en uppvärmning på den säkra sidan. Denna konservativa, medvetet något lågt bedömda uppvärmning motsvarar den som fås av konventionella värmekablar monterade på överkantsarmering med 40 cm c/c-avstånd. Ur ekonomisk synvinkel innebär ett inköp av värmemattor en relativt stor initial investeringskostnad jämfört med värmekablar. Värmemattan som metod är därför dyrare initialt, men blir så småningom lönsam eftersom

värmemattan kan återanvändas ett stort antal gånger. Utifrån de ekonomiska antaganden som gjordes i denna uppsats var värmemattorna billigare än värmekablarna efter ungefär 30 gångers användning.

Nyckelord: temperatursprickor, värmematta, Contest, sprickrisk, temperaturmätning, numeriska simuleringar.

Abstract

In order to reduce the risk of thermal cracks in a concrete structure it is recommended to reduce the temperature differences between already existing concrete parts and the newly cast parts. Therefore, adjacent and already cast parts of the structure are sometimes heated up prior to casting of a new concrete part. This reduces the temperature differences within the structure and thus the risk of thermal cracks. This heating is generally done via heating cables placed in the concrete. This method has two drawbacks: firstly, one has to plan for the heating cables in an early stage and secondly, the cables sometimes break when cast in. As an alternative and compliment to the heating cables, a new type of heating mat for heating of concrete structures was designed and produced during 2014. It is built the same way as frost thawing mats but has a lower electrical effect to avoid overheating when heating the concrete.

The main subject that is investigated in this thesis is the effect the heating mat has on the underlying concrete. This was investigated in four field trials by measuring the temperature in concrete members while heating them up with the heating mats. The field trials were effected on concrete slabs and vaults and the heating mats were covered with a concrete curing mat made of 10 mm cellular plastic. The field trials were conducted in sunny and dry conditions as well as in cloudy and rainy conditions. Data from the field trials were used to produce a proposal on how to model the heating mat's warming effect in Contest. This proposal is presented in Section 5.1.2 and is the main result of this thesis. It can be used to include the heating mat's effect in simulations to estimate thermal crack risks in Contest.

In addition, two real castings of a tunnel structure are described in which heating mats were used to reduce the risk for thermal cracks. These two castings are studied regarding the risk for thermal cracking. Finally, an economical comparison is made where using heating mats is compared to using heating cables.

The conclusion of this thesis is that the warming effect of the heating mat can be modeled in Contest in a simple and appropriate manner according to the proposed method. The proposed method considers that precipitation and sunshine influence the heating of the concrete. The actual temperature rise in the heated concrete might therefore be greater than what is obtained using the method in Contest, which gives a rise in temperature on the safe side. This conservative, slightly low estimation of the rise in temperature corresponds to using heating cables mounted on the upper reinforcement with a c / c distance of 40 cm. From an economic point of view, the purchase of heating mats means a relatively important initial investment cost compared to heating cables. Using heating mats instead of heating cables is therefore initially more expensive, but will eventually be profitable since the heating mats are not

consumed. Based on the economic assumptions made in this thesis the heating mat was less expensive than heating cables if used more than about 30 times.

Keywords: thermal cracks, temperature cracks, concrete, heating mat, Contest, crack risk, temperature measurements, numerical simulations.

Förord

Detta examensarbete är utfört på Institutionen för Bygghvetenskap, Avdelning Betongbyggnad vid Kungliga Tekniska Högskolan i Stockholm. Arbetet är skrivet i samarbete med Projektengagemang AB och Svevia AB och pågick från oktober 2014 till september 2015. Idén till arbetet kommer från teknisk doktor Carsten Vogt, Projektengagemang, och Kjell Wallin, Projektengagemang, som även initierat framtagandet av den värmematta som undersöks i detta arbete.

Först och främst vill jag uttrycka min tacksamhet till professor Johan Silfwerbrand, KTH, för det stöd och den rådgivning han bistått med i sin roll som handledare för detta examensarbete.

Vidare riktar jag ett stort tack till biträdande handledare Carsten Vogt för att under hela arbetets gång bidragit med sin stora kunskap inom området. Jag vill även tacka Kjell Wallin och doktorand Anders Hösthagen för att ha gett värdefulla råd rörande de numeriska simuleringarna såväl som de praktiska fältstudierna som utförts i detta arbete.

Slutligen vill jag tacka alla inom Svevia som jobbat med betongarbetena i Gamla Uppsala där fältförsöken genomfördes.

Stockholm, september 2015

Vilmer Andersson-Vass

Innehållsförteckning

Sammanfattning	i
Abstract	iii
Förord.....	v
1 Introduktion	1
1.1 Introduktion till temperatursprickor	1
1.2 Bakgrund till arbetet	2
1.3 Syfte med arbetet	3
1.4 Omfattning och avgränsning	3
2 Sprickbildning i betongkonstruktioner	5
2.1 Generellt om sprickbildning	5
2.2 Temperatursprickor	8
2.3 Programmet Contest	15
2.4 Temperaturegenskaper	17
3 Förutsättningar	23
3.1 Metodbeskrivning.....	23
3.2 Fältförsöken.....	24
3.3 Förberedande numeriska simuleringar	41
3.4 Numeriska simuleringar av fältförsöken	50
3.5 Exempel på användning av värmemattan.....	57
3.6 Ekonomisk jämförelse med värmekablar	60
4 Resultat	61
4.1 Förberedande numeriska simuleringar	61
4.2 Fältförsöken.....	68
4.3 Exempel på användning av värmemattan.....	85
4.4 Ekonomisk och produktionsteknisk jämförelse mellan värmemattor och värmekablar	94

5	Slutsatser.....	97
5.1	Slutsatser av försöken med värmemattan	97
5.2	Slutsatser av efterkalkylerna	99
5.3	Slutsatser om vidare studier.....	99
	Litteraturförteckning.....	101
A	Förutsättningar för grundmodellen	105
A.1	Värmeledning i betongen	105
A.2	Temperaturregenskaper för armeringsskikten	108
A.3	Specifika värmekapaciteten betongen	112
A.4	Initialtemperaturer i grundmodellen.....	112
A.5	Parametrar för rutnätet.....	116
A.6	Enskilda armeringsjärns temperaturpåverkan	118
A.7	Känslighetsanalys	120
B	Mätningar vid fältförsöken	131
B.1	Strömförbrukning i värmemattorna	131
B.2	Diagram med samtliga temperaturmätningar	132
C	Ekonomisk betraktelse av värmemattan	137
C.1	Jämförelse med värmekablar	137

Kapitel 1

1 Introduktion

1.1 Introduktion till temperatursprickor

Vid betongs hårdnande avges reaktionsvärme från de kemiska reaktioner som sker mellan cement och vatten. Denna värme kan ibland skapa stora temperaturskillnader inom en betongkonstruktion vilket tillsammans med förhindrade rörelsemöjligheter för olika konstruktionsdelar kan ge upphov till sprickbildning. Sprickorna kallas *temperatursprickor* och uppkommer i regel de närmsta dagarna efter gjutningen eftersom det är då som mest värme utvecklas och som temperaturförändringarna är som störst.

Temperatursprickor i betong är ett problem inom anläggningsbyggandet främst eftersom sprickorna orsakar minskad beständighet för den drabbade konstruktionen. De kan också orsaka problem i form av vattenläckage samt vara negativt ur ett estetiskt perspektiv. De temperatursprickor som denna rapport främst behandlar är de genomgående temperatursprickorna som sträcker sig genom konstruktionens tvärsnitt. Dessa uppkommer i huvudsak vid gjutningar mot en helt eller delvis oeftergivlig konstruktion. Ofta gäller det gjutning mot en tidigare gjuten betongkonstruktion men även vid gjutning mot till exempel berg eller en stålkonstruktion kan problemet uppstå (Emborg m.fl., 1997).

Det är sedan 1990-talet reglerat i normer och regelverk hur risken för temperatursprickor i anläggningskonstruktioner ska hanteras i projekterings- och utförandesstadiet. I anläggningsprojekt har detta lett till att entreprenören eller entreprenörens projektör i regel med datorprogram analyserar risken för temperatursprickor inför en gjutning och föreslår åtgärder för att reducera risken för att de uppkommer. Datorprogrammen modellerar temperatur- och spänningsförlopp före, under och efter gjutning och dessa ligger sedan till grund för de åtgärder som föreslås för att förhindra sprickbildning.

En ökad medvetenhet kring problemet har fått till följd att det sedan mitten av 1990-talet genomförts ett flertal åtgärder för att begränsa risken för temperatur- och fuktrelaterad sprickbildning i betongkonstruktioner. Dessa åtgärder går ut på att påverka den faktor som jämte tvånget skapar sprickorna – nämligen temperaturskillnader. Därför antingen värms motgjuten konstruktionsdel eller kyls den konstruktionsdel som gjuts för att undvika att temperaturförloppet leder till sprickbildning. Det är också möjligt att kombinera dessa två åtgärder.

1.2 Bakgrund till arbetet

Risken för temperatursprickor kan reduceras genom förändringar i betongrecept och geometri på gjutetapperna. Ibland är dessa åtgärder nog för att uppnå en acceptabel nivå på sprickrisken men i andra fall behövs andra metoder. De två metoder som i nuläget används mest för att i utförandeskedet minska risken för temperatursprickor är antingen att med kylslingor kyla betongen som gjuts under dess härdningsskede eller att med ingjutna värmekablar värma den konstruktion som det gjuts mot. Vid kylning placeras kylslingor i formen där betongen ska gjas. Under betongens inledande härdningsperiod pumpas vatten genom kylslingorna för att transportera bort tillräckligt med värme från konstruktionsdelen för att förhindra sprickbildning. Även luft kan blåsas genom kylslingorna i syfte att transportera bort värme, men vattenkylning är vanligare än luftkylning. Vid användning av ingjutna värmekablar används dessa för att värma den motgjutna konstruktionen, dvs. den tidigare gjutna, i sådan utsträckning att temperatursprickor begränsas.

Både värmekablar och kylslingor har sina för- och nackdelar. Värmekablar fungerar när sprickrisken kan reduceras i tillräcklig grad enbart genom att värma motgjutningen, vilket oftast går bra vid motgjutning mot betong i vilken värmekablar kan gjas in. Om metoden används vintertid underlättas ofta arbetet genom att snö och is på motgjuten konstruktion automatiskt tinas. Sådana vinteråtgärder behövs även vid användning av kylslingor och kan då behöva lösas genom att man ändå gjuter in värmekablar vid motgjutningsytan eller använder dieselluftvärmare eller dylikt. Värmekablar fungerar däremot inte som sprickbegränsande metod när gjutning sker mot berg eftersom värmekablar inte kan iläggas i berget (Wallin m.fl., 1997).

Kylslingor är en effektiv metod vid gjutning av tunna såväl som grova konstruktioner. Vid gjutning av mycket grova konstruktioner kan stora temperaturskillnader uppkomma internt i den gjutna betongen, vilket kan leda till uppsprickning. För att jämna ut dessa temperaturskillnader kan kylslingor användas. Kylslingor fungerar också vid gjutning av tunnare konstruktioner och vid gjutning mot berg. Av produktionsskäl har dock kylning den negativa sidan att det fördröjer hållfasthetstillväxten i den nygjutna konstruktionen. Det är även möjligt att använda en kombination av värmekablar och kylslingor för att undvika temperatursprickor (Wallin m.fl., 1997).

En nackdel med bägge metoderna är att de behöver planeras för i förtid. Kylslingor måste monteras i samband med armeringen och värmekablar måste gjas in i en tidigare gjutning. Det händer även att planeringen ändras och en gjutning förskjuts, till exempel från sommaren till vintern. Detta förändrar förutsättningarna för gjutningen vilket kan leda till att åtgärder som tidigare inte var nödvändiga behöver vidtas för att förhindra uppsprickning. Har inte värmekablar gjutits in eller kylslingor monterats kan det bli kostsamt att åtgärda detta i efterhand. ”Räddningsmetoder” som genomförts i efterhand är exempelvis att montera kylslingor, bygga in luftvärmning i den motgjutna konstruktionen eller värma den med tjältiningsmattor. Alternativet är att gjuta ändå med risk för uppsprickning. En annan nackdel med båda metoderna är att det material som gjuts in går förlorat. Värmekablarna gjas in och kan inte återanvändas och de ingjutna hålrum som skapas för kylrören måste gjas igen i efterhand. Det händer även att värmekablarna går sönder när de gjas in eller vid användning och då försvinner deras funktion.

I en ansats att lösa en del av de problem som är kopplade till sprickrisksåtgärder byggde ett företag specialiserat på elvärmeprodukter under 2014 en värmematta för att värma motgjutna

konstruktioner. Produkten är i sitt utförande lik de tjältiningsmattor som företaget också producerar men den elektriska effekten är lägre i värmemattan. Anledningen till den lägre elektriska effekten är att värmemattan kontinuerligt under några dagar ska kunna värma motgjutna betongkonstruktion utan att bli överhettad. Det är ännu inte undersökt hur den nya värmemattan fungerar – dvs. hur den värmer upp underliggande betong.

För att värmemattan ska kunna bli en vedertagen åtgärd mot sprickbildning, på samma sätt som värmekablarna är idag, krävs att dess uppvärmande effekt kan modelleras på ett adekvat sätt i de datorprogram som analyserar temperaturförlopp.

1.3 Syfte med arbetet

Syftet med arbetet har varit att undersöka på vilket sätt värmemattans uppvärmande och isolerande funktion kan modelleras i programmet Contest så att den modellerade temperaturutvecklingen i betongen stämmer med hur den hade sett ut i verkligheten. Syftet är också att studera vilka parametrar i programmet och i verkligheten som har betydelse för hur temperaturförloppet blir och som kan vara felkällor då en specifik gjutsituation ska modelleras.

Anledningen till att ovanstående är intressant att undersöka är att en bra temperaturmodellering av värmemattan krävs för att sprickrisker ska kunna bedömas i situationer där värmemattan används. I ett vidare perspektiv är därför arbetets syfte att bidra till att minska temperaturrelaterad sprickbildning i betongkonstruktioner.

Målet har varit att hitta en så snabb och enkel metod som möjligt för att inkludera värmemattan i Contestberäkningar. Viktigt har varit att försöka visa att de temperaturförlopp som erhållits med metoden i Contest stämmer överens med motsvarande temperaturförlopp i verkligheten.

1.4 Omfattning och avgränsning

Arbetet med denna rapport har innefattat en praktisk del i form av fältförsök och en teoretisk del där temperaturförlopp i betong undersökts. Nedan sammanfattas vad rapporten behandlar:

- Litteraturstudie som behandlar temperatursprickbildning och temperaturegenskaper hos material som ofta ingår i anläggningskonstruktioner.
- Fyra fältförsök då värmemattornas förmåga att värma underliggande betong provades.
 - Temperaturmätning på olika djup i betongen och mätning av lufttemperatur.
 - Mätning av värmemattans strömförbrukning.
 - Tre försök på en bottenplatta och ett försök på ett valv
- Numeriska simuleringar i programmet Contest av temperaturförlopp.
 - Numeriska simuleringar av en fiktiv bottenplatta för att undersöka inverkan av armeringsjärn och för att undersöka olika metoder för att inkludera värmemattan i Contestberäkningarna.

- En känslighetsanalys för att bedöma vilka faktorer utöver värmemattan som påverkade hur temperaturutveckling i betong såg ut vid försökssituationerna.
- Numeriska simuleringar av de uppmätta temperaturförloppen vid försöken (efterkalkyler) och en jämförelse mellan dessa och de uppmätta temperaturförloppen.
- Efterkalkyler med avseende på uppsprickning av två verkliga gjutningar där värmemattan användes som åtgärd.
- Kort ekonomisk betraktelse där användning av värmemattan jämförs med den alternativa metoden att använda värmekablar.
- Ett förslag till hur värmemattan kan modelleras i Contest.

De viktigaste begränsningar som gjorts redovisas i punktform nedan.

- Inga laborationsförsök eller liknande gjordes för att bestämma temperaturegenskaperna hos de material som innefattades i fältförsöken.
- Temperaturförloppet har enbart analyserats i två dimensioner.
- Ingen hänsyn togs i beräkningarna till strålningsvärmens från solen.
- Ingen hänsyn togs i beräkningarna till regnvatten på betong/mattor.
- Enbart situationen då värmemattan täcktes med betongtäckmatta undersöktes i fler än ett försök. Ett försök genomfördes med otäckta värmemattor.
- Inget försök utfördes i vinterförhållanden.

Kapitel 2

2 Sprickbildning i betongkonstruktioner

2.1 Generellt om sprickbildning

2.1.1 Spricktyper

Ofta delas sprickor in efter när de uppkommer. Ett enkelt sätt är att dela in dem i två kategorier: sprickor uppkomna i samband med gjutningen och sprickor uppkomna i ett senare skede.

Sprickor vid gjutningen

De typer av sprickor som kan uppkomma i samband med gjutning är plastiska sättsprickor, plastiska krympsprickor, sprickor på grund av formarnas rörelse och temperatursprickor. Plastiska krympsprickor är vanligt förekommande och uppkommer framförallt då betongen inte skyddas mot uttorkning direkt efter gjutning. Om temperaturstyrande åtgärder inte vidtas är det relativt vanligt att temperatursprickor uppkommer, i synnerhet i grova konstruktioner. Temperatursprickor behandlas i avsnitt 2.2 och behandlas därför inte här.

Plastiska sättsprickor orsakas av att nygjuten betong ibland sjunker ihop på grund av antingen komprimering av luftporer vid ökat tryck eller på grund av att vatten och luft avgår genom formen eller betongens överyta. Vid rörelser på grund av detta kan betongen hänga upp sig på armeringsjärn eller där förändringar i formens geometri sker. Detta kan skapa hålrum i betongen men också sättsprickor genom att betongytan spaltas i överytan. Spaltningen sker oftast i betongens överyta precis ovanför armeringsjärn eller i överytan ovanför förändringar i formen. (Petersons, 1994).

Plastiska krympsprickor kan uppstå i betongen kring den tidpunkt då betongens *gränstövning* når sin lägsta nivå. Gränstövningen anger den största töjningen betongen klarar innan den går till brott. Gränstövningen i ytan av betongen når sin lägsta nivå några timmar efter gjutningens färdigställande. Töjningen orsakas av att vatten avdunstar från betongen vilket leder till att betongen krymper (Petersons, 1994). Sprickorna är ofta parallellt orienterade men kan också ha en oregelbunden utbredning (Neville, 1981).

Sprickor på grund av formars rörelse uppkommer oftast när formtrycket på grund av betongmassans tyngd orsakar rörelser i formen. Sprickorna liknar ofta plastiska krympsprickor (Petersons, 1994).

Sprickor i ett senare skede

Flera olika faktorer kan orsaka uppsprickning i ett senare skede. Krympsprickor och belastningssprickor är exempel på sprickor som kan uppkomma långt efter gjutningen. Även temperatursprickor kan uppkomma i ett senare skede beroende av temperaturvariationer i omgivningen.

Krympsprickor uppkommer genom att betongen kontraherar och att denna rörelse förhindras av mothåll från till exempel andra konstruktionsdelar. Betongens slutkrympning efter lång tid beror dels av hur fuktförhållandena förändras i betongen, dels av betongsammansättningen (Petersons, 1994).

Belastningssprickor är sprickor uppkomna i samband med att konstruktionen belastats. Dessa är mycket sällan ett problem så länge konstruktionen är rätt dimensionerad för permanent och variabel last och dessa inte överskrids. De sprickor som uppkommer under bruksförhållanden är generellt mycket små, < 0,1 mm. Två exempel på belastningssprickor är böjsprickor och skjvsprickor. Just skjvsprickor bör uppmärksammas då de kan föranleda oväntade brott. Belastningssprickor är dock i regel ofarliga och kan i vissa fall vara positiva då de tjäna som varningssignaler vid propagering (Petersons, 1994).

Sprickor kan också uppkomma till följd av brand, armeringskorrosion och kemiska reaktioner, till exempel på grund av olämpligt ballastmaterial (Petersons, 1994).

2.1.2 Sprickors påverkan på konstruktionen

Det är ofta svårt att helt undvika sprickbildning i betongkonstruktioner och det är i regel heller inte befogat. Ofta ställs därför krav på maximala sprickbredder. Kraven ställs med hänsyn till vilken följden blir av sprickor av en viss bredd, och med hänsyn till vilka funktionskrav konstruktionen har. För vattentäthet och gastäthet bör sprickbredden begränsas till 0,2 respektive 0,1 mm. För konstruktioner i sterila miljöer bör sprickbredden begränsas till 0,05 mm. Bärigheten hos en konstruktion försämras i regel inte av sprickor om de inte är mycket kraftiga och därmed reducerar tryckzonen (Petersons, 1994).

I ett längre perspektiv kan däremot sprickor leda till försämrad bärighet på grund av att de i vissa fall leder till ökad armeringskorrosion. Armeringskorrosion minskar på sikt bärigheten i en konstruktion eftersom armeringsarean minskar. Den försämrar också konstruktionens beständighet. Sprickor kan skapas kring armeringen och i svåra fall kan hela täckskiktet spjälkas loss. Detta beror på att det korroderade stålet har större volym än vad samma stål hade innan det korroderade, vilket kan spräcka betongen. Sprickbreddens påverkan på armeringskorrosionen hastighet beror av betongens *inre* och *yttre* miljö. Med inre miljö menas i det här fallet betongens cementtyp och med yttre miljö den miljö som betongen omges av. Normala sprickor, vinkelräta mot armeringen, som är bredare än 0,4 mm minskar betongens beständighet så pass att hänsyn bör tas till det vid livslängdsbedömningen för en konstruktion. Detta gäller oavsett inre och yttre miljö (Byfors & Tuutti, 1994). Beroende på vilken yttre miljö en betongkonstruktion förväntas utsättas för tilldelas den en exponeringsklass. Exponeringsklassen är i många hänseenden avgörande vid utformandet av konstruktion, bland annat avseende dimensionering för spricksäkerhet. Exponeringsklasserna visas i tabell 2-1.

Tabell 2-1 Exponeringsklasser för betong (Svensk standard, 2013).

X0	Ingen risk för korrosion eller angrepp.	Betong utan armering eller betong med armering som är mycket torr.
XC1 XC2 XC3 XC4	Korrosion föranledd av karbonatisering.	Torr eller ständigt våt. Våt, sällan torr. Måttlig fuktighet. Cykliskt våt och torr.
XD1 XD2 XD3	Korrosion orsakad av andra klorider än de från havsvatten.	Måttlig fuktighet. Våt, sällan torr. Cykliskt våt och torr.
XS1 XS2 XS3	Korrosion orsakad av klorider från havsvatten.	Utsatt för luftburet salt men inte i direkt kontakt med havsvatten. Ständigt under havsytan. Tidvatten, skvalp och stänkzoner.
XF1 XF2 XF3 XF4	Angrepp från frysning och upptining.	Inte vattenmättad, utan avisningsmedel. Inte vattenmättad med avisningsmedel. Nära vattenmättad, med avisningsmedel. Nära vattenmättad, med avisningsmedel eller havsvatten.
XA1 XA2 XA3	Kemiska angrepp.	Obetydligt kemiskt aggressiv. Måttligt kemiskt aggressiv. Starkt kemiskt aggressiv.

2.1.3 Hantering av sprickor i Eurokod 2

Enligt Eurokod 2 (2004) gäller för en konstruktion att: ”Sprickbildning ska begränsas, så att bärverket kan fylla avsedd funktion och har erforderlig beständighet samt så att dess utseende förblir acceptabelt”. I Eurokodens svenska nationella bilaga EKS 8 (2011) finns krav på acceptabla sprickbredder w_k , se tabell 2-2. Den acceptabla sprickbredden bestäms av exponeringsklass och livslängdsklass. Exponeringsklasserna bestäms för en konstruktion utifrån den miljö som konstruktionen kommer att utsättas för. Livslängdsklassen indikerar för vilket tidsperspektiv som konstruktioner är utformad.

Tabell 2-2 Acceptabel sprickbredd w_k (mm) (Boverkets författningssamling 2011).

Exponeringsklass	Korrosionskänslig			Föga korrosionskänslig		
	L 100	L 50	L 20	L 100	L 50	L 20
XC0	-	-	-	-	-	-
XC1	0,40	0,45	-	0,45	-	-
XC2	0,30	0,40	0,45	0,40	0,45	-
XC3, XC4	0,20	0,30	0,40	0,30	0,40	-
XS1, XS2 XD1, XD2	0,15	0,20	0,30	0,20	0,30	0,40
XS3, XD3	0,10	0,15	0,20	0,15	0,20	0,30

Ett ökat armeringsinnehåll minskar sprickbredden vid eventuell sprickbildning (Petersens, 1994). Eurokod 2 ställer också krav på en viss mängd armering, en *minimiarmering*, i de delar av konstruktionen som förväntas utsättas för dragspänningar. Koden innehåller ett förenklat

uttryck med vilket minimiarmeringen kan beräknas. Minimiarmeringen kan också beräknas genom noggrannare beräkning vilket kan resultera i en mindre armeringsmängd än vad som ges av det förenklade uttrycket. Då ska i beräkningarna visas att sprickbredden blir mindre än i värdena tabell 2-2.

I den svenska bilagan till Eurokoden, EKS 8, anges även ekvationen:

$$\sigma_{ct,p} < f_{ctk}/\zeta \quad (2-1)$$

där $\sigma_{ct,p}$ = dragspänning i betongen (N/m²)
 f_{ctk} = betongens karaktäristiska draghållfasthet (N/m²)
 ζ = spricksäkerhetsfaktor

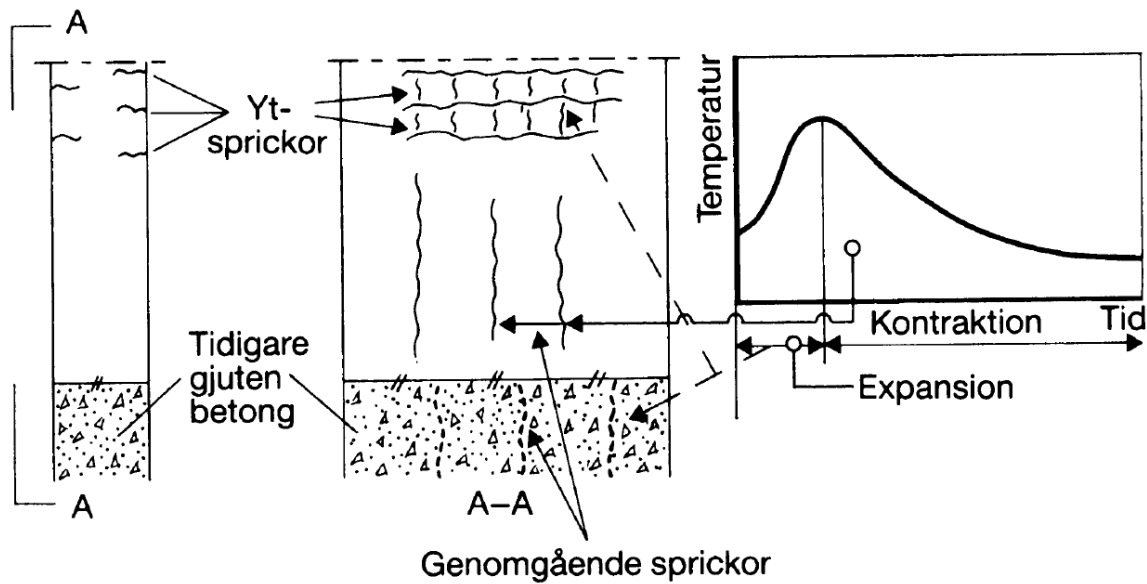
Om spänningen $\sigma_{ct,p}$ i betongen är mindre än i ekvation 2-1 kan betongen anses sprickfri och minimiarmering enligt Eurokod 2 behöver inte läggas in. Om verifiering enligt ekvation 2-1 görs för uppsprickning innan 28-dygns hållfastheten uppnåtts bör f_{ctk} ersättas med ett tidberoende uttryck $f_{ctk}(t)$ för betongens karaktäristiska draghållfasthet. Spricksäkerhetsfaktorn beror av livslängdsklass och bestäms enligt tabell 2-3. För temperaturspricksberäkningar används ibland en annan spricksäkerhetsfaktor, se avsnitt 2.2.4.

Tabell 2-3 Spricksäkerhetsfaktor ζ (Boverkets författningssamling 2011).

Exponeringsklass	L100	L50	L20
XC0, XC1	0,9	0,9	0,9
XC2	1,0	0,9	0,9
XC3, XC4	1,2	1,0	1,0
XS1, XS2 XD1, XD2	1,5	1,2	1,0
XS3, XD3	1,8	1,5	1,2

2.2 Temperatursprickor

Med *temperatursprickor* menas sprickor uppkomna till följd av återhållna volymändringar på grund av temperaturförlopp i betongkonstruktioner. Inom begreppet temperatursprickor innefattas både *genomgående sprickor*, dvs sprickor som genomkorsar konstruktionen tvärs dess längdriktning, och *ytsprickor*, sprickor som uppstår i ytskiktet men som kan sträcka sig innanför armering. Dessa spricktyper illustreras i figur 2-1. Båda dessa spricktyper uppkommer oftast på grund av det temperaturförlopp som sker i betongen de första dagarna och veckorna efter gjutning (Emborg m. fl., 1997).



Figur 2-1 Exempel på genomgående sprickor och ytsprickor. Återgivning från Jonasson m. fl. (1994).

Temperatursprickor kan också delas in i två kategorier utifrån när i temperaturförloppet de uppstår. Antingen tillkommer de under den så kallade *expansionsfasen* (då den nygjutna betongens temperatur ökar på grund av hydratationen) eller under den så kallade *kontraktionsfasen* (då den nygjutna betongens temperatur minskar) (Jonasson m.fl., 1994).

Tabell 2-4 Spricktyper. Återgivning från Emborg m.fl. (1997).

	Expansionsfas (uppvärmning)	Kontraktionsfas (avsvalning)
Genomgående spricka	Uppkommer om skillnaden i medeltemperatur är stor mellan olika delar av gjutetappen	Uppkommer vanligen i samband med tvång från motgjutna etapper
Ytspricka	Uppkommer vanligen om temperaturskillnaden är stor mellan centrala delar och yta	Kan uppkomma vid hastig avkylning t.ex. avformning vid kall väderlek

2.2.1 Genomgående temperatursprickor

Med genomgående sprickor menas sprickor som sträcker sig genom konstruktionsdelens tvärsnitt. Sprickorna kan minska konstruktionens beständighet mot betongaggressiva ämnen samt öka risken för armeringskorrosion. Vid krav på vatten- eller gastätet måste genomgående sprickor antingen undvikas eller i efterhand tätas (Emborg m. fl., 1997).

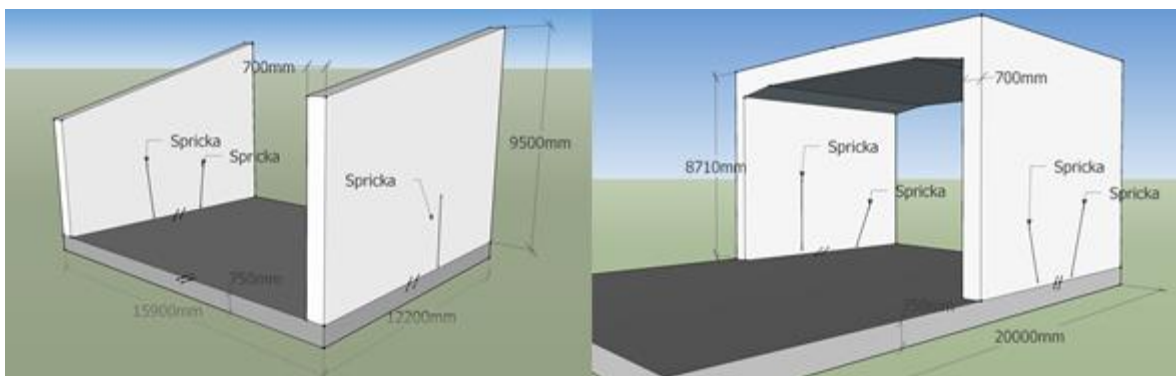
I de flesta fall uppkommer genomgående sprickor då en *motgjutning* görs, dvs. då en gjutning sker mot en tidigare gjuten konstruktion eller mot något annat mothållande, till exempel berg. En motgjutning kännetecknas av att den hårdnande betongen på grund av mothållet är

förhindrad att röra sig fritt. En gjutning av en vägg på en bottenplatta av betong är ett exempel på en motgjutning. En gjutning av en bottenplatta mot enbart sprängsten är däremot inte en motgjutning eftersom sprängstenen inte hindrar bottenplattan från att röra sig. Man kan dela in de genomgående temperatursprickorna i tre kategorier utifrån hur de uppkommer: tidiga genomgående sprickor i nygjutningen, tidiga genomgående sprickor i den motgjutna konstruktionen och genomgående sprickor uppkomna i ett senare skede (Petersons, 1994).

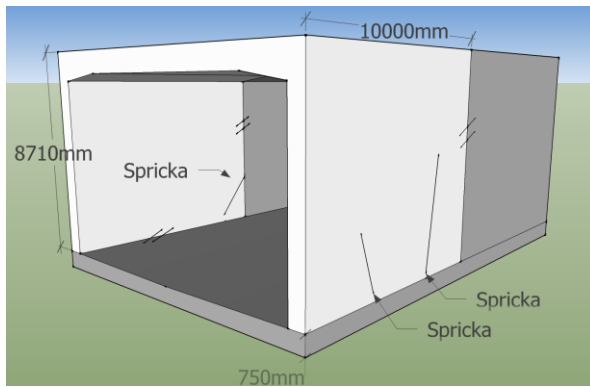
Tidiga genomgående sprickor i nygjutningen

När betongen under de första dagarna genomgår relativt stora temperaturförändringar kan volymändringar och spänningar uppstå i den, speciellt om konstruktionen inte kan röra sig fritt. Vid en motgjutning hindrar den äldre konstruktionen den nygjutna konstruktion att röra sig fritt, vilket ökar spänningarna i betongen. Detta kallas att den äldre konstruktionen utgör ett yttre tvång som beroende på geometrier och eftergivlighet hos konstruktionerna kan vara olika stort. Spänningarna som leder till sprickbildning uppkommer i kontraktionsfasen, då den nygjutna betongen kontraherar på grund av temperatursänkningen medan den äldre konstruktionen motverkar denna kontraktion. Figur 2-1 visar ett exempel på hur sprickor uppkomma i kontraktionsfasen kan se ut. Detta är den vanligaste typen av genomgående temperatursprickor och kan uppkomma både i tunna (tvärmått mindre än 0,5 m) och grova konstruktioner. I grova konstruktioner blir värmeutvecklingen större än för tunnare konstruktioner vilket är en faktor som ökar risken för temperatursprickor. Å andra sidan upplever en tunn konstruktion oftast ett större tvång från anslutande konstruktionsdelar vilket också är en faktor som ökar risken för temperatursprickor (Emborg m. fl., 1997).

I konstruktioner som är låga i förhållande till sin längd kan sprickorna gå vertikalt genom hela konstruktionen och därmed dela den i två delar. När tunnare konstruktioner drabbas av temperatursprickor på grund av värmeutvecklingen vid hydratiseringen uppkommer de i regel vinkelrätt mot konstruktionens längdriktning. För grövre konstruktioner kan temperatursprickor även uppkomma parallellt med konstruktionens längdutvidgning (Löfquist, 1946). Figur 2-2 och figur 2-3 visar tre exempel på temperatursprickor uppkomna då väggar gjutits mot bottenplatta. Exempelen är tagna från projektet i Gamla Uppsala, se avsnitt 3.1.2 och sprickbredden i dessa uppmättes några månader efter gjutning till 0,2-0,6 mm. Som tidigare nämnts beror det tvång en konstruktion känner av på hur förhindrad den är från att röra sig. Eftersom föregående vägg i figur 2-3 är ett mothåll är tvånget större än för tunnelkonstruktionen i figur 2-2, vilket ökar sprickrisken.



Figur 2-2 Exempel på genomgående temperatursprickor uppkomna vid gjutning mot tidigare gjuten bottenplatta (från projektet i Gamla Uppsala, avsnitt 3.1.2).



Figur 2-3 Genomgående temperatursprickor uppkomna då väggar gjutits mot tidigare gjutna bottenplatta och väggar (från projektet i Gamla Uppsala, avsnitt 3.1.2).

Tidiga genomgående sprickor i den motgjutna konstruktionen

Genomgående temperatursprickor kan också uppkomma i en betongkonstruktion i samband med att en ny betongdel gjuts emot den. Vid en sådan motgjutning kan den äldre konstruktionsdelen "dras" sönder av den nygjutna betongen då den expanderar under de första dagarna efter gjutning. Figur 2-1 ger ett exempel på hur genomgående sprickor uppkomma i expansionsfasen kan se ut. De orsakande faktorerna är vid detta fenomen desamma som när sprickor uppkommer i den yngre konstruktionen, dvs. värmeutvecklingen i den yngre konstruktionen i kombination med tvånget mellan de två konstruktionerna. Att temperatursprickor uppkommer i den äldre konstruktionen är ovanligare än att sprickor uppkommer i den yngre motgjutna konstruktionen, vilket beror på att den äldre konstruktionen har uppnått en högre hållfasthet och därmed tål dragbelastning i större utsträckning än den yngre konstruktionen (Emborg, 1997).

Genomgående sprickor uppkomna i ett senare skede

Genomgående temperatursprickor kan uppkomma på grund av växlingar i omgivningens temperatur. Detta kan till exempel ske vid en varm senhöst följt av en kall vinter. Om detta skapar tillräckligt stora temperaturdifferenser mellan olika konstruktionsdelar kan sprickor uppstå. När några månader gått efter gjutning är det dock svårare att slå fast en enskild orsak till en spricka. Spänningarna uppkomna av temperaturskillnader vid avsvälningen efter gjutning kan då samverka med spänningar från krympning, belastning och växlingar i omgivningstemperatur vilket sammantaget kan leda till sprickbildning (Petersons, 1994).

2.2.2 Ytsprickor

Temperaturberoende ytsprickor har i regel också sin grund i den temperaturutveckling som sker vid den inledande hydratationen men uppkommer på ett lite annorlunda sätt. När betongen härdar utvecklas värme vilket ger en temperaturhöjning i betongen, främst i betongens inre delar. När betongen sedan svalnar sjunker temperaturen, och snabbast svalnar den vid betongens kanter. Den temperaturgradient som då bildas gör att den yttre betongen vill kontrahera mer än den inre vilket ger upphov till dragspänningar i den yttre delen. Dessa spänningar kan leda till sprickbildning (Löfquist, 1946).

I grövre konstruktioner är skillnaden i temperatur mellan inre och yttre delar större än i slankare konstruktioner och därför ökar sprickrisken med konstruktionens tjocklek. Temperaturberoende ytsprickor uppkommer i regel inte när konstruktionen är tunnare än ungefär en meter. Dock kan ytsprickor uppkomma i tunnare konstruktioner om ytan utsätts för en temperaturchock, vilket exempelvis kan ske om formen rivs i kallt väder (Jonasson m. fl., 1994).

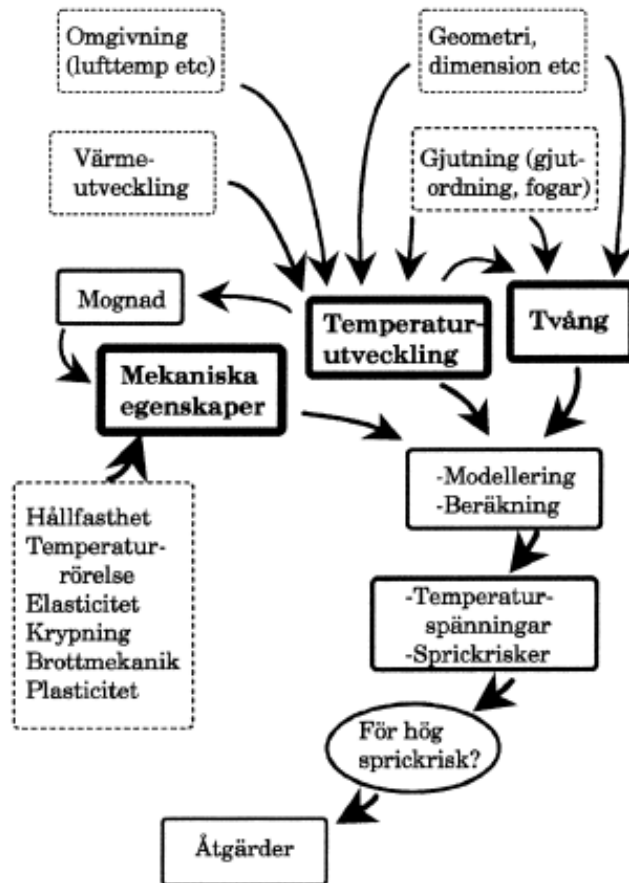
När den inre betongen efterhand svalnar av kan den inre betongen dra ihop dessa ytsprickor så att de helt eller delvis sluter sig. Vid senare temperaturväxlingar kan, på grund av yttre temperaturpåverkan, ytsprickorna komma att växla mellan att vara öppna och slutna. Om dessa injekterats kan sprickdjupet komma att öka. Ytsprickorna bildar ofta ett nätformigt mönster i betongytan. Vid betongens kanter är sprickorna generellt vinkelräta med kanten eftersom dragspänningarna där är riktade i kantens riktning. Ytarmering minskar sprickvidden genom att betongen hålls fast av armeringen (Löfquist, 1946).

2.2.3 Faktorer som orsakar temperatursprickor

De viktigaste faktorerna för uppkomsten av temperatursprickor i betong är enligt Löfquist (1946): temperaturförlopp, volymändringar och deformationsegenskaper för ung betong. Emborg m. fl. (1997) nämner ungefär samma faktorer: temperaturförloppet, mognadsutveckling och mekaniska egenskaper hos den unga betongen samt det tvång som råder inom och mellan olika konstruktionsdelar. Dessa huvudsakliga faktorer, och de parametrar som ligger bakom dem, samverkar på ett komplicerat sätt vilket gör det svårt att göra säkra bedömningar om risken för uppsprickning. De senaste 20 åren har dock datoriserade beräkningshjälpmedel gjort det möjligt att bättre modellera de olika faktorerna, vilket lett till säkrare bedömningar av uppsprickning i betongkonstruktioner. De viktigaste parametrarna som måste beaktas vid sådana bedömningar är enligt Wallin m. fl. (1997) :

- av hydratationen framkallad temperaturutveckling
- den unga betongens mekaniska egenskaper
- graden av tvång
- temperatur hos anslutande konstruktionsdelar och omgivning

Hur arbetsgången kan se ut vid bedömning av sprickrisk för en specifik gjutning visas schematiskt i figur 2-4 nedan.



Figur 2-4 Inverkande faktorer vid analys av temperaturspänningar. Återgivning av Jonasson m.fl. (1994).

Vid temperaturspricksberäkningar tas ofta ingen hänsyn till armeringen i betongen och beräkningarna görs med villkoret att betongen ska vara sprickfri. Armeringens huvudsakliga påverkan på uppsprickningen är att den minskar uppkomna sprickbredder, sprickorna blir fler men tunnare. Armeringsinnehållet har däremot måttligt betydelse för om det faktiskt uppkommer sprickor. Det är därför rimligt att inte ta hänsyn till armeringen vid sådana beräkningar.

Temperaturutvecklingen är som kan ses i figur 2-4 en avgörande faktor för om sprickor uppkommer. Ju högre temperaturen den nygjutna betongen uppnår desto större är risken att den spricker. Temperaturen påverkas starkt av betongens egenskaper och då främst av cementhalten och av vilken temperatur betongmassan har när den hamnar i formen. En hög cementhalt avger mer värme vid hydratationen vilket ökar den maximala temperaturen som betongen uppnår, vilket är negativt ur sprickrisksynpunkt. Om temperaturen på den färska betongmassan höjs med ett visst antal grader kommer också den maximala temperaturen att höjas med ungefär lika många grader. En högre temperatur på betongmassan när den hamnar i formen är alltså även det negativt ur sprickrisksynpunkt.

2.2.4 Hantering av temperatursprickor i AMA

I anläggningsprojekt regleras ofta utförande och materialval genom att krav skrivs in i en teknisk beskrivning som gäller för projektet. För att inte behöva formulera projektspecifika

beskrivningar för varje del i projektet kan det i den tekniska beskrivningen hänvisas till allmänna koder. AMA, eller allmän material- och arbetsbeskrivning, är ett referensverk av sådana koder som ofta hänvisas till i tekniska beskrivningar. Koderna beskriver tekniska lösningar och materialval som sedan måste följas vid utförandet.

AMA är uppdelad i flera områden såsom till exempel Hus, El, VVS och Kyl samt Anläggning som bland annat behandlar betonggjutningar. Den senaste versionen av denna är Anläggning 13. I denna finns utförandekoden EBE.11 som bland annat beskriver hur temperatursprickor ska begränsas. Ofta skrivs denna kod in i tekniska beskrivningar för anläggningsprojekt för att på ett enkelt sätt reglera utförandet av betongkonstruktionen. Därför beskrivs nedan hur risken för temperatursprickor ska beaktas enligt EBE.11 i AMA.

AMA-koden EBE.11

Koden beskriver tre beräkningsmetoder och att någon av dem alltid ska användas om betongkonstruktionen har en högre livslängdklass än L20, dvs. om konstruktionen ska ha en förväntad livslängd på mer än 20 år. Koden ger också förklaringar för vilken eller vilka av metoderna som får väljas för olika konstruktionsgeometrier och temperaturförhållanden. Vald beräkningsmetod ska sedan resultera i arbets- och metodbeskrivning för betonggjutningen. Villkoret för acceptabel sprickrisk är detsamma som för sprickor generellt enligt ekvation 2-1 men en annan spricksäkerhetsfaktor används, se tabell 2-5.

Tabell 2-5 Spricksäkerhetsfaktor enligt AMA. Återgivning från Svensk byggtjänst (2013).

Exponeringsklass	Fullständiga materialparametrar	Materialparametrar	
		$360 \leq C \leq 430 \text{ kg/m}^3$	$430 < C \leq 460 \text{ kg/m}^3$
XC2	1,05	1,18	1,33
XC4	1,11	1,25	1,42
XD1, XS2	1,18	1,33	1,54
XD3, XS3	1,25	1,42	1,67

Exponeringsklass	Fullständiga materialparametrar	Materialparametrar	
		$360 \leq C \leq 430 \text{ kg/m}^3$	$430 < C \leq 460 \text{ kg/m}^3$
Alla	1,42	1,67	2,0

Beräkningsmetod 1

Beräkningsmetod 1 är den enklaste av de tre och innebär begränsningar på cementhalt, *vct*, dimensioner på konstruktionen, gjuttemperatur och omgivningstemperatur. Metoden tar hänsyn till både ytsprickor och genomgående sprickor, två typer temperatursprickor som uppkommer av olika orsaker. De begränsningar som måste uppfyllas specificeras i koden och med ett undantag¹ behövs inga speciella åtgärder vid gjutning. Om kraven uppfylls behöver alltså inga beräkningar eller hänvisningar till typfall i litteraturen göras.

¹ I vissa fall kan motgjuten konstruktion behöva värmas upp till omgivningstemperaturen för att man ska få använda beräkningsmetod 1.

Beräkningsmetod 2

Beräkningsmetod 2 innebär att Tekniskt rapport 1997:02 (Emborg m.fl., 1997) får ligga till grund för arbets- och metodbeskrivningen för att undvika temperatursprickor. I denna rapport finns diagram där beräknade maximala spänningsnivåer kan utläsas för en del typfall. Diagrammen är uppdelade i fyra typfall varav två behandlar ytsprickor (symmetrisk och osymmetrisk temperaturfördelning) och två behandlar genomgående sprickor (enaxiellt tvång och tvång från förstyvande kant). Inom respektive typfall finns diagram för några olika typer av geometrier på konstruktionen.

Med hjälp av dessa diagram kan man för vissa givna situationer utläsa vilka maximala dragspänningsnivåer, η^{\max} , som uppstår i betongen. För de olika behandlande geometrierna på konstruktioner går det att ur diagram få information om nivån på η^{\max} när parametrar såsom gjutetappslängd, temperaturförhållanden, formrivningstider, med mera varierar. Med hjälp av detta kan man bedöma om aktuella spänningsnivåer är acceptabla.

Beräkningsmetod 3

Beräkningsmetod 3 betyder att ett beprövat och dokumenterat beräkningsprogram eller beräkningsmetod används för att bedöma maximala spänningskvoter i betongen under härdningsförloppet. Ofta modelleras temperaturer och spänningar för en specifik konstruktion i ett FEM-program. Då kan metod- och arbetsbeskrivning för att förhindra sprickbildning tas fram även då situationen inte uppfyller kraven för att använda beräkningsmetod 1 och fastän geometrier och förhållanden inte kan hittas i typfallen (beräkningsmetod 2). Vid beräkningsmetod 3 kan antingen generella eller provade materialparametrar användas vid beräkningarna. Om provade materialparametrar används i beräkningarna kan en lägre spricksäkerhet S användas, se avsnittet om sprickriskenivåer. Detta leder till en lägre beräknad sprickrisk vilket kan leda till att mindre åtgärder för att minska sprickrisken behöver vidtas.

2.3 Programmet Contest

2.3.1 Allmänt

Contest är ett tvådimensionellt FEM-program avsett för temperaturspänningsberäkningar i betong. Beräkningarna sker i två steg: i det första beräknas temperaturutveckling i konstruktionens delar och i ett andra steg beräknas spänningarna. Spänningsberäkningarna bygger på det temperaturförlopp som erhålles från temperaturberäkningarna och på en del övriga parametrar som anges i programmet (JEJMS Concrete, 2006). Dessa två steg beskrivs här endast översiktligt.

2.3.2 Temperaturberäkningar

I stora drag sker temperaturberäkningarna genom att konstruktionen först ritas upp i två dimensioner. Sedan delas denna upp i ett rutnät, en *mesh*. Randvillkor, temperaturegenskaper och initiala temperaturer hos konstruktionen definieras i programmet. Efter detta görs en finita-elementberäkning där värmeutvecklingen simuleras under en vald tidsperiod. Då erhålls temperaturen i konstruktionen olika delar under den tidsperiod som valts. Vid bedömning av sprickrisk för betongkonstruktioner simuleras ofta temperaturförloppet från det att eventuella

värmande eller kylande åtgärder påbörjats före gjutningen, fram till ungefär 1000 timmar efter gjutstart.

Programmet kan enbart analysera temperaturförloppet i konstruktionen i 2 dimensioner (i xy-planet). För att temperaturförloppet i en konstruktion ska kunna modelleras korrekt på detta sätt krävs att det i någon riktning i konstruktionen inte sker något värmeflöde (denna riktning kallas här z-riktningen). Detta är i princip fallet för en i z-axelriktningen långsträckt konstruktion som också har samma geometri och randvillkor längs denna z-axel. Eftersom värmeflödet i z-riktningen då kan antas försumbart kan värmeförloppet modelleras i enbart 2 dimensioner (xy-planet) (JEJMS Concrete, 2006).

Det följande beskriver på vilket sätt temperaturförlopp beräknas i Contest och är om inte annat anges hämtat från bilaga 1 till programmets manual (JEJMS Concrete, 2006). I den inre delen av konstruktionen antas värmestillståndet bestämmas enligt värmeledningsformeln i två dimensioner:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + Q_H \quad (2-2)$$

där

ρ	= materialets densitet, kg/m ³
c	= specifik värmekapacitet, J/(kg · K)
T	= temperatur, C°
k_x	= värmekonduktivitet i x-riktningen, W/(m · K)
k_y	= värmekonduktivitet i y-riktningen, W/(m · K)

Värmekonduktiviteten modelleras i Contest lika stor i x- och y-riktningen vilket innebär att $k_x = k_y$.

Vid externa ränder, gränsen där den i ett rutnät uppdelade konstruktionen slutar, beskrivs värmeflödet som:

$$q_n = h_{yta}(T_{yta} - T_{omg}) - I \quad (2-3)$$

där

q_n	= värmeflöde från kroppen till randen, W/m ²
h_{yta}	= yttre randens värmeövergångstal W/(m ² · K)
T_{yta}	= temperaturen på randen, K
T_{omg}	= omgivningens temperatur, K
I	= till randytan inkommen värmestrålning, W/m ²

En rands värmeövergångstal h_{yta} kan anges manuellt i programmet. Det går också att ange att en rand är en "fri yta" vilket betyder att programmet sätter den yttre randens värmeövergångstal till:

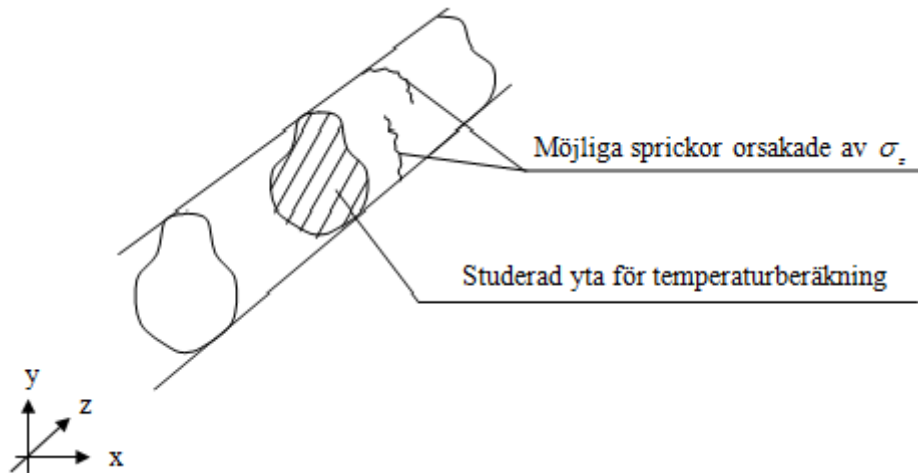
$$h_{yta} = h_{fri} = \begin{cases} 5,6 + 3,95v & \text{för } v < 5 \text{ m/s} \\ 7,8v^{0,78} & \text{för } v > 5 \text{ m/s} \end{cases} \quad (2-4)$$

där

h_{fri}	= värmeövergångstalet för en fri yta mot luft, W/(m ² · K)
v	= vindhastigheten, m/s

2.3.3 Spänningsberäkningar

Med spänningsberäkningarna i Contest analyseras spänningarna i ortogonalriktningen till den yta som studerats vid temperaturberäkningarna. I figur 2-5 innebär det att de studerade spänningarna är i z-riktningen.



Figur 2-5 Illustration av studerad yta vid temperaturberäkningarna. Riktningen på den potentiella sprickbildning som studeras och som kan uppkomma på grund av motsvarande temperaturförlopp visas också. Återgivning från JEJMS Concrete (2006).

Programmet beräknar spänningarna genom finita elementberäkningar med samma rutnät som i temperaturberäkningarna. Spänningarna beräknas utifrån hur temperaturen förändras och de tar även hänsyn till *autogen* krympning, den krympning som sker vid hydratationen om inget vatten varken tillförs eller transporteras bort från konstruktionen. Spänningarna är också beroende av vilket tvång konstruktionen är utsatt för. I beräkningarna tas hänsyn till detta via en tvångsfaktor för translation och en för rotation. Förenklat kan tvångsfaktorerna sägas beskriva hur förhindrad konstruktion är att translatera i z-riktningen respektive rotera sig kring x-axeln. Bedömningar av dessa måste göras från fall till fall och de bör grunda sig på hur den modellerade konstruktionen mothålls av andra konstruktioner och av marken.

Maximala dragspänningar och maximala töjningar kan erhållas som resultat från spänningsberäkningarna i Contest. Det kan med hjälp av ekvation 2-1 kontrolleras om den erhållna maximala spänningen är acceptabel givet aktuell sprickriskfaktor.

2.4 Temperaturegenskaper

Med datorprogram som utför numeriska simuleringar kan temperaturförlopp precis bestämmas för olika tidpunkter i en betongkonstruktion. För att sådana modelleringar ska ge rätt resultat måste givetvis de temperaturegenskaper som anges som indata till programmen stämma överens med verkligheten. Temperaturegenskaperna som behandlas nedan är främst densiteten, specifika värmekapaciteten och värmekonduktiviteten.

2.4.1 Temperaturegenskaper hos betong

Värmekonduktivitet

Värmeledningsförmågan, eller värmekonduktiviteten, hos betong är en av de viktigaste parametrarna för att korrekt förutsäga temperaturförlopp i betong (Kook-Han m fl., 2003). Värmekonduktiviteten, definierad som förhållandet mellan värmeflödestätheten och temperaturgradienten, är ett mått på hur bra ett material leder värme. Den kan för olika betong i normala temperaturförhållanden variera i spannet 1,4-3,6 W/m · K (Neville, 1981).

De faktorer som har störst inverkan på betongens värmekonduktivitet är volymandel stenmaterial och fuktigheten hos betongen (Kook-Han Kima m fl., 2003). Högre volymandel sten ger en högre värmekonduktivitet. Värmekonduktiviteten ökar även med ökad fuktighet i betongen eftersom vattnet då ersätter luft som har en låg värmekonduktivitet. Ett högre v_{ct} , ger cementpastan och därmed betongen högre värmekonduktivitet. En betongs v_{ct} , eller vattencementtalet, definieras som viktandelen vatten dividerat med viktandelen cement. Vilken typ av stenmaterial som används har också betydelse för värmekonduktiviteten. Det beror på att olika bergarter har olika värmekonduktivitet. Främst kvartsrika bergarter har en värmekonduktivitet som markant skiljer sig från ett medelvärde på värmekonduktiviteten hos kristallina bergarter i Sverige. I tabell 2-6 redovisas uppmätta värden av värmekonduktivitet från prov tagna i Sverige för några vanliga bergarter.

Tabell 2-6 Värmekonduktiviteten (W/m·K) - medelvärden av en stor mängd olika prover för varje bergart. Återgivning av Sundberg m. fl. (1985).

Bergart	Värmekonduktivitet	Standardavvikelse.
Granit	3,47	0,38
Granodiorit	3,34	0,292
Tonalit	3,16	0,269
Aplit, Pegmatit	3,31	0,477
Ryloit, dacit	3,37	0,397
Gnejs	3,47	0,465
Kvartsit	6,62	0,628
Övrig kvartsit	4,65	0,681
Medel alla prov	3,45	

I ett examensarbete av Chan (2014) blandades betong i laboratorium med ballast från olika bergtäkter runt om i Sverige. Efter att proverna torkats i ugn mättes värmekonduktiviteten 14 dagar efter blandningen och resultaten varierade mellan 1,4 och 2,92 W/m · K. Den betong vars värmekonduktivitet mättes till 2,92 W/m · K, vilket var det klart högsta värdet, hade en ballast bestående av i princip enbart kvartsit. Betonghandboken Material presenterar en ekvation av Loudon (1968) för att bedöma värmekonduktiviteten λ_c när torrdensiteten och fuktinnehållet är känt:

$$\lambda_c = k_0 \cdot k_w \cdot \lambda_0 \quad (2-5)$$

där k_0 = materialkonstant ≈ 1 för betong
 k_w = fuktfaktor
 λ_0 = värmekonduktiviteten hos ugnstorr material

I tillhörande diagram går att ta fram k_w och λ_0 som funktion av fukthalten i volymprocent och betongens torrdensitet. Fuktfaktorn enligt Loudon är ungefär 2,6 vid en fukthalt av 20 procent och går mot 1 vid en fukthalt av 0 procent. Noggrannheten uppskattas vara $\pm 10\%$. Se bilaga A.1 där ekvation 2-5 används.

Specifika värmekapaciteten hos betong

Specifika värmekapaciteten hos betong bestäms av de ingående delmaterialens värmekapaciteter och proportioner. Cementpastans värmekapacitet beror av temperatur, fuktinnehåll och vattencementtal och värmekapaciteten blir högre när dessa parametrar ökar. Spridningen i värmekapacitet olika bergarter emellan är relativt liten, den varierar mellan 750 och 880 J/kg·K, och dess beroende av temperatur, fukt och gradering är litet. Den hårdnade betongens värmekapacitet är cirka 10-20 procent lägre än betongmassans värmekapacitet på grund av att vatten binds vid hydratiseringsprocessen. Normala värden på specifika värmekapaciteten hos hårdnad betong är 900-1000 J/kg·K (Neville, 1981).

Betongs densitet

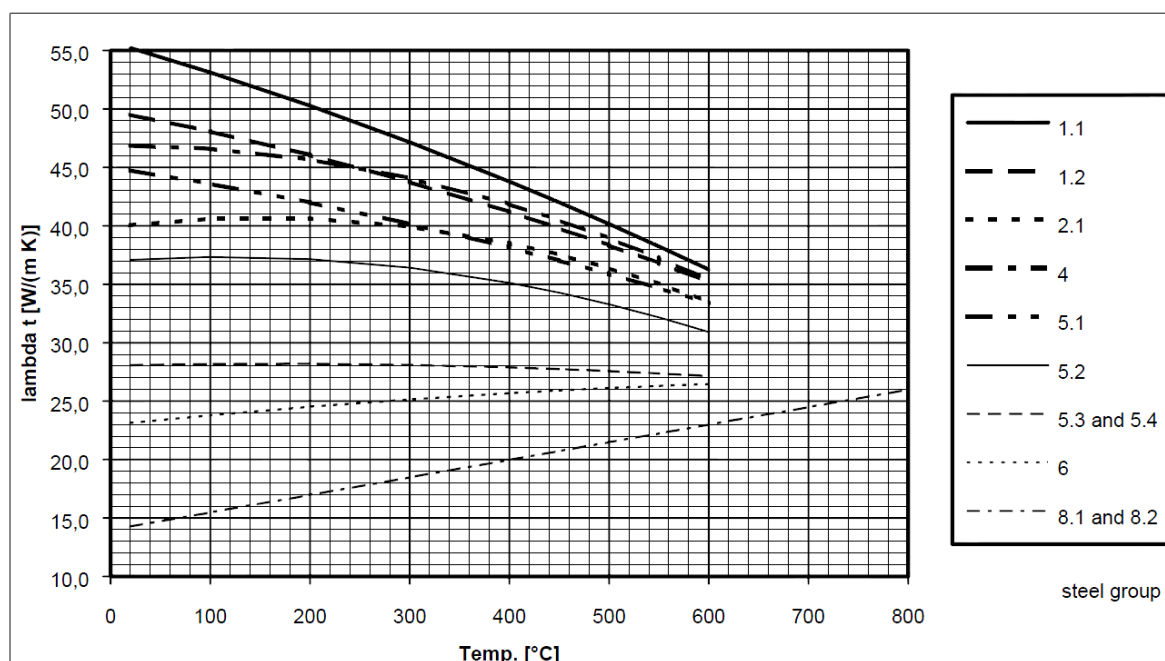
Betongs densitet är vanligen kring 2400 kg/m³ då normala ballastmaterial används såsom granit, gnejs eller kalksten. Lättballastbetong i vilken andra ballastmaterial används kan ha så låg densitet som 500 kg/m³ (Neville, 1981). Densiteten kan anges som torr densitet eller vattenmättad densitet. För betong med normal ballast är skillnaden mellan torr densitet och vattenmättad densitet i storleksordningen 200 kg/m³ (Fagerlund, 1994).

2.4.2 Temperaturegenskaper hos materialen i försöken

Stål

Stål har en värmekonduktivitet som varierar mellan ungefär 10 och 85 W/m·K beroende på kemisk sammansättning, temperatur och mikrostruktur. Generellt har legeringar lägre värmekonduktivitet än rena metaller såsom guld, silver, koppar och järn. Värmekonduktiviteten förändras med temperaturen. Denna förändring är stor vid temperaturförändringar på flera hundra grader, men inga dramatiska förändringar sker vid normala temperaturer. Mikrostrukturen, dvs. stålets uppbyggnad på mikronivå i form av till exempel faser, korn och inneslutningar, påverkar temperaturen vilket betyder att två stål med samma kemiska sammansättning kan ha olika värmekonduktivitet. Mikrostrukturen kan förändras vid temperaturförändringar, som till exempel kan ske vid tillverkningen (Peet, 2011).

Vid tillverkningsprocessen av armeringsjärn av kvalitet B500BT, den i Sverige mest tillverkade armeringskvaliteten, genomgår stålet en värme- och kylbehandling. Denna påverkar stålets kristallina struktur på olika sätt i kärnan jämfört med i järnets yttre skikt (BE Group, 2014).



Figur 2-6 Värmeledning för stål i olika stålgrupper enligt ISO/TR 15608:20 (Svensk standard, 2014). Stålgrupp 2.1 står för termomekaniskt behandlad finkorniga stål med en sträckgräns mellan 360 och 460 MPa. Återgivning från (Svensk standard, 2014).

I figur 2-6 ovan visas värmeledningskoefficienten för ett flertal stålgrupper som delats in efter kemisk sammansättning, tillverkningsätt och sträckgräns. Stålet i armeringsjärn B500BT är termomekaniskt behandlat och har sträckgränsen 500 MPa vilket innebär att det tillhör stålgrupp 2.2. Värdet för värmeledningskoefficienten för stålgrupp 2.2 har inte hittats men troligen ligger de nära dem för stålgrupp 2.1 som också är termomekaniskt behandlade men med en något lägre sträckgräns. Betonghandboken material (1994) föreslår värdet 45 W/m·K för värmeledningskoefficienten i stål generellt.

Berg

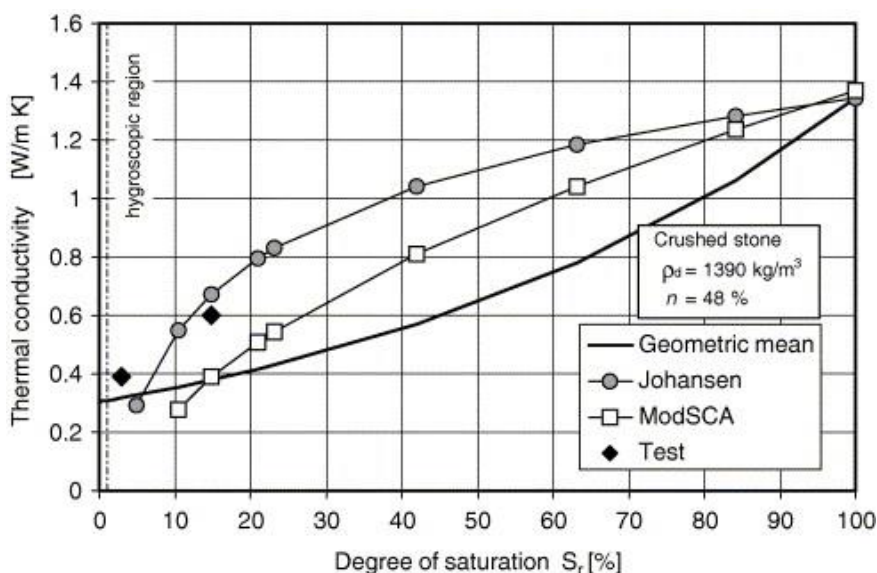
Bergarter i Sverige har i princip alltid en densitet mellan 2600 och 2800 kg/m³ (Sunberg m. fl., 1985). Bergarters specifika värmekapacitet är starkt temperaturberoende men skillnaderna blir påtagliga först sett över ett stort temperaturområde. Inga stora skillnader finns mellan olika bergarters specifika värmekapacitet och de flesta har ett värde mellan 700 och 900 J/kg·K. Värmeledningskoefficienten för olika bergarter varierar vilket framgår av tabell 2-6. Medelvärdet på värmeledningskoefficienten för samtliga prov på olika bergarter som behandlas av Sundberg m. fl. (1985) var 3,45 W/m·K.

Sprängsten

Som dränering under bottenplattor av betong läggs ofta ett lager av sorterat stenmaterial med viss kornstorleksfördelning. För att materialet ska vara dränerande och inte suga för mycket fukt får det inte innehålla för mycket finmaterial. Densiteten hos sorterat stenmaterial med brant siktkurva är i regel lägre än för samma material med en bredare fördelning av stenstorlekar, eftersom detta ökar luftvolymen mellan stenpartiklarna (Coté & Conrad, 2005). Avgörande för ett stenmaterials densitet är dess porositet, det vill säga hur stor volymandel

Luften mellan stenarna utgör av materialet. I publikation 2001:101 (Vägverket, 2001) föreslår vägverket en porositet på 40 procent för sprängsten generellt, vilket innebär en torrdensitet på ungefär 1600 kg/m^3 för bergarter med normal densitet. Specifika värmekapaciteten hos sprängsten är vid torrt material lika med den för stenmaterialet, dvs oftast ungefär $800 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$. Om materialet är blött ökar naturligtvis både specifika värmekapaciteten och densiteten. Sten- och grusmaterial binder dock inte så mycket vatten hygroskopiskt ens vid 100 procents luftfuktighet vilket figur 2-7 visar. Därför kommer sprängsten ha ungefär samma densitet och specifik värmekapacitet så länge det inte blöts upp eller sugit vatten kapillärt. Dräneringsmaterial innehåller dock ofta, trots sortering, en liten del finmaterial vilket gör att en del vatten kan sugas upp i materialet kapillärt om en vattenkälla finns under (Rantala & Leivo, 2007).

Mättnadsgraden, hur stor volymandel av porvolymen som är fylld med vatten, är ett mått på hur vattenmättat ett material är och det påverkar temperaturegenskaperna. Värmeledningsförmågan hos dräneringsmaterial påverkas av vilka kontaktytor som finns mellan stenarna eftersom det är genom dessa som värmen i huvudsak kan ledas. Den är beroende av stenmaterialets mättnadsgrad och skillnaden mellan ett ugnstorkat material och ett som är dränkt i vatten är stor. Men liksom för densiteten och värmekapaciteten påverkas inte heller värmeledningsförmågan så mycket av enbart en hög luftfuktighet. Rantala och Leivo (2007) undersökte värmeledningsförmågan experimentellt för tre typiska dräneringsmaterial: ett sandmaterial, ett stenmaterial med viss mängd sandfraktioner men i huvudsak större fraktioner samt ett sprängstensmaterial med i princip enbart fraktioner större än sand. Värmeledningsförmågan undersöktes för två mättnadsgrader och jämfördes med tre icke-experimentella metoder från litteraturen för att bedöma jordmaterials värmeledningsförmåga. Resultaten i figur 2-7 nedan talar för att sprängsten har en relativt låg värmeledningsförmåga, omkring $0,5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$. Vägverket (2001) föreslog $1,3 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ för materialet för både frusen och icke-frusen sprängsten. Sprängsten är ett vitt begrepp och det är möjligt att olika kornstorleksfördelningar starkt påverkar hur stor värmeledningsförmåga blir varför ett generellt värde på värmeledningsförmågan hos sprängsten är svårt att ge.



Figur 2-7 Värmeledningsförmåga för ett exempel på dräneringsmaterial med stenfraktionerna 4-16 mm. Kurvorna visar tre icke-experimentella metoder att bedöma värmeledningsförmågan hos jordmaterial samt laboratorieresultat vid två mättnadsgrader. Återgivning från Rantala och Leivo (2007).

Kapitel 3

3 Förutsättningar

3.1 Metodbeskrivning

3.1.1 Arbetsgång

Målet med arbetet var att ta fram en metod för att kunna räkna med värmemattan i programmet Contest på ett sätt som är likvärdigt med hur värmemattan fungerar i verkligheten. För att göra detta gjordes inledningsvis fyra fullskaleförsök där mattorna användes för att värma underliggande betong. Samtidigt som mattorna värmdes underliggande betong mättes temperaturen kontinuerligt i några mätpunkter i den underliggande betongen. Hur respektive försök gick till beskrivs i avsnitt "3.2 Fältförsöken".

Efter att försöken genomförts provades i Contest vilka metoder som skulle kunna användas för att modellera värmemattans uppvärmande och isolerande effekt i programmet. För att bedöma vilken metod som var bäst för detta gjordes i Contest numeriska simuleringar på en fiktiv bottenplatta där olika metoder provades och de erhållna resultaten jämfördes. I samband med detta undersöktes även några faktorer som påverkar temperaturförloppet i betongen när den värms upp av värmemattan. Dessa delar beskrivs i avsnittet "3.3 Förberedande numeriska simuleringar".

I nästa skede övergicks till att göra simuleringar (efterkalkyler) av de i verkligheten genomförda fältförsöken. En modell i Contest konstruerades för vart och ett av försöken. De numeriska simuleringarna av fältförsöken är uppdelade i två delar: känslighetsanalysen och jämförelsen mellan modellerade och uppmätta resultat. Dessa två delar beskrivs i avsnitt "3.4 Numeriska simuleringar av fältförsöken".

I känslighetsanalysen analyserades för varje försök hur olika parametrar i modellerna av försöken påverkade temperaturförloppen i betongen. Inga jämförelser gjordes med uppmätta resultat. I denna varierades en parameter i indata i taget och resultatet visade vilken påverkan respektive parameter hade på de modellerade temperaturförloppen och därmed också på bedömningen av värmemattans uppvärmande egenskaper. Osäkerheterna som fanns i modellerna rörde främst de ingående materialens temperaturegenskaper. Temperaturförloppen från varje försök jämfördes sedan med temperaturförlopp från olika modelleringar för att hitta de parametrar för värmemattan i Contest som resulterade i bra överensstämmelse med försöken. Eftersom detta krävde olika parametrar för de olika försöken diskuteras slutligen hur man kan välja en generell metod eller om det är bättre att variera sättet att modellera värmemattan på beroende på vilka väderförutsättningar som gäller.

För att sätta värmemattan i ett sammanhang gjordes till sist efterkalkyler med avseende på uppsprickning för två verkliga gjutningar i tunneln där värmemattan använts som åtgärd. Hur

detta gjordes beskrivs i avsnitt 3.5 "Exempel på användning av värmemattan". Slutligen gjordes en ekonomisk jämförelse mellan att använda antingen värmemattor eller värmekablar för att värma upp betongen. Metoden för det beskrivs i avsnitt 3.6 "Ekonomisk jämförelse med värmekablar".

3.1.2 Betongtunneln i Gamla Uppsala

Fältförsöken i detta arbete genomfördes i samband med byggandet av en 600 meter lång betongtunnel. Tunneln ska gå genom samhället Gamla Uppsala som är beläget strax norr om Uppsala. Dimensionen på tunnelkonstruktionens tvärsnitt (se figur 3-4), gjutetappsindelningen och gjutetappslängderna är i princip likadana längs hela tunnelns längd. Principiell uppbyggnad av betongkonstruktionen visas i figur 2-2 och figur 2-3. Dilatationsfogar är förlagda var fjortonde meter och de genomkorsar valv, väggar och bottenplatta. Gjutningarna inom dessa fyrtiometersmonoliter är indelade i två gjutningar av bottenplattor om 20 meter och fyra gjutningar av väggar om tio meter.

För att hantera de sprickrisker som följer av denna gjutetappsindelning upprättades en arbetsbeskrivning för begränsning av sprickrisken. I denna föreskrivs både konventionell användning av värmekablar och användning av den värmematta vars uppvärmande funktion undersökts i det här arbetet. Vid de gjutningar som gjorts enligt denna arbetsbeskrivning uppmättes temperaturförlopp i aktuella konstruktionsdelar. Två av dessa gjutningar studerades i detta arbete genom efterkalkyler av temperatur- och spänningsförlopp.

3.2 Fältförsöken

3.2.1 Förutsättningar

Fyra försök genomfördes i syfte att samla in mätdata för att kunna bedöma hur värmemattan uppfyller sin funktion att värma underliggande betongplatta. Försöken som genomfördes var snarlika i sitt utförande men geometrier och väder- och temperaturförhållanden var olika för varje försök. Försöken gick ut på att med hjälp av temperaturgivare mäta temperaturutvecklingen i ett antal punkter i betongen som mattorna värmdes. För de tre första försöken gjordes temperaturmätningar i två *mätserier* och i det sista i enbart en. Med mätserier menas i den här texten de vertikala rader av punkter där temperaturen mättes vid försöken. Eftersom mätserierna inom samma försök haft delvis olika förhållanden har de studerats separat.

För att enkelt kunna jämföra modelleringar, temperaturmätningar och övriga diagram har tidpunkter angivits i relativ tid. Det betyder att tiden räknas i timmar med start från då temperaturmätningen började för respektive försök, vilket för samtliga försök var inom tre timmar före det att värmemattorna startades. Tabell 3-1 nedan ger översiktlig information av de genomförda försöken.

Tabell 3-1 Översiktligt information för de fyra försök som gjorts.

	Försök 1	Försök 2	Försök 3	Försök 4
Gjutdatum	2014-09-10	2015-03-24	2015-03-24	2015-05-07
Datum värmning	2014-10-09 till 2014-10-13	2015-04-03 till 2015-04-08	2015-05-27 till 2015-06-03	2015-06-10 till 2015-06-16
Värmningstid (h)	85	123	165	135 (stopp 11 h)
Konstruktionsdel	Bottenplatta	Bottenplatta	Bottenplatta	Valv
Tjocklek betong (cm)	69,2	66 resp. 67,2	66 resp. 67,2	92
Medeltemp. btg vid start, (°C)	10	13	10	16
Medeltemp. btg max, (°C)	21	28	27	30
Medeltemperatur i luften (°C)	10,0	6,1	12	13

Plats

De fyra försöken gjordes i Gamla Uppsala i samband med byggandet av en betongtunnel av typen cut-and-cover. Tre av dem genomfördes på tunnelns bottenplattor medan ett genomfördes på tunnelns valv. Tunnelns bottenplattor är belägna cirka 8 meter under marknivå medan valven ligger i marknivå.

Värmemattorna placerades så att de täckte en radie av minst två meter runt de mätpunkter som gjutits in i betongen. Detta var dels för att undvika ett tredimensionellt värmefflöde som inte kan modelleras i Contest, dels för att minimera de faktorer som påverkar temperaturutvecklingen i mätpunkterna. Om täckningen med värmemattor slutar för nära mätpunkterna går det inte att på ett rimligt sätt modellera temperaturförloppet i två dimensioner.

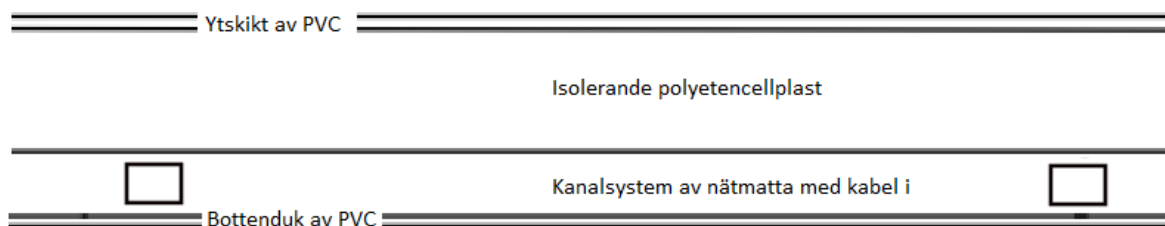
Värmemattan

Värmemattan har en storlek av 5×1 meter och visas i figur 3-1. Nätkabeln är placerad i mitten av mattans längd och på denna finns ett grenuttag med tre uttag. Dess specificerade elektriska effekt är 590 watt, vilket motsvarar en ström av 2,6 ampere vid 230 volts nätspänning. Raderna med värmekabeln som ligger i värmemattan är lagda med 90 mm mellanrum.



Figur 3-1 Värmemattan som behandlas i detta arbete. Den högra bilden visar schematiskt hur värmekablarna är dragna.

Värmemattan är uppbyggd av ett antal lager vilket illustreras av figur 3-2. Underst ligger en skyddande duk av PVC-material av ungefärlig tjocklek 1 mm. Ovanför det ligger ett slags nät av plastmaterial i vilket värmekablarna är svetsade. Nätet mellan värmekablarna och ytskiktet är cirka 1 mm tjockt. Ovanför nätet är värmemattan isolerad av ett 11 mm tjockt lager av polyetencellplast med värmekonduktiviteten $0,40 \text{ W/m}\cdot\text{K}$. Ovanför isoleringen skyddas mattan av ett övre ytskikt av PVC-material.



Figur 3-2 Principiell uppbyggnad av värmemattan.

Betongens egenskaper

Betongtyperna i bottenplattan och valvet är två sorters anläggningsbetong i hållfasthetsklass C30/37 med specificerat vattencementtal 0,50. Lufthalten provas före gjutning och ska vara minst 4 %. Densiteten var cirka 2280 kg/m^3 hos betongmassan enligt tillverkaren.

Tabell 3-2 Betongrecept² för den uppvärmda betongen.

	Viktandelar bottenplattor (kg/m ³)	Volymandel bottenplattor (m ³ /m ³)	Viktandelar valv (kg/m ³)	Volymandel valv (m ³ /m ³)
Anläggningscement	385	0,308 Cementpasta	370	0,297 Cementpasta
Vatten	185		178	
Flytmedel	1,93		2,22	
Luftporbildare	1,15		0,555	
Retarder	0		0,740	
Luft	0	0,04	0	0,04
Ballast 0-8 mm	939 (55% av total ballast)	0,652 Stenmaterial	950 (55% av total ballast)	0,663 Stenmaterial
Ballast 8-16 mm	290 (17% av total ballast)		294 (17% av total ballast)	
Ballast 8-25 mm	478 (28% av total ballast)		484 (28% av total ballast)	

Cementet var ett anläggningscement från Degerhamn av typen CEM I 42,5 N - SR 3 MH/LA. Det hade en specifik yta av 310 m²/kg och en densitet på 3200 kg/m³. 0-8 materialet i ballasten består av naturgrus medan de större fraktionerna 8-16 och 8-25 utgörs av krossmaterial. Naturgruset tas från en annan täkt än krossmaterialet. Med utgångspunkt från de petrografiska undersökningar som gjort vid aktuell bergtäkt, så består stenmaterial i ballasten i huvudsak av bergarterna tonalit och granodiorit (tillsammans mer än 90 procent). Grusmaterialet består av ett flertal olika mineral som företrädesvis är uppbyggda av kvarts och fältspater (Wallman, 2014) (Stenlid, 2014).

Bottenplattan och valvet är armerat med ett lager i överkant och ett i underkant. Täcksiktet är 40 mm i överkant och 110 mm i underkant för bottenplattorna och 40 mm i över- och underkant för valvet. Armeringskvaliteten är B500BT.

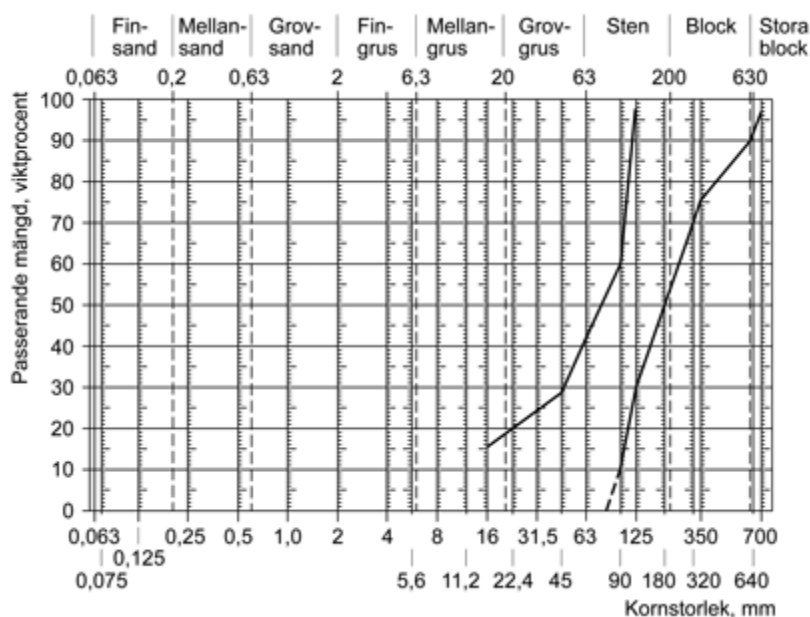
När bottenplattorna och valvet vid försöken värmdes upp var betongen relativt nygjuten, som mest hade det gått cirka 2 månader sedan gjutning. Att betongen var relativt nygjuten, att betongens tjocklek var relativt stor och hade ett relativt högt vattencementtal talar för att medelfuktigheten i plattan var hög vid försöken. Visserligen sker i samband med betongs hydratationen en självuttorkning som sänker den relativa fuktigheten i betongen. Självuttorkningen är dock mindre i betong med högre vattencementtal. För betong med vattencementtalet 0,50 är den relativa fuktigheten även efter 3 månader av enbart självuttorkning över 90 procent (Fagerlund, 1994). Betongen kan även torka ut på grund av att fukttransport sker till omgivande luft. Denna uttorkning är proportionell mot plattjockleken i kvadrat (Nilsson, 1994). De 66-92 cm tjocka plattor som studerats i försöken kommer därför torka ut betydligt långsammare än till exempel ett golvbjälklag med tjockleken 10 cm. På de tre mittersta meterna av bottenplattan ansamlades generellt vatten efter regn, vilket förhindrat uttorkning vid dessa tillfällen. Det är därför rimligt att anta att den relativa fuktigheten i betongen var över 90 procent när försöken genomfördes.

² Volymandelarna i tabell 3.2 har beräknats från kända viktandelar för respektive ingrediens, känd densitet hos betongmassan, känd densitet hos cementet, känd lufthalt samt antagandet att cementpastans volym är summan av cementets och vattnets volymer

Sprängsten och berg

En bädd av 500 mm sprängsten är lagd direkt på berget och utgör underlag för de bottenplattor som studerats. Huvuddelen av materialet ska bestå av relativt stora stenar, delar av material kan bestå av uppemot halvmeterstora block vilket visas i figur 2-2. I övre delen lades finare material för att få en jämn yta.

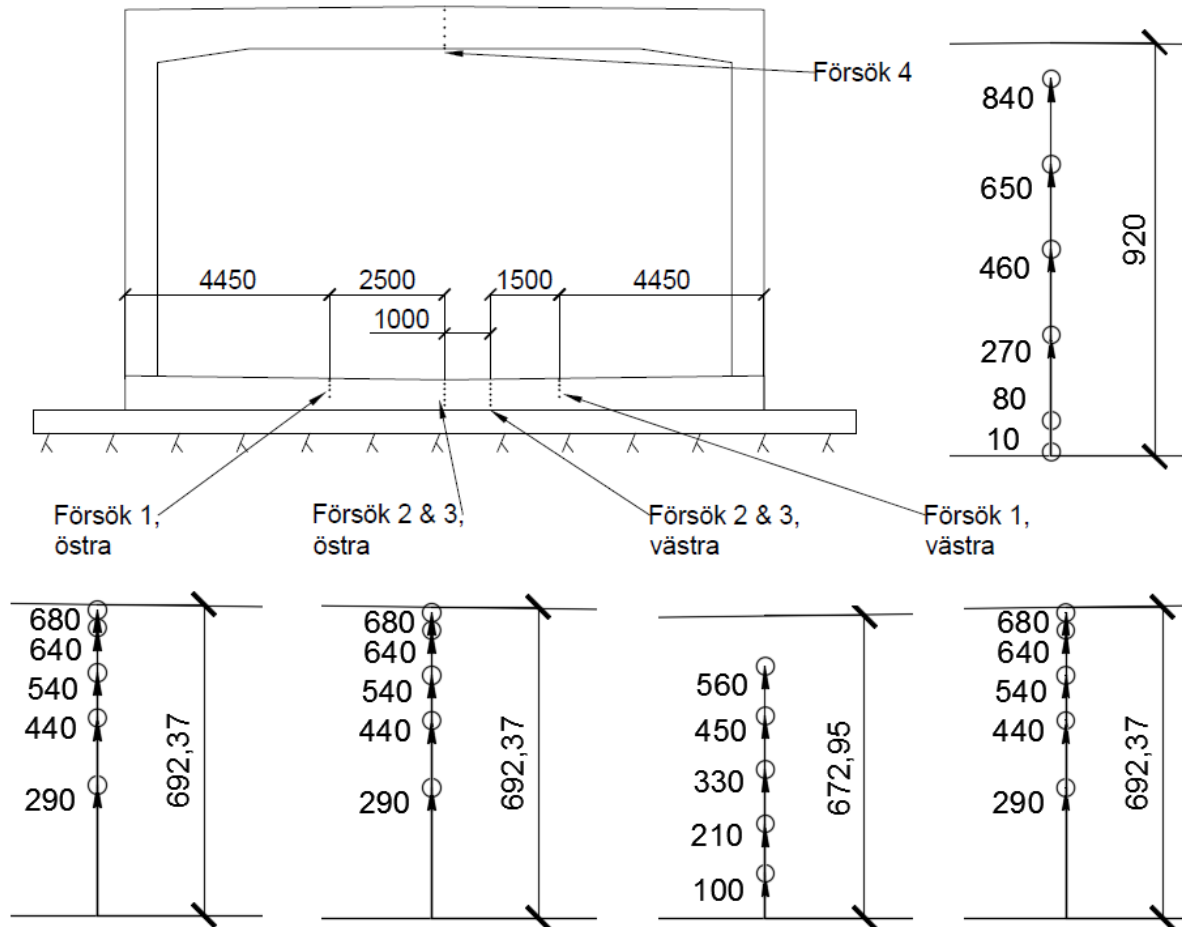
För att komma ner på rätt nivå för bädden sprängdes och schaktades det befintliga berget bort. Direkt under sprängsten är det därför berg som i det övre lagret kan bestå av större stenar och block snarare än fast berg. Berggrunden består i huvudsak av ryolit och dacit (Sveriges geologiska undersökning, 2015).



Figur 3-3 Kornstorleken på sprängstenen enligt för projektet gällande AMA-kod. Återgivning från Svensk byggtjänst (2010).

Mätpunkter

Mätpunkternas placering i tunnelkonstruktionen visas i figur 3-4. På grund av framdriften av byggnadsarbetena kunde inte alla försök i bottenplattorna göras med samma mätpunkter. Detta beror på att när väggarna väl gjutits är det riskabelt ur sprickrisksynpunkt att värma upp bottenplattan. Därför gjordes försök 2 och 3 på en annan bottenplatta än försök 1 vilket inte framgår av figur 3-4.



Figur 3-4 Mätseriernas placering i tunnelvärsnittet och deras mätpunkters höjd i betongen. Mått i millimeter.

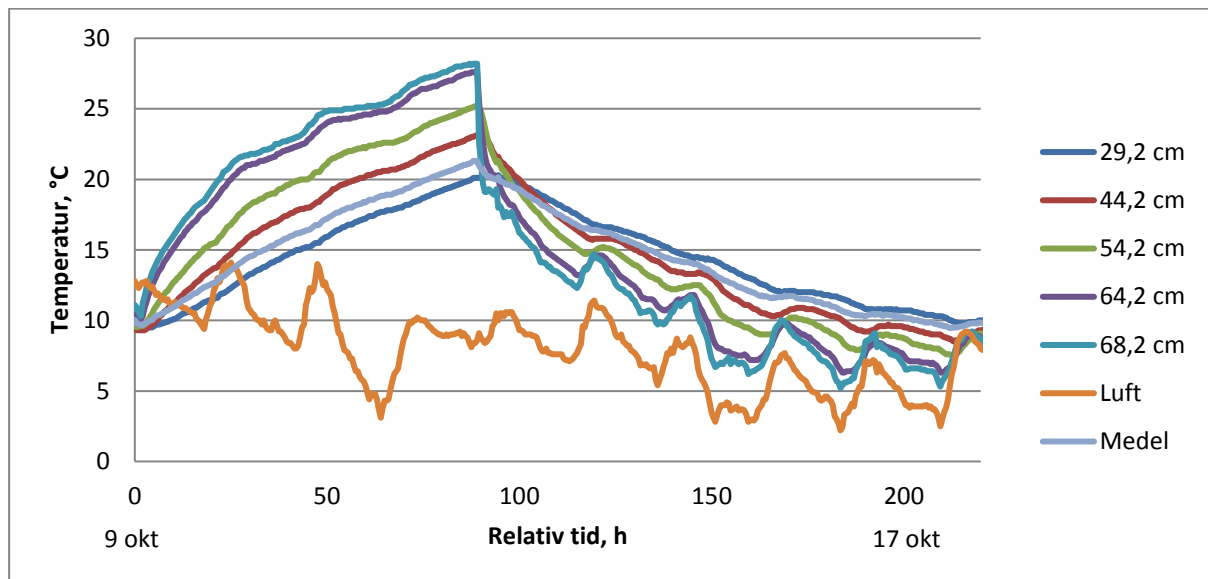
3.2.2 Försök 1

Försök 1 var det första som gjordes. Det skiljer sig från de övriga eftersom temperaturgivarna inte göts in i bottenplattan. Istället borrades i efterhand fem olika djupa hål och en temperaturgivare placerades i botten av varje hål. Hålen göts sedan igen och bruket fick brinna några dagar innan värmningen påbörjades. Två serier med fem mätpunkter placerades i borrhål, totalt borrades tio hål, och deras position visas i figur 3-4. Lufttemperaturen mättes vid försöket i ett skuggat läge vid bottenplattan.

Tunneln sträcker sig i syd-nordlig riktning. Tio mattor användes varav de fem längst österut täcktes med 10 mm tjocka betongtäckmattor, se figur 3-5. Denna placering av mattorna innebar att de östra mätpunkterna låg i mitten av den yta som täcktes med enbart mattor och att de västra mätpunkterna låg i mitten av partiet som täcktes av både mattor och isolering. Detta innebar att de två mätserierna med vardera fem mätpunkter uppmätta resultat svarande mot två skilda försökssituationer. Mattorna var igång kontinuerligt under hela värmningen som varade i 85 timmar. När mattorna stängts av plockades isolering och värmemattor bort så att betongytan var frilagd. Temperaturförloppen för de västra mätpunkterna i betongen presenteras i figur 3-6.

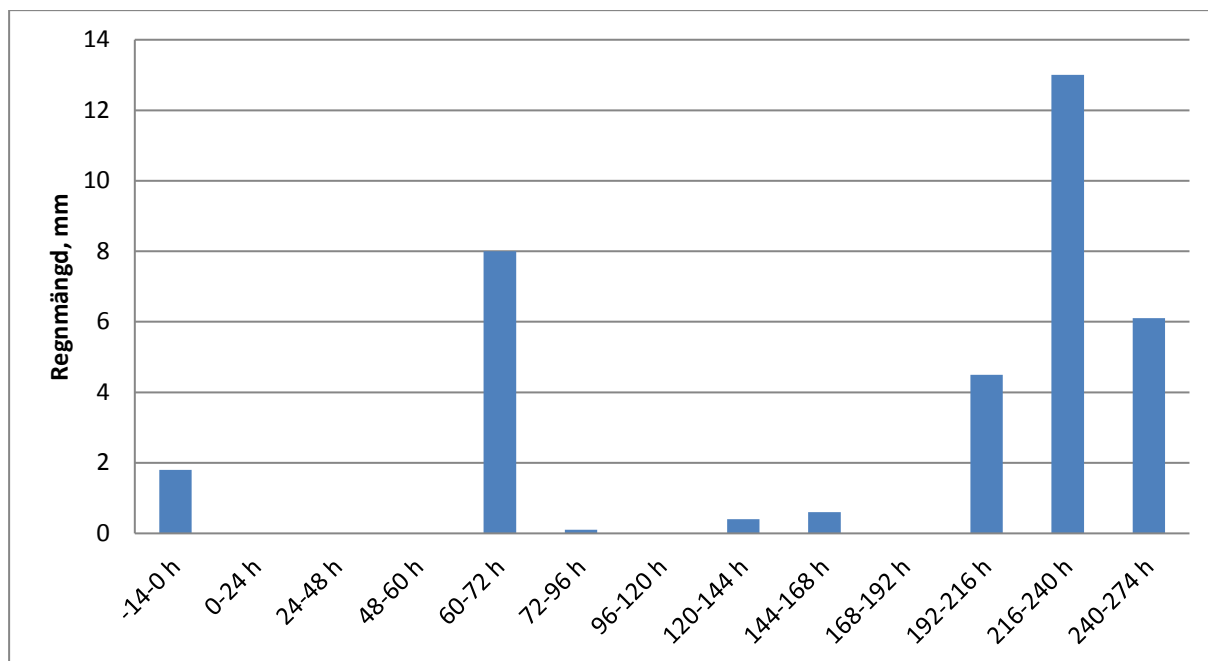


Figur 3-5 Mattor (gula) och isolering (grå) utlagda på bottenplattan. De västra mattorna täcktes med 10 mm betongtäckmatta.

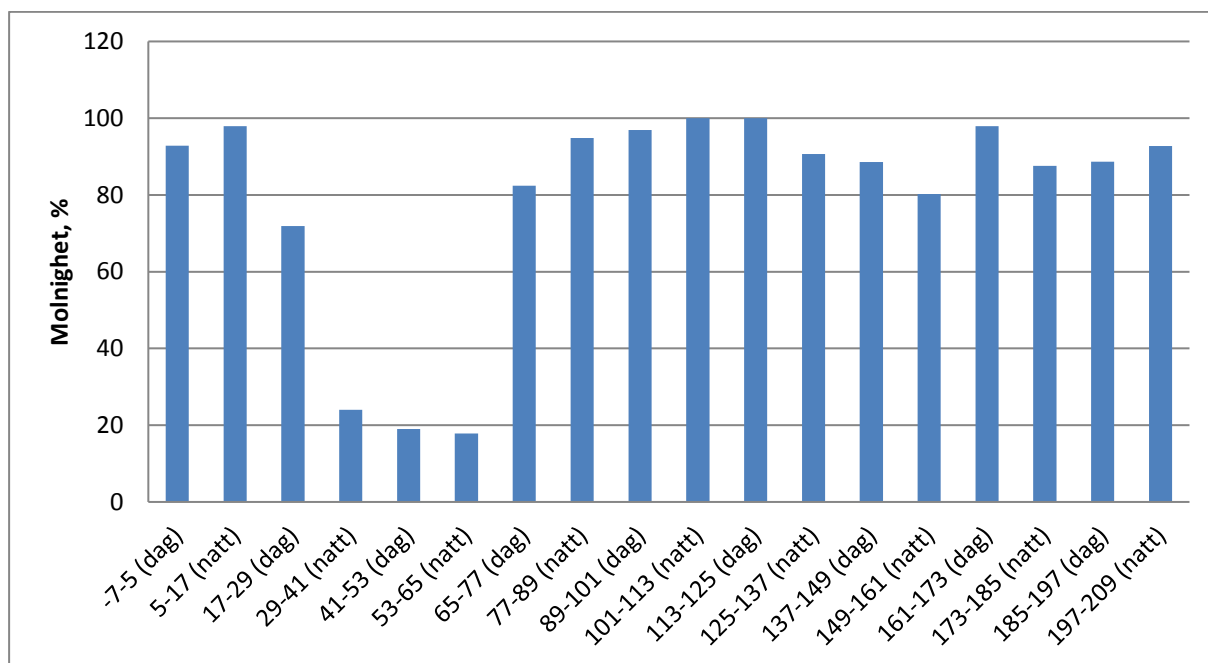


Figur 3-6 Temperaturutveckling på olika avstånd från underkant betong. Försök 1, västra mätpunkter.

I figur 3-7 och figur 3-8 visas uppmätt regn- respektive molnmängd under försöket. Det regnade timmarna innan mattorna temperaturmätningen startade och på grund av bottenplattans fall ansamlades vatten kring mitten av bottenplattan, vilket är bottenplattans lågpunkt. Det var sedan uppehåll till ungefär 60 timmar relativ tid då det regnade mycket. Mattorna var fuktiga under hela försöket och ett lager med ansamlat vatten täckte ungefär de 2 mittersta meterna under hela försöket. Eftersom mätpunkterna ligger 2,5 meter från mitten var det troligen inte stående vatten vid denna position men definitivt fuktigt. Det var omväxlande molnigt och soligt under försöket.



Figur 3-7 Regnmängd uppmätt vid Uppsala flygfält under försök 1 (SMHI, 2015).



Figur 3-8 Andel av himlen som var täckt av moln vid Uppsala flygfält under försök 1 (SMHI, 2015). Medelvärde av uppmätta timvärden.

3.2.3 Försök 2

Vid försök 2 göts temperaturgivare fästa på ett glasfiberstag in i betongen. Två stag med vardera 5 mätpunkter göts in i betongen. Sju mattor användes och de placerades symmetriskt över de två mätserierna vars position visas i figur 3-4. Luften mättes i ett skuggat läge invid bottenplattan. Försökssituationen som den såg ut innan och efter värmemattorna täcktes visas i figur 3-9 och figur 3-10 nedan.

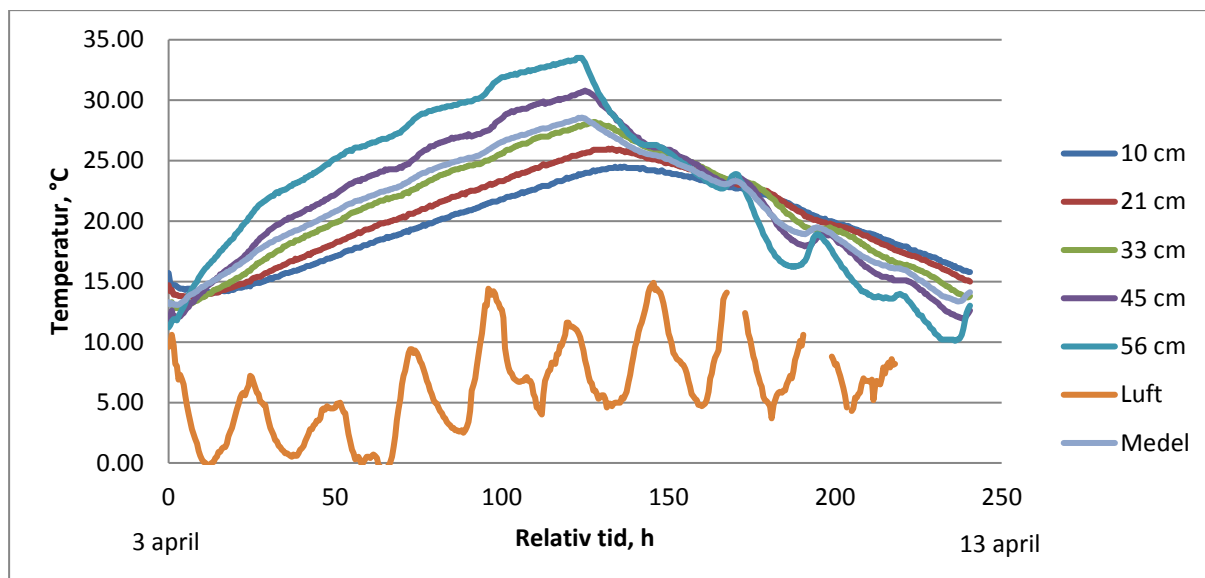


Figur 3-9 Värmemattorna innan de täcktes med isolering. Två sprayfärgade punkter kan urskiljas som markerar mätpunkternas horisontella läge.



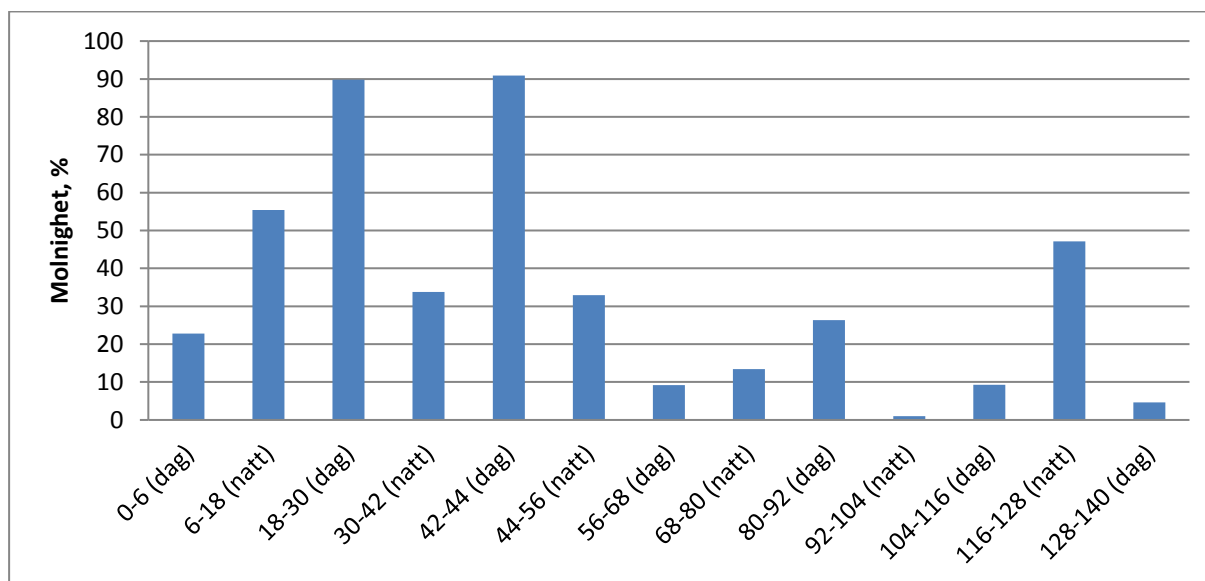
Figur 3-10 Värmemattorna täckta med betongtäckmattor.

Alla mattorna täcktes sedan med 10 mm betongtäckmatta. När värmemattorna stängdes av efter 123 timmars värmning togs isoleringen bort men mattorna låg kvar i knappt två dygn, vilket skiljer sig från övriga försök. Vid övriga försök togs isolering och mattor bort direkt när värmningen avslutades. Eftersom alla mattor täcktes med isolering var försökssituationen i princip densamma för de två mätserierna med vardera fem mätpunkter. I figur 3-11 visas de uppmätta temperaturerna för den vänstra mätserien.



Figur 3-11 Uppmätt temperaturutveckling i betongen på olika avstånd från underkant betong. Försök 2, västra mätpunkter.

Under den period som värmningen pågick och fyra dagar därefter föll inget regn varför försöket kan sägas representera torra förhållanden. Som figur 3-12 nedan visar var molnigheten växlande under försöket.



Figur 3-12 Andel av himlen som var täckt av moln vid Uppsala flygfält under försök 2 (SMHI, 2015). Medelvärde av uppmätta timvärden.

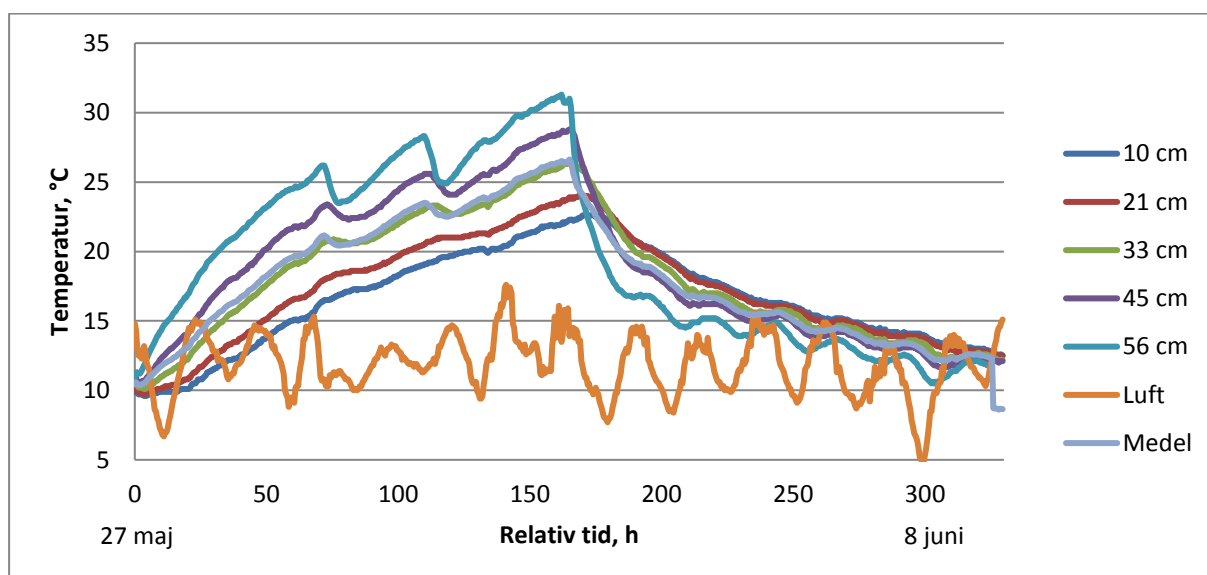
3.2.4 Försök 3

Vid försök 3 användes samma temperaturgivare som vid försök 2 och som visas i figur 3-4. Luften mättes i skuggat läge vid bottenplattan.

Fem värmemattor användes och de täcktes med 10 mm betongtäckmatta. 113 timmar efter temperaturmätningens början upptäcktes att den värmematta som låg ytterst (inte den vid bottenplattans ände) var trasig och inte gav någon värme. Mattan kontrollerades och det konstaterades att den var trasig. Sannolikt var värmemattan ur funktion sedan försökets början. När det upptäcktes att den var trasig byttes den ut mot en fungerande värmematta, och försöket fick fortgå fram till 165 timmar efter försökets början. Försökssituationen visas i figur 3-13 och de uppmätta temperaturförloppen i den östra mätserien visas i figur 3-14.

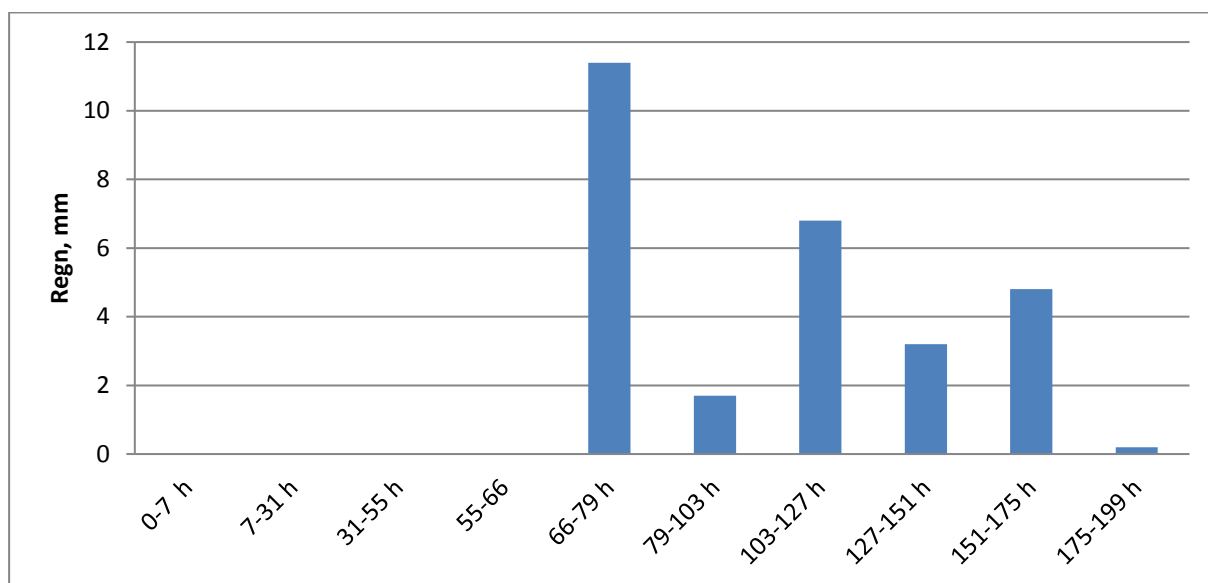


Figur 3-13 Värmemattorna vid utläggning efter att de täcktes med isolering, försök 3. Mätpunkternas horisontella läge markeras av de två hinkarna.



Figur 3-14 Uppmätt temperaturutveckling i betongen på olika avstånd från underkant betong. Försök 3, östra mätpunkter.

Förhållandena på bottenplattan var torra vid försökets början och fortsatte att vara det fram tills ungefär 66 timmar in i försöket då en period av nederbörd inleddes, se figur 3-15. Regnvatten ansamlades under mattorna på grund av bottenplattans fall och kvarlåg fram tills värmningen avslutades. Eftersom mätpunkterna var i mitten respektive 1 meter från mitten av bottenplattan täcktes betongen av stående vatten när regnet kom, vilket skiljer sig från försök 1 där mätpunkterna var 2,5 meter från mitten. Bottenplattan var under hela försöket skuggad av tak, som dock inte var vattentätt. På grund av det regn som föll kom de två mätserierna att påverkas på olika sätt. Detta innebär att de inte kan sägas motsvara samma försökssituation vilket var fallet vid försök 2.



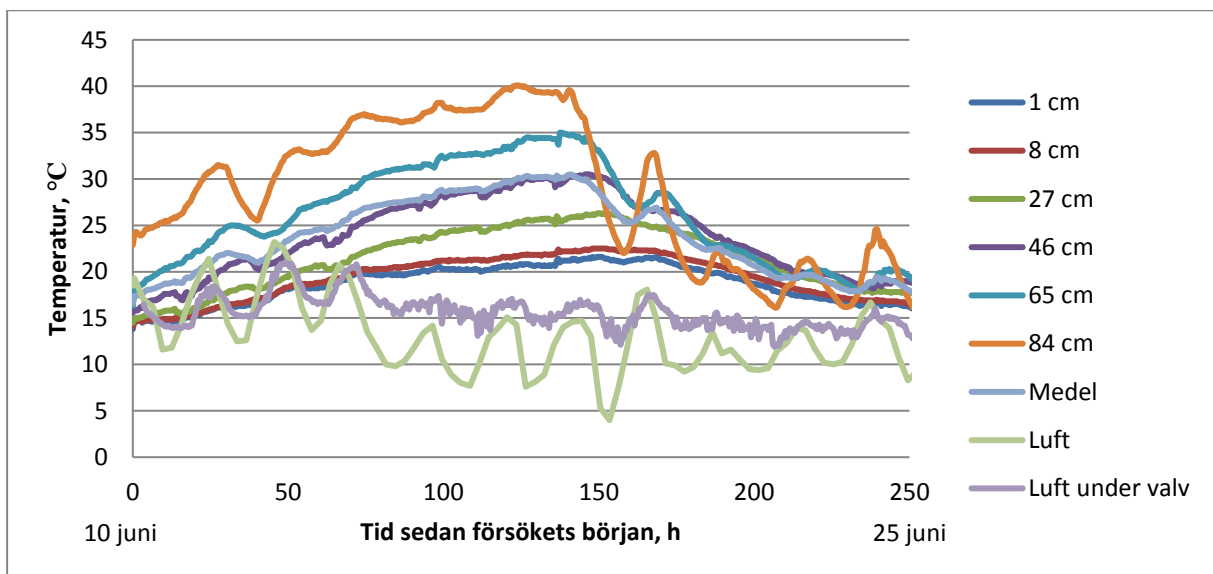
Figur 3-15 Regnmängd uppmätt vid Uppsala flygfält under försök 3 (SMHI, 2015).

3.2.5 Försök 4

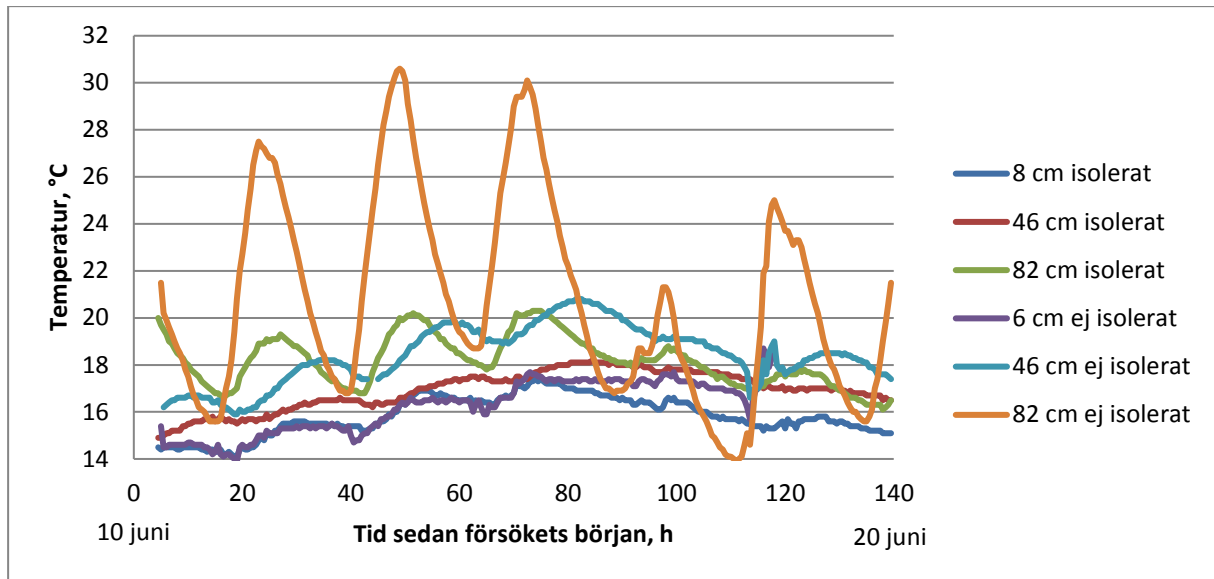
Temperaturgivarna göts in i betongen på glasfiberstag på samma sätt som för försök 2 och 3 och deras läge visas i figur 3-4. Enbart en mätserie uppmättes till skillnad från i de övriga försöken där två mätserier användes. Lufttemperaturen mättes dels 10 cm under valvtaket, dels uppe på valvet. Av misstag hamnade temperaturgivaren på valvet i solen vilket störde temperaturmätningarna. Därför har modelleringarna gjorts med lufttemperatur från en närliggande väderstation vid Uppsala flygplats. För att få en uppfattning av solens påverkan på temperaturen i valvet mättes även temperaturen i två andra valv där det fanns temperaturgivare kvar sedan de göts, se Figur 3-18. Det ena av dessa täcktes med ett lager betongtäckmatta och det andra täcktes inte alls. Fem värmemattor användes och de täcktes med 10 mm betongtäckmatta. Ett strömavbrott gjorde att mattorna slogs av 30 timmar in i försöket och de startades 10 timmar senare. Tidpunkterna för bortfallet är kända eftersom ett sms-larm hade satts på en av mattornas uttag. Värmemattornas placering på valvet visas i figur 3-16. De temperaturförlopp som uppmättes vid uppvärmningen visas i figur 3-17.



Figur 3-16 Värmemattorna vid utläggning innan de täcktes med isolering, försök 4.

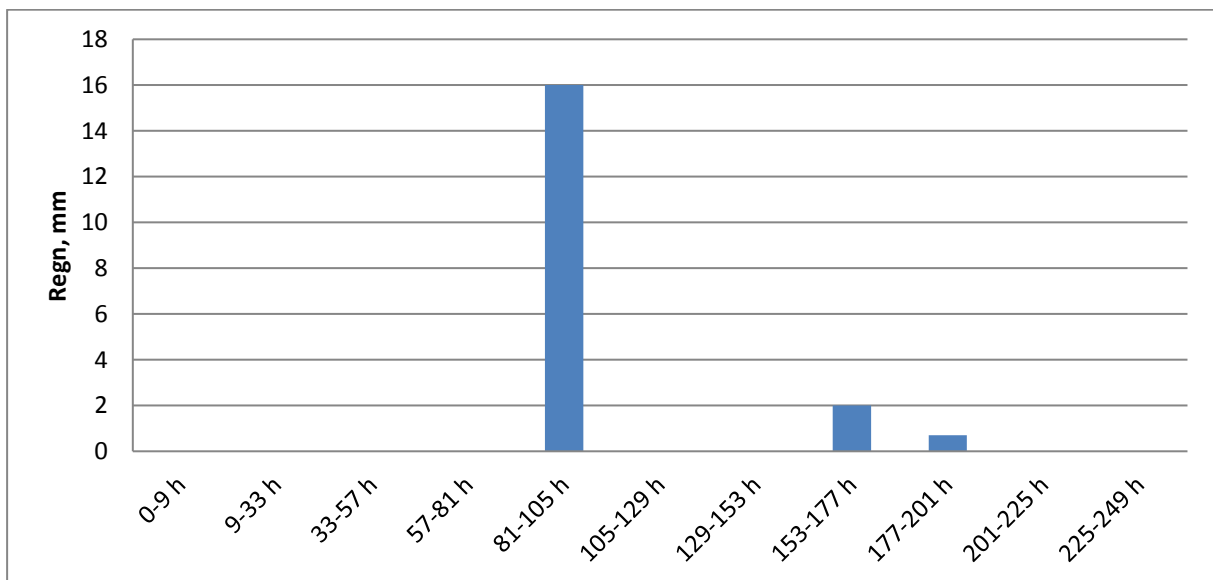


Figur 3-17 Uppmätt temperaturutveckling i betongen på olika avstånd från underkant betong. Försök 4, västra mätpunkter.

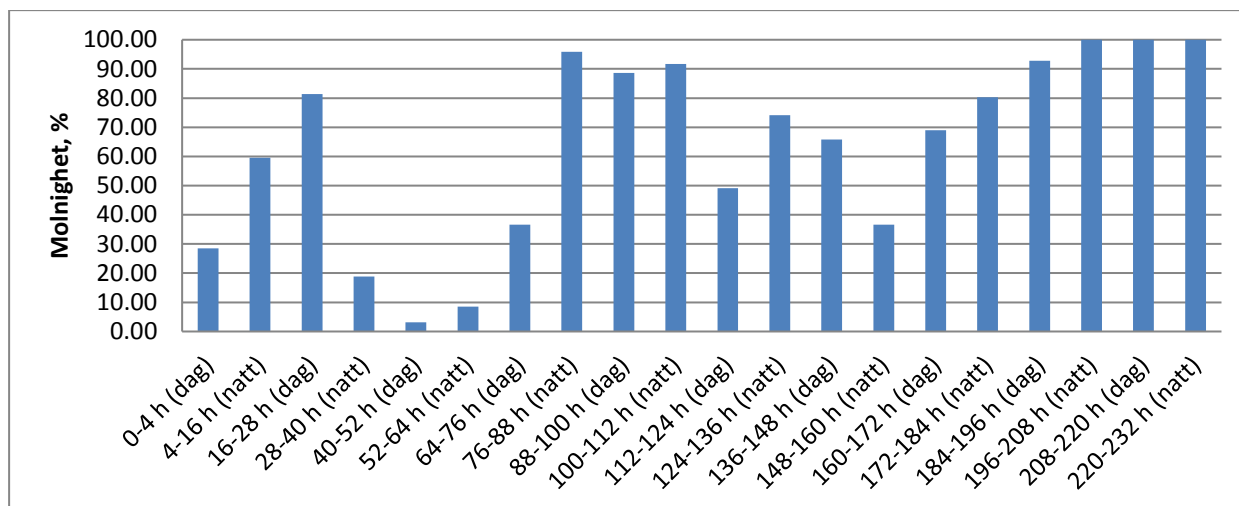


Figur 3-18 Uppmått temperaturutveckling på olika avstånd från underkant betong i två andra valv under samma period som försök 4. Ingen värmning utfördes på dessa valv. Ett av valven täcktes med 10 mm betongtäckmatta och det andra täcktes inte alls.

Valvet som försöket genomfördes på var inte skuggat och vädret var till stora delar soligt, se figur 3-20. Det regnade en del några dagar in i försöket vilket ses i figur 3-20. På grund av valvets fall bort från mitten av valvet ansamlades inget vatten under isolering och mattor vid regnet. Fukt lade sig dock under värmemattorna vilket avtecknade sig som mörka partier i betongen när värmemattorna avlägsnades.



Figur 3-19 Regnmängd uppmätt vid Uppsala flygplats under försök 4 (SMHI, 2015).



Figur 3-20 Andel av himlen som var täckt av moln vid Uppsala flygfält under försök 4 (SMHI, 2015). Medelvärde av uppmätta timvärden.

3.2.6 Temperaturmätning

Temperaturen mättes med två apparater som mäter och loggar temperaturer. Den ena var Testo 177-T4 och den andra en Conreg med sex kanaler. Temperaturmätningen är baserad på termoelement av typ T, där den ena tråden är av koppar och den andra av en legering av koppar och nickel. Själva tråden har en noggrannhet på $\pm 0,5$ grader. Testologgern har en intern noggrannhet på $\pm 0,3$ grader (Nordtech, IU). Temperaturmätningarna som gjorts borde alltså ha en noggrannhet bättre än ± 1 grader. Givarna sätts i funktion genom att vid kabelns ände skala bort höljet och sedan tvinna de två trådarna. Temperaturen mäts där de två trådarna kommer i kontakt med varandra. Figur 3-21 nedan visar hur kablarnas ändrar dragits ut till mätpositionerna.



Figur 3-21 Temperaturgivare på glasfiberstag som knöts fast i över- och underkantsarmeringen.

3.2.7 Mattornas strömförbrukning

Strömmen genom mattorna mättes vid några av försöken och den effekt de avger är därför känd med relativt god säkerhet. Även mattornas resistans uppmättes. Värden på dessa resultat redovisas i bilaga B.1. För att utifrån uppmätt ström respektive resistans beräkna effekten i värmemattorna användes ekvation 3-1 respektive 3-2. Ekvationerna gäller för likström men kan tillämpas även vid växelström om lasten är rent resistiv (ingen induktion eller kapacitans) och effektivvärden används för spänning och ström (Wikipedia, 2015). Eftersom värmekablarna består av ett resistivt motstånd (inga induktorer eller kondensatorer) antogs de utgöra en rent resistiv last. De ström- och spänningsvärden som uppmättes vid försöken var effektivvärden. Vidare är även normalvärde på nätspänningen i svenska uttag, nämligen 230 volt, ett effektivvärde varför ekvationerna kunnat användas. Spänningen uppmättes även vid försök 4 till 230 volt.

$$P = U \cdot I \quad (3-1)$$

$$P = \frac{U^2}{R} \quad (3-2)$$

Där	P	= effekt (W)
	U	= spänning (v)
	I	= ström (A)
	R	= resistans (Ω)

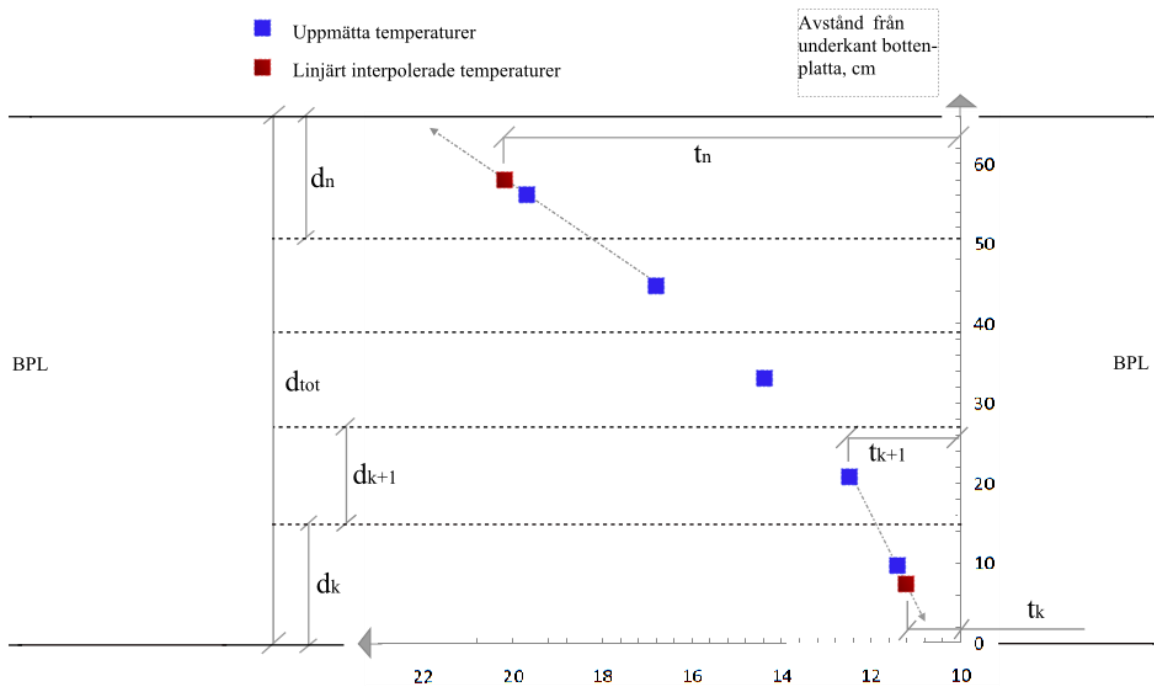
Effekten beräknades till omkring 550-600 watt. Möjligen tydde resultaten på att effekten minskade något när flera mattor kopplades in på samma fas istället för enbart en. Resistansen som uppmättes var något högre precis före försök 4 än precis efter. Vid mätningen stängdes alla mattor av samtidigt och sedan mättes resistansen på mattorna var för sig. De mattor som mättes först visade en något högre resistans, 92-94 Ω , medan de som mättes sist hade en lägre resistans, 89-91. Detta skulle kunna vara så att resistansen är något högre när värmekablarna är varma. Eftersom så är fallet när mattorna är igång kan utifrån detta antas att resistansen snarare är 92 Ω , motsvarande 575 W, än 90 Ω , motsvarande 588 W. Figur 3-22 visar instrumentet som användes för att mäta ström, resistans och spänning.



Figur 3-22 Mätning av strömförbrukning.

3.2.8 Medeltemperatur i betongen

Medeltemperaturen i motgjuten konstruktion säger i regel mer om sprickrisken än temperaturen i enskilda mätpunkter. För att användas som jämförelse med resultaten från efterkalkylerna beräknades en medeltemperatur för den uppvärmda betongkonstruktionen utifrån de i försöken uppmätta temperaturerna. För att göra en uppskattning av medeltemperaturen i bottenplattan utifrån de temperaturer som uppmätts, delades bottenplattan in i samma antal skikt som det placerats mätpunkter i den, se figur 3-23. Skikten lades så att de inre mätpunkterna hamnade mitt i skiktet och temperaturen i mitten av de yttre skikten interpolerades linjärt från de två närmsta uppmätta temperaturerna. Medeltemperaturen beräknades enligt ekvation 3-3.



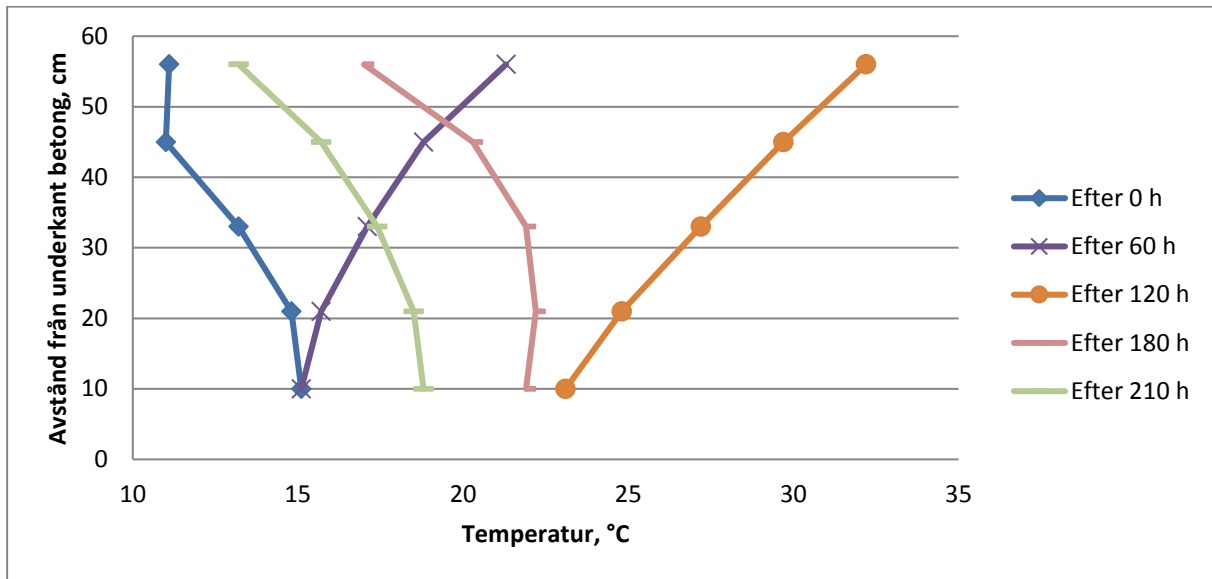
Figur 3-23 Indelning i skikt vid uppskattning av bottenplattans medeltemperatur.

$$t_{\text{med}} = \frac{\sum_{k=1}^n t_k \cdot d_k}{d_{\text{tot}}} \quad (3-3)$$

där t_k = uppmätt/interpolerad temperatur mitt i det k:te skiktet, °C
 d_k = tjocklek skikt k, m
 d_{tot} = bottenplattans tjocklek, m

Att uppskatta bottenplattans medeltemperatur på detta sätt ger sannolikt ett visst fel eftersom temperaturgradienten under pågående värmning inte är linjär utan mer liknar en exponentiell kurva. Ett exempel på detta visas i figur 3-24 där temperaturgradienten uppritats för olika tidpunkter av uppvärmningen. Detta får till följd att medeltemperaturen i bottenplattan underskattas något. Vid försök 1 uppmättes inga temperaturer i de undre 29 centimetrarna. Eftersom en så stor del av betongtjockleken saknar temperaturmätningar är medeltemperaturen för detta försök mer osäker än för övriga försök. Vid uppvärmningen

underskattas den sannolikt på grund av den linjära interpoleringen utifrån de två nedersta mätpunkterna. Detta kan jämföras med de mer krökta kurvorna i figur 3-24.



Figur 3-24 Uppmätta temperaturgradienter i betongen vid olika skeden av uppvärmningen. Förbruk 2, västra mätserien. Värmning påbörjas vid 0 h och avslutas vid 124 h.

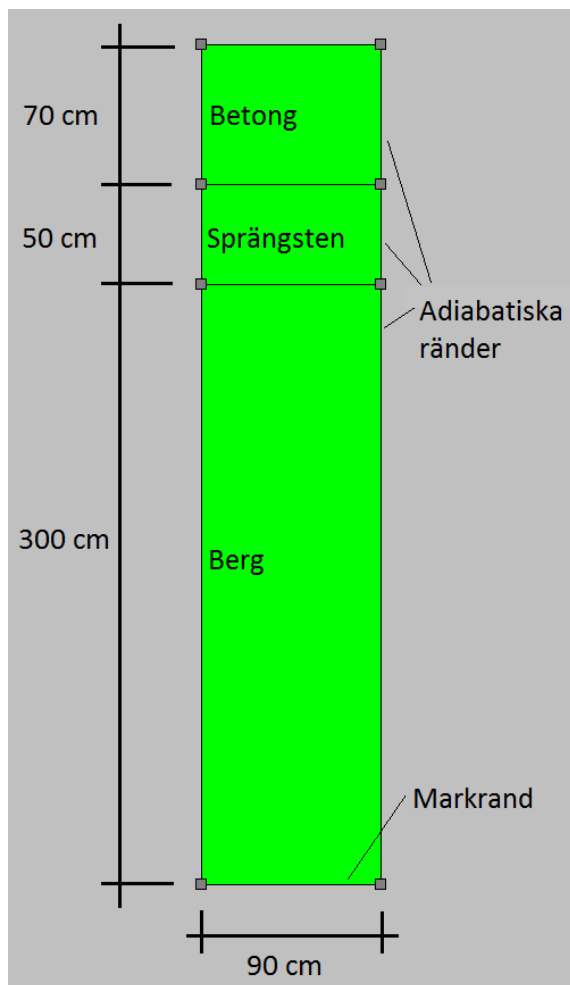
3.3 Förberedande numeriska simuleringar

I detta avsnitt beskrivs inledningsvis fyra metoder för att modellera värmemattans effekt på i Contest, se avsnitt 3.3.1 "Fyra metoder". Efter det följer fyra avsnitt som beskriver undersökningar som gjordes med hjälp av numeriska simuleringar i Contest. Dessa gjordes för att svara på några frågor som var viktiga inför de modelleringar och jämförelser av försöken som gjordes senare. De frågor som undersöktes och i vilket avsnitt:

- Hur långt ner från överkant betong kommer den punktvis tillförda värmen från värmekablarna i mattan att ge temperaturdifferenser i horisontalled? Denna fråga behövde besvaras för att veta vilka mätpunkter från försöken som var relevanta att använda vid jämförelser. Se 3.3.2 "Temperaturvariationer närmast värmekablarna".
- På vilket sätt påverkar armeringsjärnen temperaturförhållandena lokalt, och hur stort är det område som influeras invid ett armeringsjärn? Denna fråga var intressant för att veta hur mycket temperaturerna i mätpunkterna nära armeringen påverkats av dem. Se 3.3.3 "Enskilda armeringsjärns temperaturpåverkan".
- På vilket sätt påverkar lagren av över- och underkantsarmering temperaturförhållandena i plattan som helhet? Denna fråga behövde besvaras för att veta om armeringslagren påverkar temperaturerna i betongen i sådan utsträckning att de bör tas hänsyn till vid modelleringar av försöken. Se 3.3.4 "Armeringslagrens temperaturpåverkan".

- Är det någon mening att i nästa steg prova alla de fyra metoderna att modellera mattan mot försöksresultaten? Eller är de så pass lika att det räcker att använda en av dem? Denna fråga behövde besvaras för att hitta en metod för att modellera värmemattan. Se 3.3.5 "Jämförelse mellan de fyra metoderna".

I princip samma modell i användes Contest när de fyra frågorna undersöktes, se figur 3-25. Det som varierade var den övre delen av modellen, dvs. den del som utgör modelleringen av själva värmemattan. De temperaturegenskaper som angavs i Contest vid modelleringarna redovisas i tabell 3.6.



Figur 3-25 Modell av den fiktiva bottenplattan i Contest.

Tabell 3-3 Temperaturegenskaper för den fiktiva bottenplattan.

	Värmeledningsförmåga (W/m·K)	Specifik värmekapacitet (J/kg·K)	Densitet (kg/m ³)
Isolering	0,05	1500	25
Betong	1,7	1000	2350
Armering	45	449	7870
Sprängsten	2,1	1400	2200
Berg	3,7	850	2650
Plast	0,3	1000	1000

3.3.1 Fyra metoder

De två funktioner som värmemattan har och som behöver modelleras är dels dess uppvärmande effekt, dels dess isolerande verkan. Tre realistiska tillvägagångssätt finns i Contest för att modellera den tillförda värmen från värmemattan:

1. Att i modelleringen av betongkonstruktionen definiera att en viss effekt avges jämnt fördelat till en betongens rand i modellen.
2. Att tillföra effekten till specificerade punkter på betongens rand genom att koppla inre punkter till randen.
3. Att tillföra effekten i inre punkter i ett block.

Det första tillvägagångssättet är det enklaste för att modellera den tillförda värmen. Det andra är mer troget verkligheten i det hänseendet att värmen utvecklas punktvis (sett i 2D) istället för en jämnt fördelad värmeflöde över hela randen som i det första sättet. I modellen sattes de inre punkterna på samma c/c-avstånd som värmekablarna ligger i de verkliga värmemattorna, vilket är 9 cm. Att som i det tredje tillvägagångssättet tillföra värmen via inre punkter innebär att effekten tillförs via punkterna inuti ett materialblock och inte till en rand.

Det isolerande material som täcker betongen när värmemattorna används utgörs av den inbyggda isoleringen i värmemattan och av eventuell extra pålagd isolering. Den isolerande verkan som detta har kan i Contest modelleras på två sätt:

1. Isoleringen räknas in i betongrandens värmeövergångstal.
2. Ett eget block ritas i modellen och tilldelas densitet, specifik värmekapacitet och värmeledningsförmåga.

Det förra sättet är enklare och smidigare medan det senare har fördelen att mattans och isoleringsmaterialens värmetröghet medräknas.

Värmeövergångstal för en rand kan i Contest bestämmas manuellt genom att en siffra anges. Alternativt kan i programmet anges tjocklek och värmekonduktivitet för ett fiktivt isoleringsskikt och programmet räknar utifrån det ut ett värmeövergångstal som motsvarar skiktets isolerande förmåga. Vid modelleringarna i detta arbete har den senare metoden använts eftersom den är mer intuitiv. När värmemattan modellerats i detta arbete har därför tjockleken 11 mm angetts när isoleringen enbart utgjorts av värmemattan (11 mm tjock), respektive 20 mm när den utgjorts av värmematta och ett lager betongtäckmatta (9 eller 10 mm tjock har använts vid försöken). Det som varierats i programmet för att öka eller minska värmeövergångstalet har då varit värmekonduktiviteten. Vid samtliga ränder mot luft har vindhastighetens påverkan på värmeövergångstalet tagits hänsyn till via programmets inbyggda funktion, se avsnitt "2.7.2 Temperaturberäkningar".

Fyra metoder där de värmande och isolerande funktionerna hos värmemattan modelleras på olika sätt har i detta arbete använts i Contest:

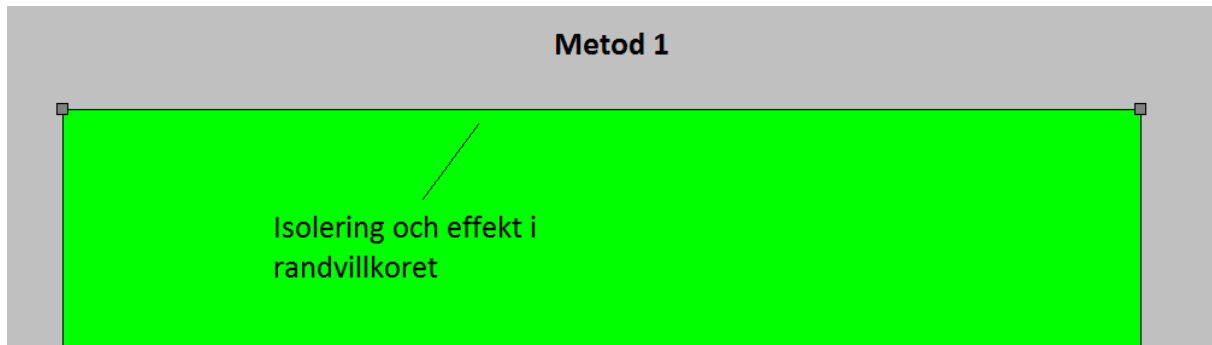
Metod 1

För metod 1 modelleras mattans inverkan enbart i det randvillkor som ansätts för betongblockets övre rand. Detta sker genom att den isolerande effekt som matta och isolering har räknas med i det värmeövergångstal som gäller för värmeutbyte mellan randen och luften

i beräkningarna. Det finns med denna metod två parametrar att justera i Contest för att hitta det bästa sättet att modellera mattans verkliga effekt:

- Effekttalet som tillförs randen (W/m^2).
- Värmeövergångstalet mellan randen och luften ($W/m^2 \cdot K$).

Som tidigare nämnts har värmeövergångstalet justerats indirekt genom att i randens isoleringsskikt ändra värmekonduktiviteten och låta tjockleken vara konstant.

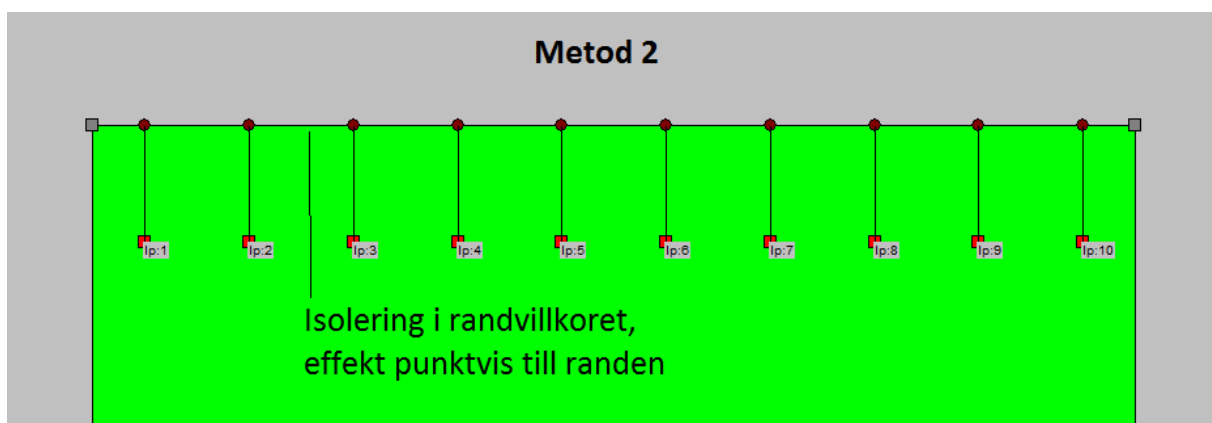


Figur 3-26 Hur mattan modelleras vid en rand, metod 1.

Metod 2

För metod 2 modelleras mattans isolerande funktion på samma sätt som för metod 1. Effekten som värmemattan tillför modelleras genom för inre punkter som kopplas till randen. Effekten tillförs då punktvis till de celler i betongblockets rutnät som punkterna kopplas till. De parametrar som kan justeras i Contest är:

- Effekttalet som tillförs varje inre punkt (W/m).
- c/c -avståndet mellan de inre punkterna (m). Det rimliga är att sätta det till det verkliga måttet: 9 cm.
- Värmeövergångstalet mellan randen och luften ($W/m^2 \cdot K$).

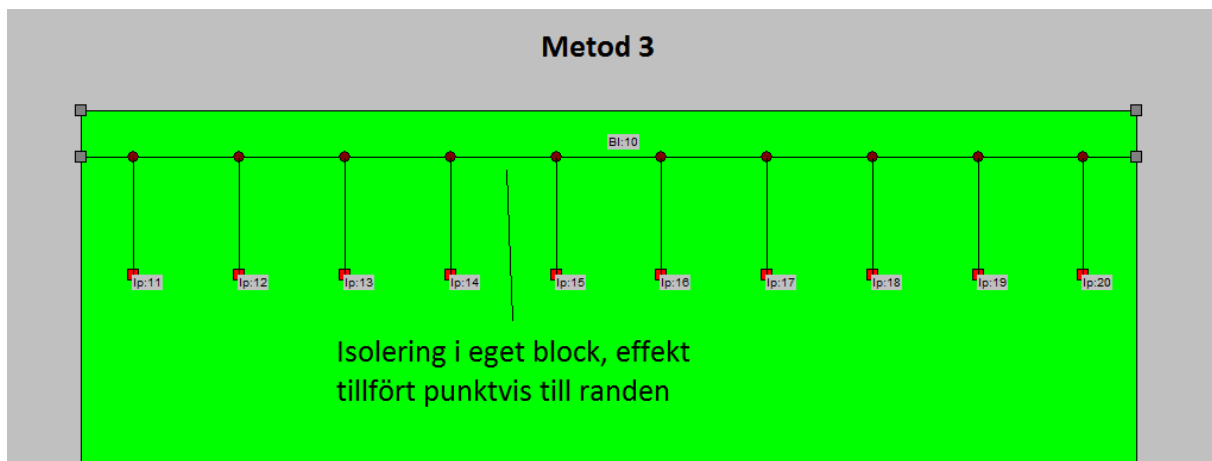


Figur 3-27 Hur mattan modelleras vid en rand, metod 2.

Metod 3

För metod 3 tillförs effekten via inre punkter kopplade till randen, dvs. på samma sätt som för metod 2. Men i metod 3 modelleras värmemattans isolering inte i randvillkoret utan utgör ett eget block i modellen. De parametrar som kan justeras i Contest är:

- Effekttätalet som tillförs de inre punkterna (W/m).
- c/c-avståndet mellan de inre punkterna (m). Det rimliga är att sätta det till det verkliga måttet: 9 cm.
- Isoleringsblockets tjocklek (m).
- Isoleringsblockets temperaturegenskaper: värmeledningsförmåga (W/m·K), specifik värmekapacitet (J/kg · K) och densitet (kg/m³).
- Värmeövergångstalet mellan isoleringsblocket och luften. Eftersom den isolerande funktionen modelleras i ett eget block är det rimligt att denna sätts konstant enligt programmets "Free-surface"-funktion, avsnitt 2.3.2.

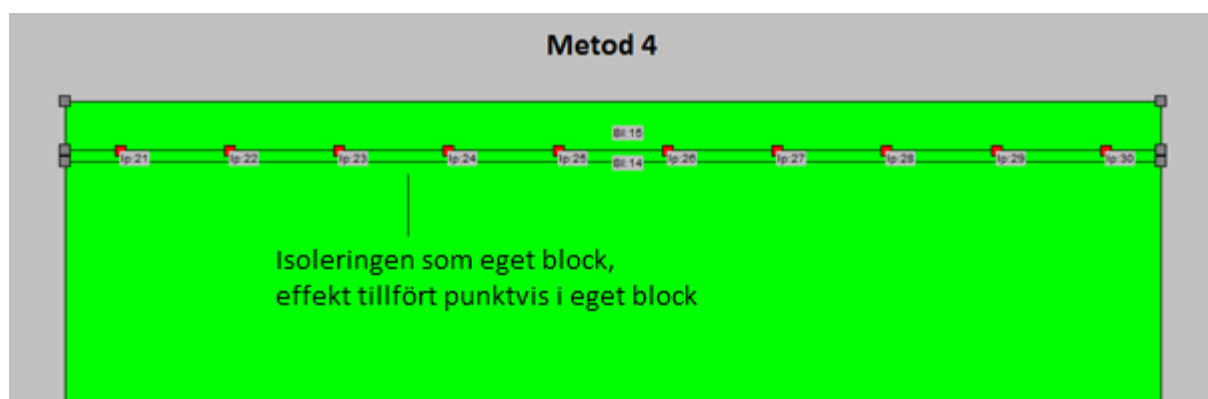


Figur 3-28 Hur mattan modelleras vid en rand, metod 3.

Metod 4

Metod 4 innebär att 2 block får simulera den isolering som utgörs av värmemattan. Det nedre av dem representerar mattans ytskikt som gör att inte kablarna har direkt kontakt med betongen. Det övre representerar den isolering som finns ovanför kablarna i mattan. De parametrar som går att justera i Contest är:

- Effekttätalet som tillförs de inre punkterna (W/m).
- c/c-avståndet mellan de inre punkterna (m). Det rimliga är att sätta det till det verkliga måttet: 9 cm.
- Isoleringsblockets tjocklek (m).
- Isoleringsblockets temperaturegenskaper: värmeledningsförmåga (W/m·K), specifik värmekapacitet (J/kg · K) och densitet (kg/m³).
- Värmeövergångstalet mellan isoleringsblocket och luften. Eftersom den isolerande funktionen modelleras i ett eget block är det rimligt att denna sätts konstant enligt programmets "Free-surface"-funktion, avsnitt 2.3.2.



Figur 3-29 Hur mattan modelleras vid en rand, metod 4.

3.3.2 Temperaturvariationer närmast värmekablarna

Vid fältförsöken som gjorts dokumenterades inte hur värmekablarna i värmemattorna var placerade i förhållande till mätpunkterna i betongen. Eftersom det blir varmare precis under en kabel jämfört med mittemellan två kablar kan en jämförelse mellan modellerade och uppmätta resultat bli felaktig om inte hänsyn till att temperaturen varierar i horisontalled tas vid jämförelsen. Det är sannolikt så att temperaturvariationerna kan försummas en bit ner i bottenplattan.

För att undersöka detta modellerades den fiktiva bottenplattan och värmemattor modellerades på den enligt metod 2. Ett antal modelleringar gjordes där vissa parametrar varierades för att se hur det påverkade resultatet. Det som varierades var:

- Tillförd effekt (8 resp. 12 W/m)
- Isoleringstjocklek (2 resp. 4 cm isolering med värmeledningsförmågan 0,05 W/m·K)
- Värmeledningsförmåga i betongen (1,7 resp. 2,4 W/m·K)

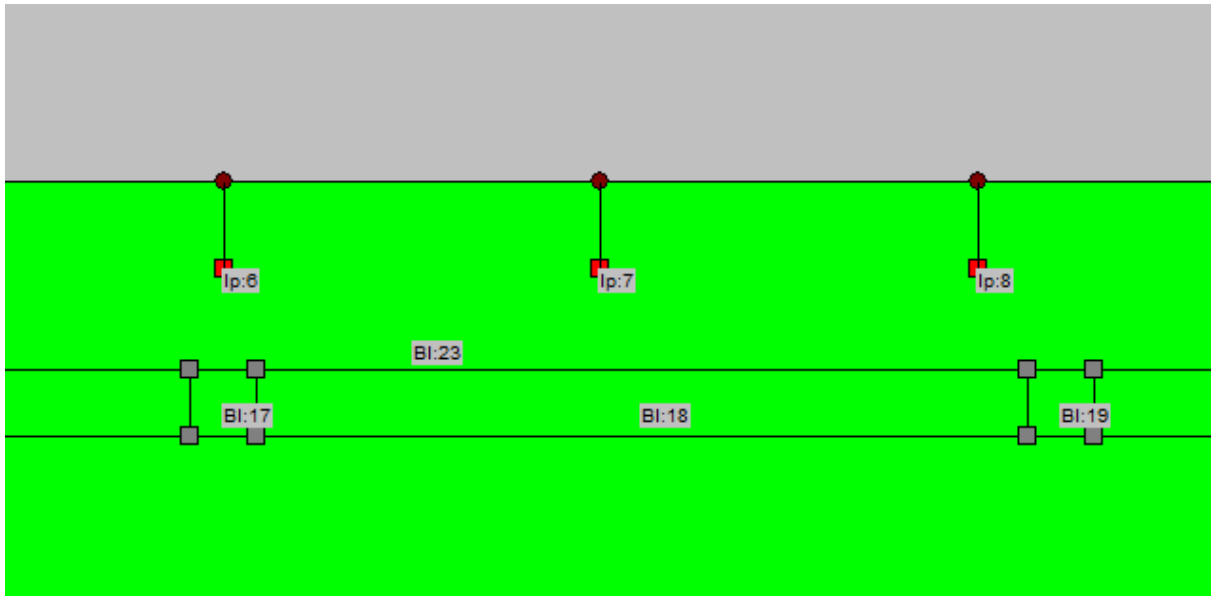
De två värdena för respektive parameter valdes i förhoppning att inringa de värden som skulle visa sig vara de som kan användas vid modellering av värmemattan. Alla kombinationer av de tre parametrar med två olika värden på respektive provades, vilket innebar åtta modelleringar.

Initialtemperaturen i samtliga av den fiktiva bottenplattans block och lufttemperatur valdes till 10 grader. Elementstorleken på rutnätet valdes till 5 mm för betongblocket och beräkningen läts pågå till 100 timmar av konstant uppvärmning. Det som jämfördes var skillnaden i temperatur lodrätt under en kabel jämfört med temperaturen mitt emellan två kablar, bägge på samma avstånd från överkant betong. Jämförelsen gjordes på flera djup för att undersöka vid vilket djup skillnaden kunde försummas.

3.3.3 Enskilda armeringsjärns temperaturpåverkan

Efter att ha gjort modelleringarna för att se hur långt ner i bottenplattan som de horisontella temperaturdifferenserna från mattans punkvisa värmeförsel sträckte sig, väcktes frågan hur överkantsarmeringen påverkar detta och om armeringsjärnen kan skapa en horisontell temperaturdifferens längre ned i betongen. För att undersöka detta valdes att studera den horisontella temperaturskillnaden under en kabel jämfört med mitt emellan två kablar, en

skillnad som jämfördes på olika djup i betongen. I modellen i Contest ritades block in för att representera armeringsjärn och dessa tilldelades temperaturegenskaper motsvarande stål. Figur 3-30 visar hur modellen av den fiktiva bottenplattan såg ut i överkant.



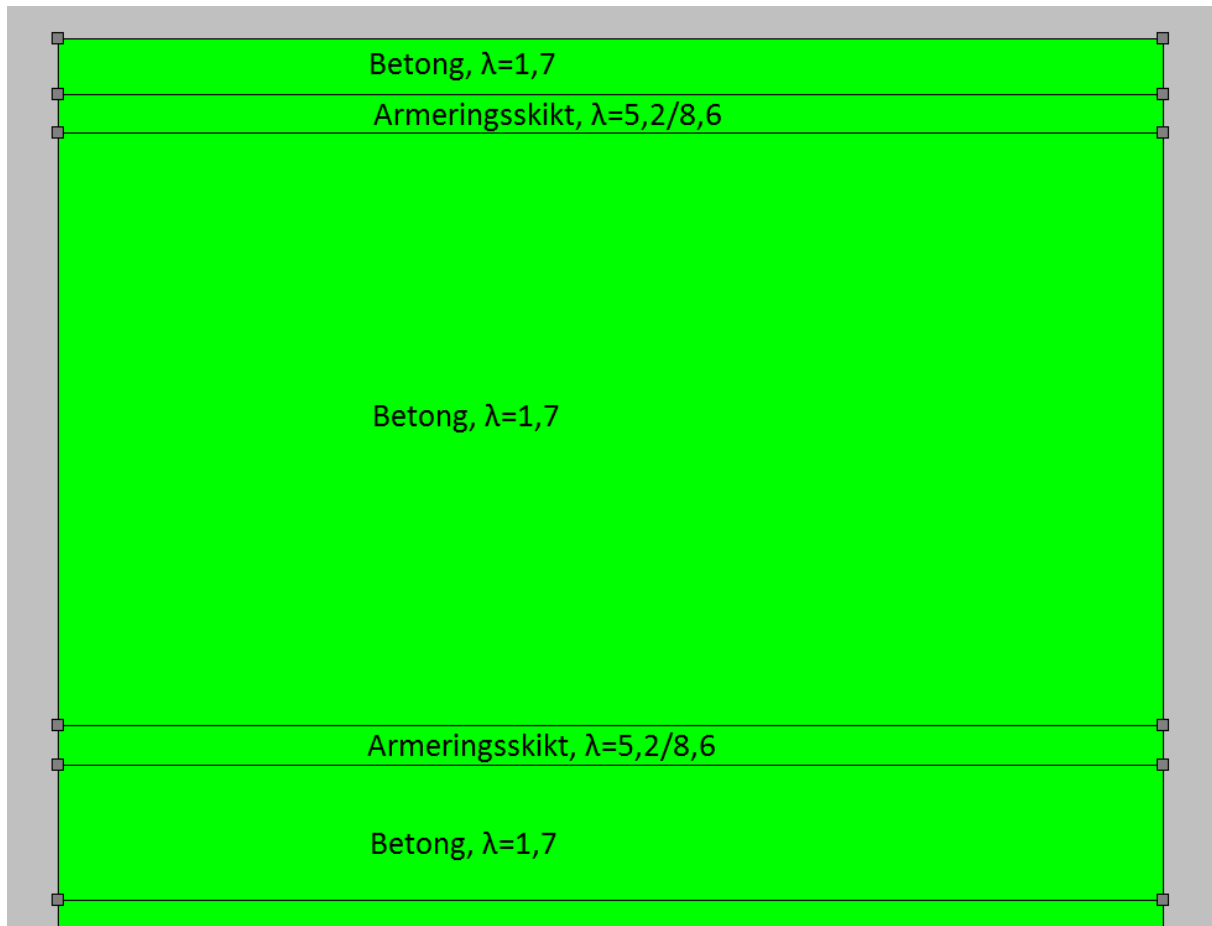
Figur 3-30 Modell för att undersöka om armeringsjärnen skapar horisontala temperaturdifferenser. De kvadratiska blocken, 16×16 mm, har fått värmeegenskaper motsvarande stål för att representera $\varnothing 16$ -järn.

I undersökningen i förra avsnittet provades åtta olika kombinationer av effekt, isoleringstjocklek och värmeledningsförmåga hos betongen. I denna användes bara den kombination som gett störst skillnad i den förra undersökningen, nämligen 12 W/m , 4 cm isolering och värmekonduktiviteten $1,7 \text{ W/m}\cdot\text{K}$. Istället jämfördes den horisontella temperaturskillnaden då ett armeringsjärn placerades rakt under respektive mellan värmekablarna. Det provades också vilka horisontella temperaturskillnader som uppkommer på grund av järnen då värmen tillförs jämnt över randen genom metod 2.

3.3.4 Armeringslagrens temperaturpåverkan

För att rätt modellera värmeförloppen i betongplattorna är en avgörande faktor vilken värmekonduktivitet som ges betongen. Stål har en värmekonduktivitet på ungefär $45 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ medan betongs är ungefär $1,7 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, se avsnitt 2.4.2. En kontrollmodellering gjordes för att få en uppfattning om huruvida denna inverkan är så stor att hänsyn måste tas till den vid temperaturmodelleringarna för sprickriskberäkningar. Modellen som användes för undersökningen var den fiktiva bottenplattan som beskrivs i figur 3-25, men betongblocket delades in i flera skikt för att kunna räkna med andra värmekonduktiviteter för betongen i höjd med över- respektive underkantsarmeringen, se figur 3-31. Värmemattan modellerades enligt metod 1. För de två skikten med armering ansattes i Contest en högre värmekonduktivitet än för betongen i övrigt. För jämförelsen valdes att studera ett fall där armeringen är lagd på c/c-avstånd 200 mm i bägge riktningarna. Det provades också att dubbla respektive fyrdubbla armeringsmängden. Värmekonduktiviteten för skikten för de olika armeringsmängderna räknades ut som ett viktat medelvärde av betongen och stålets värmekonduktiviteter där viktningen skedde med hänsyn till respektive volymandel i skiktet.

Eftersom beräkningen endast var ämnad att ge ett ungefärligt mått på armeringens påverkan gjordes förenklingen att armeringsjärnen var kvadratiska med sidan 16 mm. Tjockleken på armeringsskikten sattes till 32 mm motsvarande tjockleken på de två lagren med armeringsjärn. Detta gav en värmekonduktivitet på armeringsskiktet på 5,2 W/m·K. Om armering skulle ha lagts på c/c-avstånd 100 mm i bägge riktningar fås värmekonduktiviteten 8,6 W/m·K, och för 50 mm fås 14,4 W/m·K. Dessa tre värmekonduktiviteter provades i modelleringarna och de erhållna temperaturförhållandena över betongens tjocklek jämfördes med dem som erhöles när bottenplattan inte delades in i skikt.



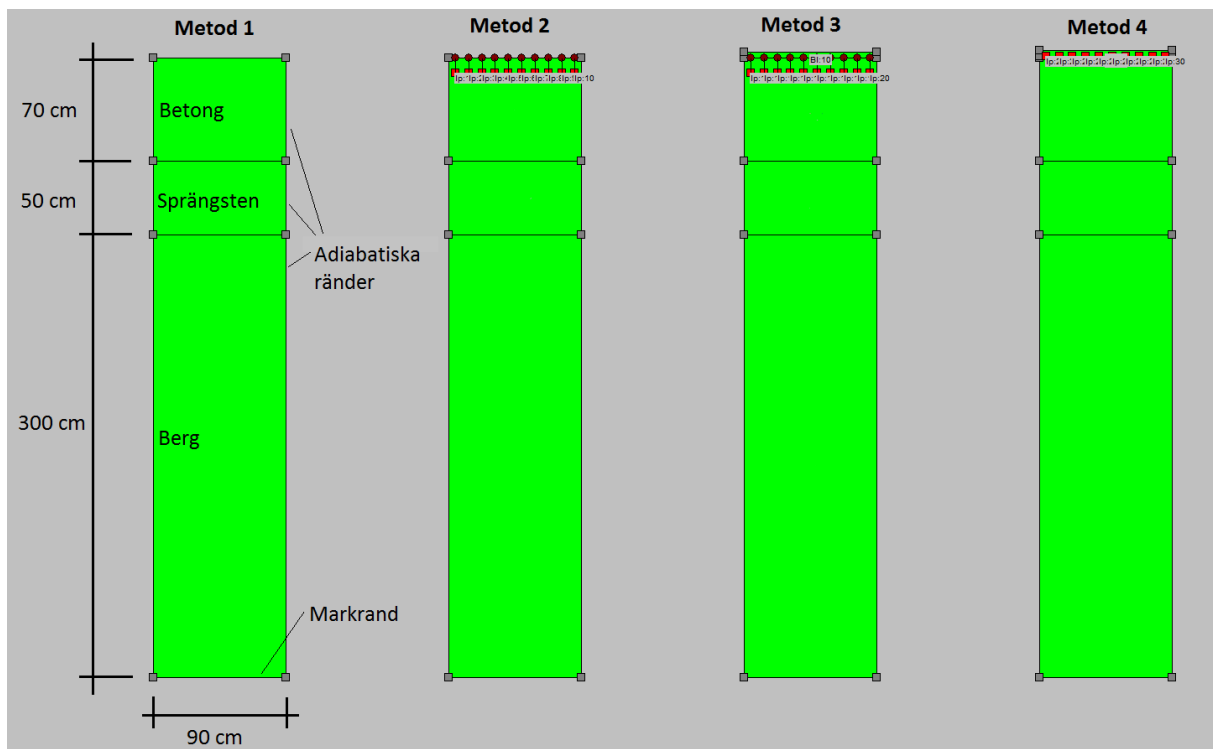
Figur 3-31 Betongblocket skiktades i fem block med olika värmeledningsförmåga.

3.3.5 Jämförelse mellan de fyra metoderna

En undersökning gjordes med hjälp av Contest för att bedöma om det innebar någon väsentlig skillnad att använda metod 1, 2, 3 eller 4. För detta användes samma fiktiva bottenplatta som i figur 3-25 och den översta delen modellerades enligt de fyra metoderna, se figur 3-32. Det var uppenbart att metod 2,3 och 4 skulle var bättre lämpade om lokala temperaturvariationer närmast värmemattan behövde studeras. Vid praktiska tillämpningar, dvs. vid kalkylering av sprickrisker, har detta dock ingen betydelse utan det som är intressant är hur mycket betongens medeltemperatur förändras. Därför modellerades uppvärmning med mattan enligt metod 1, 2, 3 och 4, och sedan jämfördes medeltemperaturen sett över hela bottenplattans tjocklek för de fyra metoderna. Vidare räknades en medeltemperatur ut i Contest för ett skikt av de översta fem centimetrarna och jämfördes mellan metoderna. Nedanför denna höjd kan

horisontella temperaturvariationer anses försumbara vid metod 2, 3 och 4, se avsnitt 4.1.1. Temperaturen jämfördes också på två specifika punkter; de två fjärdedelspunkterna sett över bottenplattans tjocklek. På så vis studerades förutom medeltemperaturen även om temperaturerna skilde lokalt mellan metoderna. Jämförelserna gjordes för samma variationer av tillförd effekt, isoleringstjocklek och värmeledningsförmåga i betongen som redovisades punktvis i avsnitt 3.3.2. Slutligen ökades värmekapaciteten hos isoleringsblocket i metod 3 genom att i Contest öka blockets specifika värmekapacitet och densitet. Jämförelser av temperaturförlopp gjordes sedan för att se hur mycket värmekapaciteten behövde ökas innan det kan anses nödvändigt att ta hänsyn till denna värmetröghet.

När metoderna jämfördes sinsemellan i Contest ansattes ekvivalent effekt och ekvivalent isolering för de fyra metoderna. Med ekvivalent effekt menas i det här fallet att den sammantaget tillförda effekten per ytenhet modellerad matta var densamma. I metod 1 anges effekten som W/m^2 medan den för övriga metoder anges som W/m för de ingående kablarna. Eftersom kablarna ligger med ett c/c-avstånd på 9 cm innebär detta att kablarna i metod 2, 3 och 4 vardera tilldelas 9 % av den effekt som tilldelas randen i metod 1. Med ekvivalent isolering menas i det här fallet att värmeövergångstalet för isoleringsranden i metod 1 och 2 i Contest väljs så att motsvarande värmemotstånd är lika med det värmemotstånd som isoleringsblocket (enbart det övre isoleringsblocket i metod 4) och randen mot luften skapar i metod 3 och 4. I programmet valdes ett gemensamt rutnät för de block som var gemensamma för blocken, och elementstorleken i rutnätet varierades men var liten, även i det en cm tjocka skikt som representerade undre isoleringsblocket i metod 4 fick cirka sex celler plats i tjocklekens riktning. Figur 3-32 nedan visar geometrier och blockindelning i betong, sprängsten och berg. För dessa olika material användes de materialparametrar som redovisas i tabell 3-3.



Figur 3-32 Modeller vid jämförelse mellan metod 1,2,3 och 4.

3.4 Numeriska simuleringar av fältförsöken

3.4.1 Metodbeskrivning

Det huvudsakliga målet med detta arbete var att föreslå en metod för att modellera värmemattan i Contest vid sprickriskberäkningar. Resultaten av de förberedande simuleringarna visade att metod 1 var en lämplig metod, se avsnitt 4.1.3. Det som återstod var att bestämma generella värden på de två parametrar i metod 1 som avgör vilken uppvärmning värmemattan av betongen ger i Contest. Dessa två parametrar är:

- Värmeledning för isoleringsskiktet i randen
- Effekten som tillförs randen

För att bestämma generella värden på dessa två parametrar har de uppmätta resultaten för respektive serie jämförts med modelleringar med olika värden på dessa parametrar. Att på detta sätt bestämma värdena på de två parametrarna försvårades av att många andra parametrar som påverkade temperaturförloppet var okända. Vilka osäkra parametrar som finns beskrivs i nästa avsnitt, 3.4.2 "Process, osäkerheter, jämförelser". För att bedöma hur de modellerade resultaten och jämförelserna med uppmätta resultat skulle tolkas gjordes en känslighetsanalys. Denna gjordes innan de modellerade resultaten jämfördes med de uppmätta. I känslighetsanalysen undersöktes vilken påverkan de osäkra parametrarna kan ha på modelleringarna och dessa resultat utgjorde ett slags referensramar vid jämförelser mellan uppmätta och modellerade resultat. Hur den gjordes beskrivs i avsnittet 3.4.4 "Känslighetsanalys". Hur värmeledning och värmemattans effekt justerades in beskrivs i avsnittet 3.4.5 "Jämförelser mellan modelleringar och försök".

Som utgångspunkt vid de numeriska simuleringarna av försöken har använts en *grundmodell* i Contest för varje mätserie. Hur dessa byggdes upp beskrivs i avsnittet 3.4.3 "Grundmodellerna".

3.4.2 Process, osäkerheter, jämförelser

Hur väl de temperaturförlopp som fås från Contest stämde överens med dem från mätningarna berodde på hur modellen i Contest såg ut. Modellen kan delas in i två delar:

1. Modelleringen av själva värmemattan, dvs. de två parametervärden: värmeledning på isoleringen och vilken effekt som tillförs randen.
2. Resten av modellen med tillhörande parametervärden.

När temperaturer från efterkalkyler jämförs med motsvarande uppmätta värdena i syfte att justera in värmeledning och tillförd effekt är det intressant att veta vad eventuella skillnader beror på. De kan tänkas bero på:

1. Fel antaganden för värmemattan
2. Fel antaganden för övriga modellen
3. Påverkande faktorer som inte modellerats (ingen hänsyn tagen)

I känslighetsanalysen undersöktes hur stora felen från punkt 2 ovan kan tänkas vara. Det undersöktes också vilka resultat som är lämpligare än andra att jämföra på grund av att de i huvudsak påverkas av punkt 1 och i mindre utsträckning av punkt 2. Påverkan av faktorerna i punkt 3 har inte kunnat bedömas eftersom de inte medtogs i modellen. Eventuella skillnader i uppvärmningen mellan de olika försökstillfällena kan ha orsakats av dessa faktorer. De viktigaste av dessa faktorer är stående regnvatten under/kring mattorna, fuktighet under/kring mattorna, värmning via solstrålning och kylning via strålning mot natthimmel.

I tabell 3-5 redovisas de viktigaste faktorerna som påverkar temperaturutvecklingen och som tagits hänsyn till i modelleringarna.

Tabell 3-4 För varje parameter har en uppskattning gjorts för inom vilka värden det rätta värdet rimligen ligger. Utifrån det har parametervärdets osäkerhet uppskattats. Slutligen har den påverkan som denna osäkerhet har på temperaturutvecklingen uppskattats. De parametrarna med störst påverkan i förhållande till sin osäkerhet har gråmarkerats.

Parametrar	Källa	Osäkerhet (1-5)	Möjlig påverkan (1-5)	Möjlig variation
Geometri				
Betongens tjocklek (cm)	Ritning, inmätningar	2	1	± 2
Sprängstenens tjocklek (cm)	Ritningar	3	2	50-70 cm
Givares höjd i betong (m)	Inmätning	2	2	± 1
Temperaturförhållanden				
Lufttemperatur, skugga (°C)	Uppmätt	2	2	± 2
Initialtemperaturer i betongen (°C)	Uppmätt	2	2	± 1
Initialtemperaturer i sprängsten och berg (°C)	Modellerad, uppskattad	4	3	± 3
Vindhastighet (m/s)	Uppskattad	4	3	± 2
Temperaturegenskaper				
Värmekonduktivitet betong, W/(m·K)	Från litteratur	3	4	1,5-3,0
Densitet betong (kg/m ³)	Från provtagning	2	2	2100-2300
Specifik värme betong, J/(kg·K)	Från litteratur	2	2,5	800-1000
Värmekonduktivitet sprängsten, W/(m·K)	Från litteratur, uppskattning	2	4	0,3-2
Densitet sprängsten kg/m ³	Från litteratur, uppskattning	2	2	1300-2000
Specifik värme sprängsten, J/(kg·K)	Från litteratur, uppskattning	3	2	800-1000
Värmekonduktivitet berg, W/(m·K)	Från litteratur, uppskattning	2	2	3,0-4,0
Densitet berg, kg/m ³	Från litteratur, uppskattning	3	1	2600-2900

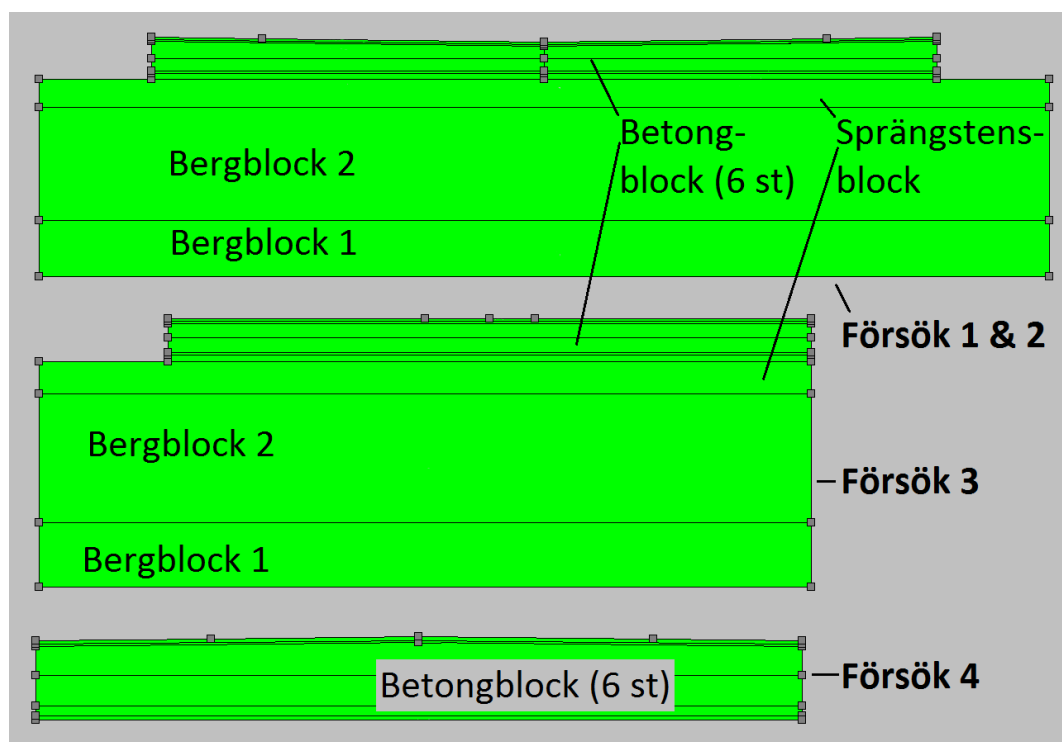
Specifik värme berg, J/(kg·K)	Från litteratur, uppskattning	3	2	800-1000
Värmekonduktivitet isolering, W/(m·K)	Litteratur, uppskattning	4	5	0,03-0,08
Värmekonduktivitet armering, W/(m·K)	Litteratur, uppskattning	3	1	40-60
Värmeövergångstal mot luft, W/(K·m ²)	Vedertagen forskning	2	2	+/-10%
Övrigt				
Elektrisk effekt (W/m ²)	Uppmätt	2	3	110-120

3.4.3 Grundmodellerna

Grundmodellerna är de modeller av försöken i Contest som utgås från vid både känslighetsanalysen och jämförelser med uppmätta resultat. När de två parametrarna för värmemattan justerades in för respektive försök utgicks från grundmodellerna. Därför strävades efter att göra grundmodellerna i Contest så verklighetstroga som möjligt. Nedan beskrivs uppbyggnaden av dem.

Geometri

I Contest har de olika materialen vid försöken delats in i olika block. Betongen i valv och bottenplattor har delats in i sex block vardera. Två av dessa representerar armeringslagren i betongen. Denna indelning gjorde det möjligt att dels differentiera temperaturerna i betongen vid modelleringens början, dels att ange andra temperaturegenskaper för betongen i höjd med armeringen. Dimensionerna i modellen valdes enligt konstruktionsritningarna.



Figur 3-33 Geometri för modellerna av försöken.

Som kan ses i figur 3-33 modelleras enbart två dimensioner. Geometrin för försök 1 och 2 motsvarar ett tvärsnitt tvärs bottenplattans längdriktning. Det fall som bottenplattan har mot mitten modellerades därmed. För försök 3 modellerades däremot ett tvärsnitt längs plattans längdriktning fastän mätpunkterna var desamma som i försök 1 och 2. Detta beror på att en av de yttre värmemattorna var trasig under försöket, se avsnitt 3.2.4. När Contest beräknar temperaturförlopp sker beräkningarna under förutsättningen att inget värmefflöde kan ske vinkelrätt mot det modellerade planet. Denna förutsättning kan approximativt sägas gälla för långsträckta konstruktioner vars tvärsnitt och temperaturpåverkan från omgivningen är konstant längs en längre sträcka. Ju tjockare tvärsnittet är desto längre måste konstruktionen vara i den långsträckta riktningen för att förenklingen till två dimensioner ska vara berättigad. En tumregel är att denna längd måste vara minst 2,5 gånger tjockleken på betongen (både ”ut” och ”in” från det modellerade planet) för att förenklingen till två dimensioner ska vara acceptabel. Detta motsvarar en längd på 1,75 meter för bottenplattorna och 2,25 meter för valvet. I och med att denna yttre värmematta föll bort i försök 3 blev längden mindre än 1,75 meter, rättare sagt ungefär 1,4 meter. Detta löstes i beräkningarna genom att vrida det modellerade tvärsnittet 90 grader. När bottenplattan nu modellerades från sidan kunde i beräkningen tas hänsyn till att en matta först inte hade någon effekt men sedan byttes ut och då började avge effekt.

Temperaturegenskaper i materialen

Värdena på de temperaturegenskaperna som ansattes i för grundmodellerna i Contest grundar sig i huvudsak på avsnitt 2.4 och 3.2.1 där materials temperaturegenskaper och materialen i försöken beskrivs. Temperaturegenskaper har angetts för respektive block enligt tabell 3-5.

Tabell 3-5 Temperaturegenskaper för blocken i grundmodellerna.

	Värmeledningsförmåga (W/m·K)	Specifik värmekapacitet (J/kg·K)	Densitet (kg/m ³)
Isolering	0,04	-	-
Betong	2,0	1000	2280
Betong överkantsarmering, bottenplatta	7,88	1000	3008
Betong underkantsarmering, bottenplatta	4,01	1000	2503
Betong överkantsarmering, valv	4,99	1000	2630
Betong underkantsarmering, valv	5,65	1000	2718
Sprängsten	0,6	800	1500
Berg	3.45	800	2700

Isoleringens värmekonduktivitet har valts till 0,04 W/m·K. Det är det värde som tillverkaren ger för isoleringsmaterialet som ligger i värmemattan.

Betongens värmekonduktivitet har bedömts till 2,0 W/m·K för samtliga försök. Värdet grundar sig på ekvation 2-5. I bilaga A.1 redovisas denna beräkning. Betongens densitet sattes till 2280 kg/m³ vilket egentligen är betongmassans densitet. Specifika värmekapaciteten angavs till 1000 J/kg·K vilket är det värde som Contest föreslår för normal betong.

För värmekonduktiviteten hos armeringsskikten gjordes en uppskattning som grundade sig på den faktiska mängden armering i betongen vid försöken och på stål och betongs

värmeledningsförmågor där viktningen skedde med hänsyn till respektive volymandel i skiktet, se bilaga A.2. På samma sätt uppskattades även armeringsskiktets specifika densiteter utifrån volymandelarna och de viktade värdena användes i Contest. Däremot användes samma värde på specifika värmekapaciteten som för betongen, $1000 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$. En viktning påverkade värdet mindre än 10 procent vilket troligen är mindre än felmarginalen för det uppskattade värdet på betongen, $1000 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$.

Sprängstenen antogs ha värmekonduktiviteten $0,6 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, densiteten 1500 kg/m^3 samt specifika värmekapaciteten $800 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$.

Berget antogs ha värmekonduktiviteten $3,45 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, densiteten 2700 kg/m^3 samt specifika värmekapaciteten $800 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$.

Rändernas egenskaper

De ränder som utgjorde vertikala gränser för modellen antogs *adiabatiska*, dvs. att inget värmeutbyte kan ske genom dem. För ränderna där block gränsade direkt mot luft antogs den i programmet fördefinierade fri-yta-randen och vindhastighetens värde sattes till 2 meter per sekund. För den rand som utgör nedre gräns för modellen valdes värmeövergångstalet $200 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$.

För den rand i vilken värmemattan modelleras användes i modellerna metod 1. Isoleringens tjockleken angavs till 20 mm när värmematta och ett lager betongtäckmatta modellerades. När enbart värmemattor utan någon täckning modellerades ansattes tjocklek på isoleringen till 11 mm. Värmekonduktiviteten antogs vara $0,04 \text{ W/m}\cdot\text{K}$. Värmekonduktivitet i randens isoleringsskikt är en av de två parametrar som senare anpassades till uppmätta resultat.

Omgivningens temperatur

Värden på lufttemperaturen togs från de mätningar som gjordes vid försöken för försök 1, 2 och 3. För försök 4 användes istället värden från en väderstation i närheten eftersom den uppmätta lufttemperaturen bedömdes vara påverkad av solsken. Denna väderstation var SMHI:s station på Uppsala flygfält som ligger ungefär 2 kilometer från försöksplatsen. Ett värde på lufttemperaturen matades in för var tredje timma. Marktemperaturen, med vilket här menas den temperatur som råder konstant nedanför bergblocket, angavs till 5°C .

Initialtemperaturer i blocken

Temperaturerna kan väljas som linjärt varierande i respektive block. I betongen valdes temperatur och temperaturgradient för varje block i betongen så att temperaturen så bra som möjligt stämde överens med de i uppmätta temperaturerna vid försökens början. Eftersom betongen skiktats i 6 block var det möjligt att uppnå bra överensstämmelse över hela betongens tjocklek.

Inga mätningar av temperaturen gjordes i underliggande sprängsten eller berg. För att uppskatta initialtemperaturen i sprängsten och berg gjordes modelleringar av temperaturförloppet i betong och mark fram tills försökens början för försök 1, 2 och 3. För försök 1 pågick detta från det att bottenplattan göts fram till att försöket påbörjades en månad senare. På samma sätt pågick modelleringen för försök 2 från gjutningen av denna

bottenplatta fram till försökets början. Försök 3 genomfördes på samma bottenplatta som försök 2. Därför gjordes en modellering från och med uppvärmningen av bottenplattan vid försök 2 fram till början av försök 3 (på i princip samma sätt som har skett vid den fortsatta utvärderingen av värmemattan). Uppskattningar av initialtemperaturer för dessa tre modelleringar gjordes med hänsyn till årstid och uppgifter om när schaktning ned till markbädd gjordes. Vid dessa tre modelleringar matades ett dygnsmedelvärde för lufttemperaturen in per dygn. Hänsyn togs till hur isolering av betongen utförts vid de olika gjutningarna. Genom dessa modelleringar erhöles en uppfattning om hur temperaturerna kan ha sett ut i sprängsten och berg vid försökens början. Eftersom programmet modellerade hydrationsvärmets och lufttemperaturen matades in för varje dygn tas hänsyn till att restvärme från gjutningar eller tidigare försök med värmemattor kan finnas kvar i marken. De initialtemperaturer som valdes redovisas i bilaga A.4.

Effekt

Effekten som tillfördes den rand som utgör själva värmemattan angavs till 109 W/m^2 . Bedömningen grundar sig på de mätningar av resistans, ström och nätspänning som gjorts vid försöken och som talar för att en värmematta avger den elektriska effekten 575 W , vilket motsvarar 115 W/m^2 . Från detta värde har 5 procent dragits av för att ta hänsyn till eventuella förluster i gränsen mellan värmematta och betong, vilket ger en till betongen tillförd effekt av 109 W/m^2 . Storleken på dessa förluster är svåra att bedöma. Den isolerande verkan som mattans ytskikt under kablarna har kan troligen försummas, se avsnitt 4.1.3 "Jämförelse mellan metoderna". Däremot är det möjligt att andra fenomen, till exempel fukt- eller smutsrelaterade, utgör ett värmemotstånd. För att på något sätt ta hänsyn till detta har dessa 5 procent dragits av. Effekten är en av de två parametrar som senare anpassades till uppmätta resultat.

Rutnät

Som standardrutnät i grundmodellen valdes olika parametrar för de olika blocken. Rutnätet valdes mer finmaskigt för de tunnare blocken och mer grovmaskigt för de tjockare blocken. Inledningsvis valdes ett väldigt finmaskigt rutnät. För att förkorta beräkningstiden gjordes en enklare konvergensstudie som visade att ett grövre rutnät kunde användas utan att noggrannheten försämrades. Vilka parametrar för rutnätet som valdes i programmet och resultaten från konvergensstudien redovisas i bilaga A.5.

3.4.4 Känslighetsanalys

I Tabell 3-4 listades de parametrar som har störst betydelse för vilka resultat som erhöles vid försöken. Det gjordes också en bedömning av hur mycket respektive parameter skulle ha påverkat försöket om dess värde varierades inom det möjliga variationsområdet. De sex parametrar som i och med sin osäkerhet och vikt ansågs kunna påverka försöksresultaten mest valdes ut för känslighetsanalysen.

Med utgångspunkt från grundmodellerna varierades dessa sex parametrar inom det spann som visas i tabell 3-6. Enbart en parameter i taget varierades från grundmodellen. Vid valet av variationsområde utgicks från tabell 3-4.

Tabell 3-6 Studerade parametrar och hur de varierats i känslighetsanalysen.

	Värde grundmodell	Varierade värden
Effekt matta	109 W/m ²	100; 105; 109; 115; 120
Värmekonduktivitet isolering	0,04 W/m·K	0,03; 0,04; 0,05; 0,06; 0,08
Värmekonduktivitet betong	2,0 W/m·K	1,4; 1,7; 2,0; 2,3; 2,6
Initialtemperatur sprängsten och berg	Se avsnitt bilaga A.4	± 1; ± 3;
Värmekonduktivitet sprängsten	0,6 W/m·K	0,3; 0,6; 0,9; 1,2; 1,5; 1,8
Vindhastighet	2 m/s	0; 2; 4

Resultaten från känslighetsanalysen redovisas i avsnitt ”4.2.1 Känslighetsanalysen”.

3.4.5 Jämförelser mellan modelleringar och försök

I syfte att finna en kombination av värmekonduktivitet och effekt hos värmemattan som kan användas i Contest för att modellera värmemattan har resultat från modelleringar av försöken jämförts med de uppmätta resultaten. Vissa av de serier av mätningar som gjordes motsvarade olika försökssituationer fastän mätningarna gjordes vid samma försök. Modelleringarna har därför gjorts för respektive serie av mätpunkter och inte en för respektive försök. För modelleringen för respektive uppmätt mätserie har värmekonduktiviteten på isoleringen samt effekten hos kablarna justerats för att uppnå bästa möjliga överensstämmelse.

Modelleringarna gjordes med utgångspunkt i respektive grundmodell. Enbart värmekonduktiviteten och effekten varierades från denna. Inget tydligt kriterium har använts för att avgöra hur bra de modellerade temperaturförloppen stämmer överens med de uppmätta. Istället har en sammantagen bedömning gjorts utifrån hur väl temperaturförloppen stämmer för respektive mätpunkt. Bedömningen har gjorts genom att visuellt jämföra diagram där temperaturen beskrivs som en funktion av tiden. Några speciella hänsyn har dock tagits:

- I avsnitt 4.2.1 "Känslighetsanalys" visades att mätpunkterna i bottenplattan på höjden 35-55 cm från underkant var relativt opåverkade av de parametrar som bedömdes osäkra, medan andra punkter påverkades mer av dessa osäkra parametrar. Mer vikt har därför lagts vid att erhålla överensstämmelse i dessa mätpunkter än på de övriga mätpunkterna som potentiellt påverkats mer av osäkerheten i de parametrar som inte hör till modelleringen av värmemattan.

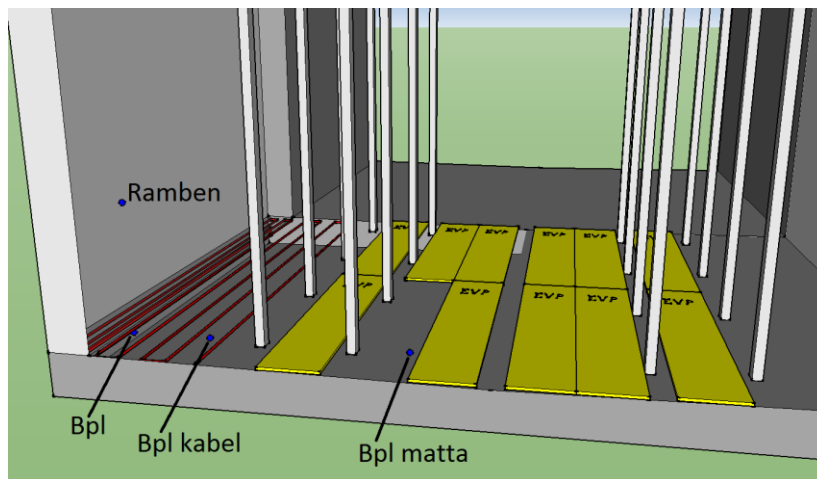
- I avsnitt "4.1.2 Enskilda armeringsjärns temperaturpåverkan" visades att temperaturen i mätpunkterna kring armeringslagren beror av hur nära ett enskilt armeringsjärn de hamnat. Mindre vikt har därför lagts vid att få överensstämmelse i dessa punkter.
- De mätpunkter som ligger närmast sprängsten i försök 1-3 påverkades mycket av eventuella felaktigheter i temperaturegenskaperna hos sprängstenen, se avsnitt 4.2.1. Mindre vikt har därför lagts vid att temperaturförloppet överensstämmer för dessa mätpunkter.
- Solstrålning och kallstrålning från natthimlen påverkar resultaten. Eftersom dessa inte modelleras finns här ett inbyggt fel i utvärderingsmetoden av värmemattorna. När en kombination av värmekonduktiviteten i isoleringen och effekten i kablarna justerats in för varje försök har ingen hänsyn tagits till detta utan den kombination som överlag gav bäst överensstämmelse har valts. Undantaget från detta är det stående vatten som förekom vid försök 3. Här har temperaturförloppen enbart jämförts fram till det att stående vatten ansamlades.
- Ingen vikt har lagts vid att uppnå överensstämmelse mellan den medeltemperatur som beräknats från uppmätta temperaturer och den från Contestberäkningarna. Anledningen till det är att den beräknade medeltemperaturen kan avvika från den verkliga på grund av att mätpunkterna inte täcker hela betongens tjocklek.

Resultaten från jämförelserna redovisas i avsnitt 4.2.2 "Jämförelse mellan modelleringar och försök".

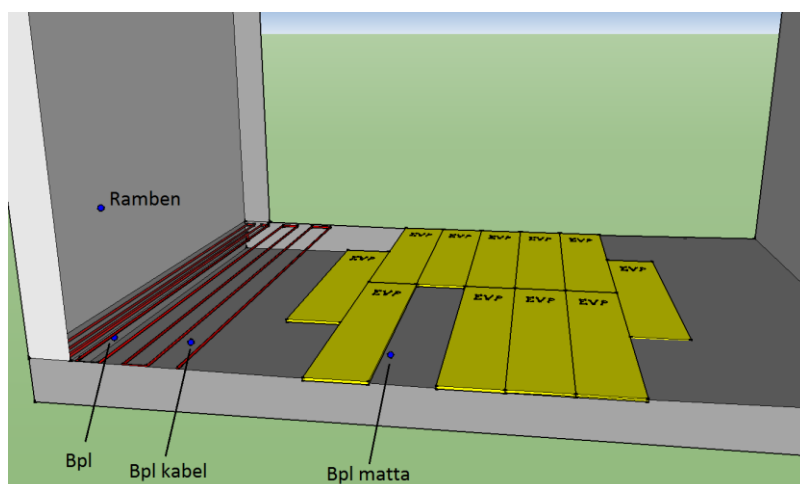
3.5 Exempel på användning av värmemattan

Under uppförandet av tunneln som beskrivs i avsnitt 3.1.2 användes värmemattan i kombination med värmekablar för att reducera sprickrisken i rambenen vid gjutning av ramben och valv. Metoden går ut på att värma upp bottenplattan fram till rambenens ungefärliga temperaturmaximum för att därefter låta båda konstruktionsdelarna svalna av. Värmningen avslutas därför två dagar efter gjutning i och med att värmekablar och värmemattor stängs av och värmemattor och isolering rullas ihop. På så vis minskas temperaturdifferenserna mellan konstruktionsdelarna vilket reducerar sprickrisken.

De två gjutningarna kallas här för gjutning 1 och gjutning 2 och var två av totalt sextio liknande gjutningar av valv och ramben som innefattades i det tunnelprojekt som beskrivs i avsnitt 3.1.2. Spricksäkerheten hanteras i projektet via AMA, se avsnitt 2.2.4. Inga provningar av betongens materialparametrar gjordes utan vid sprickriskberäkningarna användes generella materialparametrar. Vidare var konstruktionens exponeringsklass XC4, XF3 och betongens cementhalt 360 kg/m^3 vilket betyder att spricksäkerhetsfaktorn var 1,25. Vid gjutningarna vidtogs åtgärder enligt arbetsbeskrivningen som var anpassad för dygnsmedeltemperaturen -5 till 5 grader. I figur 3-34 visas de åtgärder som utfördes vid gjutning 1 och i figur 3-35 de vid gjutning 2. Att åtgärderna inte såg likadana ut vid de två gjutningarna beror på att olika formställningar användes. En väsentlig skillnad mellan gjutning 1 och gjutning 2 är att den förra förutom att gjutats mot bottenplattan även göts mot en föregående vägg- och valvetapp medan den senare enbart göts mot bottenplattan. Det senare är fördelaktigare ur sprickrisksynpunkt eftersom att tvånget är mindre. Denna skillnad gjorde att en kortare tid av uppvärmning föreskrivits i arbetsbeskrivningen för det senare fallet.



Figur 3-34 De fyra temperaturgivarnas placering och placering av värmekablar och värmemattornas vid gjutning 1. En matta är inte uttrid i bilden för att inte dölja mätpunkten "Bpl matta" under. Hela bottenplattan täcktes med 10 mm betongtäckmatta innan värmningen.



Figur 3-35 Temperaturgivarnas, värmekablarnas och värmemattornas placering vid gjutning 2. En matta är inte uttrid i bilden för att inte dölja mätpunkten under. Hela bottenplattan täcktes med 10 mm betongtäckmatta.

Det som studerades var temperaturutvecklingen i konstruktionsdelarna och maximala spänningsnivåer i rambenen. Tre fall studerades i Contest avseende temperatur- och spänningsförlopp och det gjordes via tre modeller:

1. **Förkalkylen.** En modell av gjutförloppet där de åtgärder som vidtagits modellerats med generella parametrar. Denna motsvarar en slags modifierad förkalkyl eftersom uppmät lufttemperatur och noterat gjutförfarande använts.
2. **Nollkalkylen.** En modell av gjutförloppet om inga sprickbegränsande åtgärder vidtagits.
3. **Efterkalkylen.** En modell där parametrar, både kopplade till rambenen och till bottenplattan, justerats för att återskapa de uppmätta temperaturförloppen.

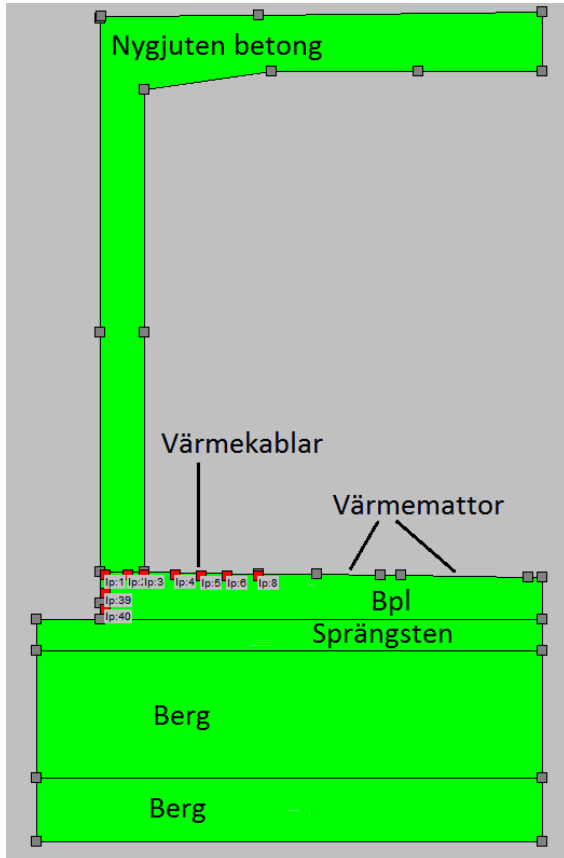
Det andra fallet motsvarar den bedömning av temperatur- och spänningsförlopp som hade kunnat göras på förhand om lufttemperatur och gjutförfarande (inklusive värmande och isolerande åtgärder) varit kända. I denna användes generella parametrar för de material som ingår i gjutsituationen. Lufttemperaturen angavs som den verkligt uppmätta.

Det andra fallet svarar mot situationen att gjutningen skett utan några värmande eller isolerande åtgärder. Lufttemperaturen angavs som den verkligt uppmätta. För att temperaturutvecklingen i rambenen i modelleringen skulle följa den verkligt uppmätta justerades den färska betongens värmeutvecklande egenskaper och de isolerande egenskaperna för rambenens form.

Det tredje fallet är en modifiering av den första modellen för att återskapa det temperaturförlopp som uppmäts och på så vis få en bild av vilka spänningar som uppträtt i betongen. För att göra det justerades ett flertal parametrar:

- Effekten på värmemattan.
- Effekten på kablarna.
- Den färska betongens egenskaper med avseende på värmeutvecklingen i betongen.
- Isoleringens förmåga i den färska betongens ränder.

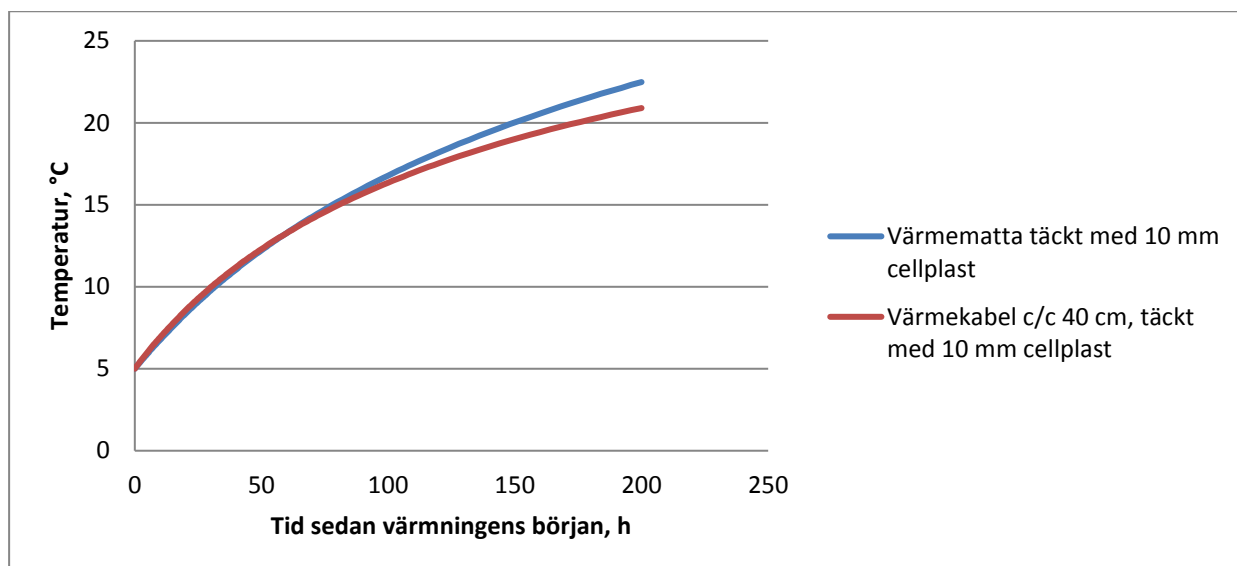
Förutom temperaturförloppet är även betongens mekaniska egenskaper och tvånget avgörande för spänningsutvecklingen. De parametrar som styr detta ändrades inte utan enbart sådana som påverkar temperaturutvecklingen. Figur 3-36 visar hur de modeller som användes vid efterkalkylerna var uppbyggda.



Figur 3-36 Geometri för modellen av gjutning 1.

3.6 Ekonomisk jämförelse med värmekablar

Eftersom det är intressant att veta hur värmemattorna står sig ekonomiskt gjordes en enklare jämförelse med alternativet att använda ingjutna värmekablar (med effekten 40 W/m). Den metod som provats i detta arbete innebar att värmemattan täcktes med 10 mm cellplast. Som framgår av figur 3-37 motsvaras detta relativt väl av att använda ingjutna värmekablar med c/c-avstånd 40 cm och täcka betongen med 10 mm cellplast. De ekonomiska antaganden som gjorts för fallet med värmekablarna har därför grundat sig på den metoden.



Figur 3-37 Ökning av medeltemperaturen i en 70 cm tjock bottenplatta grundlagd på sprängsten och berg. Alla initialtemperaturer och luftens temperatur satts till 5 grader och vindhastigheten till 2 m/s.

Kostnaderna uppskattades för ett hypotetiskt fall där 40 kvadratmeter betongplatta med tjockleken 70 cm värms, vilket för fallet med värmekablar innebär att 100 meter värmekabel läggs ut. Uppskattningen av kostnaderna utgick från de ungefärliga priser som redovisas i Tabell 3-7. Resultaten redovisas i avsnitt 4.4 där även diskuteras vilka andra hänsyn som är relevanta i valet mellan värmematta och värmekablar.

Tabell 3-7 Priser relaterade till de två värmningsmetoderna.

Produkt	Pris (kr)
Värmematta	5000
Värmekabel 35 meter	375
Värmekabel 85 meter	575
Betongtäckmatta 50×2 m	1000
Arbetad timma	500
Kilowattimma	0,8

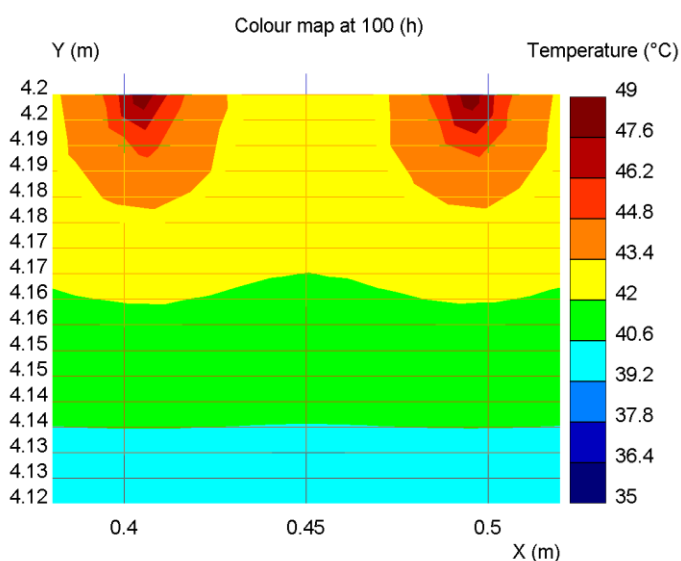
Kapitel 4

4 Resultat

4.1 Förberedande numeriska simuleringar

4.1.1 Temperaturvariationer närmast värmekablarna

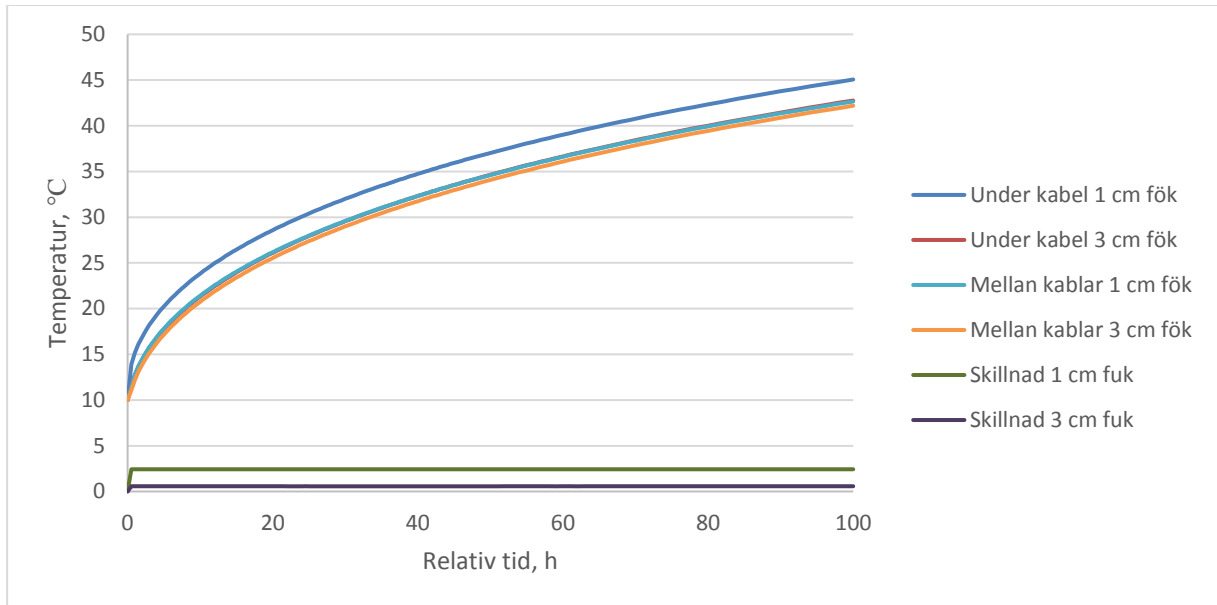
De temperaturförhållanden som uppstår i betongen närmast värmekablarna ser i princip ut som i figur 4-1 för alla de provade kombinationerna. De temperaturskillnader som jämförts har erhållits genom att jämföra temperaturen i två punkter på samma djup där den ena ligger lodrätt under en kabel och den andra lodrätt under en punkt mellan de två kablarna. Det betyder att endast horisontella temperaturskillnader jämförts i detta avsnitt.



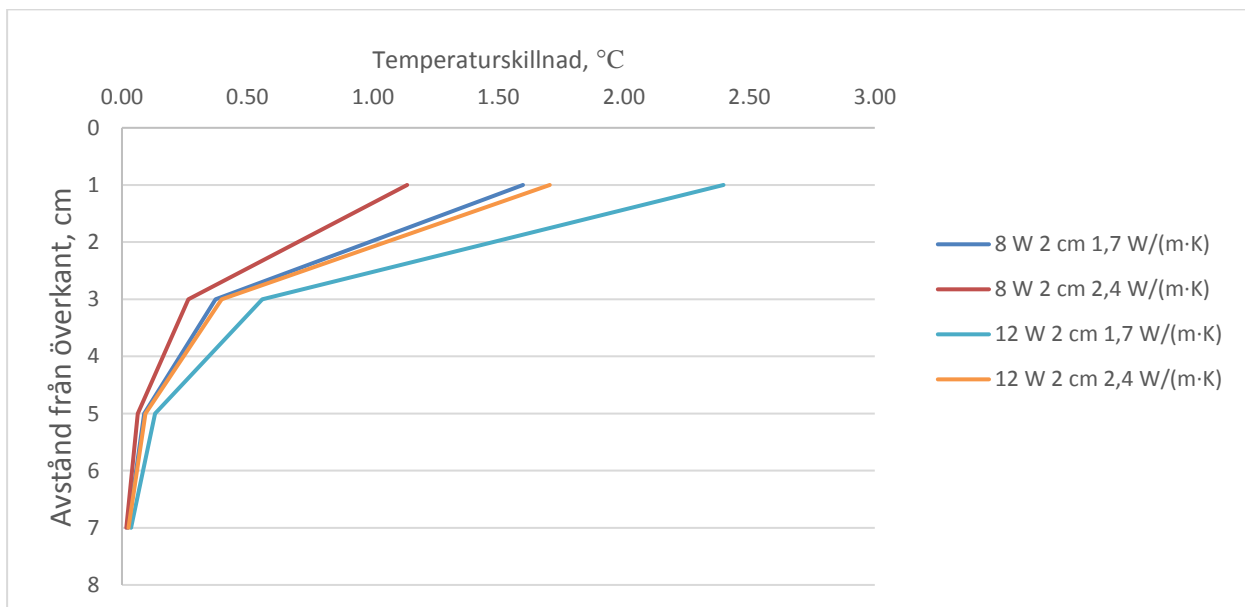
Figur 4-1 Temperaturkarta efter 100 timmars uppvärmning. Den kombination som gav störst temperaturskillnader vid jämförelse under kabel och mitt emellan två kablar. (12 W, 4 cm isolering och 1,7 W/m·K)

Temperaturskillnaderna uppkom i princip omgående vid värmningens början och ligger kvar på samma nivå fram till värmningens slut, se figur 4-2. Temperaturskillnaderna var i storleksordningen 2 grader vid en jämförelse mitt under en kabel kontra mitt emellan två kablar på djupet av 1 cm från betongens överkant. De avtog sedan snabbt och på djupet 5 cm är de i storleksordningen 0,1 grad för de olika provade kombinationerna, se figur 4-3 och figur 4-4.

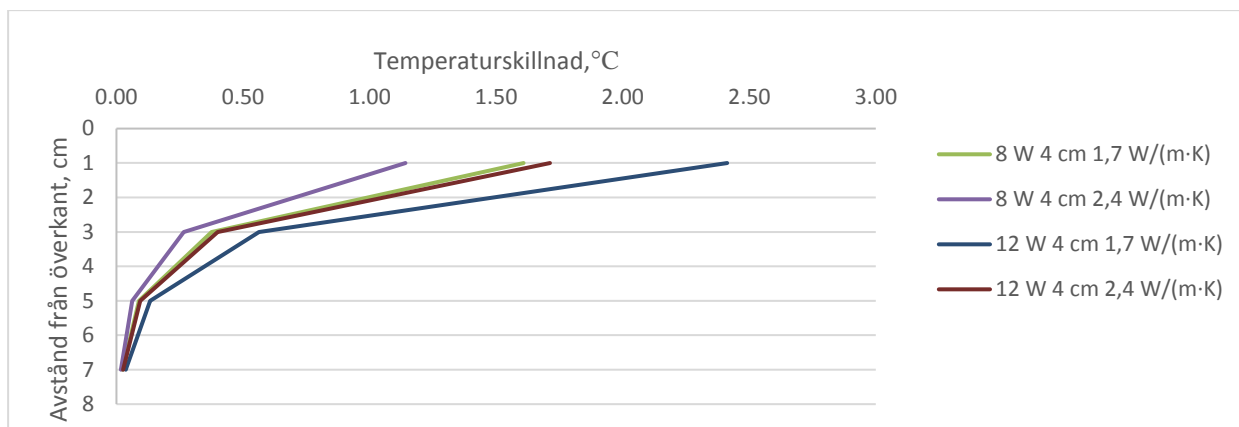
Skillnaderna mellan en punkt mitt under kabeln och en punkt på samma djup mitt emellan kabeln ökade med en högre tillförd effekt hos kablarna men minskade med en ökande värmeledningsförmåga hos betongen, se figur 4-5 och figur 4-6. Isoleringstjockleken hade ingen påverkan på skillnaden. På grund av detta erhöles de största temperaturskillnaderna för kombinationerna med högst tillförd effekt och lägst värmeledningsförmåga i betongen, nämligen då tillförd effekt var 12 W/m och värmeledningsförmågan 1,7 W/(m·K)).



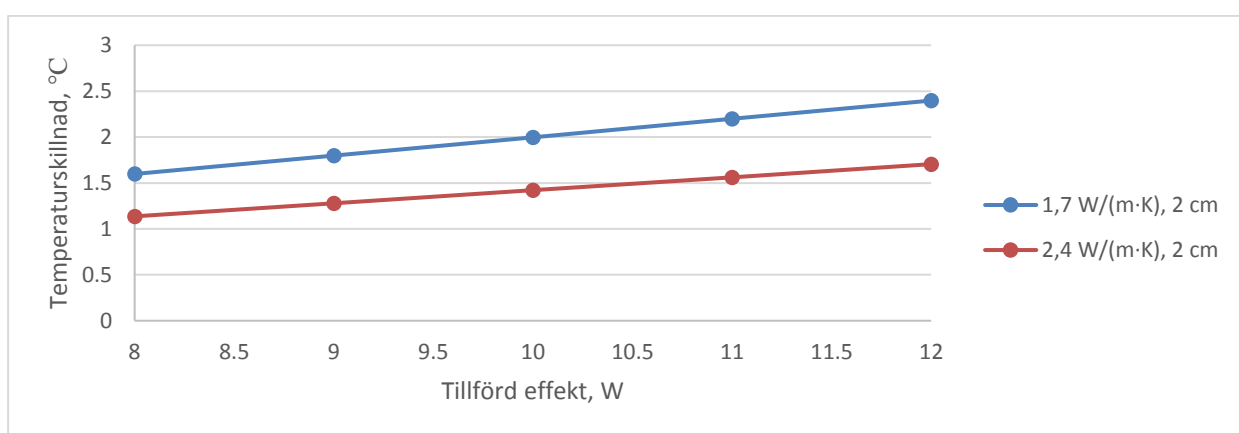
Figur 4-2 Temperaturutveckling under respektive mitt emellan två kablar på olika djup från överkant betong. De lägre kurvorna visar differensen mellan de övre kurvorna på respektive djup. (12 W, 4 cm isolering och 1,7 W/(m·K))



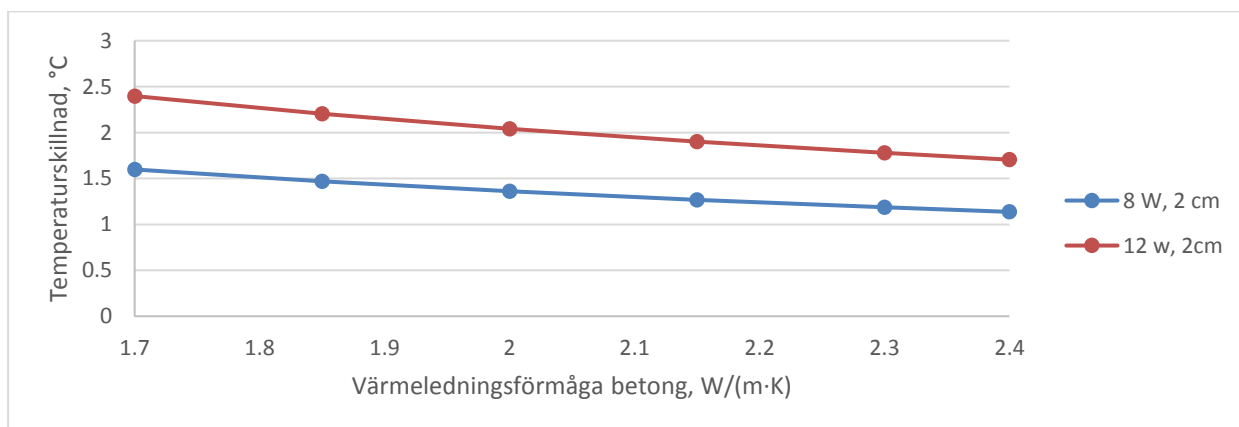
Figur 4-3 Maximala temperaturskillnader för olika kombinationer av tillförd effekt, isoleringstjocklek och värmeledningsförmåga hos betongen.



Figur 4-4 Maximala temperaturskillnader för olika kombinationer av tillförd effekt, isoleringstjocklek och värmeledningsförmåga hos betongen.



Figur 4-5 Maximala temperaturskillnader, 1 cm från överkant betong, vid olika tillförda effekter och konstant isoleringstjocklek och värmeledningsförmåga hos betongen.



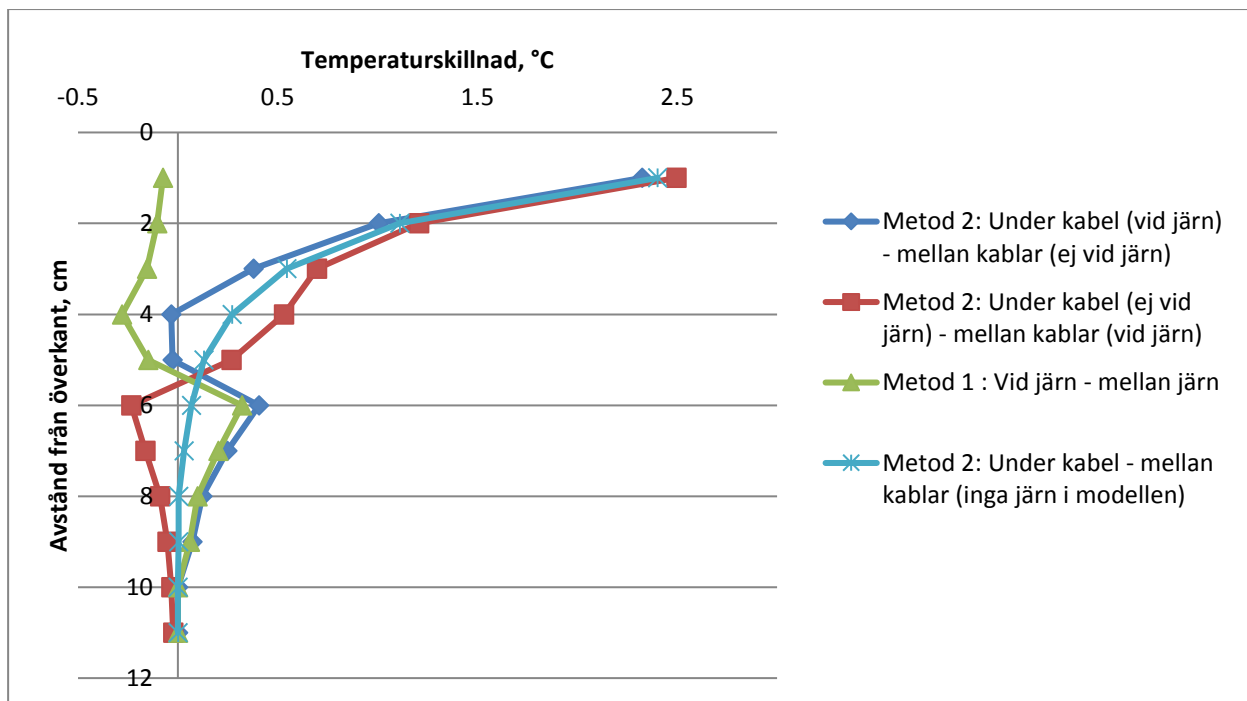
Figur 4-6 Maximala temperaturskillnader, 1 cm från överkant betong, vid olika värmeledningsförmågor och konstant isoleringstjocklek och tillförd effekt.

Resultaten visar att de lokala temperaturdifferenserna i modelleringen som störst för de provade fallen var 2,5 grader vid en jämförelse horisontalt på djupet 1 cm från överkant betong. På detta avstånd placerades den högst belägna mätpunkten vid de försök som gjordes.

Detta pekar mot att de uppmätta temperaturerna i denna mätpunkt skulle kunna vara två grader högre, likväl som två grader lägre i denna mätpunkt om mattan flyttats några centimeter. Djupare än tre cm ner i bottenplattan är de lokala temperaturvariationerna i horisontalld små, mindre än 0,5 grader vid 3 cm och mindre än 0,15 grader vid 5 cm för de provade fallen. Att justera in parametrar för modellering av värmemattan görs därför bäst genom jämförelser med temperaturer från mätpunkter på djup större än 5 cm från betongens överkant.

4.1.2 Enskilda armeringsjärns temperaturpåverkan

När armeringsjärn lades in i modellen förändrades de horisontella temperaturskillnaderna lite grann jämfört med dem som redovisades i förra avsnittet. Figur 4-7 visar vilka variationer som kan fås beroende på om temperaturen mäts vid ett armeringsjärn eller mitt emellan två järn. Temperaturförhållandena som jämförts redovisas som temperaturkartor i bilaga A.6.



Figur 4-7 Temperaturskillnad mitt under kabel och mellan två kablar, dvs. temperaturskillnaden för punkter längs linjen $X=2,405$ jämfört med punkter på linjen $X=2,45$ i diagrammen 3.50–3.53. Vid det testade fallet: 12 W, 4 cm isolering och $1,7 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$.

Om metod 1 används, dvs. jämn effekt längs randen uppkommer inga temperaturskillnader i horisontalld om inte järn modelleras. När 16-järnen i överkantsarmeringen modellerades uppkommer vissa horisontella temperaturskillnader kring järnet vilket ses i figur 4-7. Skillnaderna ovanför järnet beror på att betongen ovanför järnet blir kallare än betongen på samma djup men en bit från järnet. På motsvarande sätt blir betongen under järnet varmare än betongen på samma djup men en bit från järnet. Skillnaderna avtar ganska snabbt i vertikalld och 2 cm under järnet är de för det studerade fallet mindre än 0,1 grader och de avtar på ungefär samma vis ovanför järnet.

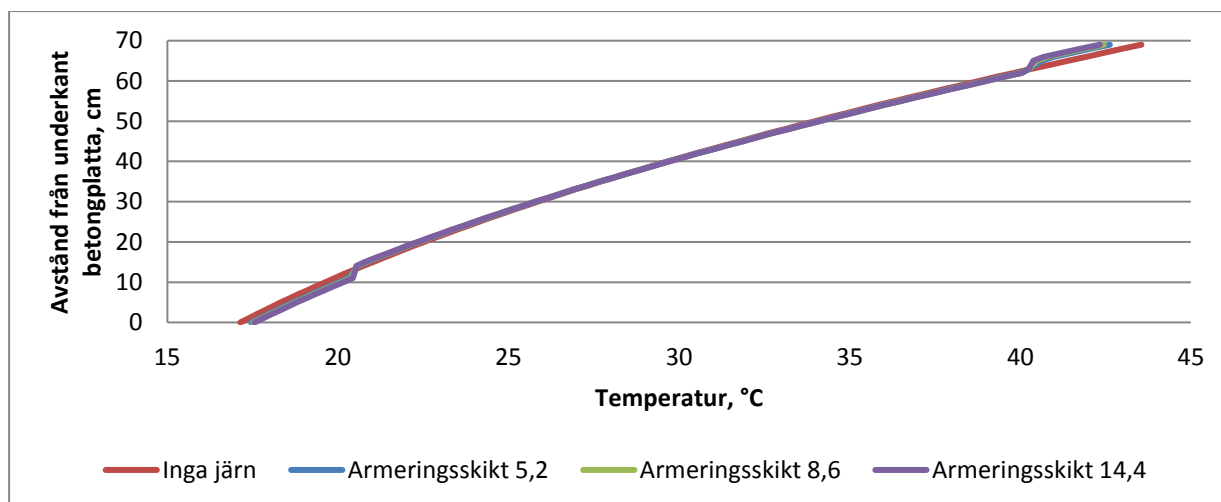
Om metod 2 används, dvs. effekten tillförs punktvis, förändras de temperaturskillnader som kan ses i förra avsnittet (t.ex. figur 4-3) på grund av järnens påverkan. Detta beror på att järnen leder ner värmen effektivare än betongen. För jämförelse modellerades dels situation då en värmekabel hamnar precis ovanför ett järn, dels situationen att en punkt mellan två kablar hamnade precis ovanför ett järn. Järnen antingen ökar eller minskar den horisontella temperaturskillnaden beroende på om de hamnat under eller mellan kablarna. Till exempel indikerar figur 4-7 att den största skillnad som kan fås vid mätningar på nivån 4 cm från överkant är cirka 0,27 grader om ingen hänsyn tas till armeringsjärn medan den kan bli cirka 0,53 grader då armeringsjärnets effekt medtagits i modellen.

I det prövade fallet verkade effekten från den punktvis tillförda värmen och effekten från armeringsjärnen kunna ses som två separata faktorer som båda gav upphov till en temperaturskillnad i horisontalled. Dessa skillnader var, även när båda faktorerna modellerades, försumbara djupare än 4 cm ner i betongen. I undersökningen modellerades dock bara ett järn. I de verkliga fall där ett tvärgående järn korsar ett längsgående järn i överkantsarmeringen eller då grövre armering lagts in är det troligt att skillnaderna kan bli större.

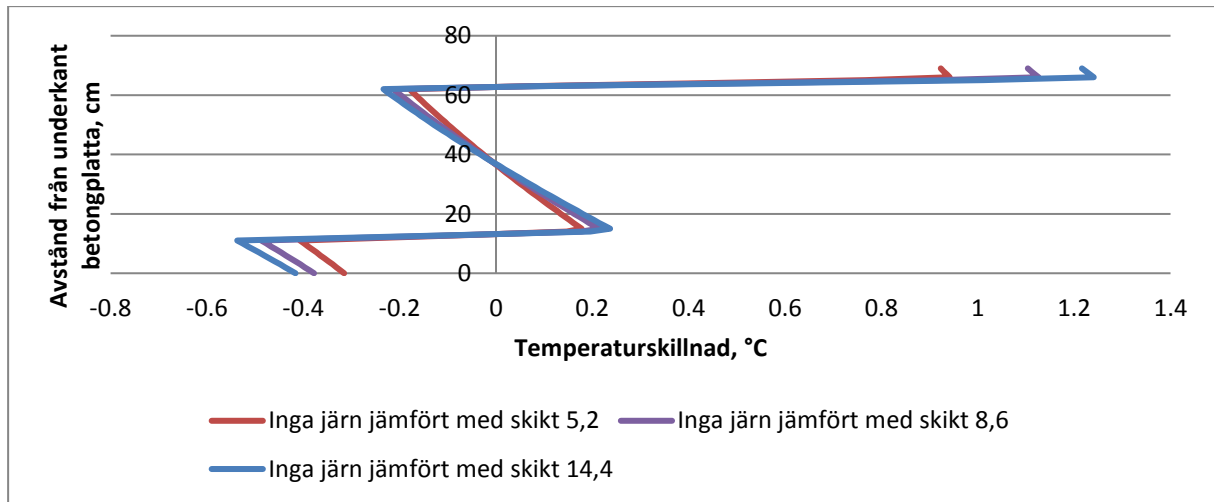
Armeringslagrens temperaturpåverkan

När egna block skapades för betongen i höjd med över- och underkantsarmeringen och dessa tilldelades en högre värmekonduktivitet påverkades temperaturfördelningen i bottenplattan i huvudsak ovanför överkantsarmeringen och under underkantsarmeringen, medan den påverkades mindre däremellan. Detta illustreras av figur 4-8 och figur 4-9.

Vid de värmekonduktiviteter som provades erhöles en största skillnad på 0,9 grader efter 100 timmars modellering av värmemattan, vilket kan ses i figur 3.55. Mellan armeringsskikten är skillnaden ännu mindre, knappt än 0,25 grader för den provade modellen. När värmekonduktiviteten i armeringsskikten ökas motsvarande en fördubbling respektive fyrdubbling av armeringen ökar skillnaderna något men inte proportionellt mot ökningen av värmekonduktiviteten. Skillnaderna var störst vid modelleringens slut. Medeltemperaturen i betongen påverkades knappt alls av armeringsskikten.



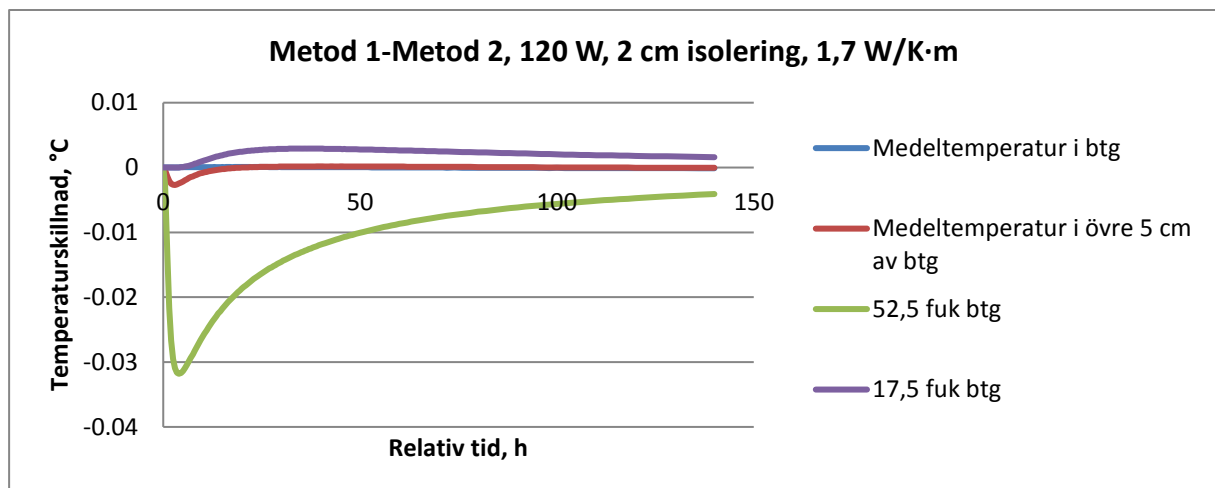
Figur 4-8 Temperaturer i bottenplattan efter 100 timmars modellering av värmemattan för olika värmekonduktiviteter i armeringsskiktet.



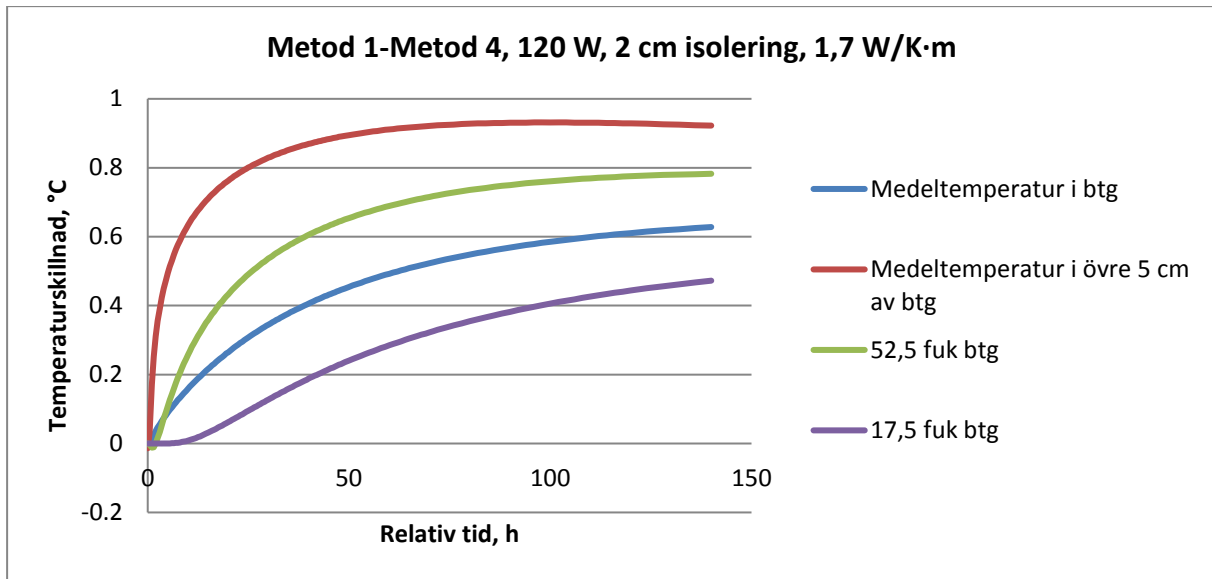
Figur 4-9 Temperaturskillnader när armeringsskikten modellerats med förhöjda värmekonduktiviteter jämfört med när hela betongen hade samma värmekonduktivitet.

4.1.3 Jämförelse mellan metoderna

När resultaten av uppvärmningen enligt metod 1, 2 och 3 jämfördes visade det sig att det inte var någon skillnad i temperaturförlopp för de jämförda mätpunkterna. I figur 4-10 visas vilken skillnad i temperatur som metod 2 gav i förhållande till metod 1. Figurerna visar den av de provade kombinationerna av effekt, isoleringstjocklek och värmeledningsförmåga hos betongen som gav de största skillnaderna. Diagrammet visar att det inte har någon betydelse vilken av metod 1 eller 2 som används om inte lokala temperaturvariationer i det översta skiktet närmast kablarna (de 5 översta cm) ska studeras. På samma sätt förhöll det sig när metod 1 jämfördes med metod 3. Den skillnad som ändå kan ses i figur 4-10 för punkten 52,5 cm från underkant kan möjligen vara kopplat till rutnätets uppbyggnad.



Figur 4-10 Skillnad i temperatur mellan metod 1 och 2.



Figur 4-11 Skillnad i temperatur mellan metod 1 och 4.

Metod 4 skiljer sig däremot från de övriga tre vilket är naturligt då värmekablarna isolerats något från betongranden. Ett 1 cm tjockt block med temperaturegenskaper motsvarande ett plastmaterial lades till för denna modellering. Blocket lades mellan värmekablarna och betongen för att representera det isolerande material som mattans ytskikt av PVC-plast utgör. Även vid ett så pass tjockt lager av plast som 1 cm minskades inte uppvärmningen av medeltemperaturen mer än cirka 0,6 grader, vilket figur 4-11 visar. I verkligheten är ytskiktet bara cirka 1 mm tjockt varför dess isolerande inverkan kan försummas. Det provades också att öka värmekapacitet hos isoleringsblocket i metod 3. Detta gav ingen märkbar skillnad i temperaturförloppen om inte värmekapaciteten ökades orimligt mycket.

Om man bortser från de lokala temperaturförhållandena högst upp i betongen finns ingen praktisk skillnad mellan metod 1, 2 och 3 förutom att metod 1 är enklare att använda i Contest. Vitsen att använda metod 3 är liten eftersom värmetrögheten i isoleringen inte har någon betydelse. Vitsen med att använda metod 4 är också liten eftersom ytskiktets isolerande betydelse är så liten. Därför är metod 1 en lämplig metod för att modellera värmemattan.

4.1.4 Slutsatser av de förberedande numeriska simuleringarna

Några slutsatser kan dras av de simuleringar som genomförts:

- Temperaturskillnaderna i horisontalled på grund av att effekten tillförs punktvis i värmekablarna var försumbar nedanför 5 cm från betongens överkant.
- Temperaturen i betongen invid över- och underkantsarmeringen skilde sig från den på samma höjd i betongen men en bit från järnen. För enbart ett 16-järn är var de största skillnaderna cirka 0,3 grader. För grövre järn eller flera lager av järn skulle skillnaderna naturligtvis bli något större.

- Att öka värmekonduktiviteten för armeringsskikten gjorde skillnad för vilka temperaturer som erhöles under underkantsarmeringen och över överkantsarmeringen. Skillnader på uppemot 0,9 grader erhöles.
- Det finns ingen anledning att använda de krångligare metoderna 2, 3 och 4 för att modellera värmemattan. Dessa modellerade temperaturförhållanden närmast värmemattan bättre men det har ingen betydelse vid sprickriskberäkningar. De modellerade medeltemperaturerna och temperaturgradienterna över bottenplattans tjocklek var desamma för de olika metoderna. Den isolering som värmemattans ytskikt utgör är försumbart och därför finns ingen anledning att använda metod 4.

4.2 Fältförsöken

4.2.1 Känslighetsanalys

I känslighetsanalysen varierades de sex parametrar som har störst påverkan på temperaturutvecklingen för att undersöka vilken inverkan det fick på temperaturutvecklingen i betongen. En parameter i taget varierades från grundmodellen. I tabell 4-1 visas vilka parametrar som varierades och inom vilka intervall.

Tabell 4-1 Studerade parametrar och hur de varierades.

Parameter	Förkortning	Provat intervall	Enhet
Initialtemperatur sprängsten och berg	T_{mark}	± 3	$^{\circ}\text{C}$
Värmekonduktivitet betong	λ_{c}	1,4-2,6	W/m·K
Värmekonduktivitet sprängsten	λ_{spr}	0,3-1,8	W/m·K
Värmekonduktivitet isolering	λ_{iso}	0,03-0,08	W/m·K
Effekt värmematta	P_{k}	100-120	W/m ²
Vindhastighet	v	0-4	m/s

Det som studerades var dels hur de olika parametrarna påverkade medeltemperaturen i betongen, dels hur de påverkade temperaturfördelningen i betongen. Detta har i huvudsak studerats under uppvärmningsfasen och inte i avsvlningsfasen. Anledningen till att temperaturfördelningen studerades var för att utröna på vilka höjder i betongen, och därmed för vilka mätpunkter, som påverkan från de osäkra parametrarna var liten. Sådana mätpunkter skulle vara bättre för en jämförelse med uppmätta resultat eftersom de i huvudsak beror av de två parametrarna som senare bestämdes, dvs. effekten i värmekablarna och isoleringens värmekonduktivitet, men däremot inte så mycket av de övriga parametrarna i känslighetsanalysen. Om inget annat nämns så är de temperaturer som redovisas nedan under uppvärmningsfasen. Resultaten redovisas i sin helhet i bilaga A.1, i detta avsnitt sammanfattas resultaten.

Initialtemperaturen i sprängsten och berg hade liten betydelse för medeltemperaturen i betongen. Fastän temperaturer varierades inom ett spann av 6 grader höll sig medeltemperaturen inom ett spann av knappt 1,5 grader. I de 20 cm närmast betongens

underkant blev skillnaden något större, uppemot 2-3 grader. Skillnaden avtar högre upp i betongen och är i princip obefintlig närmast värmemattan.

Värmekonduktiviteten i betongen hade mycket liten påverkan på medeltemperaturen för alla mätserier. Det provade intervallet gav för de olika mätserierna i bottenplattorna en maximal skillnad på knappt 0,5 grader. De högsta temperaturerna erhöles för det högsta provade värdet på värmekonduktiviteten. För valvet, som inte hade någon isolering eller anliggande mark i underkant, var skillnaden större men fortfarande inte stor, cirka 1 grad. Värmekonduktiviteten i betongen påverkar temperaturfördelningen i betongen mer än medeltemperaturen. Vid högre värmekonduktivitet höjs temperaturen i den nedre delen av betongen men minskar i den övre delen, vilket resulterar i att medeltemperaturen knappt ändras. Ungefär i mitten av betongen var temperaturen i princip densamma oavsett värmekonduktivitet i betongen. Skillnaderna i under- och överkant var i storleksordningen 3 grader. 10 cm in i betongen var de i storleksordningen 2 grader.

Sprängstenens värmekonduktivitet påverkade medeltemperaturen genom att höja den vid hög isolerande förmåga (låg värmekonduktivitet) och sänka den vid låg isolerande förmåga (hög värmekonduktivitet). Skillnaderna inom det varierade intervallet var ganska stora vilket delvis berodde på att intervallet var stort på grund av att osäkerheten om det verkliga värdet var stor. Skillnaderna var för de olika mätserierna mellan 1 och 4 grader. De största skillnaderna erhöles för de försök som pågick under längst period. Skillnaderna var störst längst ner i bottenplattan. Vid 10 cm från underkant var de mellan 3 och 5,5 grader beroende av försök, och de avtar högre upp i betongen men även vid de övre 10 cm var skillnaderna i storleksordningen 1 grad.

Isoleringens värmekonduktivitet och effekten på värmekablarna påverkar temperaturen i hela betongen men mest upptill. En skillnad mellan dessa två parametrars påverkan är att den första påverkar temperaturutveckling mer i ju längre värmningen pågår medan den andra påverkar temperaturutvecklingen mindre ju längre värmningen pågår.

Vindhastigheten hade liten påverkan på medeltemperaturen, för samtliga mätserier varierade den mindre än 1,6 grader för det provade intervallet. Om däremot temperaturskillnaderna i avsvlningsfasen studeras kan konstateras att skillnaderna är stora, uppemot 6-7 grader.

I bilaga A.1 beskrivs på vilket sätt de sex varierade parametrarna påverkade temperaturerna när parametern varierades inom variationsområdet. I de fall där något särskilt uppträtt har det visats i diagram. För andra parametrar har dess betydelse enbart beskrivits i ord. Generellt sett var likheterna stora mellan modelleringar för samma konstruktionstyp när samma parameter varierades. För varje parameter har studerats två saker: utvecklingen av medeltemperaturen samt temperaturfördelningen i betongen. Slutsatserna av analysen i bilaga A.1 presenteras nedan.

Slutsatser av känslighetsanalysen

De viktigaste slutsatserna av känslighetsanalyserna är:

- Att inom rimliga ramar, ± 3 grader, missta sig på temperaturen i bottenplattan har liten betydelse för temperaturutvecklingen i betongen.
- Att anta fel värmekonduktivitet i betongen har ingen stor påverkan på medeltemperaturer i betongen.

- Värmekonduktiviteten i betongen förändrar däremot temperaturgradienten i betongen, vilket kan ge relativt stora skillnader i temperatur nära betongens ytor. Temperaturen kring 35-50 cm från underkant betong för bottenplattorna och 25-50 cm för valvet förändras inte mycket när betongens värmekonduktivitet varierades. Mätpunkterna kring dessa höjder är därför lämpliga för jämförelser eftersom de inte påverkats mycket av osäkerheter i värmekonduktivitetens värde.
- Värmekonduktiviteten i sprängsten varierades över ett brett område: 0,3-1,8 W/m·K eftersom det var svårt att bedöma dess verkliga värde. Beroende på vilket av dessa värden som angavs vid beräkningarna varierade de erhållna medeltemperaturerna i betongen relativt mycket. Av de parametrar som provades vid känslighetsanalysen var värmekonduktiviteten i sprängstenen den som visade sig ha potential att vara den största felkällan.
- Variation av värmekonduktiviteten i sprängstenen påverkade temperaturerna längst ner i betongen mest men skillnader på ungefär 0,5-3 grad erhöles även för de översta mätpunkterna.
- För att påskynda temperaturökningen i betongen kan effekten höjas eller värmekonduktiviteten i isoleringen sänkas. Att höja effekten ökar temperaturhöjningen snabbt i början av försöket men ju varmare betongen blir desto mer mattas ökningen av. Att öka isoleringen ger omvänt inte så mycket snabbare uppvärmning i början av försöket men ju längre försöket går desto större blir effekten av den ökade isoleringen.
- Vindhastigheten har liten påverkan på temperaturutvecklingen under uppvärmningsskedet för försöken på bottenplattorna. Vid försök 4 har vindhastigheten i underkant viss betydelse för temperatur som helhet i betongen eftersom undersidan inte är isolerad.
- Vid avsvälningsskedet är vindens påverkan stor vilket gör det vanskligt att dra några slutsatser om andra parametrar från avsvälningsskurvorna utan att känna till vindhastigheten.
- För att göra jämförelser med uppmätta resultat och utifrån dessa bestämma värmekonduktiviteten på isoleringen och effekten i värmekablarna är vissa mätpunkter bättre lämpade än andra. Mätpunkterna inom de 20 cm närmast underkant betong är inte lämpliga eftersom temperaturen där kan ha påverkats mycket av eventuella fel i ansatt värmekonduktivitet i sprängstenen, ansatt värmekonduktivitet i betongen och initialtemperatur i sprängsten och berg. Mätpunkterna i de övre 20 cm är mindre lämpliga för att temperaturen där kan ha påverkats dels av eventuella fel i betongens värmekonduktivitet, dels av armeringsjärnets värmeledande förmåga. Säkrast är att jämföra temperaturen i mätpunkterna däremellan.

4.2.2 Jämförelse mellan modelleringar och försök

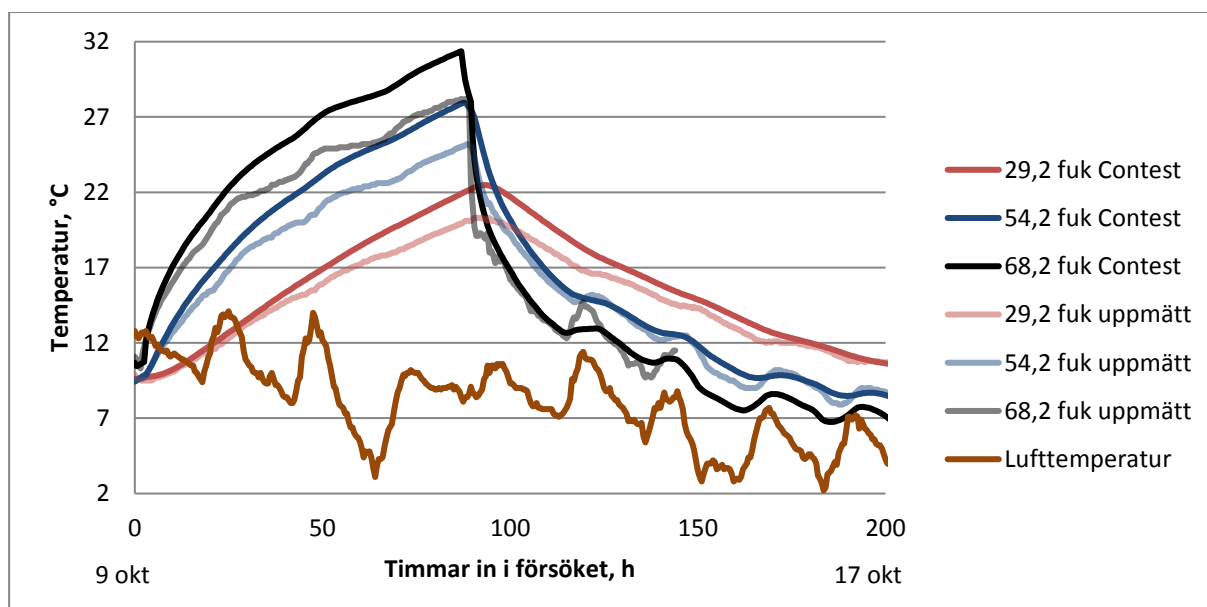
I detta avsnitt har jämförelser mellan modelleringar och uppmätta resultat gjorts. När skillnader funnits har orsakerna till dem diskuterats. De diagram som redovisas innehåller för tydlighetens skull enbart temperaturkurvor för tre mätpunkter. För att få bäst uppfattning av temperaturgradienten redovisas den lägsta, den mittersta, och den högsta mätpunkten i betongen. De modellerade och de uppmätta temperaturförloppen för dessa mätpunkter är uppritade i samma diagram för att de ska kunna jämföras.

I slutet av avsnittet för varje mätserie anges också den kombination av värmekonduktivitet på isoleringen och effekt som gav bäst överensstämmelse med uppmätta resultat. Dessa låg till grund för den bedömning av generella parametrar för värmemattan som görs i avsnitt 4.2.3.

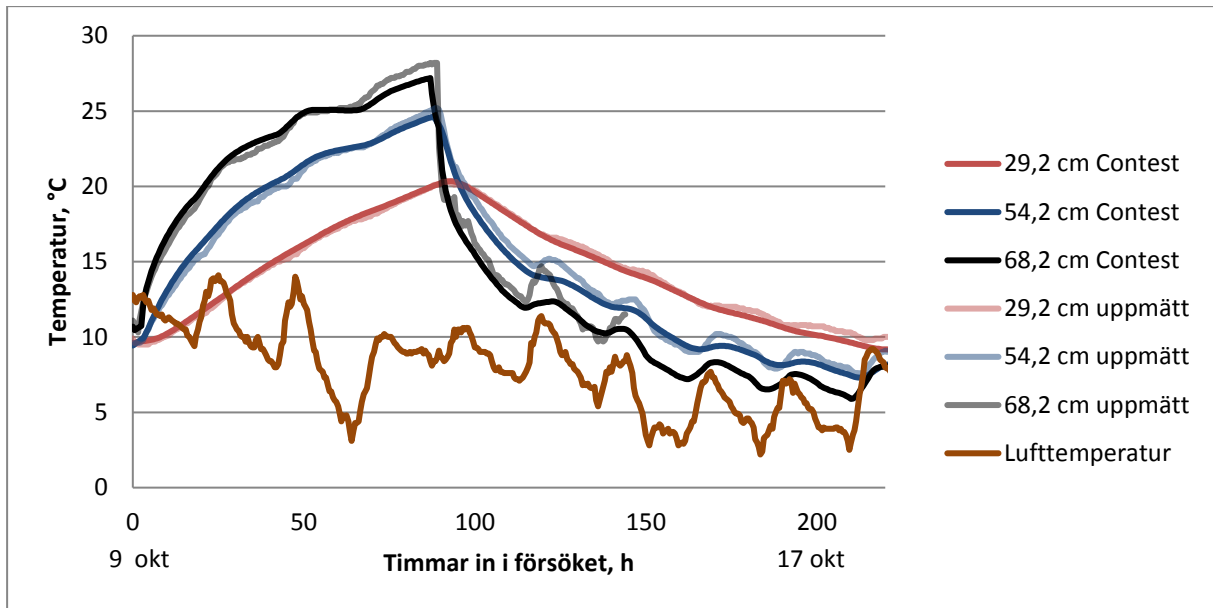
Försök 1, isolerad med betongtäckmatta

Vid försök 1 uppmättes temperaturer i två mätserier med skilda förhållanden. Det här avsnittet behandlar den som täcktes med betongtäckmatta. Grundmodellen i Contest gav högre temperaturer än dem som uppmätts vid försöket, se figur 4-12. De dalar i temperaturökningen som uppmätts i de övre mätpunkterna (cirka 26 respektive 50 timmar in i försöket) stämmer väl överens tidsmässigt med sänkningen av lufttemperaturen under kvällen och början av natten den 10 respektive 11 oktober. Den modellerade kurvan från grundmodellen är relativt nära den uppmätta fram tills kvällen den 10 oktober. Anledningen till att kurvorna går isär kan vara att det i Contest ej tagits hänsyn till eventuell värmestrålning mot himlen, att den isolerande förmågan underskattats i Contest, att värmekablarnas verkliga effekt underskattats i Contest eller möjligen att delar av effekten försvinner i gränsen mellan kabel och betong (till exempel på grund av avdunstning). Dipparna i temperaturökningen under nätterna är markantare i de uppmätta resultaten än i de modellerade vilket kan beror på att strålning mot natthimlen inte modellerats i Contest.

Det uppmättes i det aktuella området att totalt 8 mm regn kommit lite då och då under de sista 18 timmarna innan värmningen stängdes av (SMHI, 2015). Detta verkar inte ha påverkat temperaturutvecklingen speciellt mycket utan temperaturökningen under denna period var högre än under de föregående nätterna, vilket troligen också berodde på att lufttemperaturen var högre.

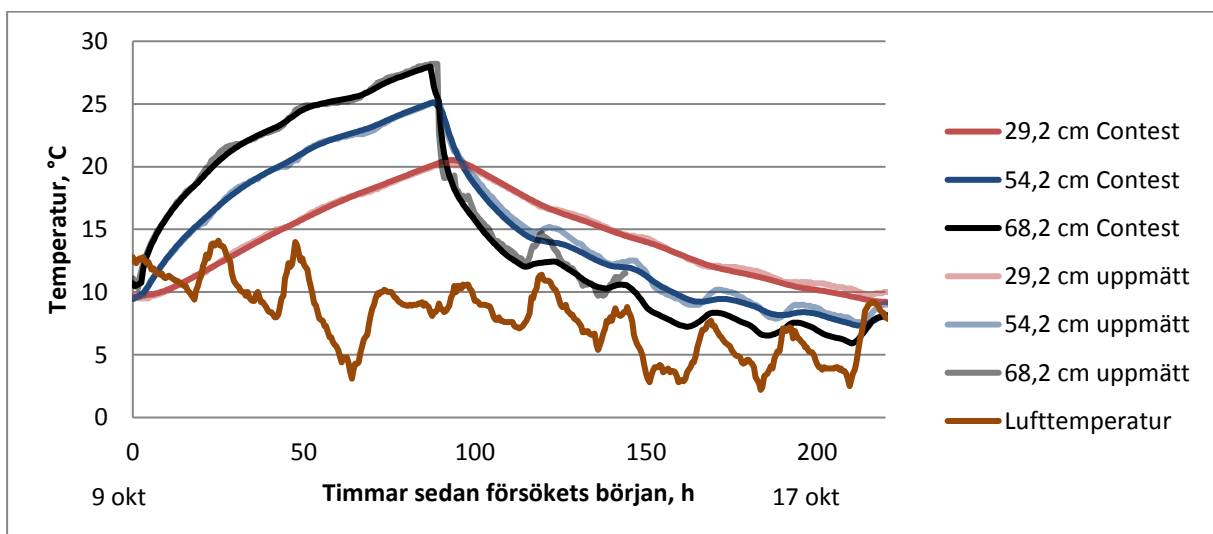


Figur 4-12 Grundmodellen, dvs. $\lambda_{iso} = 0,04 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ och $P_k = 109 \text{ W/m}^2$. Försök 1, isolerad.



Figur 4-13 Grundmodellen, men med $\lambda_{iso} = 0,08 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ och $P_k = 109 \text{ W/m}^2$. Försök 1, isolerad.

Genom att enbart öka isoleringens värmekonduktivitet från grundmodellen följde kurvorna varandra bättre, vilket ses i figur 4-13 ovan. En tendens till att de uppmätta kurvorna är något högre kan dock ses i slutet av uppvärmningsperioden. Att låta isoleringens egenskaper vara desamma som i grundmodellen och istället sänka effekten hos kablarna visade sig ge bättre överensstämmelse även mot slutet av uppvärmningsperioden, se figur 4-14. Tyvärr mättes inga temperaturer i de nedre delarna av bottenplattan, varför det är svårt att veta om modelleringarna stämmer även där. För de förutsättningar som rådde för de isolerade försök 1 kan konstateras att en modellering enligt grundmodellen men med sänkt effekt på kablarna från 109 W/m^2 till 92 W/m^2 gav god överensstämmelse mellan uppmätta och modellerade temperaturer, vilket kan ses i figur 4-14.



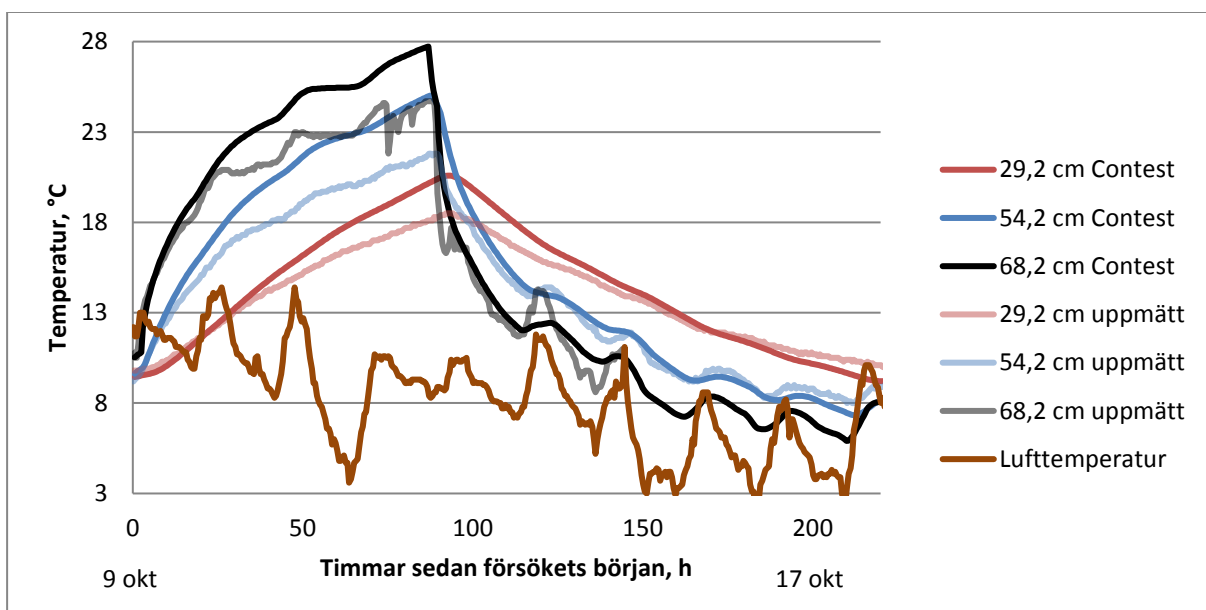
Figur 4-14 Grundmodellen, men med $\lambda_{iso} = 0,04 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ och $P_k = 92 \text{ W/m}^2$. Försök 1, isolerad.

Försök 1, enbart mattor

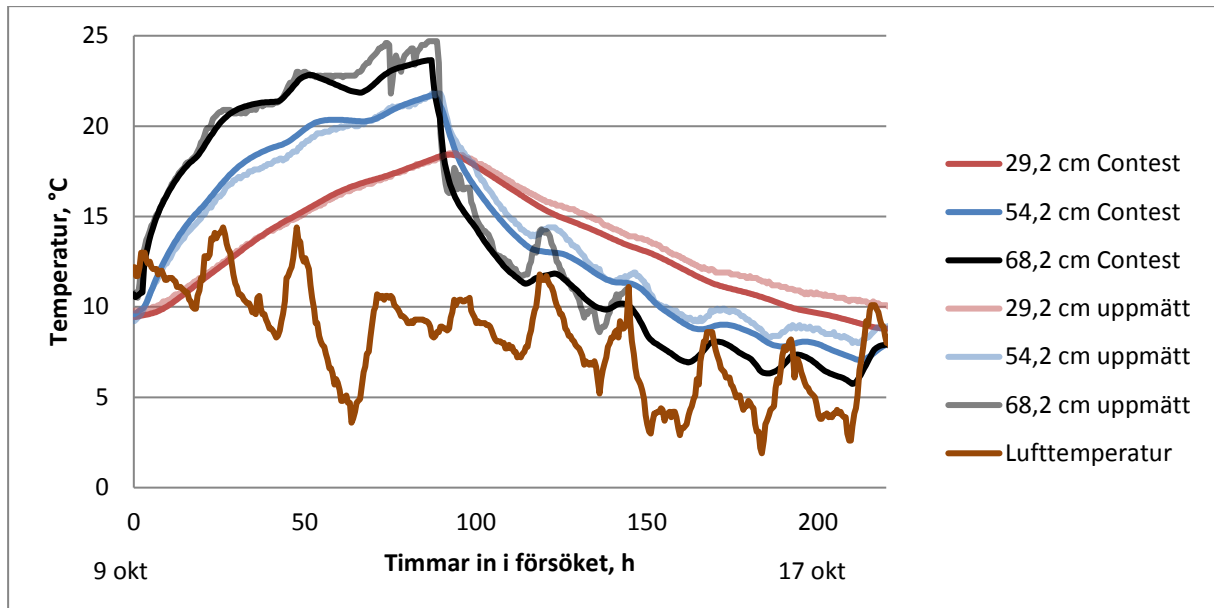
Även för de mätningar som gjordes under de oisolerade mattorna gav grundmodellen i Contest högre temperaturer än dem som uppmätts vid försöket, se figur 4-15. De två dalarna i temperaturökningen som uppmätts i de övre mätpunkterna (cirka 26 respektive 50 timmar in i försöken) stämmer väl överens tidsmässigt med natten till den tionde oktober respektive natten till den elfte oktober då lufttemperaturen sjunkit relativt mycket.

Skillnaden mellan resultaten från grundmodellen och uppmätta resultat ökar ända från början av försöket men ökningen är större under dessa två nätter. Ökningen av skillnaden under nätterna kan tänkas bero antingen av att isoleringen överskattats i Contest och att detta slår igenom när temperaturen sjunker under natten, eller att strålningen till natthimlen sänkt temperaturen vid de verkliga försöken. Strålning har inte beaktats i modelleringarna och de två nätterna var relativt molnfria. Oavsett orsak till dipparna är det uppenbart att antingen isoleringsförmågan eller effekten måste sänkas i Contest för att få överensstämmelse med uppmätta resultat eftersom tendensen hos kurvorna från Contest är att temperaturen stiger för snabbt redan innan de två dalarna.

Det regn som föll under de sista 18 timmarna innan värmningen stängdes av kan ha orsakat det oregelbundna mönster i den översta mätpunktens temperatur under dessa timmar.



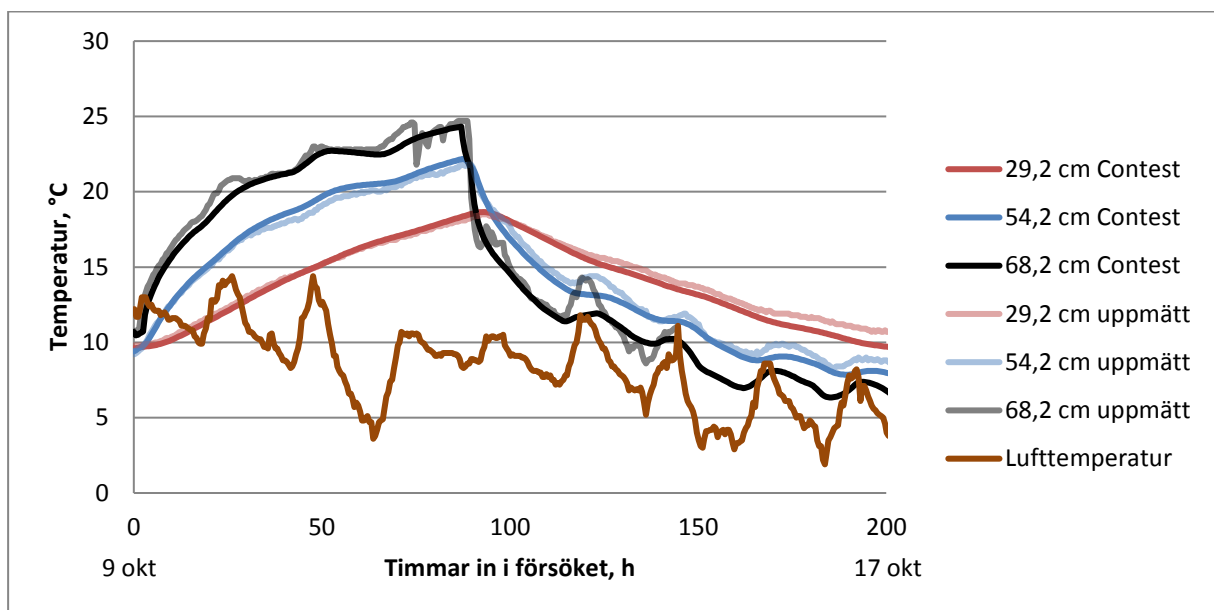
Figur 4-15 Grundmodell, dvs. $\lambda_{iso} = 0,04 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ och $P_k = 109 \text{ W/m}^2$. Försök 1, östra (oisolerade).



Figur 4-16 Grundmodellen, men med $\lambda_{iso} = 0,08 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ och $P_k = 109 \text{ W/m}^2$. Försök 1, östra (oisolerade).

Att på samma sätt som för försök 1, västra, minska värmekonduktiviteten i isoleringen i Contest ger bättre överensstämmelse vilket illustreras i figur 4-16. De temperatursänkningar som då fås i de två övre punkterna i Contest vid sänkningen av lufttemperaturen vid ungefär 65 timmar har dock inte sin motsvarighet i de uppmätta resultaten, vilket tyder på att isoleringens förmåga är större än det som motsvaras av $0,08 \text{ W/m}\cdot\text{K}$.

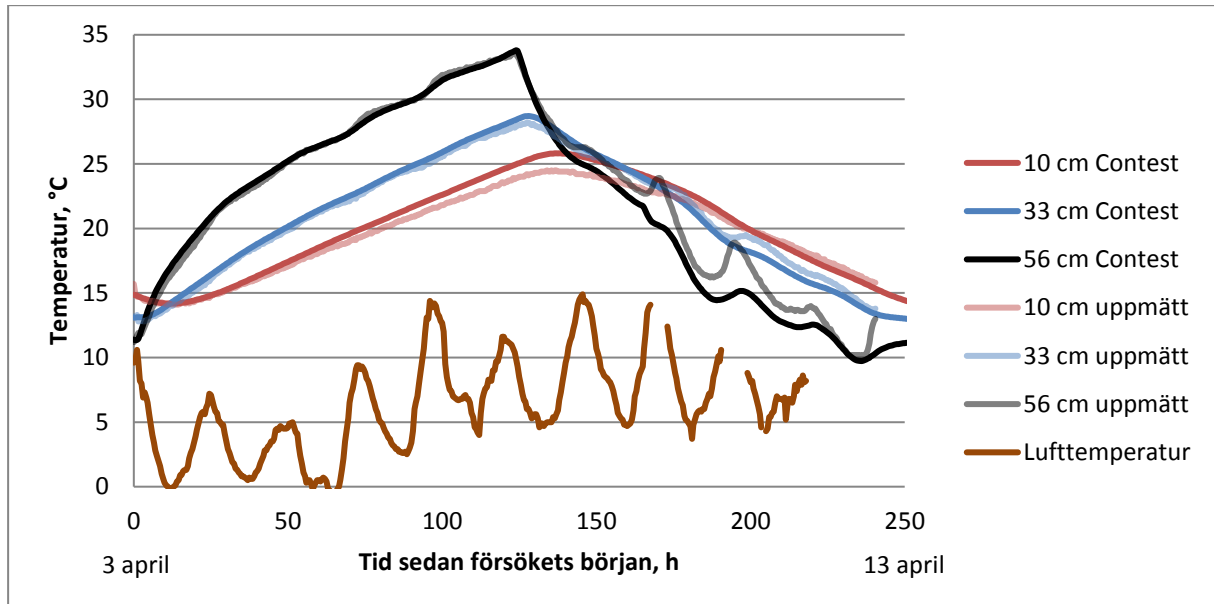
Flera olika kombinationer av isoleringens värmekonduktivitet och värmemattans effekt provades och bäst överensstämmelse erhöles med kombinationen $0,045 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ respektive 92 W/m^2 . Resultaten av den jämförelsen visas i figur 4-17.



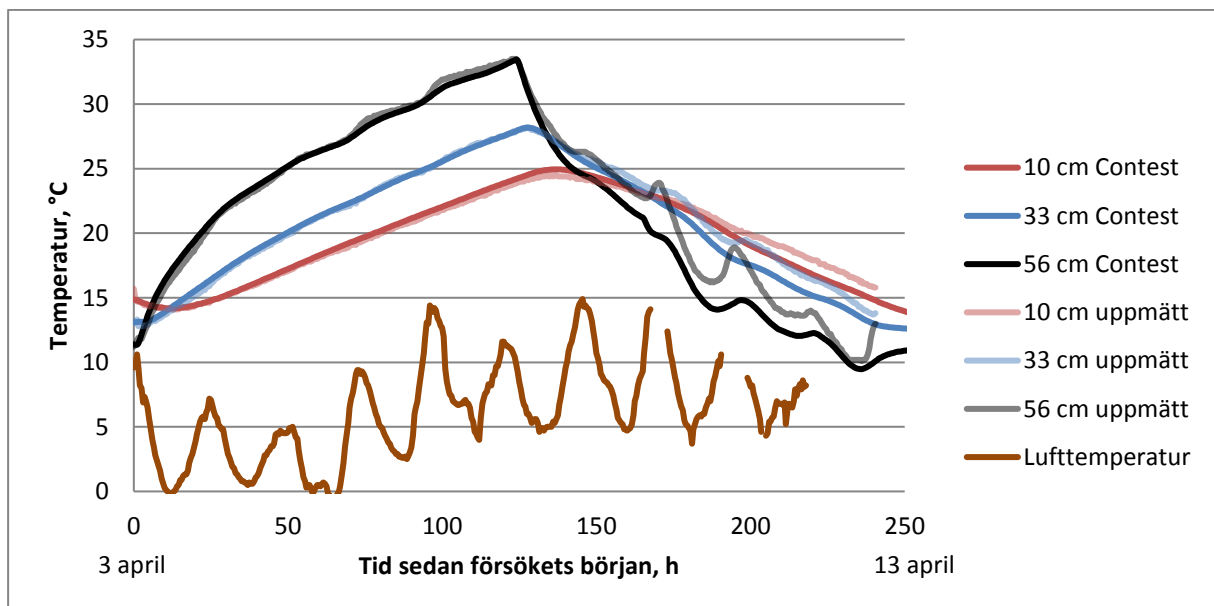
Figur 4-17 Grundmodellen, men med $\lambda_{iso} = 0,045 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ och $P_k = 92 \text{ W/m}^2$.

Försök 2, västra

Grundmodellen för den västra mätserien stämde relativt väl överens med de uppmätta temperaturerna, vilket figur 4-18 visar. För de lägre mätpunkterna blev dock de modellerade temperaturerna högre än de uppmätta. Förklaringen till att de lägre mätpunkterna avvek men inte de övre kan ha varit att värmekonduktiviteten i sprängstenen var för lågt ansatt i Contest. I grundmodellen var den $0,6 \text{ W/m}\cdot\text{K}$.



Figur 4-18 Grundmodellen, dvs. $\lambda_{\text{iso}} = 0,04 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ och $P_k = 109 \text{ W/m}^2$. Försök 2, västra.



Figur 4-19 Grundmodellen, dvs. $\lambda_{\text{iso}} = 0,04 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ och $P_k = 109 \text{ W/m}^2$ men med $\lambda_{\text{spr}} = 0,9 \text{ W/m}\cdot\text{K}$. Försök 2, västra.

Att i Contest anta en högre värmekonduktivitet i sprängstenen sänkte temperaturen i hela betongens tjocklek men sänkningen var betydligt större nedtill, se figur 4-19. Även

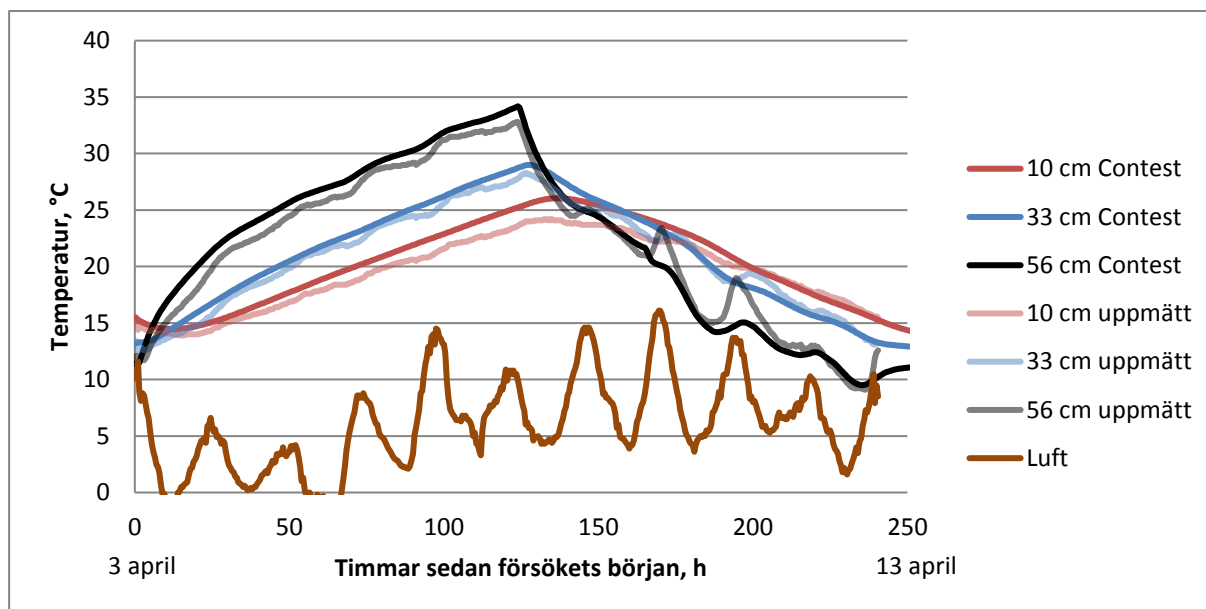
modellering med upp till $\lambda_{\text{spr}} = 1,2 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ gav bättre temperaturfördelning över betongens tjocklek.

Två andra parametrar som kan ha orsakat skillnaderna i de lägre mätpunkterna är felaktigt ansatt värmekonduktivitet i betongen och felaktig initialtemperatur i marken. Det går att ändra på isoleringens och värmemattans egenskaper i Contest så att överensstämmelsen fås i alla mätpunkterna, även de nedre. Det görs genom att öka isoleringen (värmekonduktiviteten) mycket och samtidigt minska effekten som avges till randen, vilket ger ungefär samma temperaturgradient som den uppmätta. För att göra det måste dock både isoleringens värmekonduktivitet och effekten till randen sänkas orimligt mycket. Isoleringens värmekonduktivitet måste sänkas så pass mycket att dygnsvariationerna i uppvärmningstakten blir i princip obefintliga.

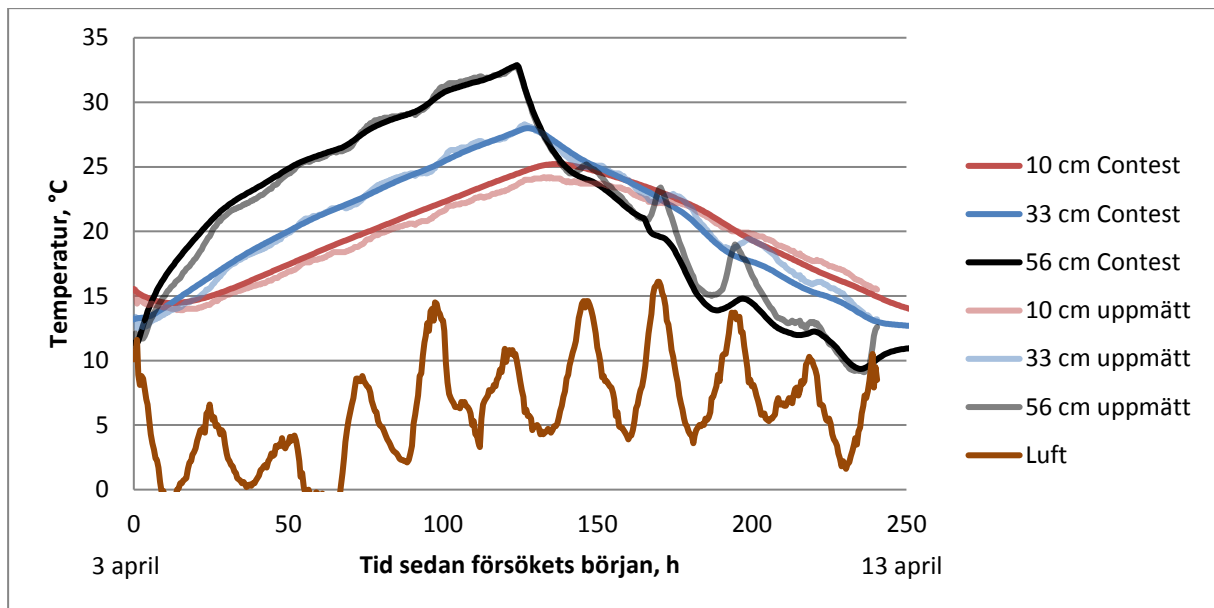
Känslighetsanalysen har visat att de mitre punkterna (33 cm respektive 45 cm från underkant) är relativt okänsliga för felaktigheter i de parametrar som inte hör till värmemattan. Eftersom dessa temperaturer stämmer bra vid modellering med grundmodellen har denna bedömts vara den modellen med bäst överensstämmelse. Detta trots att temperaturerna i de lägre mätpunkterna är något låga jämfört med de uppmätta temperaturerna. Dvs.: en värmekonduktivitet på $0,04 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ och en effekt på 109 W/m^2 bedöms vara de parametrar för modellering av värmemattan som ger bäst överensstämmelse med uppmätta resultat för försök 2.

Försök 2, östra

Grundmodellen för den östra mätserien ger något högre temperaturer i betongen än de uppmätta. Samma tendens som för den västra mätserien kan noteras i det att de lägre mätpunkterna avvek mer och mer från de uppmätta ju längre försöket pågick.



Figur 4-20 Grundmodellen, dvs. $\lambda_{\text{iso}} = 0,04 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ och $P_k = 109 \text{ W/m}^2$. Försök 2, östra.



Figur 4-21 Grundmodellen men med $\lambda_{iso} = 0,04 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ och $P_k = 103 \text{ W/m}^2$. Försök 2, östra.

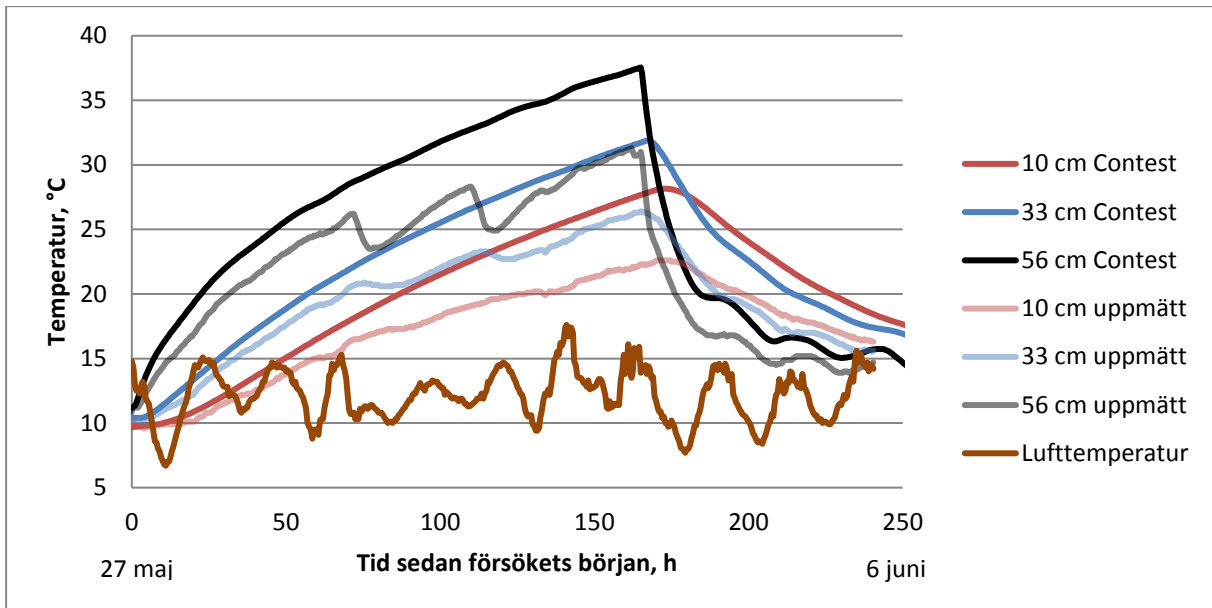
Den modelleringen som bedömdes ge bäst överensstämmelse med uppmätta resultat var värmekonduktiviteten $\lambda_{iso} = 0,04 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ och effekten $P_k = 103 \text{ W/m}^2$, se figur 4-21. Bedömningen grundar sig på att temperaturförloppen stämmer väl överens i mätpunkterna 33 och 45 cm från underkant betong, dvs. de mätpunkter som enligt känslighetsanalysen är mest lämpliga för jämförelser.

Försök 3, östra mätpunkter

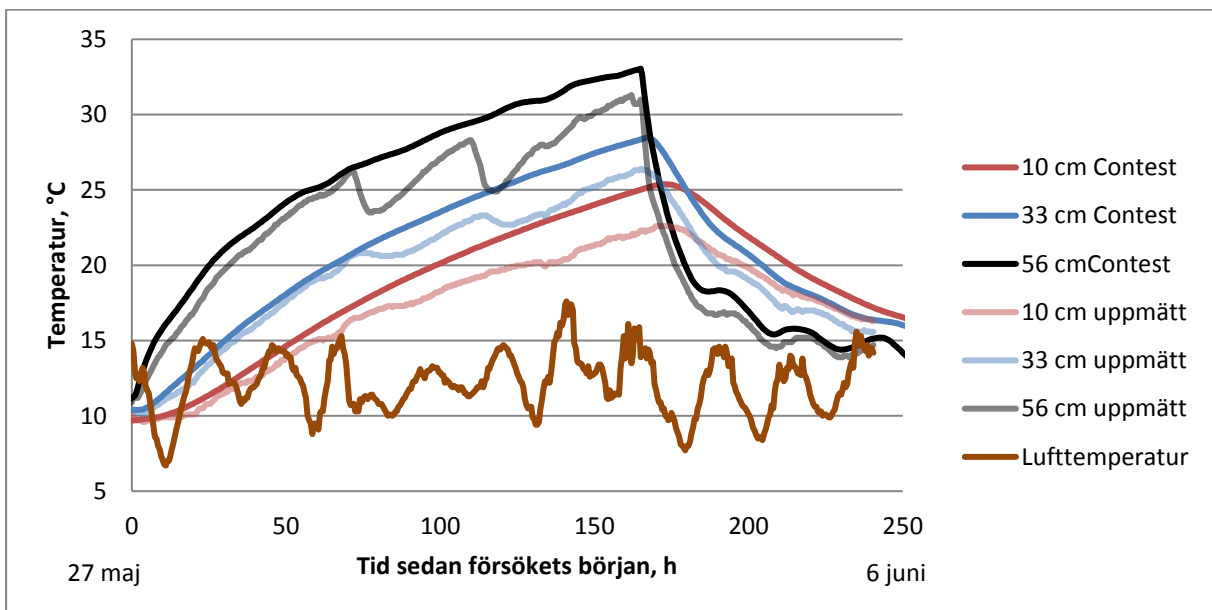
Försök 3 präglades av torra förhållanden fram till ungefär 66 timmar in i försöket varefter det under ett dygn föll cirka 10 mm regn. Efter det regnade det till och från och var fortsatt blött tills försöket avslutades.

I de östra mätpunkterna som låg mitt under bottenplattans lägsta del har två rejäla temperatursänkningar registrerats, se figur 4-22. Temperatursänkningen beror sannolikt på det regn som föll över Uppsalaområdet vid dessa tidpunkter. Regnvatten ansamlades över mätpunkterna och har troligen kylt ned bottenplattan. Det har dröjt tills vattnet värmts upp innan betongen har fortsatt att öka i temperatur. Ett 1-2 cm tjockt lager regnvatten observerades när värmemattan byttes ut 114 timmar in i försöket. På grund av detta delades försöket upp i en inledande del med torra förhållanden och en avslutande del med blöta förhållanden. Det är svårt att dra några slutsatser om värmemattans uppvärmande effekt under den blöta delen på grund av det stående vattnet. Därför har anpassningen av parametrarna gjort för att uppnå överensstämmelse de första cirka 70 timmarna då torra förhållanden rådde. Av de uppmätta temperaturerna för resterande del av försöket kan slutsatsen dras att regnvatten som ansamlas i pölar kan minska temperaturökningen kraftigt.

Vid en jämförelse ses att de modellerade temperaturerna enligt grundmodellen blev klart lägre än de som uppmättes för de östra mätpunkterna. Även innan regnet kom visar de uppmätta temperaturkurvorna en svagare temperaturutveckling än de från grundmodellen.

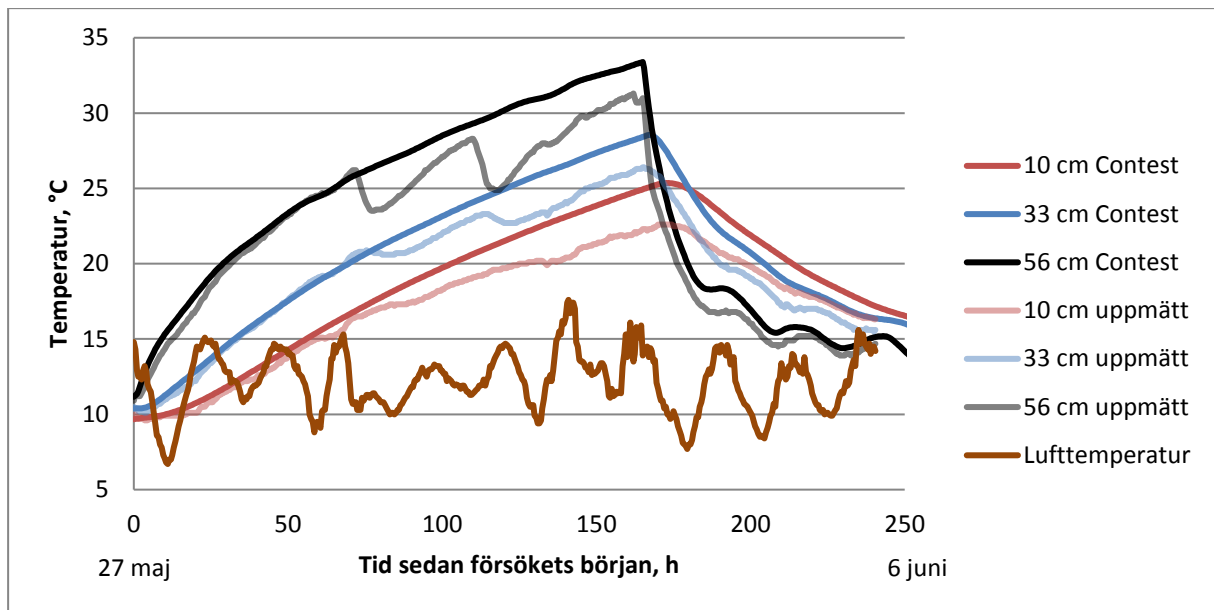


Figur 4-22 Grundmodellen, dvs. $\lambda_{\text{iso}} = 0,04 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ och $P_k = 109 \text{ W/m}^2$. Försök 3, östra mätpunkterna.



Figur 4-23 Grundmodellen, men med $\lambda_{\text{iso}} = 0,07 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ och $P_k = 92 \text{ W/m}^2$. Försök 3, östra mätpunkterna.

Att öka isoleringens värmekonduktivitet gav bättre överensstämmelse i alla mätpunkter vilket kan ses i Figur 4-23. De uppmätta resultaten visar dock ett mer linjärt beteende i uppvärmningsfasen än de modellerade. Alternativet att istället minska den isolerande förmågan gav en form på kurvan som mer liknar den uppmätta, se figur 4-24.

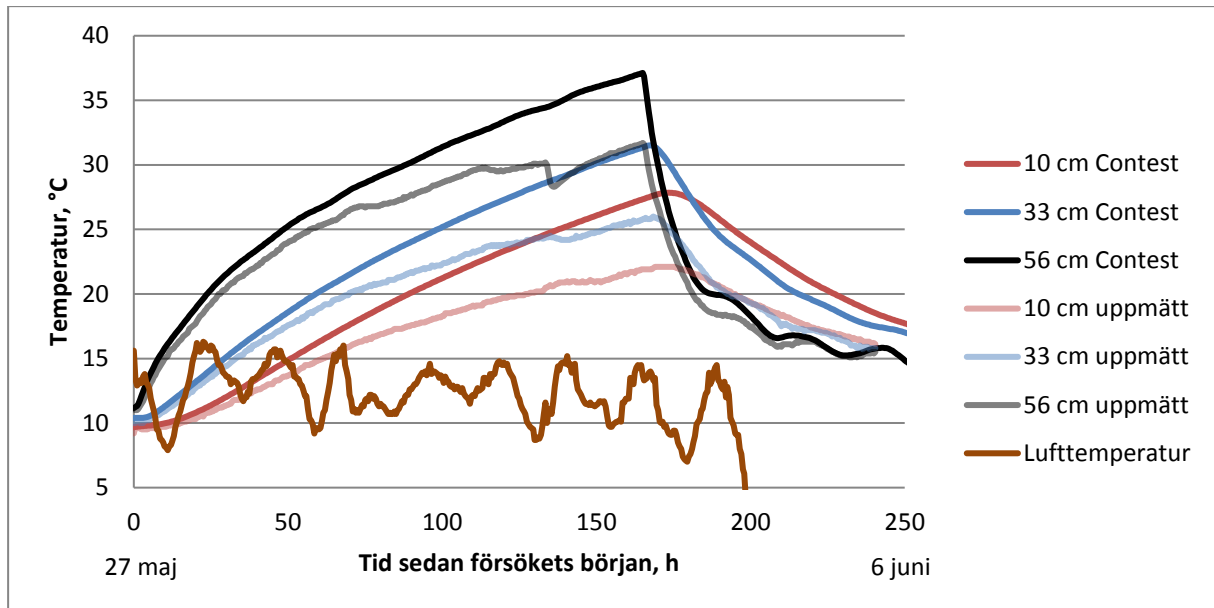


Figur 4-24 Grundmodellen, men med $\lambda_{\text{iso}} = 0,04 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ och $P_k = 92 \text{ W/m}^2$. Försök 3, östra mätpunkterna.

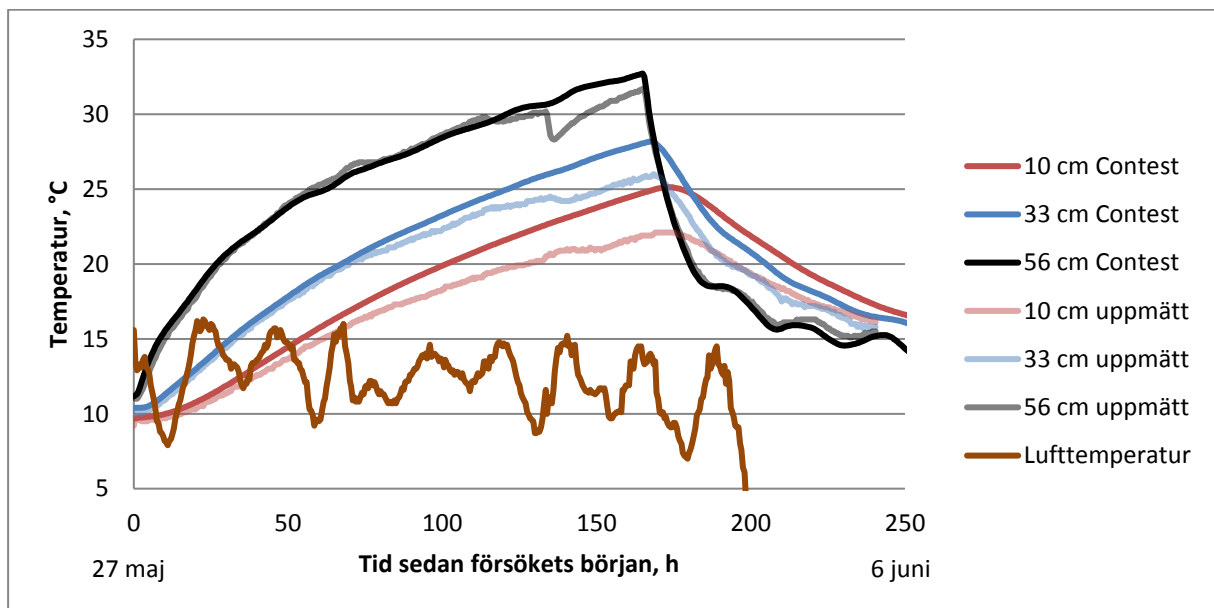
För den östra mätserien i försök 3 gav värmekonduktiviteten $\lambda_{\text{iso}} = 0,04 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ och effekten $P_k = 92 \text{ W/m}^2$ bäst överensstämmelse för de första torra 70 timmarna av försöket. Några slutsatser av den efterföljande uppvärmningsperioden är svåra att dra på grund av den avkylande effekt regnvattnet tycks ha haft.

Försök 3 västra

De västra mätpunkterna i försök 3 har inte känt av de två temperatursänkningar som var så tydliga vid de östra mätpunkterna vilket kan ses i figur 4-25. Detta berodde sannolikt på att stående vatten inte la sig ovanför de västra mätpunkterna som det gjorde över de östra mätpunkterna. Effekten från värmekablarna behövde därför inte gå till att värma upp det stående vattnet på samma sätt som vid de östra mätpunkterna. Däremot har ett plötsligt temperaturfall registrerats drygt 130 timmar in i försöket. Orsaken till detta är svårförklarad. Man skulle kunna tänka sig att bytet av värmemattan (se avsnitt 3.2.4) skulle vara orsaken, men värmemattan byttes ut hela 16 timmar innan den uppmätta temperaturen började falla och bytet av mattan borde därför ha påverkat temperaturen tidigare. I figur 4-25 är det också tydligt att grundmodellens temperaturkurvor ligger högre än de uppmätta.



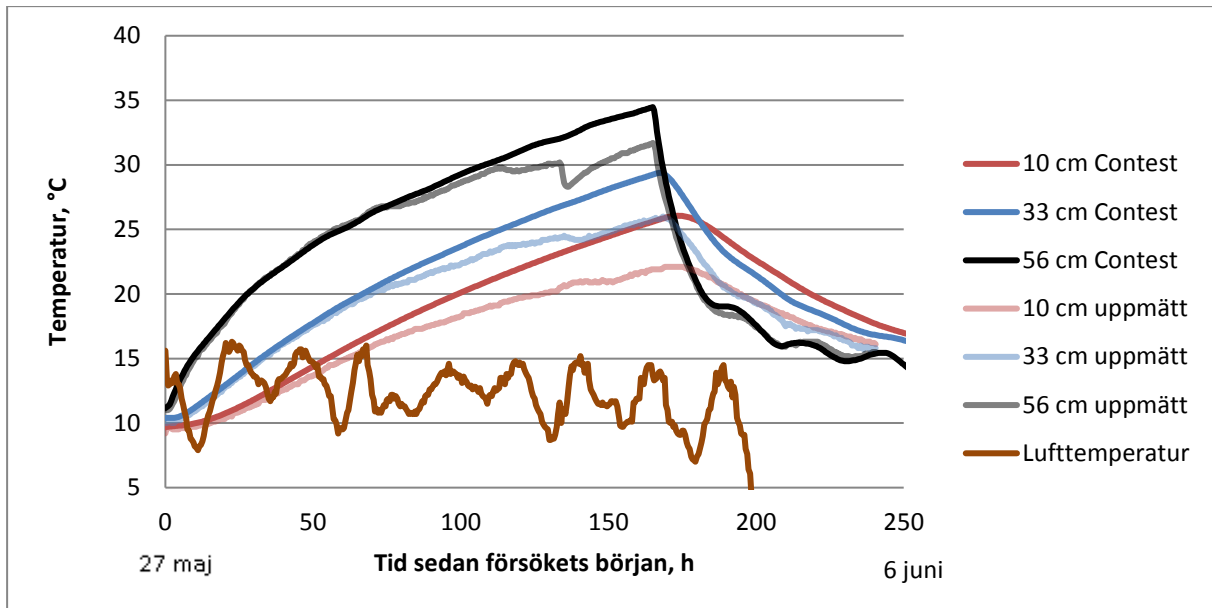
Figur 4-25 Grundmodellen, dvs. $\lambda_{iso} = 0,04 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ och $P_k = 109 \text{ W/m}^2$. Försök 3, västra mätpunkterna.



Figur 4-26 Grundmodellen, men med $\lambda_{iso} = 0,07 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ och $P_k = 109 \text{ W/m}^2$. Försök 3, västra mätpunkterna.

Det finns två möjligheter för att sänka temperaturkurvorna från Contest: sänka effekten i värmekablarna eller minska den isolerande förmågan. Hur en minskning av den isolerande förmågan påverkar de modellerade temperaturerna visas i figur 4-26 där isoleringens värmekonduktivitet höjdes till $0,07 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ från grundmodellens $0,04 \text{ W/m}\cdot\text{K}$.

Alternativet är att minska den tillförda effekten vilket visas i figur 4-27 nedan. I denna modellering minskades den tillförda effekten till 98 W/m^2 från grundmodellens 109 W/m^2 . Detta gav faktiskt en bättre fram till ungefär 70 timmar in i försöket, dvs. då regnet med största sannolikhet kom. Att så är fallet syns bäst då diagrammen syns i stor skala. Efter 70 timmar divergerar modellerade och uppmätta resultat till skillnad från i figur 4-26 ovan.



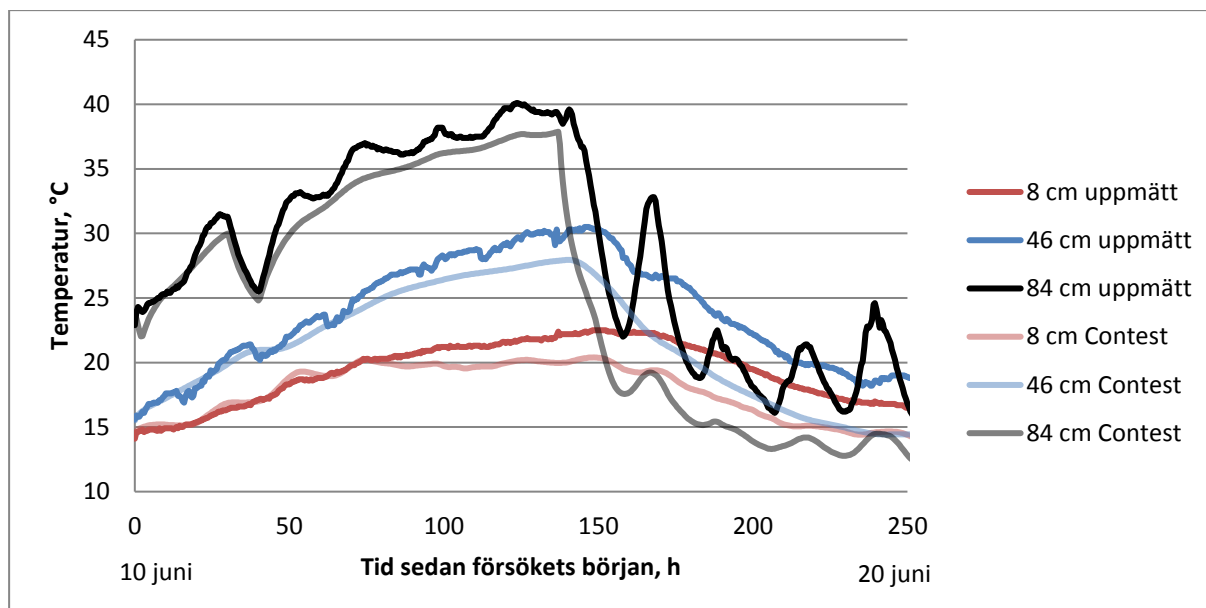
Figur 4-27 Grundmodellen, men med $\lambda_{iso} = 0,04 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ och $P_k = 98 \text{ W/m}^2$. Försök 3, västra mätpunkterna.

Det är svårt att avgöra om den minskade takten på temperaturökning beror på vattenkyllning eller på att värmemattans egenskaper förändras när den blir fuktig. Troligen blir den isolerande förmågan sämre när isoleringen blir fuktig eftersom vatten leder värme bättre än luft. Det är även möjligt att en del av effekten går till att kondensera fukt istället för att värma betongen. Även om dessa västra mätpunkter påverkats mindre av stående vatten än de östra är det troligt att det stående vattnets påverkan ändå är väsentlig eftersom mätpunkterna enbart är placerade en meter från de östra mätpunkterna där påverkan var stor. Bäst överensstämmelse vid de torra förhållandena erhöles med $\lambda_{iso} = 0,04 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ och $P_k = 98 \text{ W/m}^2$. Vid de efterföljande blöta förhållandena är det troligt att temperaturökningen minskat både på grund av vattenkyllning och på grund av att den isolerande funktionen minskat. Det är svårt att avgöra hur stor del av förändringen som beror på det första respektive andra av dessa.

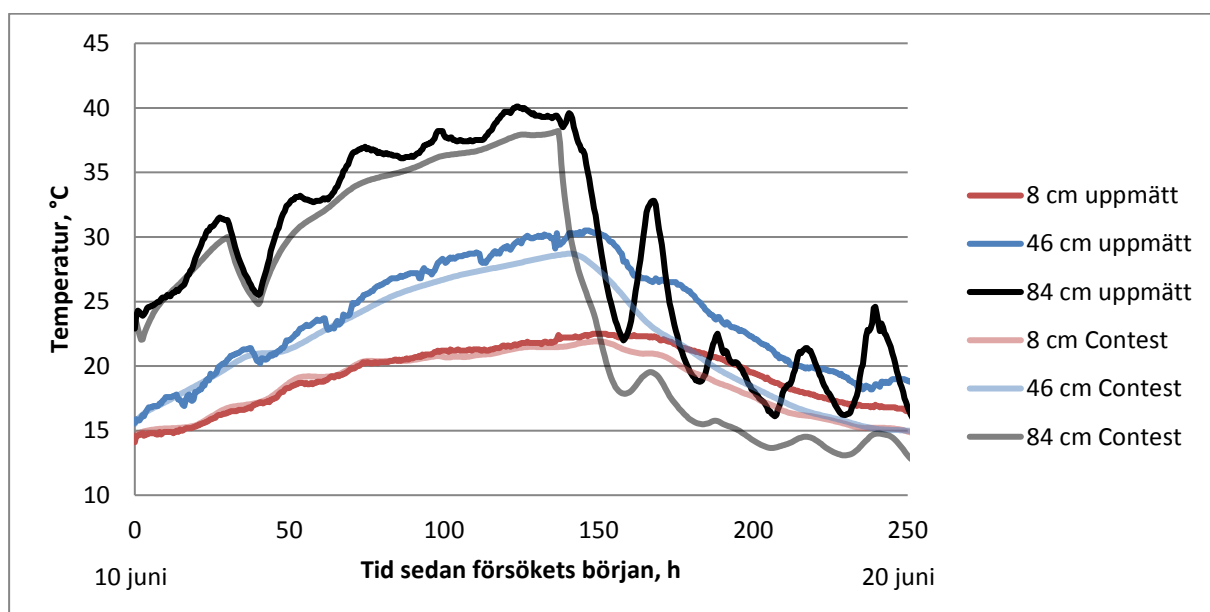
Att den uppmätta temperaturen i den lägsta mätpunkten redan från försökets början är lägre än för modelleringarna kan bero på att sprängstenens värmekonduktivitet antagits för låg i Contest.

Försök 4

Grundmodelleringen av försök 4 gav lägre temperaturer än dem som uppmättes vilket kan ses i figur 4-28. En trolig förklaring till detta är att modelleringen inte tar hänsyn till solskenets inverkan på temperaturutvecklingen. Även mätpunkterna längst ner i betongen har betydligt lägre temperaturer uppmätts vilket antyder att vindhastigheten överskattats i Contest. Vinden antogs i grundmodellen vara 2 m/s mot alla ränder. Sänks denna till 0,5 m/s ökar de modellerade temperaturerna i hela betongens tjocklek vilket kan ses i figur 4-29.

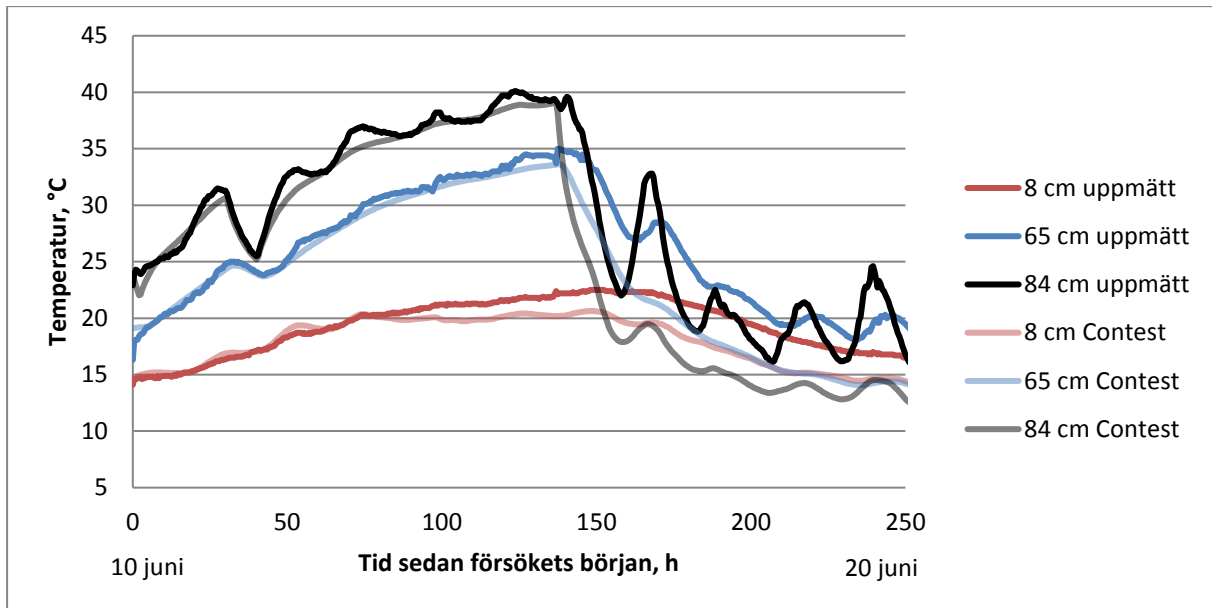


Figur 4-28 Grundmodellen, dvs. $\lambda_{iso} = 0,04 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ och $P_k = 109 \text{ W/m}^2$. Försök 4, västra mätpunkterna.



Figur 4-29 Grundmodellen, dvs. $\lambda_{iso} = 0,04 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ och $P_k = 109 \text{ W/m}^2$, men med $v = 0,5 \text{ m/s}$. Försök 4, västra mätpunkterna.

När försöket modellerades enligt grundmodellen men med en ökning av effekten till 115 W/m^2 erhöles ett temperaturförlopp där maxtemperatur stämmer relativt bra överens med de uppmätta resultaten, se figur 4-30. Temperaturkurvan för 65 cm från underkant har tagits med i diagrammet eftersom känslighetsanalysen visade att den var relativt okänslig för felaktigheter i indata.



Figur 4-30 Grundmodellen, men med $\lambda_{iso} = 0,04 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ och $P_k = 115 \text{ W/m}^2$. Försök 4, västra mätpunkterna.

Vid jämförelser mellan uppmätta och modellerade resultat för försök 4 var kombinationen $\lambda_{iso} = 0,04 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ och $P_k = 115 \text{ W/m}^2$ den som gav bäst överensstämmelse. Solskenets betydelse för temperaturökningen är svår att uppskatta. Den mätning som gjordes på ett valv som enbart täckts med 10 mm betongtäckmatta, se figur 3-18 tyder på att solen inte har någon betydande inverkan på temperaturutvecklingen om betongen täckts av isolering. Med grund i detta skulle det sannolikt inte uppmätts dramatiskt lägre temperaturer om det vid försöket varit samma temperatur men molnigt. Kanske hade den effekt och värmekonduktivitet på isoleringen som angetts i grundmodellerna, 109 W/m^2 och $0,04 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, gett bra överensstämmelse för de förhållandena.

4.2.3 Sammanfattning

Jämförelserna mellan modelleringar och försök visade att det för varje försök gick att modellera värmemattan med metod 1 så att god överensstämmelse mellan uppmätta och modellerade temperaturer erhöles. Dock var det nödvändigt att ange relativt olika parametrar för tillförd effekt och isolerande förmåga för att uppnå detta för de olika mätserierna. Tabell 2-1 presenterar de parametervärden (anpassade parametrar) som gav bäst överensstämmelse för respektive mätserie och försök. Värdena för värmekonduktivitet bygger på att isoleringens tjocklek angivits till 11 mm då enbart värmemattan modellerats samt till 20 mm då värmematta och ett lager isolering modellerats. Tabellerna visar också vilken ökning i medeltemperatur som uppmättes och vilken som beräknats med dels de anpassade parametrarna för respektive försök, dels med de generella parametrarna som föreslås i avsnitt 5.1.2. Att ökningen av medeltemperatur från beräkningarna med parametrarna anpassade för respektive försök inte stämmer helt överens med den uppmätta temperaturökningen beror på att kurvorna inte enbart anpassats för det att just medeltemperaturen ska stämma, se avsnitt 3.4.5.

Tabell 4-2 Sammanställning av de parametrar som gav bäst överensstämmelse med uppmätta resultat. Mätserien utan extra isolering.

Mätserie	Anpassade parametrar		Ökning medeltemperatur (°C)		
	λ_{iso} (W/m·K)	P_k (W/m ²)	Anpassade parametrar	Generella parametrar	Uppmätt
Försök 1	0,045	92	9,5	9,7	9,1

Tabell 4-3 Sammanställning av de parametrar som gav bäst överensstämmelse med uppmätta resultat. Mätserier med extra isolering.

Mätserie	Anpassade parametrar		Ökning medeltemperatur (°C)		
	λ_{iso} (W/m·K)	P_k (W/m ²)	Anpassade parametrar	Generella parametrar	Uppmätt
Försök 1	0,04	92	11,6	11,4	11,1
	0,04	92	11,6	11,4	11,1
Försök 2	0,04	106	15,5	12,7	15,0
Östra	0,04	103	15,0	12,7	15,0
Västra	0,04	109	16,0	12,7	15,5
Försök 3	0,04	95	10,7	10,1	10,8
Östra	0,04	92	10,4	10,1	10,7
Västra	0,04	98	10,9	10,0	10,9
Försök 4	0,04	115	11,4	8,6	13,5

Resultaten i tabellerna ovan indikerar att värmekonduktivitet bör väljas till ungefär 0,04 W/m·K. Vilken effekt som bör väljas för att värmemattan är däremot svårare att bestämma utifrån resultaten i tabell 4-3. Vid försök 2 och 4 tycks värmemattans förmåga att värma upp betongen varit större än vid försök 1 och 3. Det är svårt att sluta sig till varför sådana stora skillnader finns. Regnpåverkan är troligen inte det som orsakat skillnaderna. Förhållande vid försök 1 var visserligen fuktiga vilket kan ha försämrat värmemattans uppvärmande funktion. Vid försök 3 var förhållandena däremot torra för den del av uppvärmningen som ligger till grund för resultaten i tabellen ovan och ändå tycks värmemattans uppvärmande förmåga varit tydligt lägre än vid försök 2 och 4.

Resultaten talar för att det är en god idé att vid modelleringar av värmemattan i Contest tillföra effekten 90 W/m² till randen och att ange värmekonduktiviteten 0,04 W/m·K. Dessa generella värden är på den säkra sidan eftersom de för alla mätserier gav en sämre uppvärmning än vad som uppmätts vid försöken. I tabell 4-3 kan ses att modellering med de generella parametrarna för försök 2 och 4 resulterade i en underskattning av ökningen i medeltemperatur jämfört med uppmätta resultat. För försök 4 kan ses att skillnaden mellan den uppmätta medeltemperaturen och den som beräknats med de generella parametrarna är stor, cirka 5 grader. En del av den skillnaden beror sannolikt på att det i grundmodellen antogs för hög vindhastighet mot undersidan av valvet. Felet i bedömningen av de anpassade parametrarna på grund av detta minimerades eftersom liten hänsyn tog till temperaturen i de lägre mätpunkterna. Däremot blir den från Contest uträknade medeltemperaturen lägre på grund av den för höga vindhastigheten.

Medelvärde på de effekter som anges i tabell 4-3 är 102 W/m·K vilket i Contest ger den uppvärmning man kan förvänta sig utifrån de försök som genomförts i detta arbete.

4.3 Exempel på användning av värmemattan

4.3.1 Gjutning 1

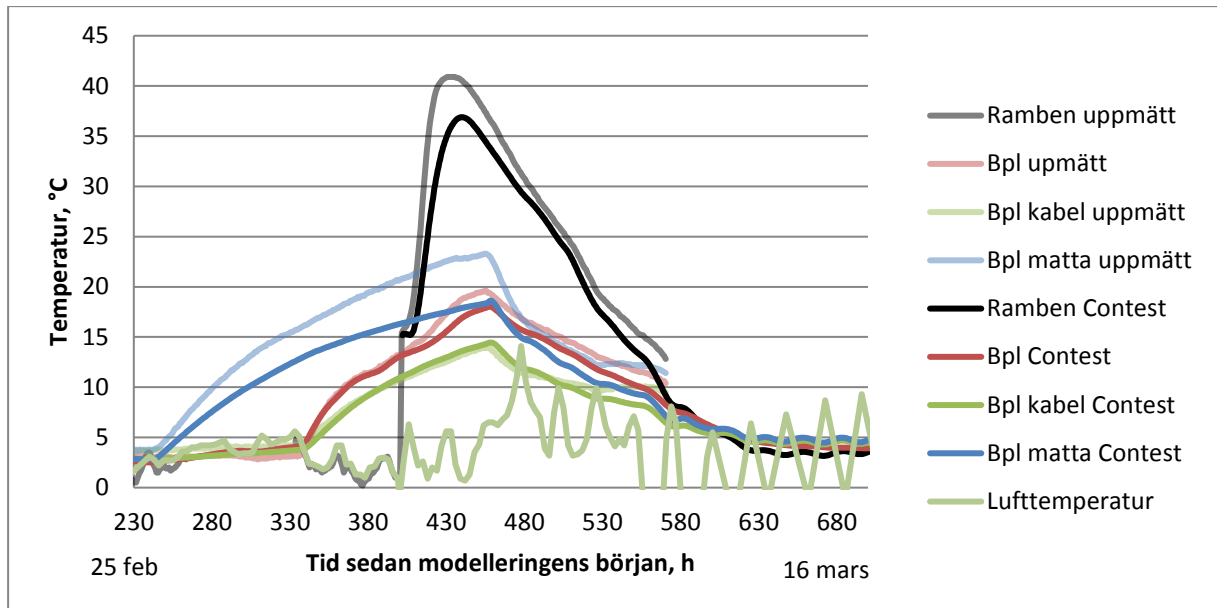
Vid både gjutning 1 och 2 användes värmemattor såväl som värmekablar för att undvika temperatursprickor, vilket beskrivs i avsnitt 3.5. Till skillnad från för gjutning 2 göts däremot gjutning 1 mot en tidigare gjuten vägg- och valvetapp vilket ökar risken för sprickor. Det var därför viktigare att värma upp bottenplattan i gjutning 1 än i gjutning 2 varför det var tänkt att all värmning vid gjutning 1 skulle starta redan ungefär 160 timmar före gjutstart. Av misstag startades dock enbart värmemattorna då och värmekablarna startades först cirka 70 timmar före gjutstart, vilket kan ses i diagrammen i det här avsnittet.

I efterkalkylen anpassades modelleringen så att temperaturen vid mätpunkterna i modellen stämde överens med de uppmätta temperaturerna, se avsnitt 3.5. Eftersom temperaturmätningarna i bottenplatta och ramben finns för hela förloppet ligger sannolikt även det modellerade temperaturförloppet för konstruktionen som helhet nära verkligheten. Gjutningen skedde i relativt milda vinterförhållanden vilket kan ses i figur 4-31 där även lufttemperaturen, som användes som indata i samtliga modelleringar, visas. I övriga diagram visas den för tydlighetens skull inte.

Förkalkyl

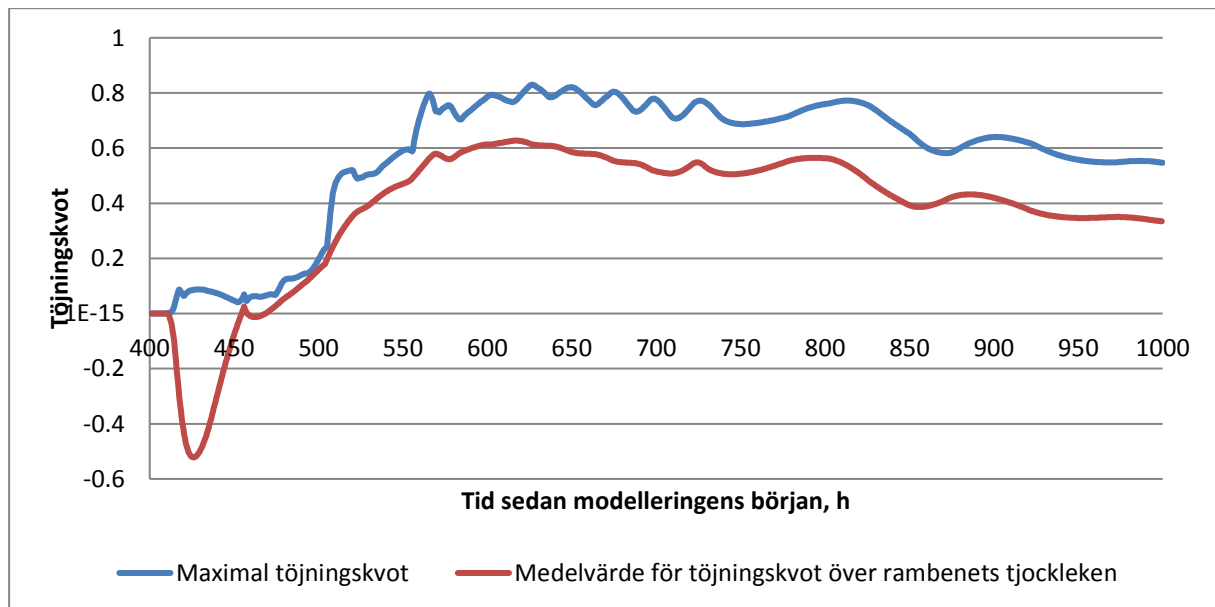
När gjutning 1 modellerades enligt förkalkylen, som beskrivs i avsnitt 3.5 erhöles klart lägre temperaturer i mätpunkten under värmemattan än de som uppmätts, se figur 4-31. Mätpunkterna vid värmekablarna, Bpl och Bpl kabel, stämmer relativt väl med uppmätta temperaturer. Temperaturen i rambenet är lägre och når sin topp senare än i de uppmätta resultaten.

Det är väntat att mätpunkten under värmemattorna visar på högre temperaturen än de modellerade eftersom de parametrar som använts för värmemattan är konservativt valda. Orsaken till skillnaderna i temperatur i den nygjutna betongen kan vara att de provningar som ligger till grund för värmeutvecklingen i Contest inte är fullt relevanta för den aktuella betongen. Dagens betong med ett visst *vct* och hållfasthet har nödvändigtvis inte samma värmeutveckling som då provningarna gjordes.

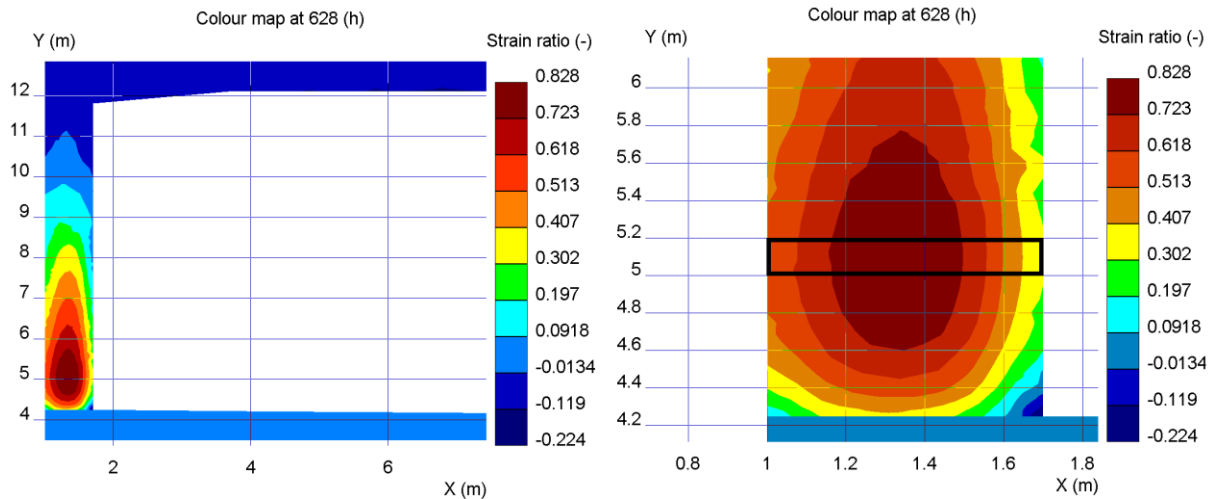


Figur 4-31 Gjutning 1. Förkalkylen.

I figur 4-32 visas det beräknade töjningskvotsförloppet för förkalkylen, vilket är detsamma som spänningkvotförloppet eftersom spänningen i programmet antas linjärt proportionell mot töjningen. Eftersom inga spänningkvoter visas när kvoten överskrider 1, dvs. då betongen spricker, har valts att studera töjningskvoten (där värden > 1 är möjliga) istället för spänningkvoten. De största spänningarna för förkalkylen uppkommer ungefär 10 dygn, eller 240 timmar, efter gjutningen som skedde vid 400 timmar, vilket visas i figur 4-32. Som indikator för sprickrisken kan ett medelvärde för töjningskvoten beräknas över tjockleken för rambenet. Medelvärdet beräknas då för den tidpunkt och för den höjd i rambenet som töjningarna är som störst, se figur 4-33.



Figur 4-32 Gjutning 1. Förkalkyl.

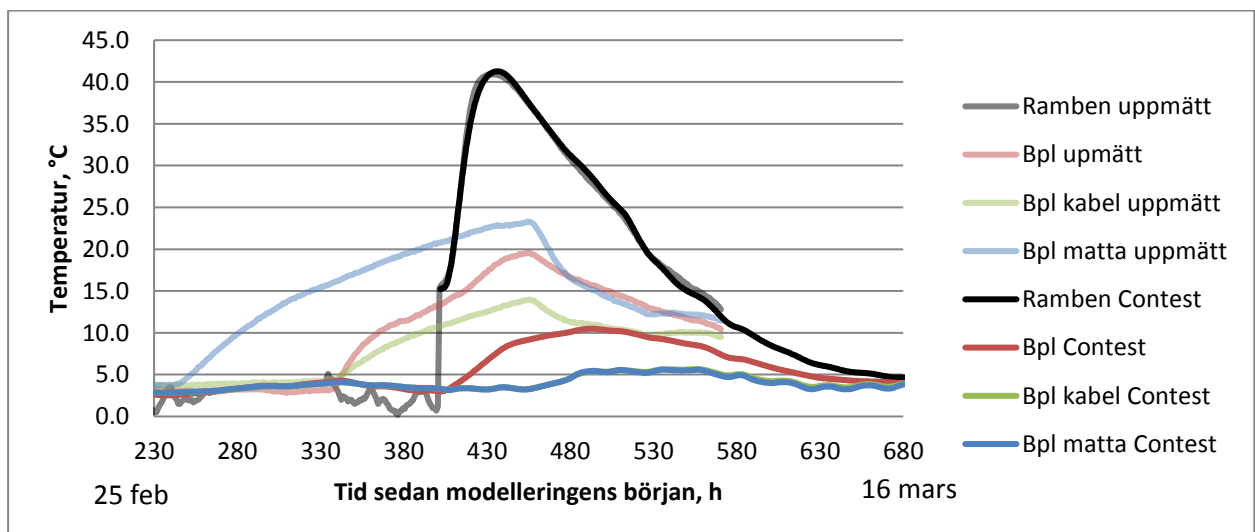


Figur 4-33 Töjningskvoter i konstruktion då de är som störst, 228 timmar efter gjutning. Den andra kurvan i figur 4-32 visar medelvärdet av töjningskvoten inom det rektangulära svartmarkerade området ovan.

Enligt förkalkylen håller sig den medelvärdesbildade töjningskvoten under 0,8 vilket är den övre gränsen för att töjningskvoten ska vara acceptabel med spricksäkerhetsfaktorn 1,25 som gällde för konstruktionen.

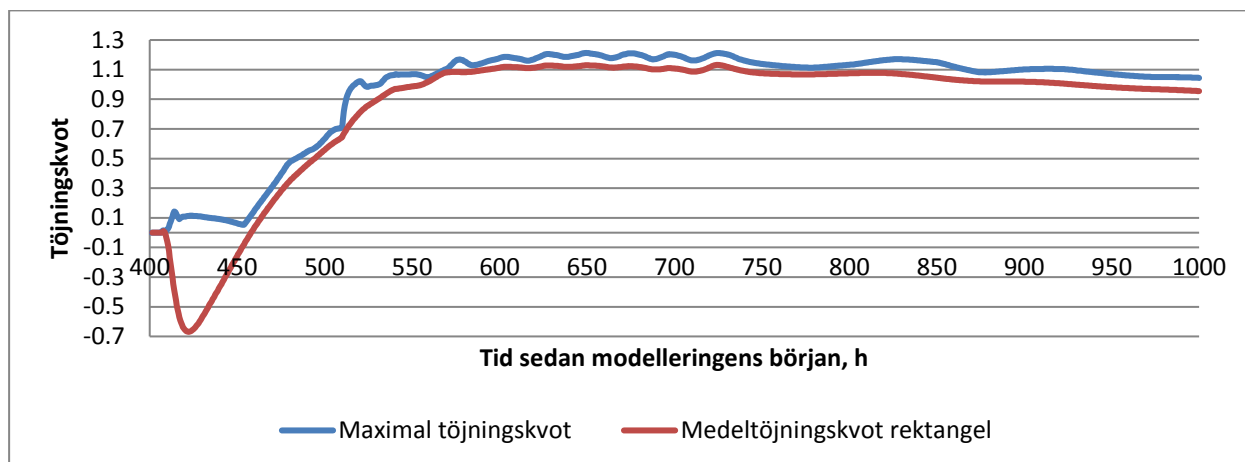
Nollkalkylen

Syftet med nollkalkylen är att undersöka sprickrisken för ett fall utan åtgärder mot temperatursprickor. Resultatet från nollmodellen är med andra ord den sprickrisk som hade förelegat om värmekablar och värmemattor inte använts vid gjutningen. För att uppnå det justerades parametrar för den färska betongens temperaturutveckling i rambenen och för formens isolerande förmåga. På så vis anpassades temperaturutvecklingen i rambenet i modellen till de temperaturer som uppmätts. I figur 4-34 kan noteras att temperaturen i mätpunkten under rambenet stigit på grund av den färska betongens temperaturutveckling. I övrigt ligger bottenplattans temperatur stabilt på ungefär 4 grader.



Figur 4-34 Gjutning 1. Nollmodellen. Temperaturutveckling.

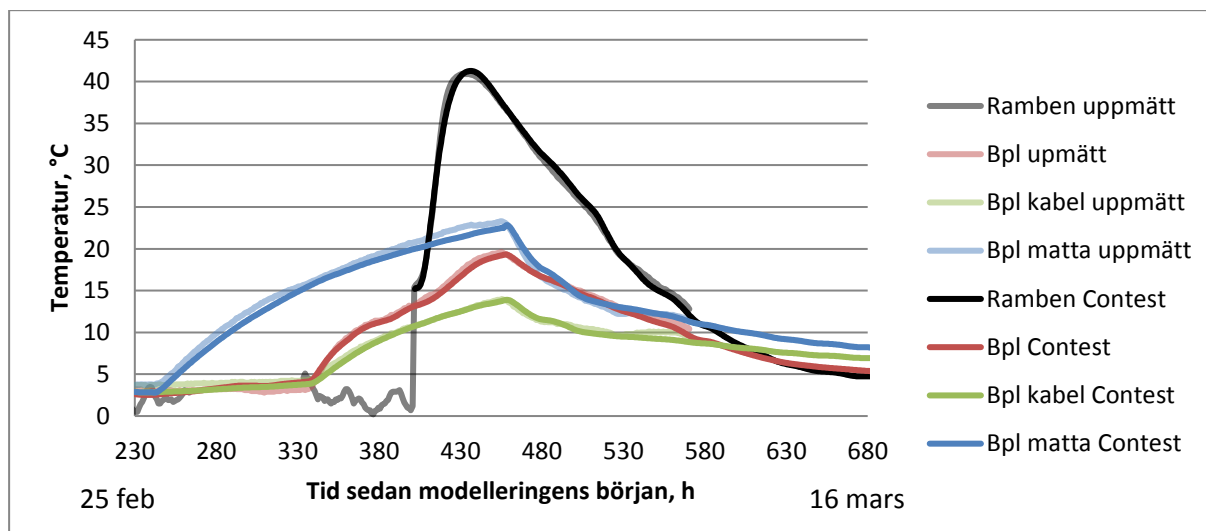
I figur 4-35 har medeltöjningskvoten beräknats på samma sätt som beskrevs för förkalkylen. Det är tydligt att töjningskvoten överskrider och ligger kvar på en nivå över 1,1 även när töjningskvoten medelvärdesbildats över rambenets tjocklek. Detta innebär att konstruktion sannolikt spricker.



Figur 4-35 Gjutning 1. Nollmodellen. Töjningskvoter.

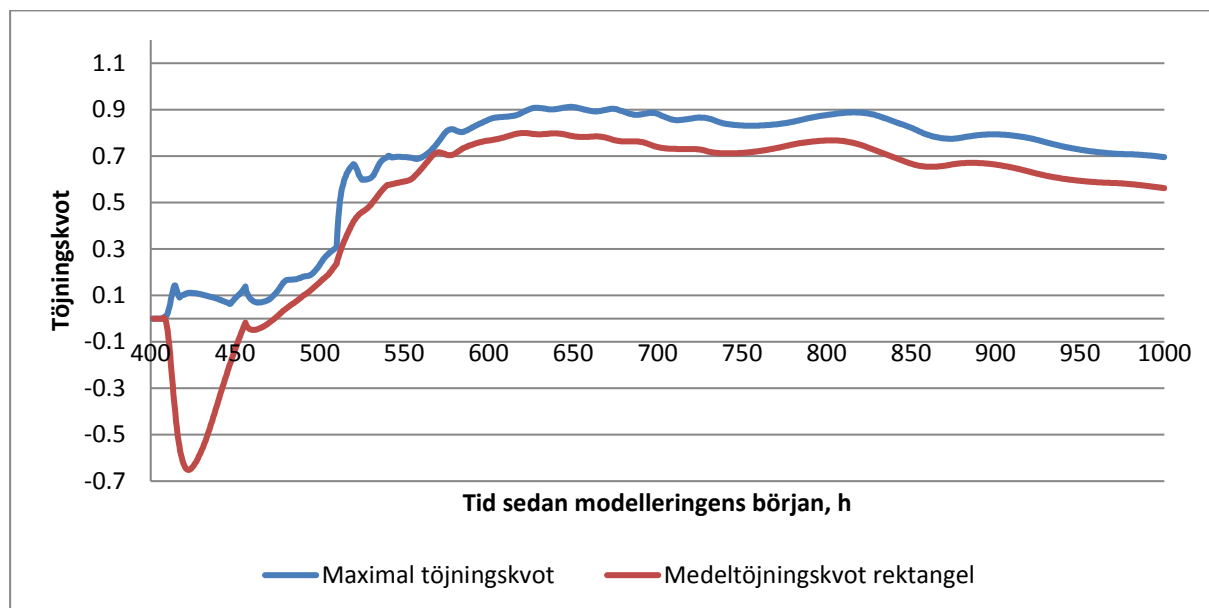
Efterkalkylen

För att temperaturkurvorna skulle stämma överens justerades en del parametrar från förkalkylen. Värmemattans effekt höjdes från 90 till 117 W/m². För den modellerade temperaturen i mätpunkten Bpl kabel skulle följa den uppmätta temperaturen lades isolering till vid randen mot yttersida bottenplatta som inte var där i verkligheten. För att bottenplattan skulle svalna långsammare och i takt med det uppmätta avsvlningsförloppet lades tunna isoleringslager till på bottenplattan under avsvlningsfasen. För att temperaturen skulle stämma för mätpunkten i rambenet höjdes värmeutvecklingen för cementet från 360 till 390 kJ/kg vilket ökade den modellerade temperaturen. Vidare ändrades en parameter som påverkar när värmen utvecklas vilket tidigarelade temperaturmaximum i modelleringen så att det bättre överensstämde med det uppmätta. Figur 4-36 visar att de modellerade temperaturerna med dessa justeringar väl följde de uppmätta.



Figur 4-36 Gjutning 1. Efterkalkylen. Temperaturutveckling.

Efterkalkylen är den av de tre modelleringarna som sannolikt bäst modellerar de verkliga spännings- och töjningsförloppen eftersom temperaturutveckling anpassats efter de uppmätta resultaten. Figur 4-37 visar att den medelvärdesbildade töjningskvoten var på gränsen till att överskrida gränsvärdet 0,8.



Figur 4-37 Gjutning 1. Efterkalkylen. Töjningskvoter.

Sammanfattning

I verkligheten har inga sprickor noterats för gjutning 1. Om inga åtgärder vidtagits hade sannolikt sprickor bildats med tanke på de spännings- och töjningsnivåer som erhöles med nollmodellen. Noterbart är att sprickrisken underskattades ordentligt i förkalkylen jämfört med efterkalkylen vilket märks av att medeltöjningskvoten endast är 0,6 jämfört med 0,8 för efterkalkylen. Denna skillnad beror på att temperaturmaximum underskattades med ungefär 5 grader i förkalkylen vilket gav lägre beräknade töjningsnivåer. Skillnaden uppstår trots att värmemattans och även kablarnas effekt också underskattades i förkalkylen vilket ger högre beräknade töjningsnivåer. Hade värmemattan i förkalkylen beräknats med samma parametrar som i efterkalkylen skulle sprickrisken ha underskattats ännu mer. Spricksäkerhetsfaktorn (= inversen av den högsta tillåtna medeltöjningskvoten vid dimensionering) var för konstruktionen 1,25. Kvoten av 0,8 och 0,6 är 1,33 vilket talar för att spricksäkerhetsfaktorn inte är för lågt satt.

4.3.2 Gjutning 2

Modelleringarna av gjutning 2 försvårades av att temperaturmätningen började först vid gjutstart. Därför var det inte helt säkert när värmekablar och värmemattor startats och hur de varit igång. Antaganden om när värmekablar och värmemattor varit igång har därför gjorts utifrån noteringar från egenkontrollen och efter vad som verkar rimligt med tanke på de temperaturer som uppmätts vid mätningens början.

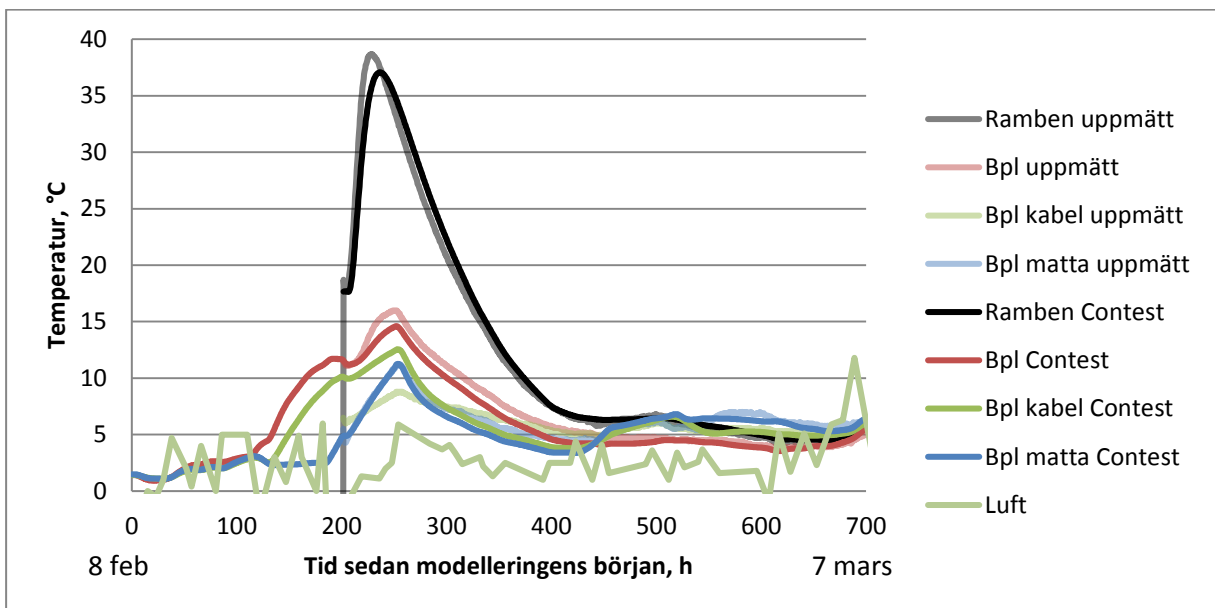
Gjutning 2 var en så kallad *fri etapp* vilket innebär att den inte göts emot något tidigare gjuten etapp av väggar och valv. Härigenom blir tvånget mindre vilket gjorde den mindre benägen

att spricka varför värmningen var planerad att påbörjas endast 72 timmar innan gjutstart. Det troliga scenariot är att en del av värmekablarna startades cirka 4 dagar före gjutstart och resterande cirka 3 dagar före. Värmemattorna noterades vara avstängda 18 timmar före gjutning varpå de startades, och de har troligen inte varit igång innan dess. Denna uppdelade start av värmningen förklarar varför temperaturökningen i diagrammen i detta avsnitt börjar vid olika tidpunkter för de olika mätpunkterna.

Gjutningen skedde i relativt milda vinterförhållanden vilket kan ses i figur 4-38 där lufttemperaturen medtagits.

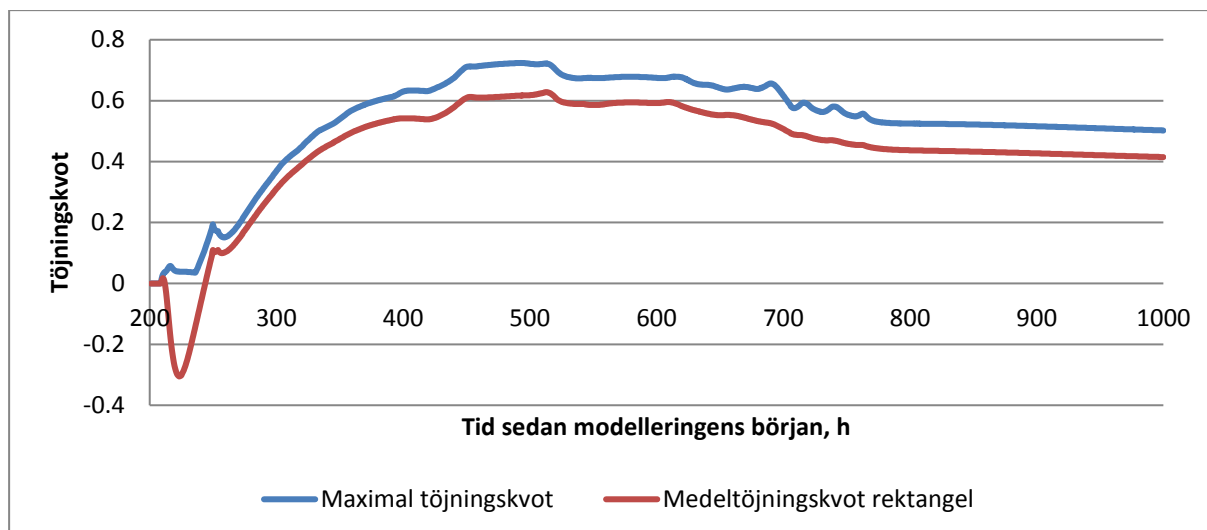
Förkalkylen

Temperaturutvecklingen för modelleringen respektive mätningen för de olika mätpunkterna redovisas i figur 4-38. För mätpunkten Bpl kabel finns de största skillnaderna mellan uppmätta och modellerade temperaturer. Eftersom mätningen började först vid gjutstart går det inte att vara säker på när värmekabeln över mätpunkten startades. Den uppmätta temperaturkurvans lutning och noteringen att den ska ha startats talar för att den startade som i modelleringen, dvs. vid 128 timmar. Varför dess effekt verkar ha varit så låg är svårt att veta men kan bero på att vissa betongytor inte täckts ordentligt med isolering. Den nygjutna betongens temperaturökning är initialt intensivare för mätningen än för modelleringen, vilket resulterar i att temperaturmaximum nås tidigare och även på en högre nivå. Skillnaden i temperaturmaximum är dock inte av samma storlek som för gjutning 1.



Figur 4-38 Gjutning 2. Förkalkylen. Temperaturutveckling.

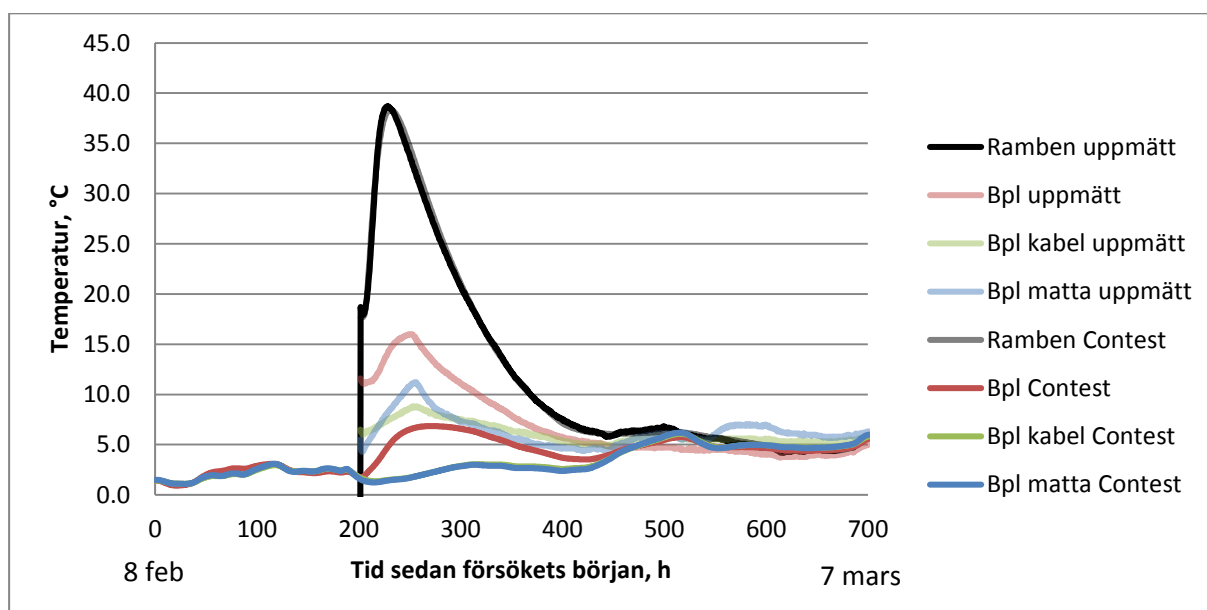
De spänningar (töjningar) som erhålls av förkalkylen är inte så stora att någon sprickrisk borde ha förelegat. För medelvärdet över rambenets tjocklek når töjningskvoten som mest upp till ungefär 0,6 vilket framgår av figur 4-39.



Figur 4-39 Gjutning 2. Förkalkylen. Töjningskvoter.

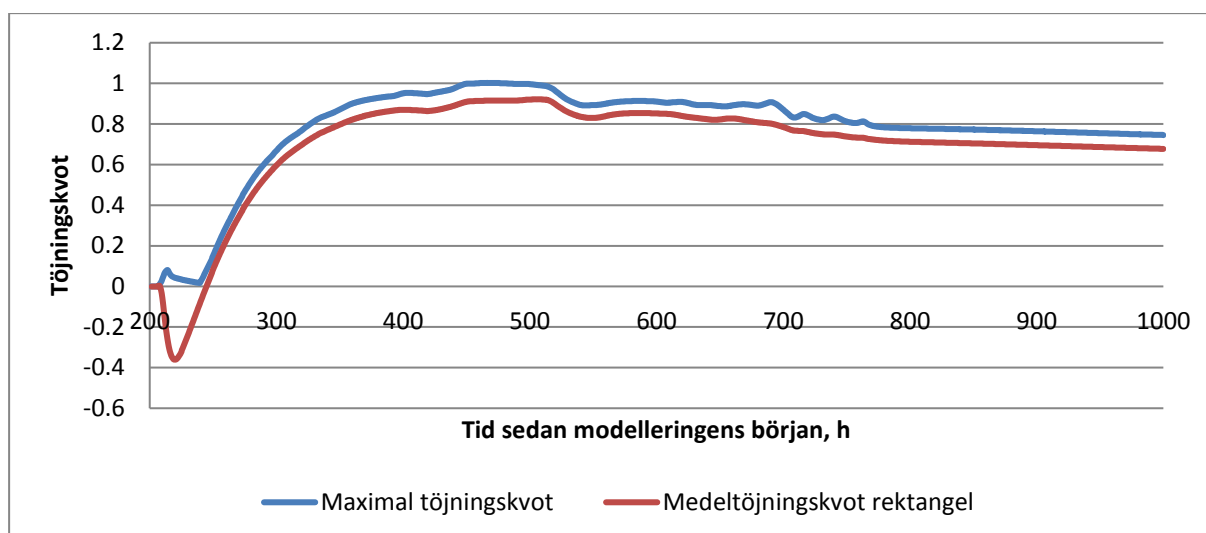
Nollkalkylen

Om inga åtgärder mot temperatursprickor genomförts hade temperaturförloppen sannolikt sett ut som i figur 4-40. I modelleringen har ingen värmende eller isolerande åtgärder genomförts och de parametrar som styr värmeutvecklingen i den färska betongen har justerats mot de uppmätta temperaturerna i rambenet.



Figur 4-40 Gjutning 2. Nollkalkylen. Temperaturutveckling.

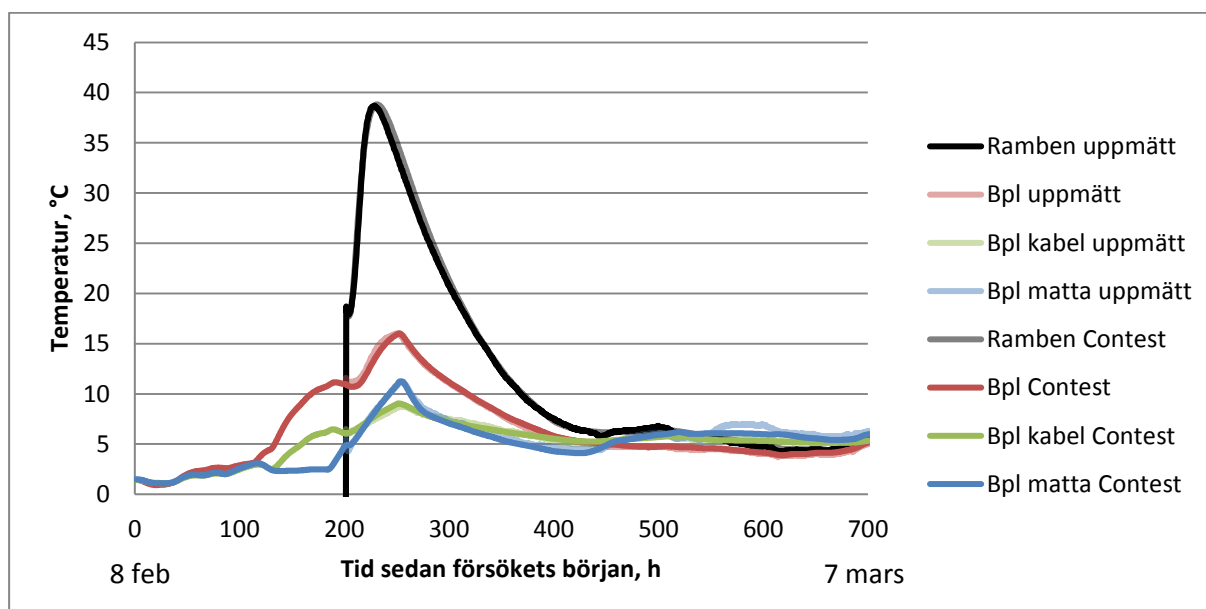
Nollkalkylen pekar på att töjningskvoten utan åtgärder hade blivit farligt hög men inte över 1 när töjningarna medelvärdesbildades på samma sätt som beskrev i avsnittet om gjutning 1.



Figur 4-41 Gjutning 2. Nollkalkylen. Töjningskvoter.

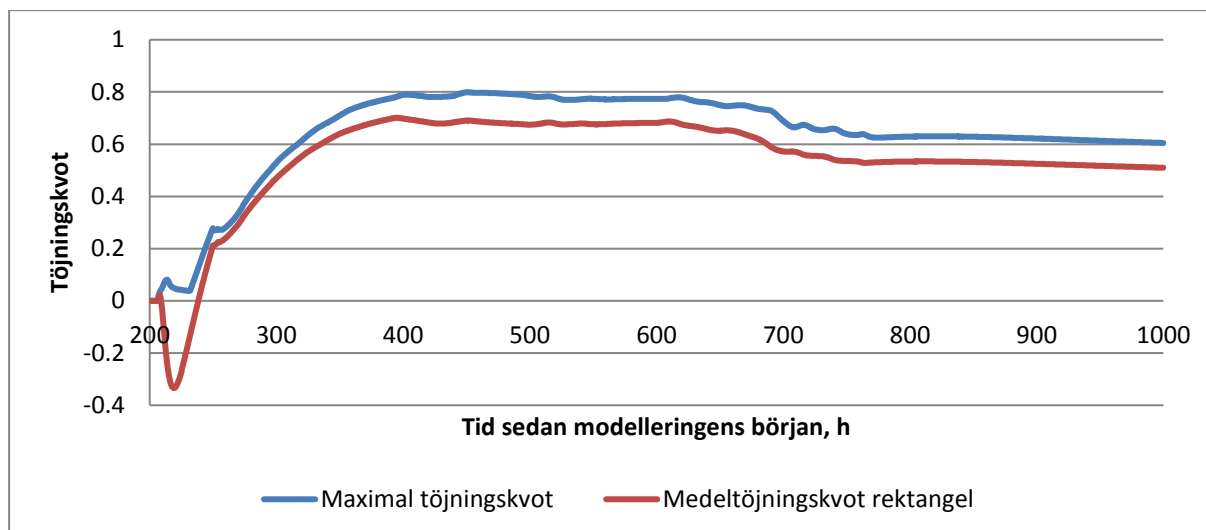
Efterkalkylen

För att temperaturkurvorna för rambenet skulle stämma överens justerades den parameter i programmet som påverkar hur snabbt och hur tidigt värmeutvecklingen i cementet kommer. Den totala värmeutvecklingen per kilogram cement sänktes faktiskt något för att få överensstämmelse med uppmätt temperatur. Isoleringen över Bpl kabel justerades ner för att ge liknande temperaturutveckling som från mätningen. Bottenplattan isolerades även med ett tunt lager isolering för att den inte skulle svalna av för snabbt. God överensstämmelse uppnåddes på detta vis med uppmätta resultat, se figur 4-42.



Figur 4-42 Gjutning 2. Efterkalkylen. Temperaturutveckling.

Efterkalkylen tyder inte på att det förelåg någon sprickrisk på grund av temperaturförloppen vid gjutningen. I figur 4-43 ses att kurvorna aldrig överskrider den dimensionerande töjningskvoten 0,8.



Figur 4-43 Gjutning 2. Efterkalkylen. Töjningskvoter.

Sammanfattning

I verkligheten har två sprickor upptäckts i väggen. De uppkom någon gång mellan 35 och 42 dagar efter gjutningen. Att sprickorna uppkom efter så lång tid efter gjutning och att spänningsnivåerna i efterkalkylen och även nollkalkylen är så pass låga talar för att spänningarna orsakade vid gjutningen inte själva orsakat sprickorna.

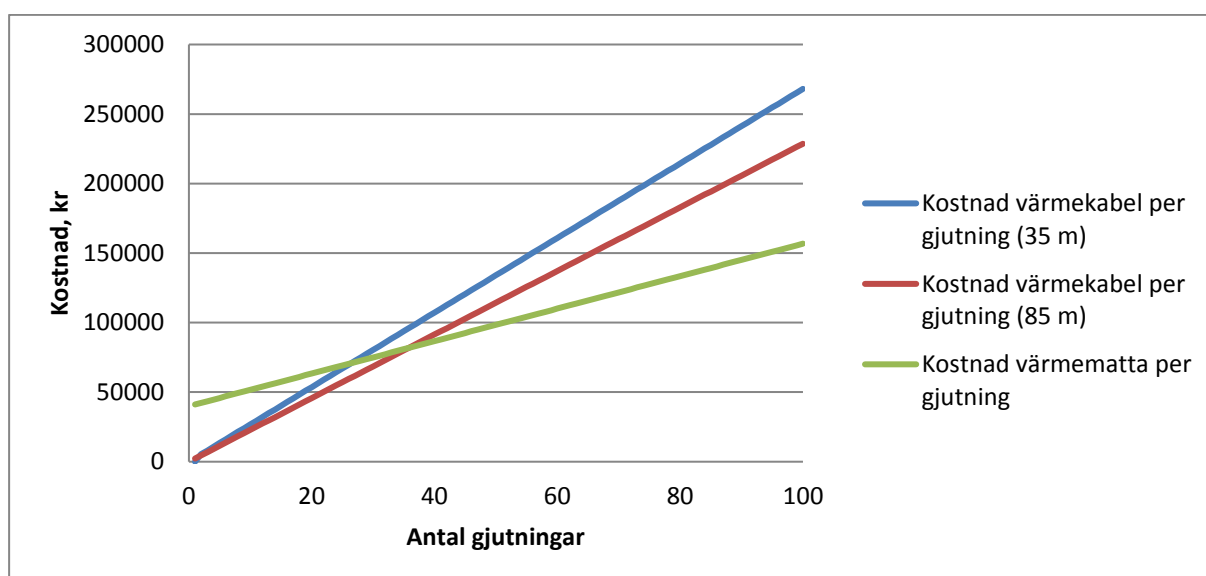
Tre dagar efter den aktuella gjutningen göts den angränsande södra vägg/valvetappen. Ytterligare 13 dagar senare göts den angränsande norra etappen. Möjligen har temperaturförloppen i dessa ökat på dragspänningarna i den aktuella etappen. Det kan i figur 4-43 konstateras att spänningarna (töjningskvoten) ligger kvar på en hög nivå även 1000 timmar, 41 dagar, efter gjutningen. Eftersom dragspänningsnivåerna redan är höga (0,8) är risken att konstruktionen spricker stor om ytterligare dragspänningar tillförs. Ingen nyttig last belastade etappen under perioden fram till sprickornas uppkomst.

Det faktum att skillnaden mellan uppmätt och modellerad temperatur i rambenet är mindre för försök 2 än för försök 1 kan möjligen förklaras av att olika formtyper använts. I försök 1 stabiliserades formens plywoodskiva av längsgående cirka 3 dm utstående träreglar fördelade på ungefär varje halvmeter i höjdlid. I försök 2 användes formar där en tunnare stålkonstruktion stabiliserade formens plywoodskiva. Troligen förhindrade formen vid gjutning 1 luftflödet invid formen på ett annat sätt än i gjutning 2 vilket ökade formens isoleringsförmåga. Hur stor påverkan detta kan ha haft på temperaturutvecklingen i rambenet är dock svårt att säga.

4.4 Ekonomisk och produktionsteknisk jämförelse mellan värmemattor och värmekablar

Ekonomisk jämförelse

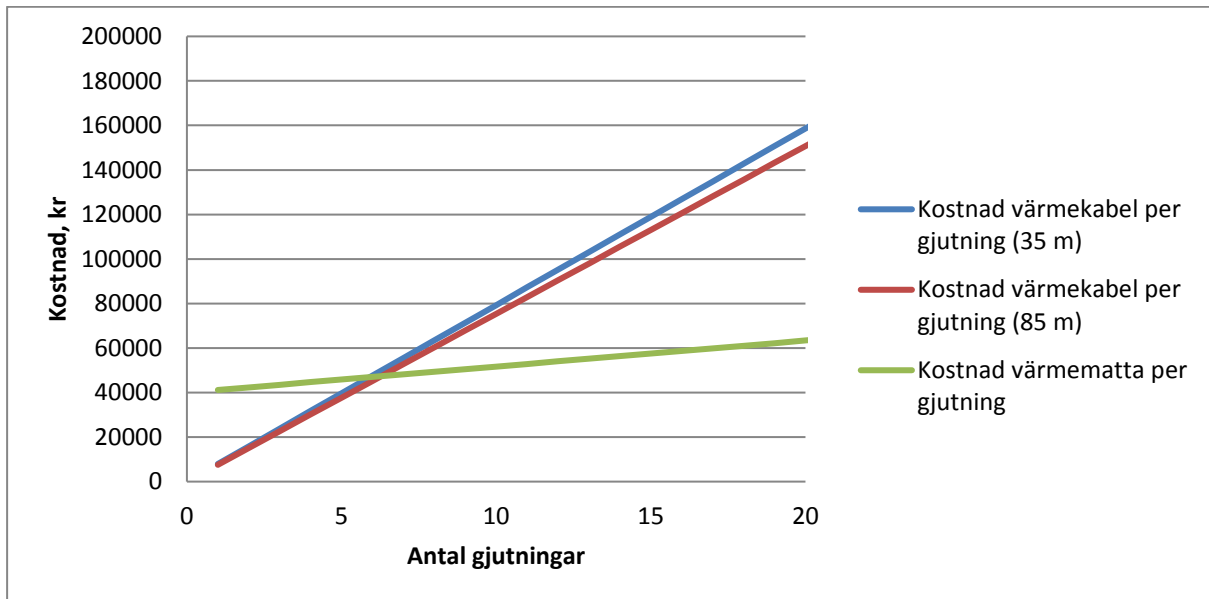
Det fall som kostnaderna beräknats för, dvs. uppvärmning av en 70 cm tjock och 40 m² stor bottenplatta, se avsnitt 3.6, är någorlunda representativt för många verkliga gjutsituationer i vilka värmemattan skulle kunna användas. Det skulle till exempel kunna handla om gjutning av en stödmur på en bottenplatta eller gjutningar av tunnelväggar och valv som i projektet i Gamla Uppsala, se avsnitt 3.1.2. Vilka antaganden som gjorts om arbetsåtgång, kostnad per arbetad timma och materialkostnader redovisas i bilaga C.1. Som figur 4-44 visar gör den inledande engångskostnaden det innebär att köpa in värmemattorna att värmekablar är ett ekonomiskt bättre alternativ om ett mindre antal gjutningar ska göras. Överstiger antalet gjutningar ungefär 30 stycken blir värmemattorna lönsamma enligt den gjorda beräkningen.



Figur 4-44 Ekonomisk jämförelse mellan värmekablar och värmematta som sprickbegränsande åtgärd för den fiktiva situationen.

I beräkningen har hänsyn tagits till materialkostnad, kostnad för elförbrukning samt arbetskostnaden för att utföra värmningen. Materialkostnad och kostnad för elförbrukning är kända från prisuppgifter från tillverkare och elbolag. Arbetskostnaden är däremot inte lika säker eftersom en bedömning av hur många arbetstimmar som åtgår för värmningen måste göras. För diagrammet i figur 4-44 antogs att det går åt 2,5 arbetstimmar för värmningsarbete vid användning av värmekablar och 1,5 timmar vid användning av värmemattor. Anledningen till den lägre kostnaden för värmemattorna är att det rimligen tar längre tid att knyta fast värmekablarna på armeringen än att lägga på värmemattorna. Hur många arbetstimmar som ansätts för arbetet med värmekablarna och värmemattorna har stor betydelse för hur värmningskostnaderna bedöms i exemplet. I produktionskalkylen för projektet i Gamla Uppsala räknades med motsvarande 13 timmar per arbetstimmar för arbetet med värmning med värmekablar (för jämförelsen har omräkning gjorts efter hur många meter kabel som lagts per timma). Vid ett sådant antagande för värmekablarna och samma antagande som tidigare om värmemattorna blir värmemattorna billigare redan efter sju gjutningar, se figur

4-45. Antalet arbetstimmar vid användning av värmemattor bedömdes aldrig i produktionskalkylen varför samma antagande som tidigare använts.



Figur 4-45 Ekonomisk jämförelse mellan värmekablar och värmematta som sprickbegränsande åtgärd med fler arbetstimmar för fallet med värmekablar.

Ett sådant antagande för antalet arbetstimmar för fallet med värmekablarna är dock orimligt högt för det här exemplet. Antagandet är mer rimligt om de arbetsmoment som går åt till att säkerställa att värmningen fungerar (montering av temperaturtrådar, startande av temperaturlogger och kontroll att värmen är igång) räknas in i arbetet kring värmningen. Detta arbete behöver göras både för värmekablar och också för värmemattor. Oavsett vilken av metoderna som används är kostnader för värmningen oftast en relativt liten del av den totala konstruktionskostnaden. Vid valet av metod är det därför också viktigt att titta på de produktionstekniska för- och nackdelarna relaterade till de två metoderna.

Produktionsteknisk jämförelse

Vid praktisk användning har både värmekablarna och värmemattorna sina för- och nackdelar.

Värmekablarna går relativt ofta sönder, ofta i samband med att de gjuts in i betongen, och förlorar då sin funktion. Det händer också att de slutar att fungera under tiden som de är tänkta att vara igång vilket är bedrägligt eftersom detta kanske inte upptäcks. Eftersom de elnät som etableras på byggarbetsplatsen är av provisorisk natur är det heller inte ovanligt att elförsörjningen till värmekablarna bryts, vilket inte heller alltid upptäcks. En stor nackdel med metoden att använda värmekablar är att även om det upptäcks att en värmekabel är trasig så kan den inte ersättas av en ny. En fördel med värmekablarna är däremot att de inte är i vägen för eventuellt övrigt pågående arbete vid den betong som ska värmas. Om monterandet av värmekablar planeras tillsammans med armeringsarbetet kan de också placeras så att de värmer i princip vilken konstruktionsdel av betong som helst. Värmemattorna begränsas i detta avseende av att de enbart kan värma från betongens yta.

Värmemattorna kan i sin tur ha den nackdelen att de stör pågående arbete genom att viss försiktighet måste iakttas kring dem, man bör till exempel undvika att gå på dem för att inte värmekablarna i dem ska gå sönder³. Eftersom värmemattorna inte kan användas på två ställen samtidigt måste gjutningarna spridas ut om inte flera uppsättningar mattor köps in. En annan nackdel med värmemattorna är att de enbart kan värma betongen från någon av dess ytor, vilket kanske inte alltid ger tillräcklig uppvärmning. Det kan också vara svårt att placera värmemattorna på betongs yta om till exempel ställningar är i vägen⁴. Den kanske största fördelen med värmemattan är att det räcker med att känna på dem för att veta om de är igång. Risken att värmningen går förlorad av misstag är därför mindre än vid användning av värmekablarna. En annan fördel är att värmemattan inte behöver planeras för i förtid. Den kan därmed ersätta till exempel förstörda ingjutna värmekablar eller användas om värmekablar av misstag inte gjutits in. Ett annat användningsområde är vid reparationsarbeten, där det sällan finns ingjutna värmekablar om delar av betongen behöver värmas.

Oavsett om värmekablar eller värmemattor används som huvudsaklig metod vid ett större betongarbete är det mycket lämpligt att ha några värmemattor att kunna använda vid behov.

³ Erfarenhet från användningen av värmemattor i projektet i Gamla Uppsala, se avsnitt 3.1.2, är emellertid att värmemattorna är robusta. Trots att de ibland blivit något ovarsamt behandlade (trampade på och nedtryckta mellan ställningar) gick enbart ett par stycken av ungefär 50 mattor sönder det första halvåret av användande (höst, vår och vinter).

⁴ Vid projektet i Gamla Uppsala användes vid vissa vägg- och valv etapper ställning för att bära upp valvformen vid gjutning. Ställningsstagens c/c-avståndet på 90 cm (att jämföra med värmemattans 100 cm) gjorde att det fungerade bra att använda värmemattorna, men att det tog extra tid att lägga ut värmemattorna mellan stagen.

Kapitel 5

5 Slutsatser

5.1 Slutsatser av försöken med värmemattan

Målet med denna rapport var att undersöka värmemattans förmåga att värma upp underliggande betong, och att föreslå en metod för att inkludera värmemattan i sprickriskberäkningar gjorda i Contest. Värmemattan har även tidigare inkluderats i sprickriskberäkningar och då har de parametervärden som använts enbart grundats på värmemattans specificerade elektriska effekt och på antaganden om värmemattans isolerande förmåga.

5.1.1 Tolkning av resultaten

Den viktigaste slutsatsen som kan dras av försöken är att värmemattan kan användas i syfte att värma upp underliggande betong. Dess uppvärmande förmåga bibehölls även vid blöta förhållanden och relativt stora temperaturökning i betongens medeltemperatur har uppmätts vid försöken. Resultaten från försök 1 visade att det är en god idé att täcka värmemattorna med ett lager extra isolering vid användning. Detta ökade den uppmätta uppvärmningen med strax under 20 procent, se tabell 4-2 och tabell 4-3. Därför täcktes värmemattorna vid fortsatta försök med extra isolering och det är så värmemattorna ska användas enligt förslaget i nästa avsnitt.

Gällande vilken metod som bör användas för att modellera värmemattan i Contest visade resultaten att det är lämpligt att modellera värmemattan med metod 1. Det fanns ingen anledning till att modellera värmemattan genom de mer krångliga metoderna som provades. Utvärderingen av vilka generella värden som bör användas i Contest för att modellera värmemattan med metod 1 försvårades av att resultaten inte gav några entydiga svar. Resultaten från de olika mätserierna pekade alla på att parametrarna för den isolerande förmågan i programmet bör sättas till 0,04 W/m·K och 0,02 meter. Vilken effekt som i programmet ska låtas tillföras randen var däremot mer svårbestämt. Jämförelserna mellan modellerade temperaturer och uppmätta temperaturer från de olika mätserierna visade att det för vissa mätserier stämde bra då en effekt på cirka 110-120 W/m² ansattes i Contest medan det för andra mätserier räckte med cirka 90-100 W/m². Vad skillnaderna beror på har inte gått att utreda.

Den största felkällan som tagits hänsyn till vid modelleringen var värmekonduktiviteten i sprängstenen. Jämförelserna med uppmätta resultat från försök 3 talade för att denna kan ha varit lågt antagen i grundmodellen som användes vid jämförelserna och vid utvärderingen av

effekt och värmekonduktivitet i värmemattan. Om så är fallet har detta lett till en viss underskattning av värmemattans uppvärmande förmåga. Eftersom utvärderingen i huvudsak grundades på jämförelser av temperaturkurvorna över plattans mitt har det eventuella felet på grund av detta minskats till skillnad från om lika mycket hänsyn tagits till alla mätpunkter. Det är sannolikt att skillnaderna i hur värmemattan behövde modelleras för att få överensstämmelse för de olika mätserierna till största del beror av de faktorer som inte tagits hänsyn till i modellen. Dessa faktorer är troligen relaterade till väder, fuktighet och skuggförhållanden. En del talade till exempel för att solsken drivit på uppvärmningen för de försök där hög modellerad effekt behövdes för att erhålla överensstämmelse med uppmätta resultat. Det är därför till fördel att fyra försök gjordes eftersom detta påvisat att viss variation på grund av faktorer som inte beaktats i modellen är att förvänta sig.

När generella parametrar väljs är det säkrast att välja dem konservativt och därför har ett relativt lågt värde på den tillförda effekten föreslagits i nästa avsnitt.

5.1.2 Förslag till metod i Contest

Att täcka värmemattorna med minst ett lager isoleringsmaterial är att rekommendera eftersom detta gör att värmemattans uppvärmande effekt utnyttjas bättre. Täckningen utgör även ett visst skydd mot att mattorna går sönder vid åverkan ovanifrån. Vid modellering i Contest av värmemattor täckta med isolering motsvarande 10 mm betongtäckmatta föreslås följande metod:

- Använd noder så att de delar av betongblockets sidor som täcks av värmemattor får separata ränder i modellen.
- Modellera hela värmemattornas funktion genom att ändra egenskaperna för den/de ränder mot vilka värmemattor läggs:
 - I fönstret för randens egenskaper och under "Insulation description" välj "Varying in time" och klicka på "Edit".
 - "Layers of insulation materials" används och för den tidsperiod som mattorna ska simuleras läggs två lager till via knappen "Add item from file":
 - Lägg till lagret "Free surface".
 - Lägg till ett annat lager (vilket som helst från listan) och ändra värmekonduktiviteten till $0,04 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ och ändra tjockleken till $0,02 \text{ m}$. Detta görs via knappen "Edit item"
 - Kryssa i "Simulate wind"- funktionen. Ett rimligt värde på vindhastigheten är ofta 2 m/s .
 - Under "External power" välj "Varying in time" och klicka "Edit".
 - Lägg till effekten 90 W/m^2 .

Om betongen grundläggs på mark har värdet på värmekonduktiviteten hos denna betydelse för hur mycket betongen kommer att värmas. Att välja ett för högt värde är på säkra sidan eftersom det ger en mindre temperaturökning i Contest.

Om den värmda konstruktionsdelens undersida gränsar mot luft (till exempel ett valv) och denna inte är isolerad har vindhastigheten betydelse för hur mycket betongen kommer att värmas upp. Är undersidan relativt skyddad mot vinden kan vindhastigheten för randen väljas till $0,5 \text{ m/s}$.

5.2 Slutsatser av efterkalkylerna

Efterkalkylerna vars resultat redovisas i avsnitt 4.3 visade att värmande åtgärder sannolikt var avgörande för om sprickor uppkom vid gjutning 1. Vid gjutning 2 uppkom sprickor trots låga beräknade spänningsnivåer. Sprickorna uppkom sannolikt inte av att konstruktionen belastats av något tyngd, till exempel jordmassor, eftersom ingen last lades på konstruktionen under perioden. Sprickorna hänger snarare ihop med de två gjutningar som på var sin sida göts mot den spruckna etappen. När dessa svalnade av kan de ha orsakat en ökning av dragspänningsnivåerna i gjutning 2. Eftersom dragspänningsnivåerna i gjutning 2 redan var höga, se figur 4-43, behöver ökningen av dragspänningen orsakad av de efterföljande gjutningarna inte ha varit så stor för att sprickbildning skulle uppstå.

Efterkalkylen för gjutning 1 stärker tesen att de parametrar som föreslås för att modellera värmemattan är konservativt satta och att den uppvärmande förmågan för många verkliga situationer är högre. Att så är fallet är rimligt eftersom regn- och vindförhållanden kan skilja mycket inom anläggningsbyggandet vilket påverkar värmemattans uppvärmande förmåga, se avsnitt 4.2.3.

Vid båda de studerade gjutningarna skilde sig temperaturutvecklingen i den nygjutna betongen mellan mätningar och modelleringar då generella parametrar för den färska betongen användes. Framförallt vid gjutning 1 var skillnaderna stora vilket avspeglade sig i att de beräknade sprickriskerna skilde sig mycket mellan förkalkylen och efterkalkylen i vilken parametrarna för den färska betongen anpassats. Det är därför rimligt att spricksäkerhetsfaktorn är högre vid användning av generella parametrar för den färska betongen jämfört med vid provade materialparametrar.

5.3 Slutsatser om vidare studier

Eftersom de försök som gjordes inom ramen för detta arbete genomfördes i relativt likvärdiga förhållanden skulle värmemattans effekt behöva provas på skilda förhållanden. Förhållanden som inte provats i denna studie är hur uppvärmningen påverkas av andra tjocklekar på betongplattorna, av rena vinterförhållanden, av andra betongsorter och vid uppvärmning av betongplattor grundlagda på andra material än sprängsten. Undersökningar av i vilken utsträckning solstrålning dagtid och utstrålning nattetid kan värma upp respektive kyla ner betongen är intressant i detta sammanhang.

I detta arbete gjordes enbart två kortare efterkalkyler av gjutningar för att sätta värmemattan i en kontext och för att illustrera ett av dess användningsområden. Fler efterkalkyler med jämförelser med verklig uppsprickning skulle behöva göras för att verifiera att den metod för beräkningar av spänningar och töjningar som används i Contest är korrekt. Försök skulle även kunna göras med spänningsmätare ingjutna i betongen för att direkt kunna koppla temperaturförloppet till spänningsnivåer och inte enbart ha uppsprickningen som indikator på de spänningsnivåer som råder i betongen vid gjutförloppet.

Litteraturförteckning

- BE group (2014): "Armeringshandboken", www.bkl.lth.se/fileadmin/byggnadskonstruktion/education/VSMF10/referenslitteratur/BE-armeringshandboken. [Använd 2015-07-16].
- Boverkets författningssamling (2011): "Boverkets föreskrifter och allmänna råd om tillämpning av europeiska konstruktionsstandarder (eurokoder)", BFS 2011:10 EKS 8, april 2011.
- Byfors K & Tuutti K (1994): "Armeringskorrosion", Betonghandboken material, Svensk byggtjänst och Cementa AB, Stockholm, Sverige.
- Chan, J (2014): "Thermal properties of concrete with different Swedish aggregate materials", Report TVBM-5095 Master thesis, LTH faculty of engineering, Lund, Sweden.
- Coté J & Conrad J-M (2005): "Thermal conductivity of base-course materials", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 42, Nr. 1, ss. 61-78.
- Emborg M, Bernander S, Ekerfors K, Groth P & Hedlund H (1997): "Temperatursprickor i betongkonstruktioner", Teknisk rapport 1997:02, Luleå tekniska universitet, institutionen för väg- och vattenbyggnad, Luleå, Sverige.
- Fagerlund G (1994): "Struktur och strukturutveckling", Betonghandboken Material, Svensk byggtjänst och Cementa AB, Stockholm, Sverige.
- JEJMS Concrete (2006): "Contest Pro users manual", Luleå, Sverige
- Johansson S-E (1994): "Cement", Betonghandboken material, Svensk byggtjänst och Cementa AB, Stockholm, Sverige.
- Jonasson J-E, Emborg M & Bernander S (1994): "Temperatur, mognadsutveckling och egenspanningar i ung betong", Betonghandboken Material, Svensk byggtjänst och Cementa AB, Stockholm, Sverige.
- Kook-Han K, Sang-Eun J, Jin-Keun K & Sungchul Y (2003): "An experimental study of thermal conductivity of concrete", *Cement and concrete research*, Vol. 33, Nr. 3, mars 2003.
- Loudon AG (1968): "U-values in the 1970 guide", *The journal of the institution of heating and ventilation engineers*, Vol. 39, september 1968, ss. 167-174.
- Löfquist B (1946): "Temperatureffekter i hårdnande betong", Tekniskt meddelande, Serie B, Nr 22, Kungliga vattenfallsstyrelsen.

Neville A M (1981): "Properties of concrete", Kapitel 7, "Durability of concrete", Longman scientific & technical, Singapore, Indonesien.

Nilsson L-O (1994): "Fukt och betong", Betonghandboken material, Svensk byggtjänst och Cementa AB, Stockholm, Sverige.

Nordtec instrument AB (IU): "Temperatur, fakta mätteknik",
www.nordtec.se/sites/default/files/pdf_1.pdf
[Använd 2015-07-30]

Nordtec instrument AB (IU): "De nya dataloggrarna Testo 175/177",
www.nordtec.se/sites/default/files/pdf_178_1.pdf
[Använd 2015-07-30]

Peet M J, Hasan H S & Bhadeshia H K D H (2011): "Prediction of thermal conductivity of steel", *International journal of heat and mass transfer*, Vol. 54, Nr. 11, maj 2011.

Petersons N (1994): "Sprickor", Betonghandboken material, Svensk byggtjänst och Cementa AB, Stockholm, Sverige.

Rantala J & Leivo V (2007): "Thermal and moisture parameters of a dry coarse-grained fill or drainage layer", *Construction and building materials*, Vol. 21, Nr. 8, ss. 1726-1731.

Stenlid L (2014): "Petrografisk analys Olunda bergtäkt", Analys ballastmaterial, Upplands Väsby, Sverige.

Sunberg J, Thunholm B & Johnson J (1985): "Värmeöverförande egenskaper i svensk berggrund", Rapport R97:1985, Statens råd för byggforskning, Stockholm.

Svensk byggtjänst (2013): "AMA 13 Anläggning", EBE.11, Betonggjutning kategori A vid nybyggnad,
"http://ama.byggtjanst.se/navigera/anlaggning-13"
[Använd 2015-08-08]

Svensk byggtjänst (2010): "AMA 10 Anläggning", CEB.411, Fyllning med sprängsten för grundläggning av bro, Svensk byggtjänst, Västerås, Sverige, ss. 126-127.

Sveriges geologiska undersökning (IU): "Kartvisare, berggrund 1:1 miljon",
<http://apps.sgu.se/kartvisare/kartvisare-berggrund-1-miljon-sv.html>
[Använd 2015-07-21]

Sveriges meteorologiska institut (2015): "SMHI Öppna data, Total molnmängd - Uppsala Flygplats, 97530",
<http://opendata-download-metobs.smhi.se/api/version/latest/parameter/16.atom>
[Använd 2015-07-27]

Sveriges meteorologiska institut (2015): "SMHI Öppna data, Nederbördsmängd - Uppsala Flygplats, 97530",
<http://opendata-download-metobs.smhi.se/api/version/latest/parameter/7.atom>
[Använd 2015-07-28]

Svensk standard (2005): "Dimensionering av betongkonstruktioner – Del 1-1: Allmänna regler och regler för byggnader, SS-EN 1992-1-1:2005.

Svensk standard (2014): "Welding - Guidelines for a metallic materials grouping system", SIS-CEN ISO/TR 15608:2014.

Svensk standard (2014): "Tryckkärl (ej eldberörda) – Del 3, konstruktion", SS-EN 13445-3:2014, Annex O Fysikaliska egenskaper för stål.

Svensk standard (2013): "Betong - Fordringar, egenskaper, tillverkning och överensstämmelser", SS-EN 206:2013.

Tang S, Tang C, Liang Z, Zhang, Y & Li L (2012): "Numerical Study of the Influence of Material Structure on Effective Thermal Conductivity of Concrete", *Heat transfer engineering*, Vol. 33, Nr. 8, ss. 732-747.

Vägverket (2001): "Beräkning av tjällyftning", Publikation 2001:101, Vägverkets metodbeskrivningar.

Wallin K, Emborg M & Jonasson J-E (1997): "Värme ett alternativ till kyla", Teknisk rapport 1997:15, Luleå tekniska universitet, institutionen för väg- och vattenbyggnad, Luleå, Sverige.

Wallman S (2014): "Petrografisk beskrivning Stingtorpets grustäkt naturgrus", Analys ballastmaterial, Göteborg, Sverige.

Wikipedia (2015): "AC power",
https://en.wikipedia.org/wiki/AC_power
[Använd 2015-08-17]

Bilaga A

A Förutsättningar för grundmodellen

A.1 Värmekonduktiviteten i betongen

Bedömning av betongens värmekonduktivitet

Beräkningen har gjorts enligt Betonghandboken Material, upplaga 2.
Kapitel 14.3:2 har använts för att bedöma fukthalten utifrån antagandet att RH i betongen är 90%.
Kapitel 18.5:2 har använts för att bedöma värmekonduktiviteten utifrån fukthalt och torrdensitet.

Betongmassans densitet	$\rho_b := 2280 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 2.28 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
Cementhalt i betongen	$c := 385 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
Vattencementtalet, vct	$vct := 0.4$
Hydratationsgrad (antagen)	$\alpha := 0.4$
Relativ fuktighet	$RH := 90\%$
Densitet vatten	$\rho_w := 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

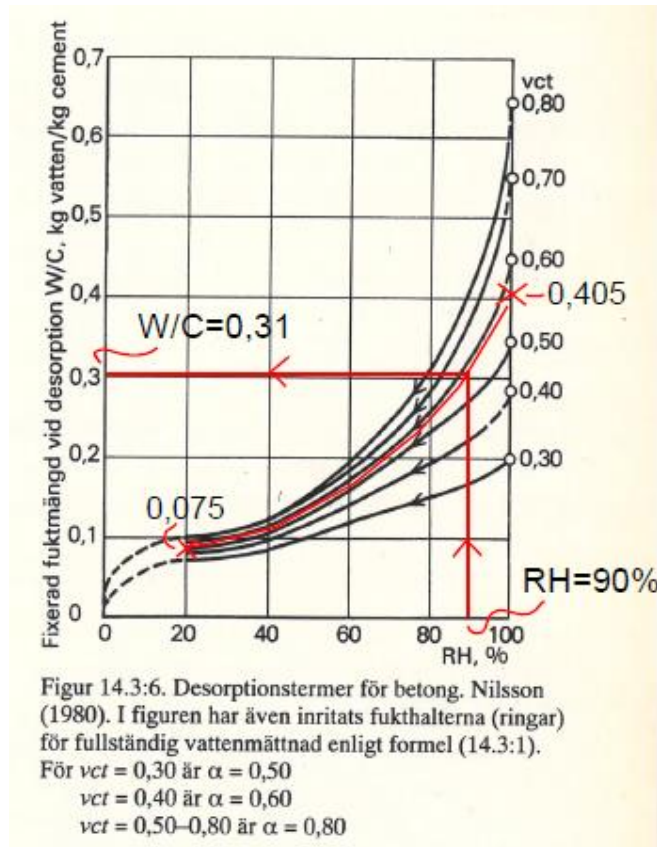
Justering av desorptionstermer

Fukthalt vid fullständig vattenmättnad	$W_{\max} := c \cdot (vct - 0.19\alpha) = 155.925 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
Tal för justering av desorptionsterm (100% RH)	$\frac{W_{\max}}{c} = 0.405$
Fukthalt vid 20% RH	$W_{45\text{des}} := 0.15\alpha \cdot c = 28.875 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
Tal för justering av desorptionsterm (20% RH)	$\frac{W_{45\text{des}}}{c} = 0.075$

Avläsning av fukthalt i betongen från desorptionsterm

Fukthalt i betongen, W/c från diagram $W_c := 0.31c = 119.35 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

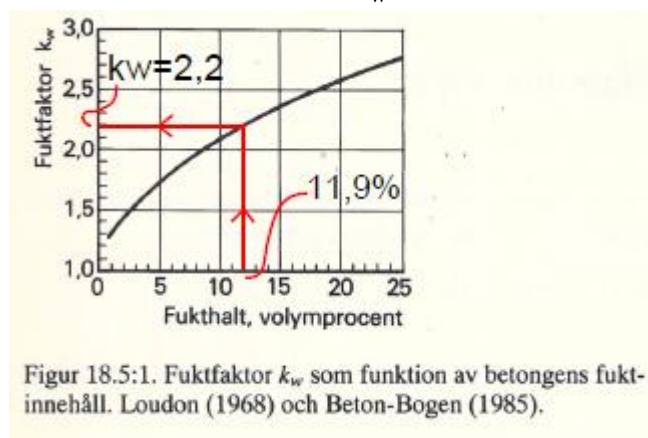
Fukthalt volymprocent $\frac{W_c}{\rho_w} = 0.119$



Figur A-1 Fixerad fuktmängd. Omarbetning från Betonghandboken Material (1994).

Fuktfaktorn k_w

Fuktfaktor, se diagram $k_w := 2.2$



Figur A-2 Fuktfaktor. Omarbetning från Betonghandboken Material(1994).

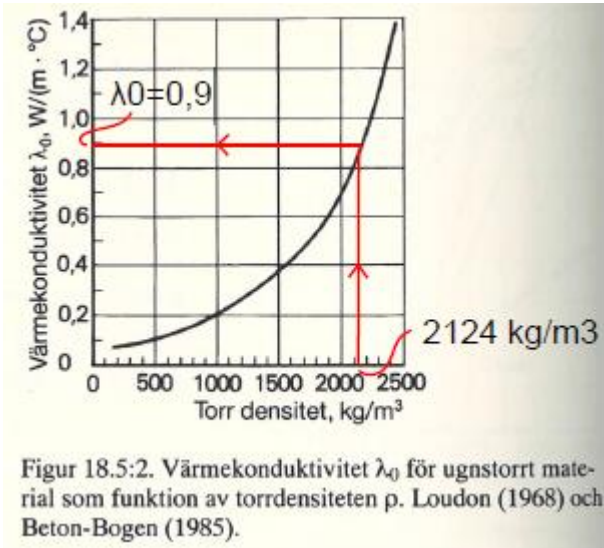
Värmekonduktivitet för ugnstorr betong, λ_0

Torrdensitet betong

$$\rho_b - W_{\max} = 2.124 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Värmekonduktivitet torr betong

$$\lambda_0 := 0.9 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} = 0.9 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$



Figur A-3 Värmekonduktivitet i betong. Omarbetning från Betonghandboken Material (1994).

Värmekonduktivitet betong

$$k_m := 1$$

Värmekonduktivitet betong

$$\lambda_c := k_m \cdot k_w \cdot \lambda_0 = 1.98 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

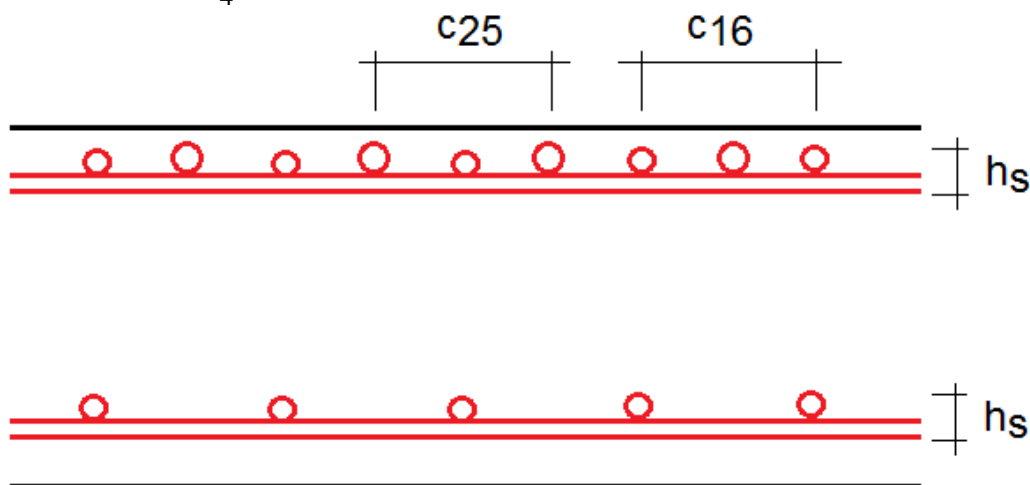
A.2 Temperaturegenskaper för armeringsskikten

Viktning av temperaturegenskaperna för armeringsskikten

För betongen i höjd med armeringen för över- och underkantsarmeringen i bottenplatta och valv

Indata

$\lambda_s := 45 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$	Värmekonduktivitet stål
$\lambda_b := 2.3 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$	Värmekonduktivitet betong
$\rho_s := 7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	Densitet stål
$\rho_b := 2280 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	Densitet betong
$c_s := 460 \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$	Specifika värmekapaciteten stål
$c_b := 1000 \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$	Specifika värmekapaciteten betong
$A_{\phi 25} := (0.025\text{m})^2 \cdot \frac{\pi}{4} = 4.909 \times 10^{-4} \text{ m}^2$	Tvärsnittsarea 25 mm järn
$A_{\phi 16} := (0.016\text{m})^2 \cdot \frac{\pi}{4} = 2.011 \times 10^{-4} \text{ m}^2$	Tvärsnittsarea 16 mm järn
$A_{\phi 12} := (0.012\text{m})^2 \cdot \frac{\pi}{4} = 1.131 \times 10^{-4} \text{ m}^2$	Tvärsnittsarea 12 mm järn



Figur A-4 Schematisk bild av armeringsskikten över vilka viktade temperaturegenskaper räknats ut utifrån betongens och stålets volymandelar och temperaturegenskaper.

Valv underkant

$$c_{25a} := 0.4\text{m}$$

$$c_{25b} := 0.2\text{m}$$

$$c_{16} := 0.16\text{m}$$

c/c-avstånd för de olika järnposterna

$$h_s := 0.11\text{m}$$

Armeringsskiktets höjd

Volymfördelning armeringsskikt

$$V_{\text{tvärs}} := 4 \cdot A_{\phi 25} \cdot \frac{1\text{m}}{c_{25a}} \cdot 1\text{m} + 1 \cdot A_{\phi 25} \cdot \frac{1\text{m}}{c_{25b}} \cdot 1\text{m} = 7.363 \times 10^{-3} \cdot \text{m}^3$$

Volym järn i armeringsskiktet per kvadratmeter betong (tvärgående järn)

$$V_{\text{längs}} := 1 \cdot A_{\phi 16} \cdot \frac{1\text{m}}{c_{16}} \cdot 1\text{m} = 1.257 \times 10^{-3} \cdot \text{m}^3$$

Total volym järn i armeringsskiktet per kvadratmeter betong (längsgående järn)

$$V_j := V_{\text{tvärs}} + V_{\text{längs}} = 8.62 \times 10^{-3} \cdot \text{m}^3$$

Total volym järn i armeringsskiktet per kvadratmeter betong

$$V_b := h_s \cdot 1\text{m} \cdot 1\text{m} - V_j = 0.101\text{m}^3$$

Volym betong i armeringsskiktet per kvadratmeter betong

Viktade temperaturparametrar för armeringsskiktet

$$\lambda_a := \frac{\lambda_s \cdot V_j + \lambda_b \cdot V_b}{V_j + V_b} = 5.646 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$$

Viktad värmekonduktivitet

$$\rho_a := \frac{\rho_s \cdot V_j + \rho_b \cdot V_b}{V_j + V_b} = 2.716 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Viktad densitet

$$c_a := \frac{c_s \cdot V_j + c_b \cdot V_b}{V_j + V_b} = 957.685 \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$$

Viktad värmekapacitet

Valv överkant

$$c_{12a} := 0.3\text{m}$$

$$c_{12b} := 0.15\text{m}$$

c/c-avstånd för de olika järnposterna

$$h_s := 0.024\text{m}$$

Armeringsskiktets höjd

Volymfördelning armeringsskikt

$$V_{\text{tvärs}} := 2 \cdot A_{\phi 12} \cdot \frac{1\text{m}}{c_{12a}} \cdot 1\text{m} = 7.54 \times 10^{-4} \cdot \text{m}^3$$

Volym järn i armeringsskiktet per kvadratmeter betong (tvärgående järn)

$$V_{\text{längs}} := 1 \cdot A_{\phi 12} \frac{1\text{m}}{c_{12b}} \cdot 1\text{m} = 7.54 \times 10^{-4} \cdot \text{m}^3$$

Total volym järn i armeringsskiktet per kvadratmeter betong (längsgående järn)

$$V_j := V_{\text{tvärs}} + V_{\text{längs}} = 1.508 \times 10^{-3} \cdot \text{m}^3$$

Total volym järn i armeringsskiktet per kvadratmeter betong

$$V_b := h_s \cdot 1\text{m} \cdot 1\text{m} - V_j = 0.022\text{m}^3$$

Volym betong i armeringsskiktet per kvadratmeter betong

Viktade temperaturparametrar för armeringsskiktet

$$\lambda_a := \frac{\lambda_s \cdot V_j + \lambda_b \cdot V_b}{V_j + V_b} = 4.983 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

Viktad värmekonduktivitet

$$\rho_a := \frac{\rho_s \cdot V_j + \rho_b \cdot V_b}{V_j + V_b} = 2.63 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Viktad densitet

$$c_a := \frac{c_s \cdot V_j + c_b \cdot V_b}{V_j + V_b} = 966.071 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

Viktad värmekapacitet

Bottenplatta underkant

$$c_{16a} := 0.6\text{m} \quad c_{16b} := 0.33\text{m}$$

c/c-avstånd för de olika järnposterna

$$h_s := 0.032\text{r}$$

Armeringsskiktets höjd

Volymfördelning armeringsskikt

$$V_{\text{tvärs}} := 2 \cdot A_{\phi 16} \frac{1\text{m}}{c_{16a}} \cdot 1\text{m} = 6.702 \times 10^{-4} \cdot \text{m}^3$$

Volym järn i armeringsskiktet per kvadratmeter betong (tvärgående järn)

$$V_{\text{längs}} := 1 \cdot A_{\phi 16} \frac{1\text{m}}{c_{16b}} \cdot 1\text{m} = 6.093 \times 10^{-4} \cdot \text{m}^3$$

Total volym järn i armeringsskiktet per kvadratmeter betong (längsgående järn)

$$V_j := V_{\text{tvärs}} + V_{\text{längs}} = 1.279 \times 10^{-3} \cdot \text{m}^3$$

Total volym järn i armeringsskiktet per kvadratmeter betong

$$V_b := h_s \cdot 1\text{m} \cdot 1\text{m} - V_j = 0.031\text{m}^3$$

Volym betong i armeringsskiktet per kvadratmeter betong

Viktade temperaturparametrar för armeringsskiktet

$$\lambda_a := \frac{\lambda_s \cdot V_j + \lambda_b \cdot V_b}{V_j + V_b} = 4.007 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$$

Viktad värmekonduktivitet

$$\rho_a := \frac{\rho_s \cdot V_j + \rho_b \cdot V_b}{V_j + V_b} = 2.503 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Viktad densitet

$$c_a := \frac{c_s \cdot V_j + c_b \cdot V_b}{V_j + V_b} = 978.409 \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$$

Viktad värmekapacitet

Bottenplatta överkant

$$c_{25a} := 0.6\text{m} \quad c_{25b} := 0.2\text{m} \quad c_{12} := 0.15\text{m}$$

c/c-avstånd för de olika järnposterna

$$h_s := 0.037\text{m}$$

Armeringsskiktets höjd

Volymfördelning armeringsskikt

$$V_{\text{tvärs}} := 2 \cdot A_{\phi 25} \cdot \frac{1\text{m}}{c_{25a}} \cdot 1\text{m} + 1 \cdot A_{\phi 25} \cdot \frac{1\text{m}}{c_{25b}} \cdot 1\text{m} = 4.091 \times 10^{-3} \cdot \text{m}^3$$

Volym järn i armeringsskiktet per kvadratmeter betong (tvärgående järn)

$$V_{\text{längs}} := 1 \cdot A_{\phi 12} \cdot \frac{1\text{m}}{c_{12}} \cdot 1\text{m} = 7.54 \times 10^{-4} \cdot \text{m}^3$$

Total volym järn i armeringsskiktet per kvadratmeter betong (längsgående järn)

$$V_j := V_{\text{tvärs}} + V_{\text{längs}} = 4.845 \times 10^{-3} \cdot \text{m}^3$$

Total volym järn i armeringsskiktet per kvadratmeter betong

$$V_b := h_s \cdot 1\text{m} \cdot 1\text{m} - V_j = 0.032\text{m}^3$$

Volym betong i armeringsskiktet per kvadratmeter betong

Viktade temperaturparametrar för armeringsskiktet

$$\lambda_a := \frac{\lambda_s \cdot V_j + \lambda_b \cdot V_b}{V_j + V_b} = 7.891 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$$

Viktad värmekonduktivitet

$$\rho_a := \frac{\rho_s \cdot V_j + \rho_b \cdot V_b}{V_j + V_b} = 3.009 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Viktad densitet

$$c_a := \frac{c_s \cdot V_j + c_b \cdot V_b}{V_j + V_b} = 929.295 \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$$

Viktad värmekapacitet

A.3 Specifika värmekapaciteten betongen

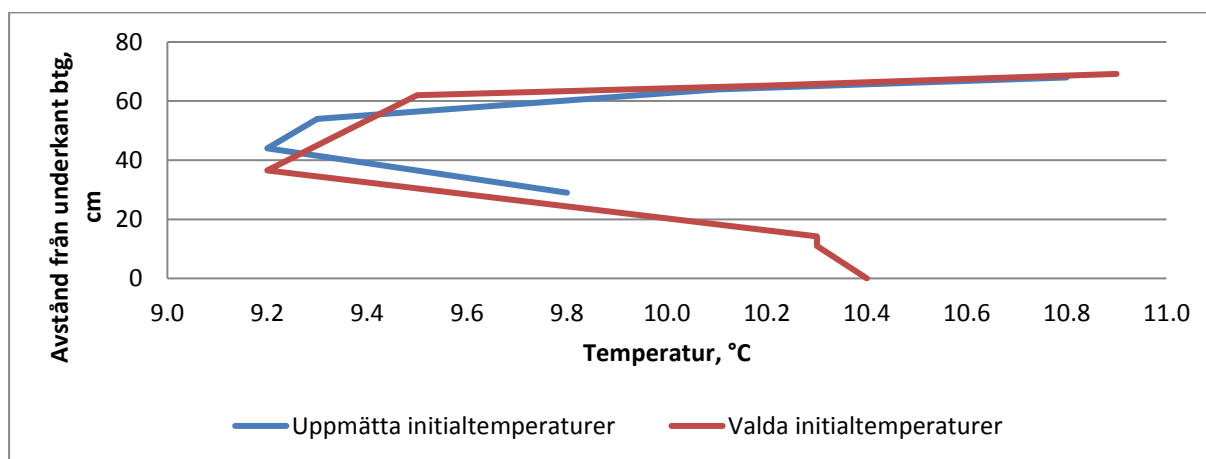
Nedan visas hur värmekapaciteten för den betong som uppvärmdes vid försöken räknades ut. Uträkningen är gjord enligt Betonghandboken material, upplaga 2, tabell 18.5:4.

Tabell A-1 Uträkning av betongmassans specifika värmekapacitet utifrån ingående beståndsdelar.

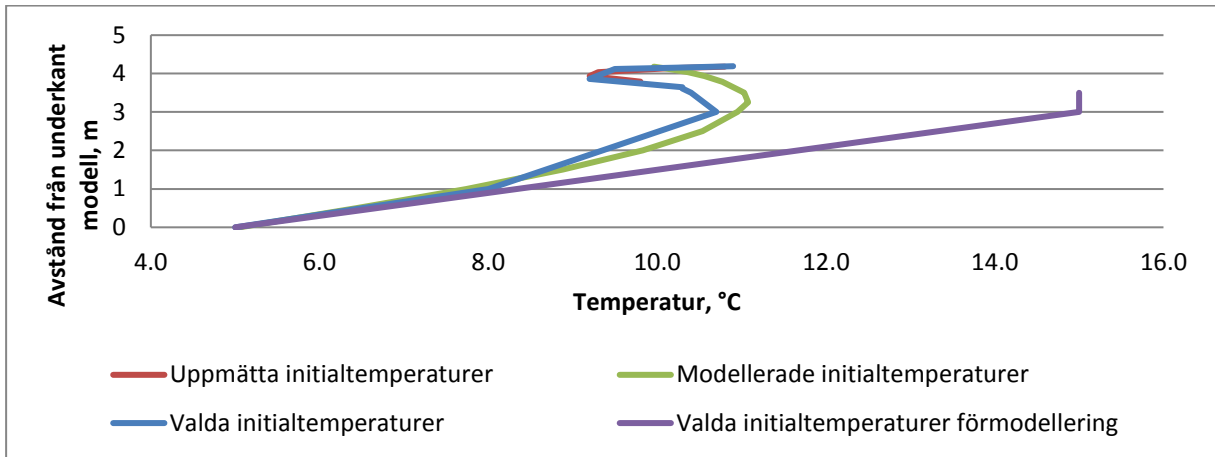
		Densitet	Viktandel	Värmekapacitet	Bidrag
		kg/m ³	kg/m ³	kJ/kg·K	MJ/m ³ ·K
Bottenplattor	Cement	3200	385	0,8	0,308
	Vatten	1000	188	4,2	0,79
	Ballast	2618	1707	0,8	1,37
	Betongmassa	2280	2280	1,08	2,47
Valv	Cement	3200	370	0,8	0,296
	Vatten	1000	181	4,2	0,760
	Ballast	2606	1728	0,8	1,38
	Betongmassa	2280	2280	1,07	2,44

A.4 Initialtemperaturer i grundmodellen

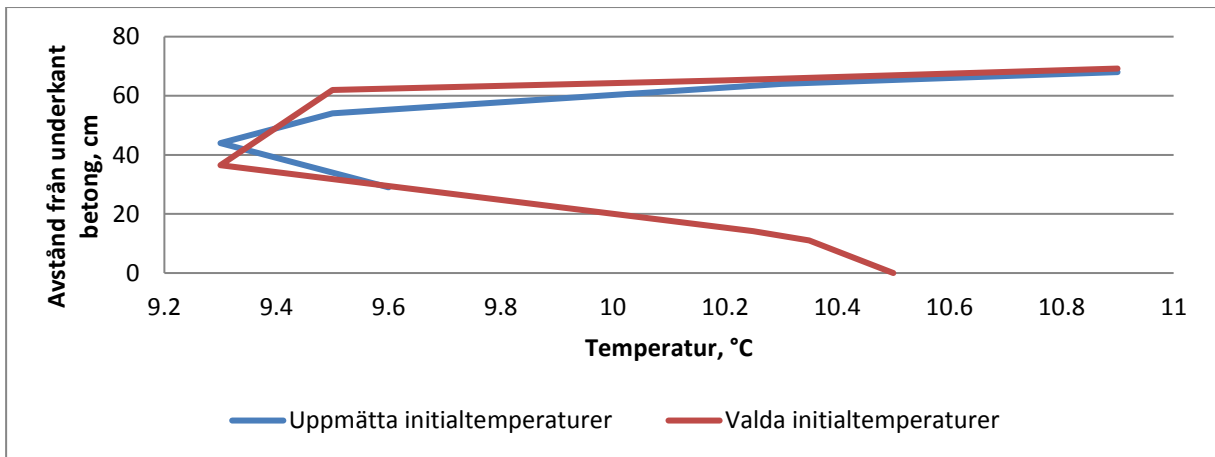
Detta är de temperaturer som angavs vid början av modelleringarna i Contest för de olika mätserierna



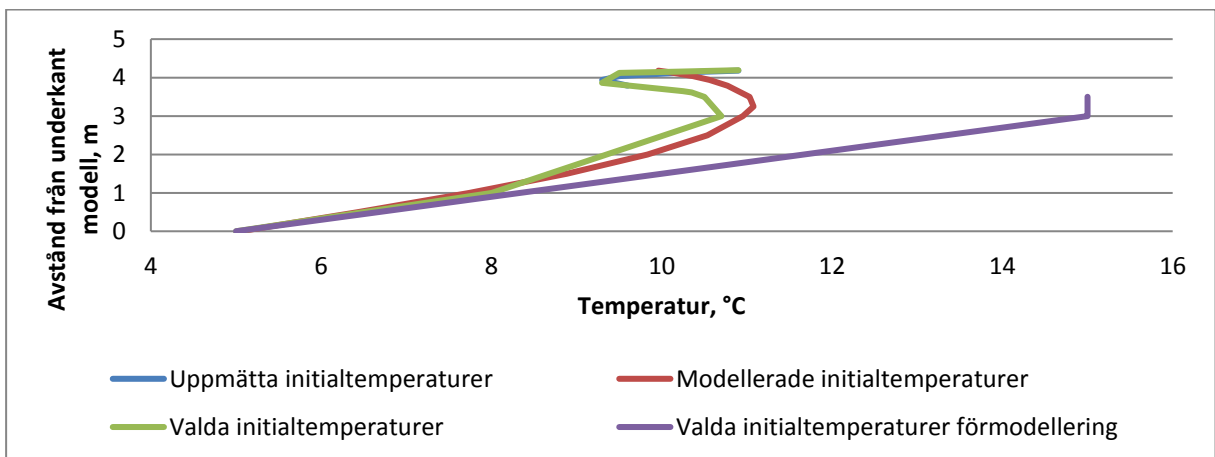
Figur A-5 Försök 1, östra. Enbart betongen.



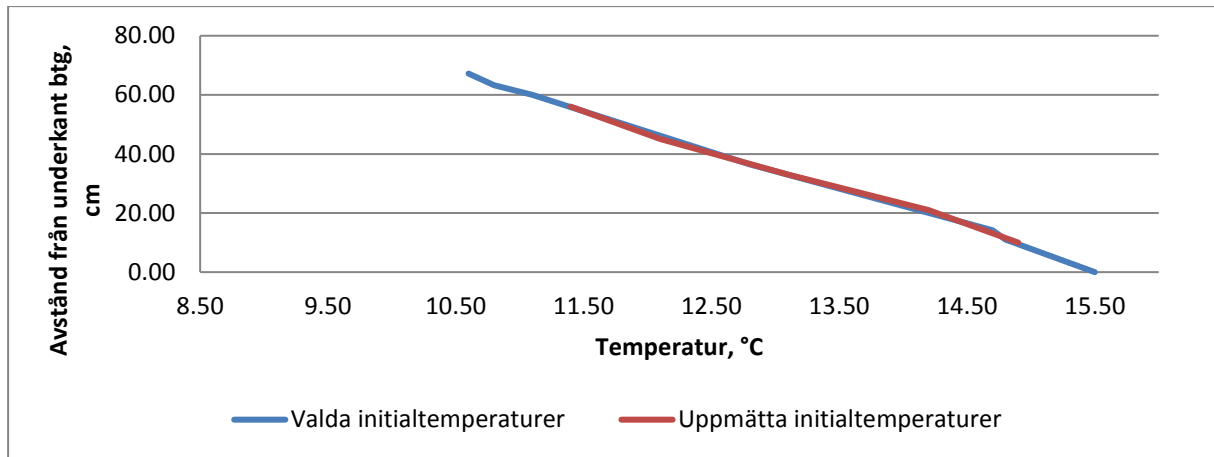
Figur A-6 Försök 1, östra. Hela modellen.



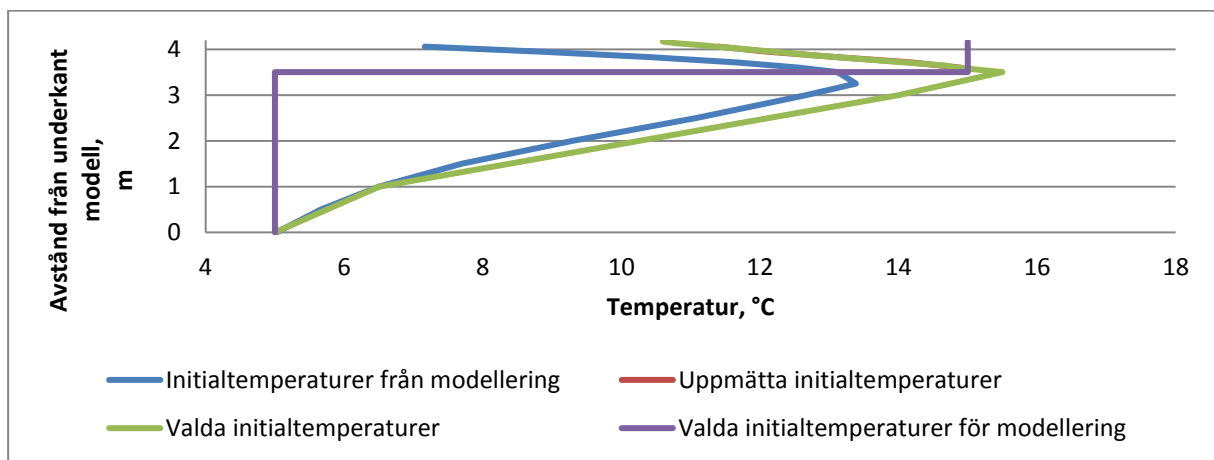
Figur A-7 Försök 1, västra. Enbart betongen.



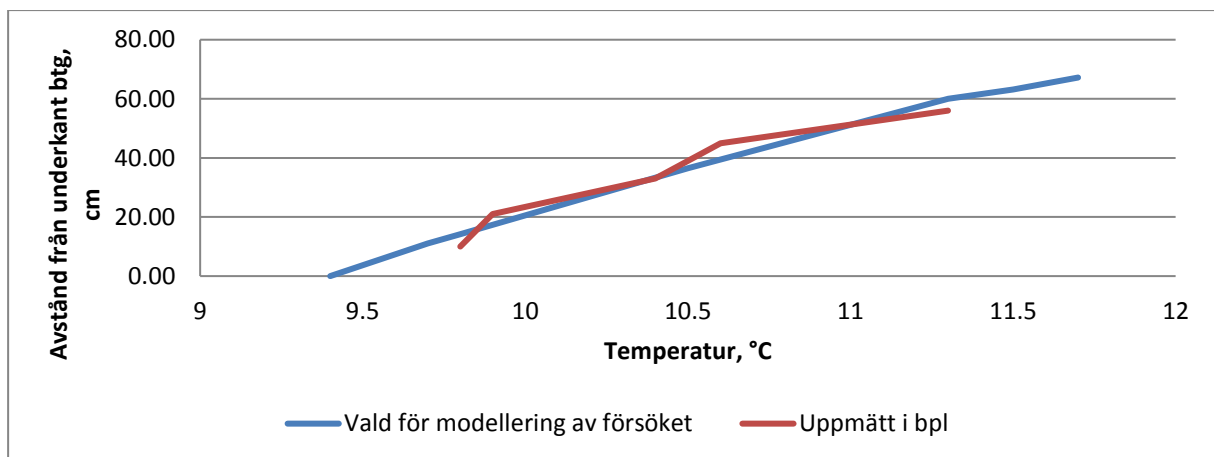
Figur A-8 Försök 1, västra. Hela modellen.



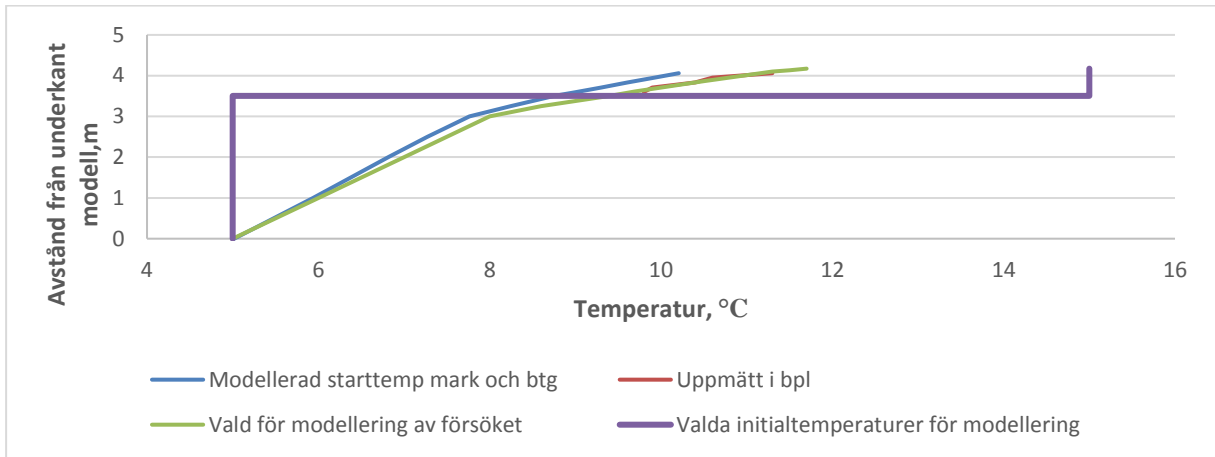
Figur A-9 Försök 2, västra. Enbart betong.



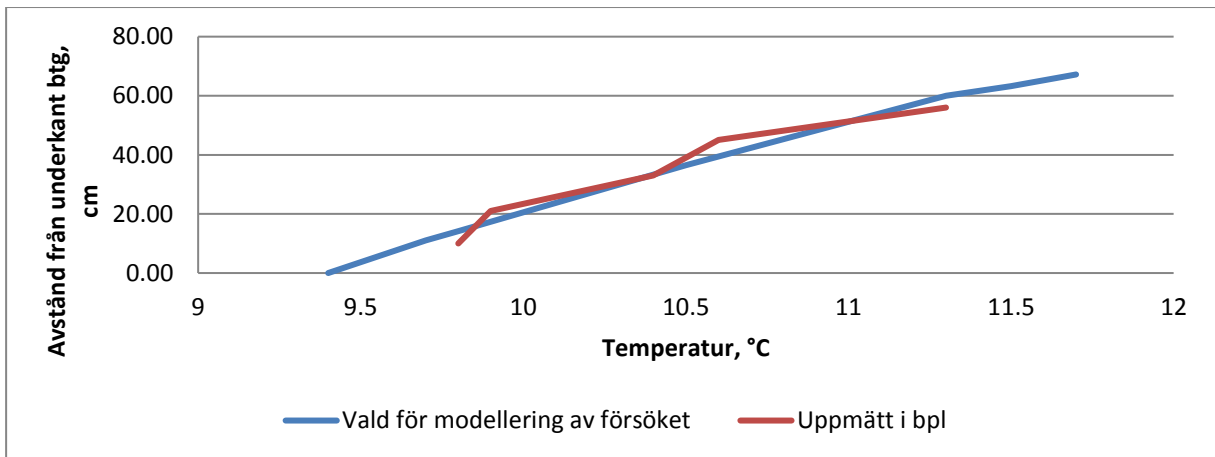
Figur A-10 Försök 2, västra. Hela modellen.



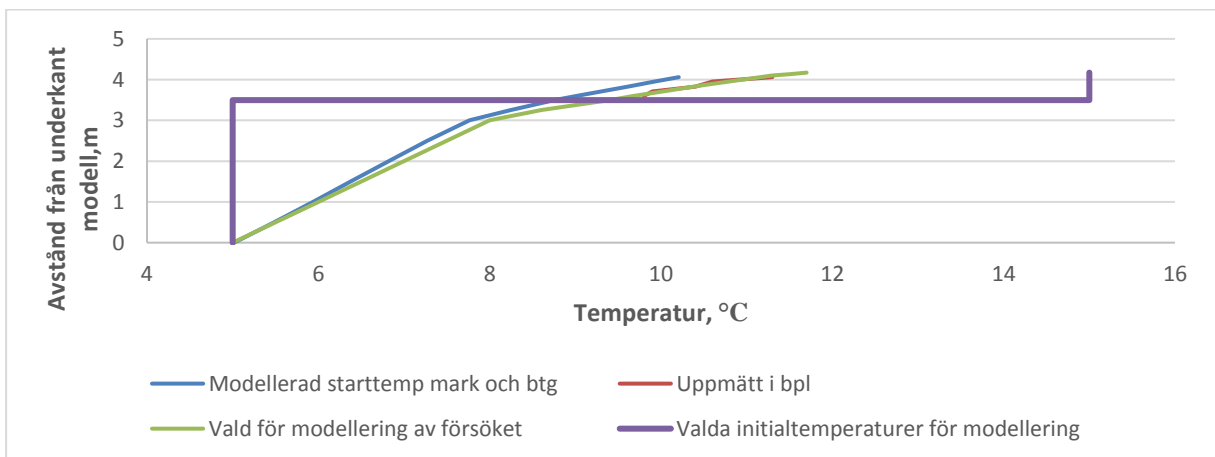
Figur A-11 Försök 3, östra. Enbart betong.



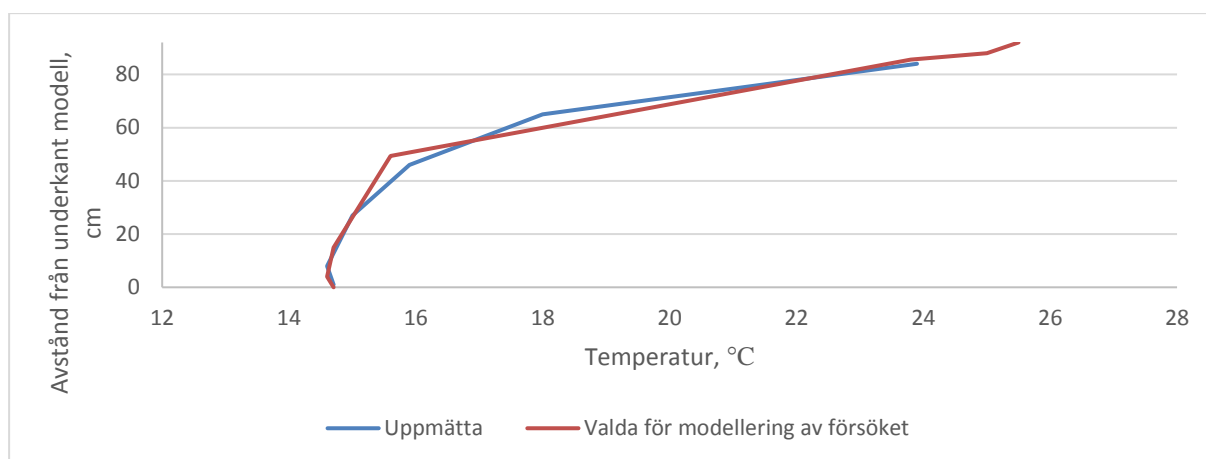
Figur A-12 Försök 3, östra. Hela modellen.



Figur A-13 Försök 3, västra. Enbart betong.



Figur A-14 Försök 3, västra. Hela modellen.



Figur A-15 Försök 4. Enbart betongen.

A.5 Parametrar för rutnätet

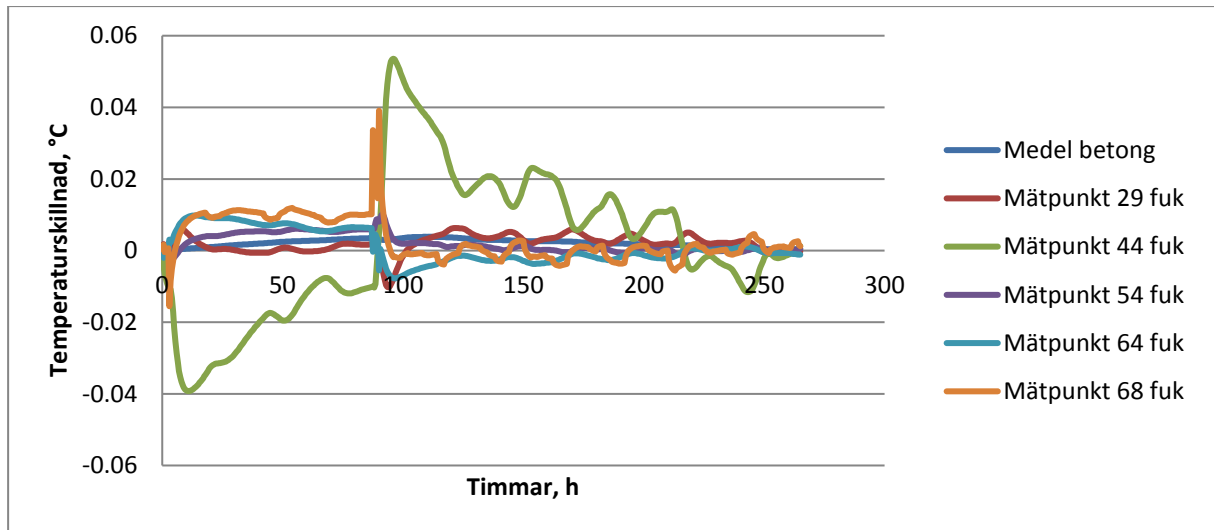
Nedan beskrivs vilket rutnät som användes i grundmodellerna. *Elementstorleken* indikerar storleken på elementens storlek i rutnätet. *Avstånd från objekt* anger hur långt ut från ett objekt som elementstorleken gäller. *Övergångstalet* anger den takt som elementens storlek ska ändras gentemot anliggande objekts elementstorlek efter det angivna avståndet från objekt. För att bestämma de parametrar som användes vid efterkalkylerna av försöken och som redovisas i Tabell A-2 och Tabell A-3 gjordes en enklare konvergensstudie för grundmodellen för försök 1, östra mätpunkter. Elementstorleken valdes till en början så att det fanns minst 5 element tvärs varje blocks tjocklek vilket gjordes för att uppnå hög noggrannhet vid beräkningarna. Detta innebar att temperaturberäkningarna tog lång tid, cirka 30 minuter. Parametrarna för rutnätet justerades sedan för att minska beräkningstiden. Detta gjordes genom att öka elementstorleken och minska avstånd från objekt så mycket att det fortfarande fanns minst två element tvärs blockens tjocklek. Detta mer grovmaskiga rutnät jämfördes sedan med det ursprungliga mer finmaskiga rutnätet. Det som jämfördes var dels temperaturskillnaden i försöks 1 mätpunkter som funktion av tiden, dels skillnaden i temperatur över plattans tjocklek vid avslutad värmning (varannan cm jämförd). Resultaten redovisas i Figur A-16 och Figur A-17. Skillnaderna är försumbara, mindre än 0,1 grad varför parametrarna för det mindre fina rutnäten användes för denna grundmodell. Eftersom geometrin i de olika grundmodellerna liknar varandra valdes att ange samma parametrar för rutnätet även för de andra grundmodellerna.

Tabell A-2 Parametrar för det generade rutnätet i grundmodellen för bottenplattorna.

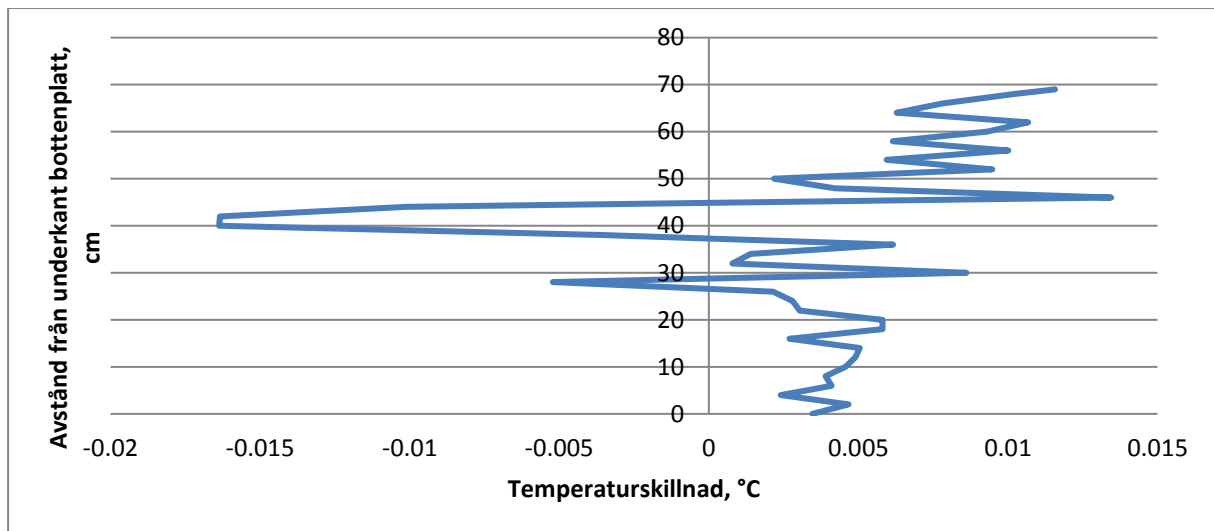
Block	Berg 1	Berg 2	Sprängsten	Btg 1	Btg 2	Btg 3	Btg 4	Btg 5	Btg 6
Elementstorlek (m)	0,3	0,3	0,1	0,025	0,015	0,06	0,06	0,015	0,015
Avstånd från objekt (m)	0,2	0,2	0,5	0,05	0,02	0,1	0,1	0,02	0,03
Övergångstal (-)	0,5	0,5	0,5	0,9	0,9	0,5	0,5	0,9	0,9

Tabell A-3 Parametrar för det generade rutnätet i grundmodellerna för valvet.

Block	Btg 1	Btg 2	Btg 3	Btg 4	Btg 5	Btg 6
Elementstorlek (m)	0,015	0,02	0,06	0,06	0,010	0,015
Avstånd från objekt (m)	0,02	0,03	0,1	0,1	0,02	0,03
Övergångstal (-)	0,9	0,9	0,5	0,5	0,9	0,9



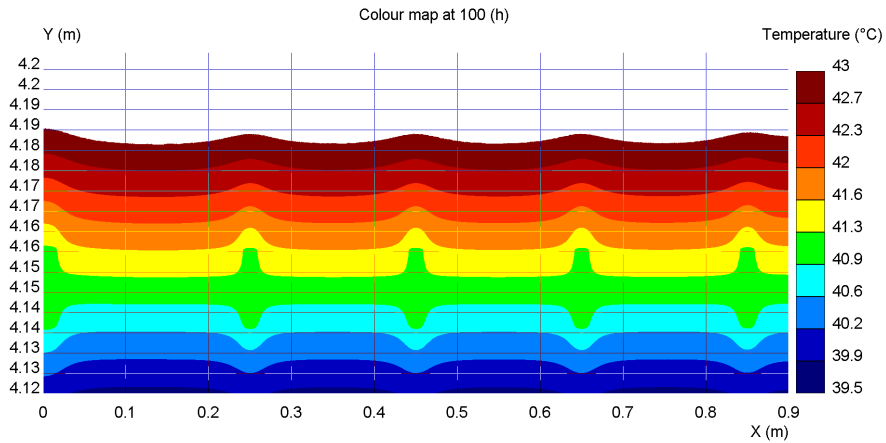
Figur A-16 Skillnad mellan det ursprungliga, mycket fina rutnätet med 180000 element och det som användes vid simuleringarna av försöken, 38000 element. Bottenplatta.



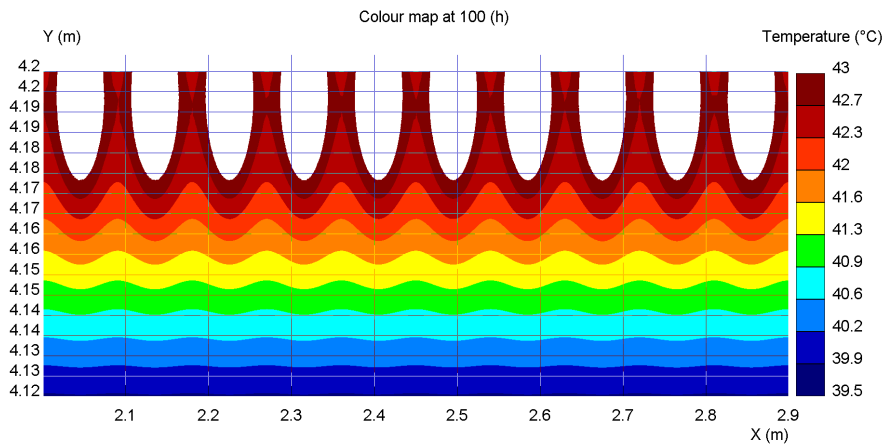
Figur A-17 Skillnad mellan det mycket fina rutnätet, 180000 element och från det som användes vid simuleringarna av försöken, 38000 element. Tidpunkten är vid avslutad uppvärmning. Bottenplatta.

A.6 Enskilda armeringsjärns temperaturpåverkan

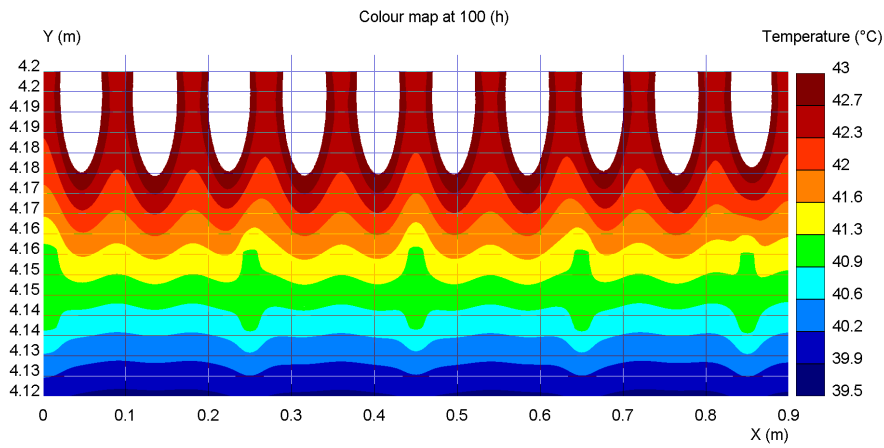
Här redovisas temperaturkartor för de fall som jämförts i diagrammet i kapitel "Enskilda armeringsjärns temperaturpåverkan".



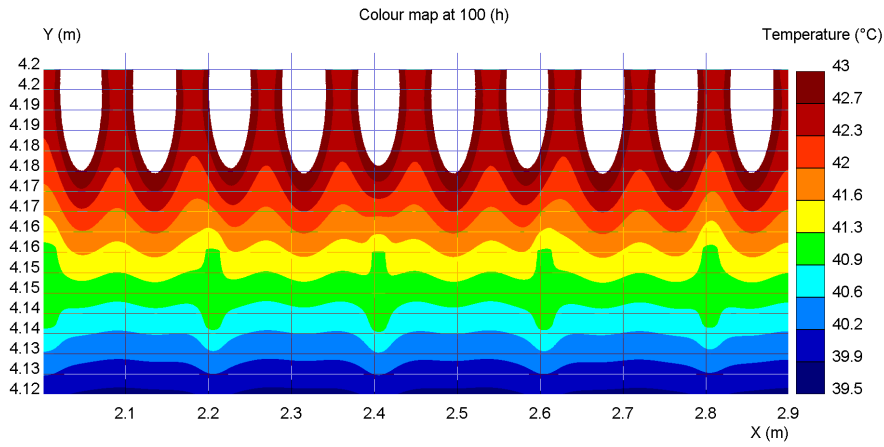
Figur A-18 Metod 1 (effekt längs hela randen), järn modellerade.



Figur A-19 Metod 2 (effekt i punkter), inga järn modellerade.



Figur A-20 Metod 2 (effekt i punkter), järn modellerat.



Figur A-21 Metod 2 (effekt i punkter), järn modellerat på andra positioner.

A.7 Känslighetsanalys

I Tabell A-4 redovisas vilka parametrar som varierats i känslighetsanalysen (parameterstudien). I Tabell A-5 visas hur medeltemperaturen i betongen påverkades av att variera de olika parametrarna.

Tabell A-4 Studerade parametrar och hur de varierats.

Parameter	Förkortning	Provad intervall	Enhet
Initialtemperatur sprängsten och berg	T_{mark}	± 3	$^{\circ}\text{C}$
Värmekonduktivitet betong	λ_{c}	1,4-2,6	W/m·K
Värmekonduktivitet sprängsten	λ_{spr}	0,3-1,8	W/m·K
Värmekonduktivitet isolering	λ_{iso}	0,03-0,08	W/m·K
Effekt värmematta	P_{k}	100-120	W/m ²
Vindhastighet	v	0-4	m/s

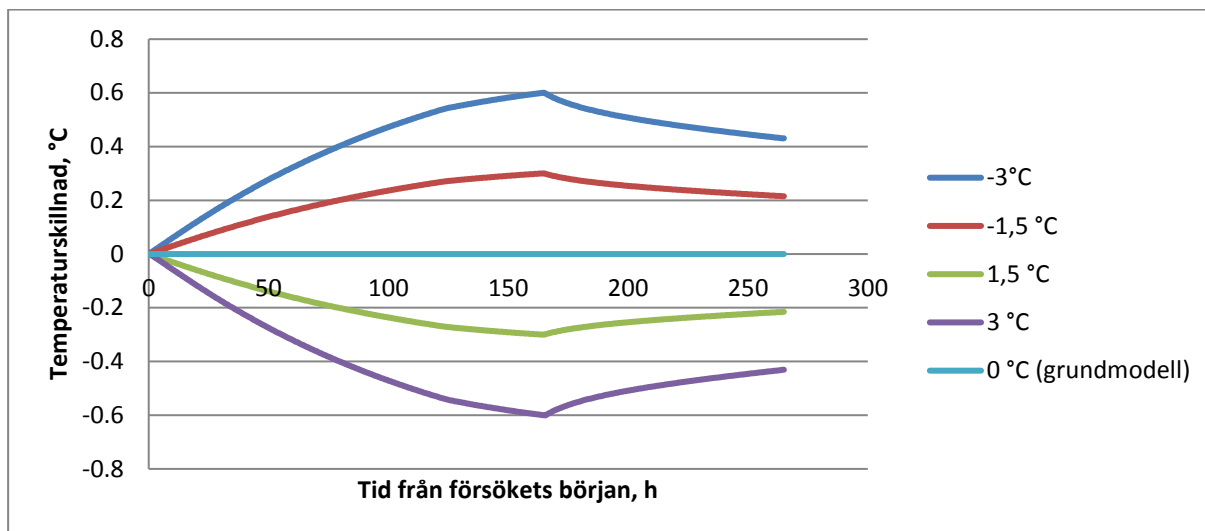
Tabell A-5 Differens mellan största och minsta värde på medeltemperaturen i betongen när de olika parametrarna varierades i det provade intervallet.

	T_{mark}	λ_{c}	λ_{spr}	λ_{iso}	P_{k}	v
Provad intervall	± 3	1,4-2,6	0,3-1,8	0,03-0,08	100-120	0-4
Försök 1, oisolerad	0,60	0,07	0,95	3,43	2,17	0,60
Försök 1, isolerad	0,84	0,43	1,10	3,26	2,54	0,64
Försök 2	1,09	0,47	2,31	6,24	3,37	0,64
Försök 3, östra	1,35	0,24	4,28	5,99	3,98	1,31
Försök 3, västra	1,41	0,26	4,15	5,91	3,94	1,30
Försök 4	Ej aktuell	1,01	Ej aktuell	3,45	2,25	1,61

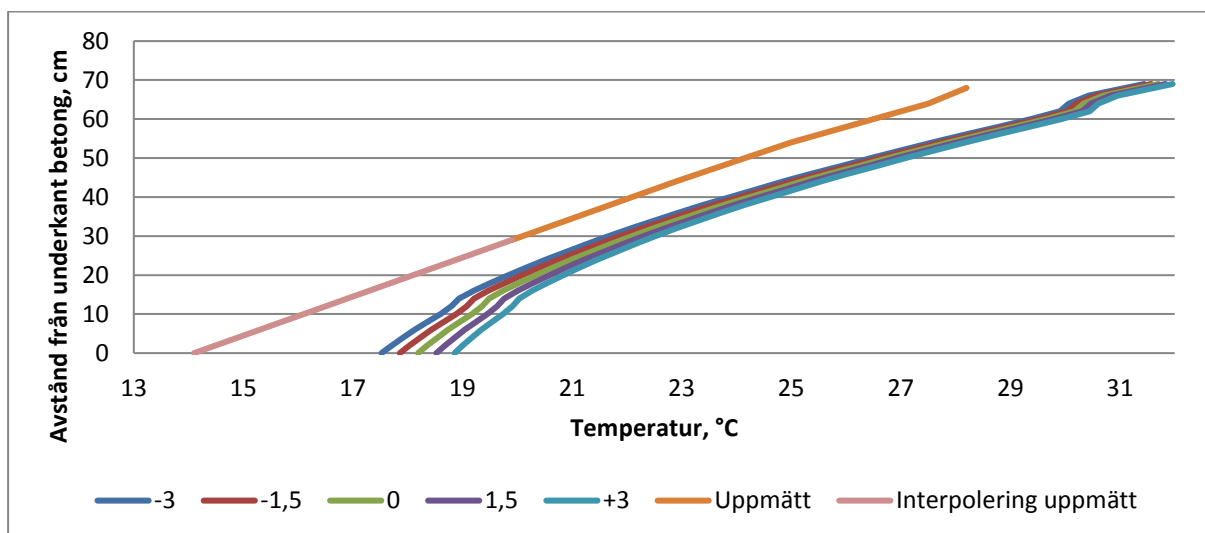
Nedan beskrivs hur respektive parametrarna som varierades i känslighetsanalysen påverkade temperaturen i betongen.

Temperatur i berget och sprängstenen

Temperaturen i sprängsten och berg vid modelleringens början hade i samtliga försök liten betydelse för medeltemperaturen i betongen vilket kan ses i Figur A-22. Dess inflytande på betongens medeltemperatur var inte som störst vid värmningens avstängning utan i ett senare skede. Skillnaderna i temperatur för den övre halvan av betongen är försumbara medan det i de lägre mätpunkterna fanns en viss skillnad, se Figur A-23.



Figur A-22 Skillnad i medeltemperatur mellan grundmodell och modell med ändrade initialtemperaturer i berg och sprängsten. Försök 2, västra mätpunkter.



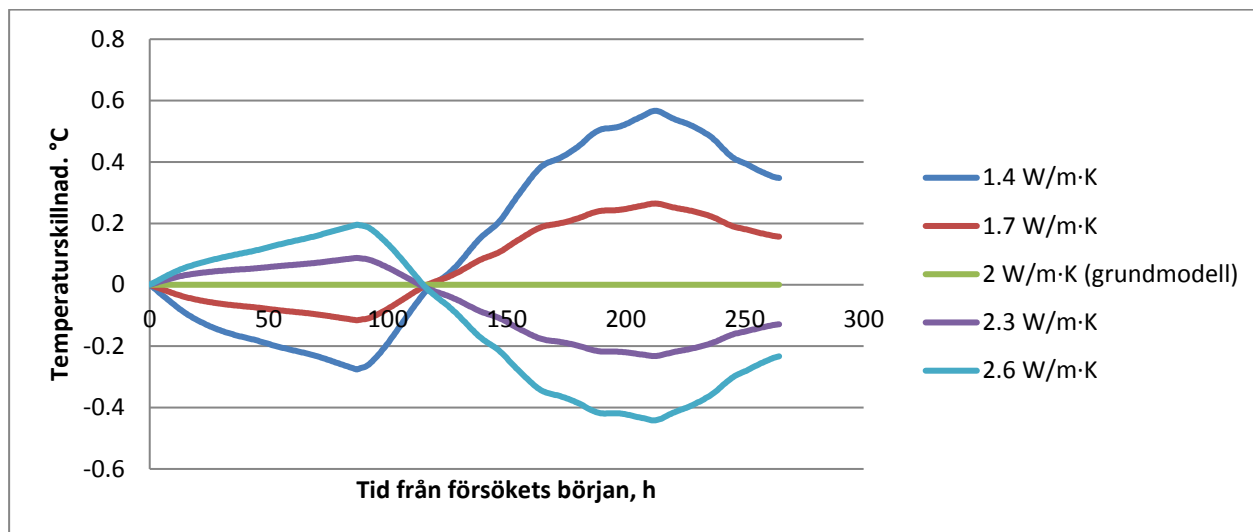
Figur A-23 Temperaturgradienter i bottenplattan då värmen stängdes av för olika temperaturer i sprängsten och berg jämfört med grundmodellen. Försök 1, västra mätpunkter.

Värmekonduktiviteten hos betongen

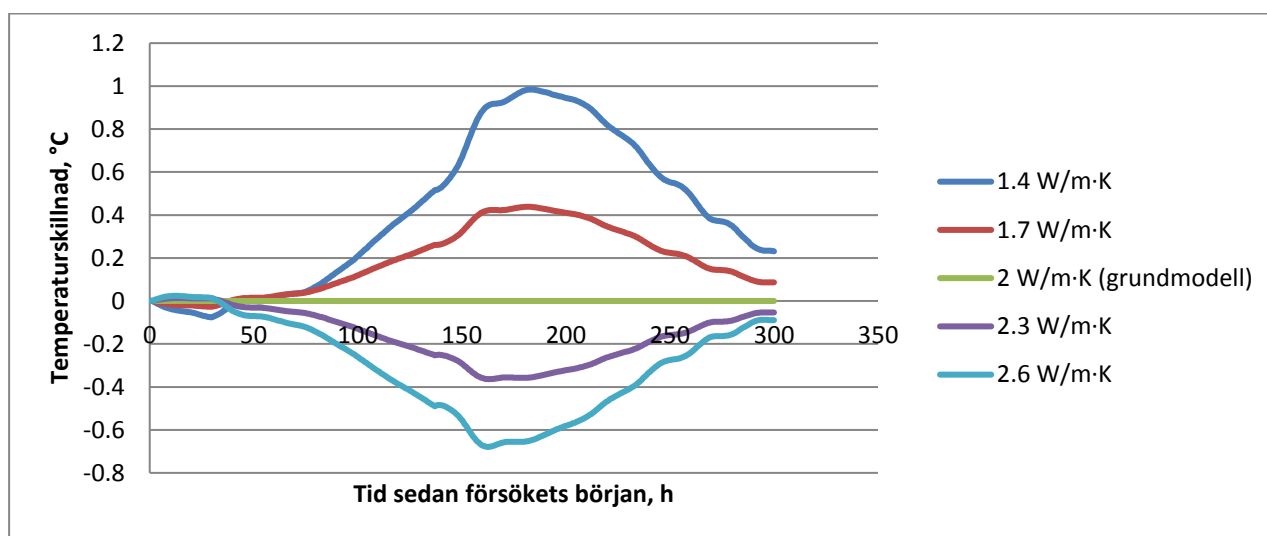
Värdet på betongens värmekonduktivitet påverkade vid modelleringarna medeltemperaturen i betongen i måttlig utsträckning. Hos bottenplattorna, försök 1-3, snabbade en högre värmekonduktivitet på både uppvärmningen och avsvälningen av betongen vilket kan ses i Figur A-24. Detta gav vissa temperaturskillnader både vid uppvärmningen (som max uppemot 0,4 grader för försök 1 östra) och vid avsvälningen (ungefär 0,6 grader som mest vid samtliga försök på bottenplattorna).

Hos valvet, försök 4, var skillnad i temperatur vid uppvärmningen mycket liten men vid avsvälningen svalnade betongen snabbare med högre värmekonduktivitet vilket gav skillnader på uppemot 1 grad jämfört med grundmodellen. Detta visas i Figur A-25. En högre

medeltemperatur i betongen då värmemattorna stängs av är såklart positivt. Generellt är troligen en snabb avsvälning också positivt ur sprickrisksynpunkt men detta är beroende av den specifika gjutsituationen.



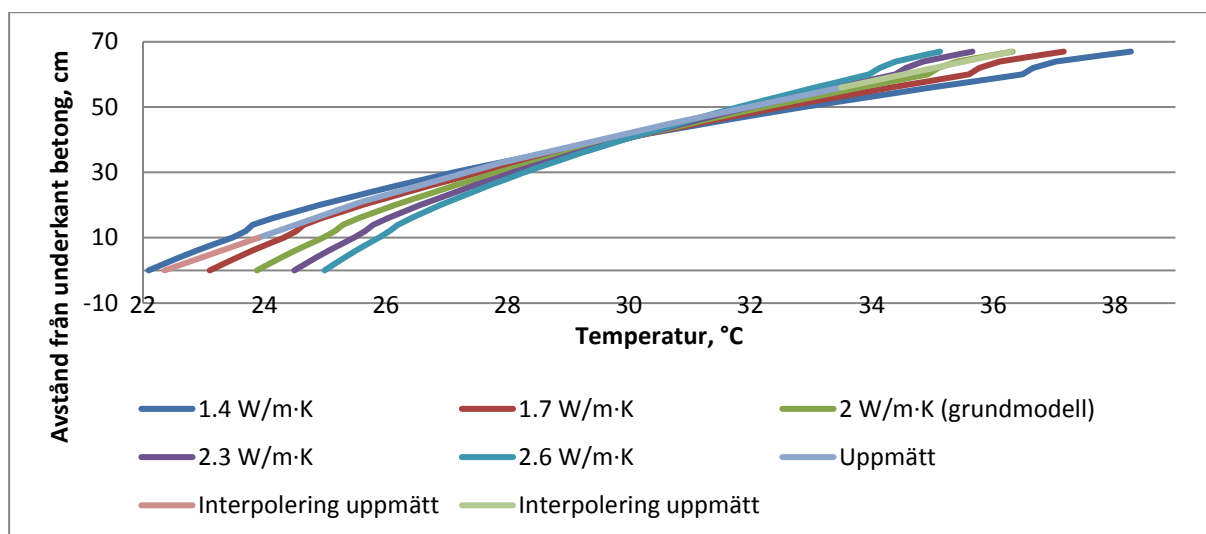
Figur A-24 Skillnad i medeltemperatur mellan grundmodell och modeller med ändrad värmekonduktivitet i betongen. Försök 1, västra mätpunkter.



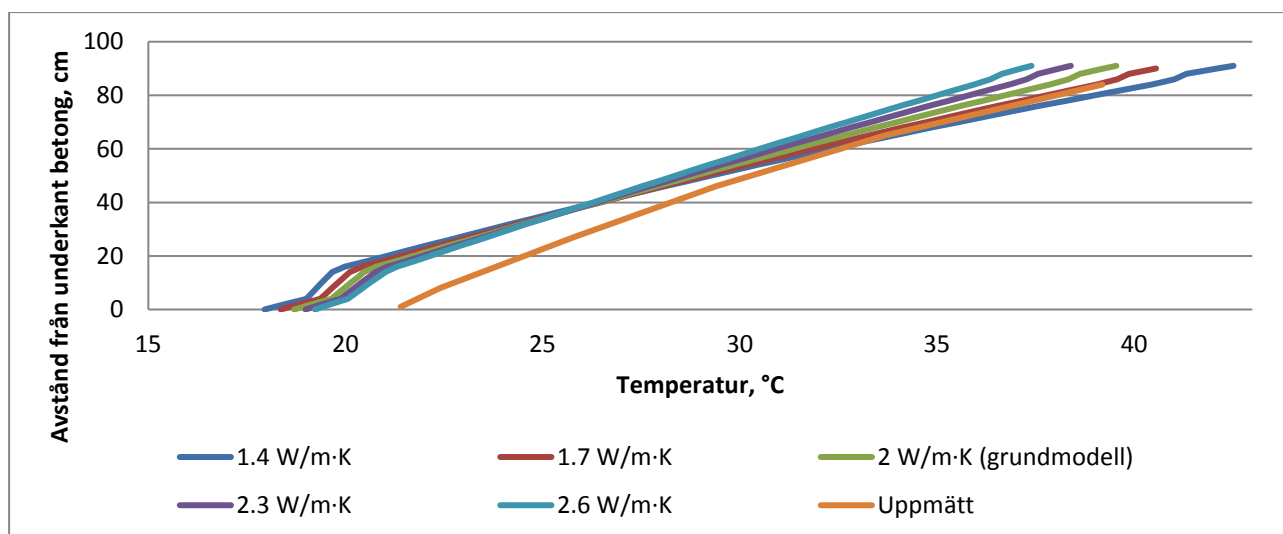
Figur A-25 Skillnad i medeltemperatur mellan grundmodell och modeller med ändrad värmekonduktivitet i betongen. Försök 4.

Värdet på värmekonduktiviteten förändrade också temperaturgradienten i betongen då mattorna stängdes av och mönstret var ungefär samma för modelleringarna av samtliga försök/mätserier. En lägre värmekonduktivitet ger en större gradient över betongens tjocklek än en högre värmekonduktivitet. Temperaturgradienten ger en böjning av betongplattan som helhet, den skjuter ”rygg”. Detta är positivt temperatursprickrisk då till exempel en vägg gjuts på en bottenplatta, eftersom det bidrar till att öka motgjutningsytans längd vid temperaturmaximum. På gradienterna kan ses att temperaturen kring 35-50 cm för bottenplattorna respektive 25-50 cm inte förändras mycket beroende av variationerna i värmekonduktivitet. Över och under dessa höjder i betongen har betongens

värmeledning relativt stor påverkan på temperaturen vilket illustreras av Figur A-26 och Figur A-27.



Figur A-26 Temperaturgradienter i bottenplattan då värmen stängdes av för olika värmeledningskoefficienter på i betongen. Försök 2, västra mätpunkter.

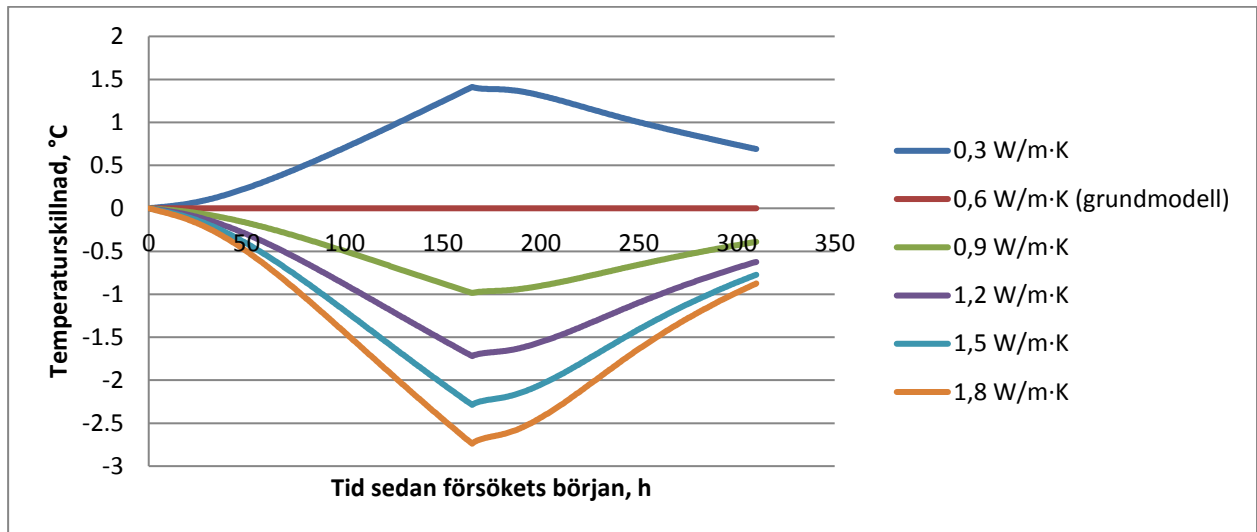


Figur A-27 Temperaturgradienter i valvet då värmen stängdes av för olika värmeledningskoefficienter i betongen. Försök 4.

Värmeledning sprängsten

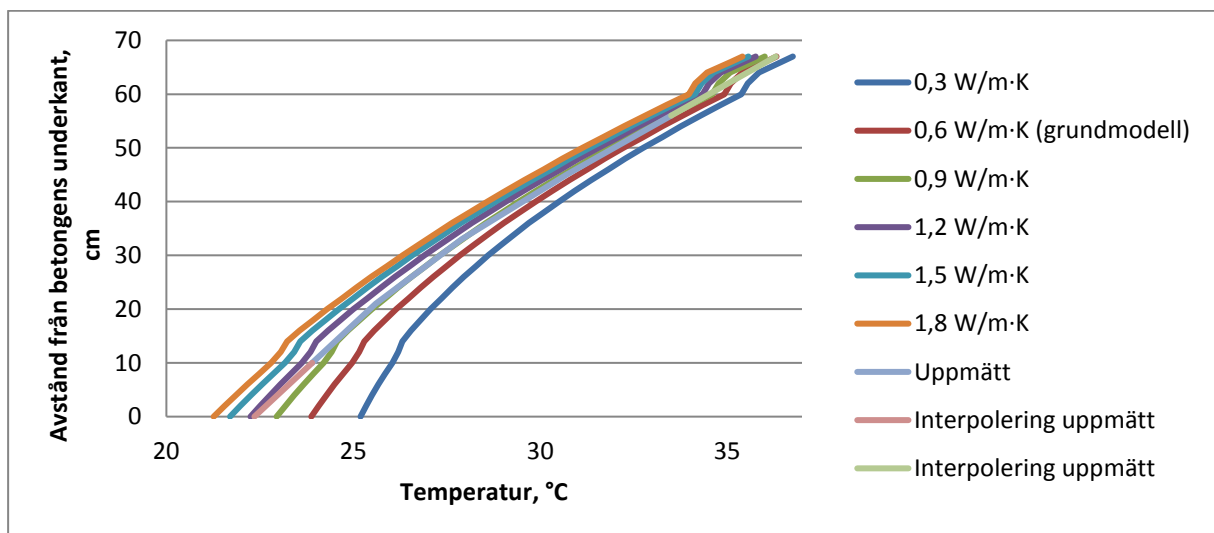
Sprängstenen under bottenplattorna kan ses som ett mer eller mindre väl isolerande lager mellan betongen och det väl värmeledande berg som ligger under sprängstenen. Vid modelleringarna av försöken med olika värmeledningskoefficient i sprängstenen fick man också relativt stora temperaturskillnader. Störst skillnad erhöles för försök 3 (drygt 2,5 grad skillnad från grundmodellen) som också var det försök där mattorna var igång längst. Försöket pågick i 165 timmar och skillnaderna visas i Figur A-28. Modelleringarna för övriga försök på bottenplattorna, de med kortare värmeledningstid, gav diagram med liknande kurvform men med

mindre temperaturskillnad. Vid försök 2 där mattorna var igång i 123 timmar var skillnaden som störst 2 grader och för försök 1 som pågick 85 timmar var skillnaden bara 1 grad.



Figur A-28 Skillnad i medeltemperatur mellan grundmodell och modeller med ändrad värmekonduktivitet i sprängstenen. Försök 3, västra mätpunkter.

Temperaturgradienten vid avslutad värmning var olika för olika värmekonduktiviteter. Hela betongens tjocklek blev varmare när värmekonduktiviteten i sprängstenen minskades men ökningen var störst närmast sprängstenen. Temperaturgradienten blev större då värmekonduktiviteten ökade. Denna faktor, sprängstenens värmekonduktivitet, påverkade temperaturen mest längst ner i betongen och minst högst upp vilket syns tydligt i Figur A-29.

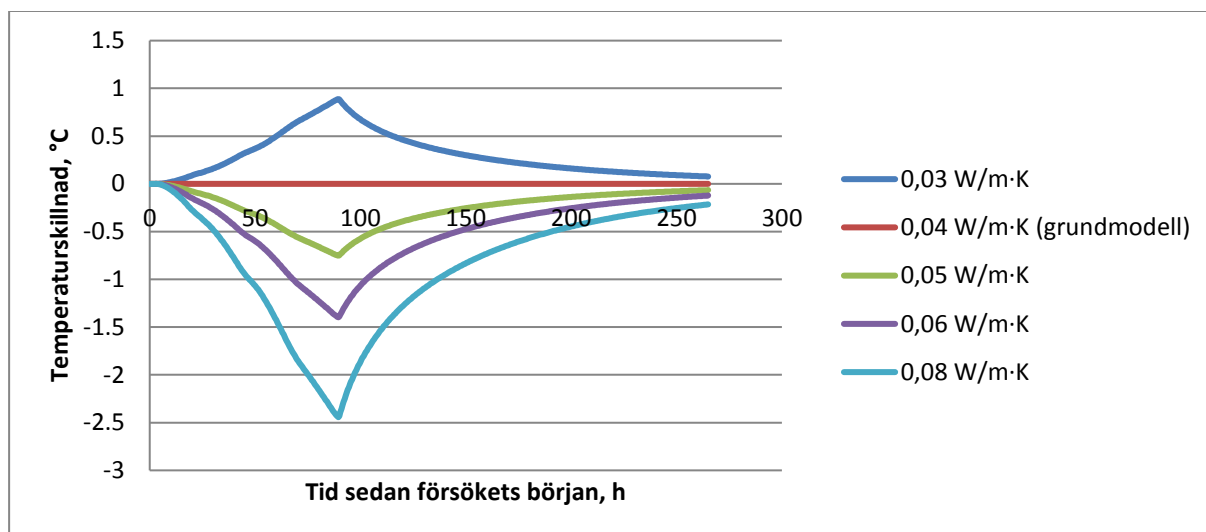


Figur A-29 Temperaturgradienter i bottenplattan då värmen stängdes av, 123 timmar efter påbörjad värmning, för olika värmekonduktiviteter i sprängstenen. Försök 2, västra mätpunkter.

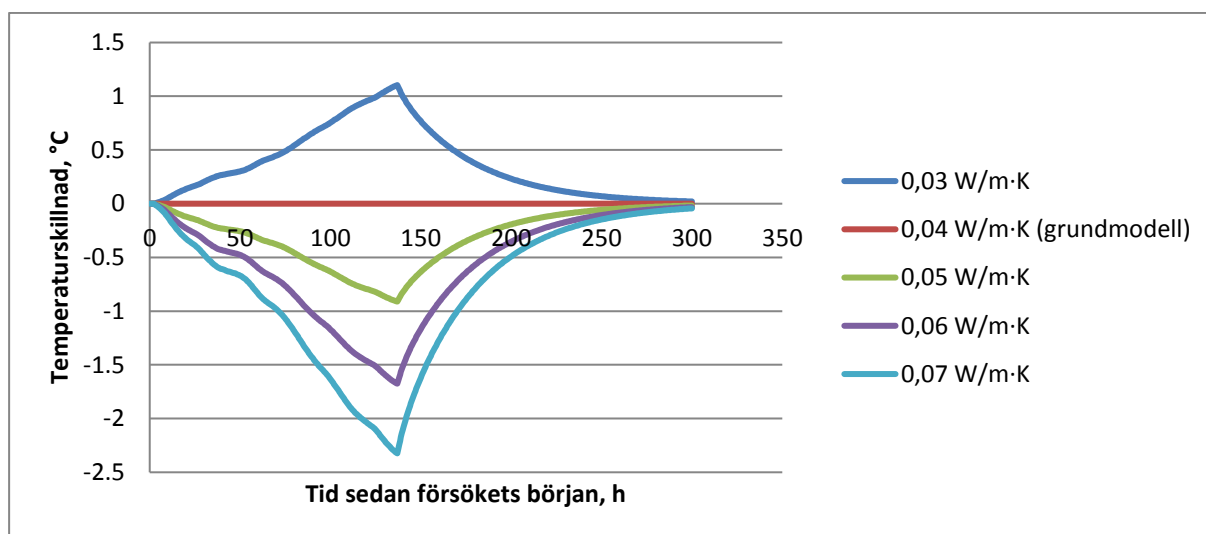
Isoleringens värmekonduktivitet

Värmekonduktiviteten hos isoleringen, dvs. isolering i och på värmemattan, hade stor betydelse för temperaturen i betongen. Skillnaden i medeltemperatur vid avslutad värmning

för försök 1 och 4 var i storleksordningen 2 grader vid en jämförelse mellan $0,03 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ och $0,08 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, se Figur A-30 och Figur A-31. Motsvarande skillnad för försök 2 och 3 var ungefär 4 grader.

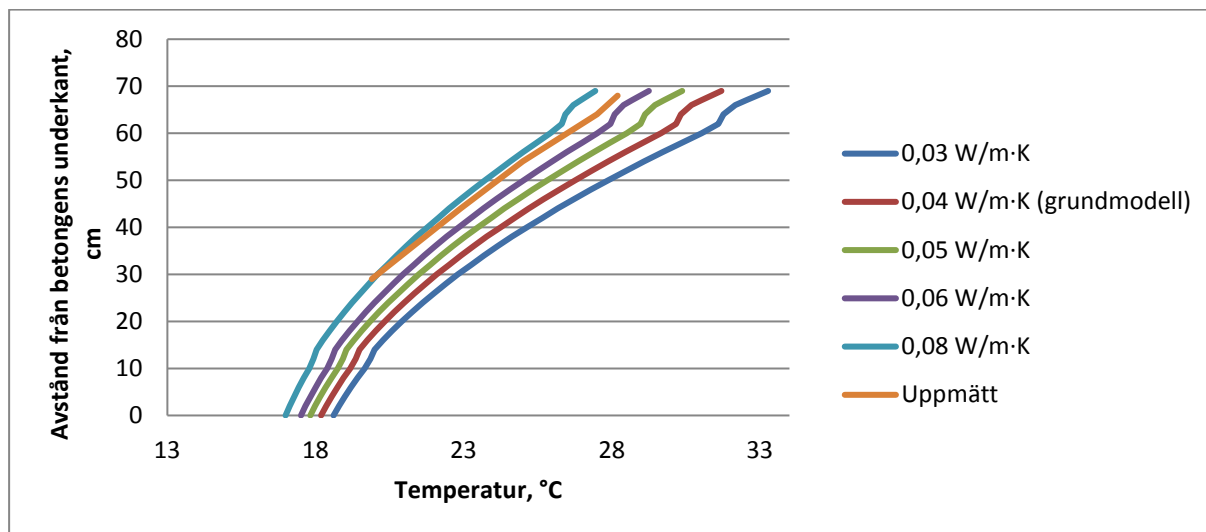


Figur A-30 Skillnad i medeltemperatur mellan modeller med olika värmekonduktivitet i isoleringen jämfört med grundmodellen. Försök 1, västra mätpunkter.

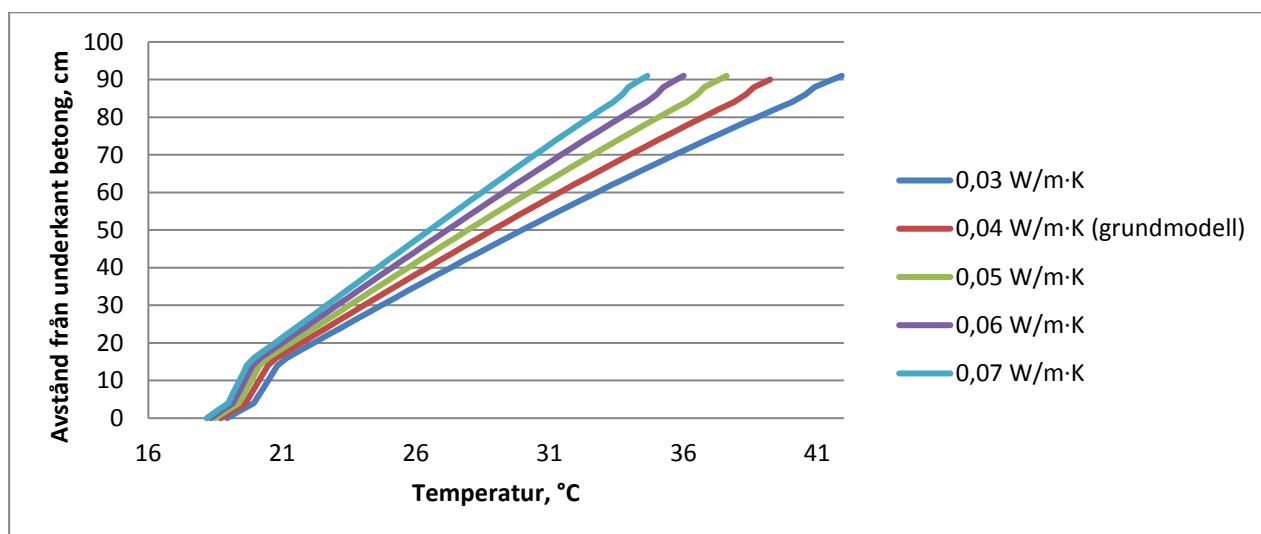


Figur A-31 Skillnad i medeltemperatur mellan modeller med olika värmekonduktivitet i isoleringen jämfört med grundmodellen. Försök 4.

Temperaturgradienten ändras vid olika värmekonduktivitet på isoleringen. En lägre värmekonduktivitet höjde temperaturen i hela betongen men mer och mer högre upp i betongen, se Figur A-32 och Figur A-33.



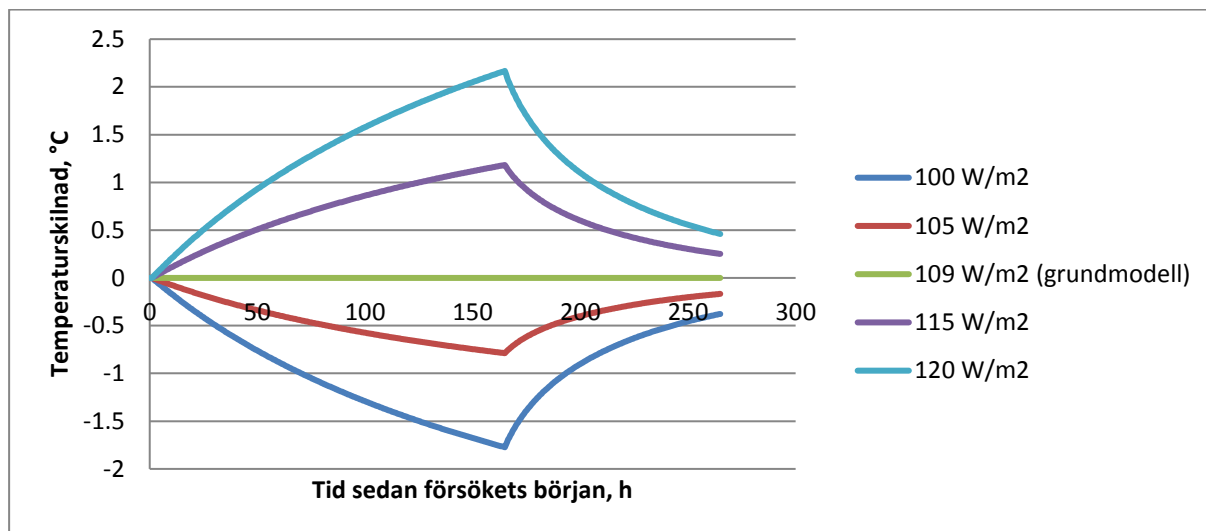
Figur A-32 Temperaturer i bottenplattan då värmen stängdes av, 85 timmar efter påbörjad värmning, för olika värmekonduktiviteter på isoleringen. Försök 1, västra mätpunkter.



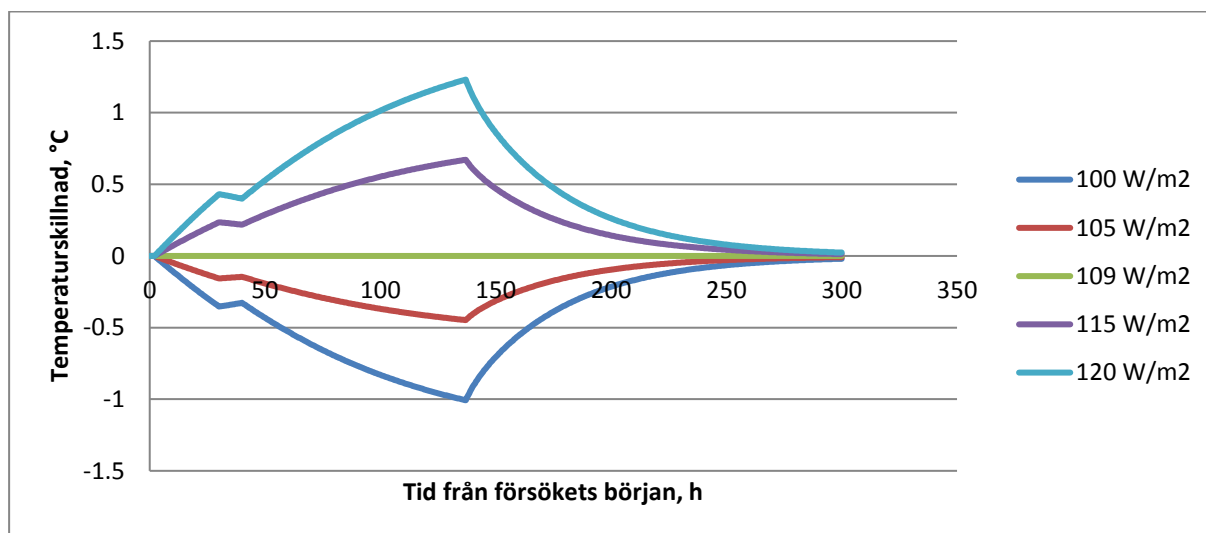
Figur A-33 Temperaturer i valvet då värmen stängdes av, 136 timmar efter påbörjad värmning, för olika värmekonduktiviteter på isoleringen. Försök 4.

Effekten hos värmekablarna

Att öka effekten på värmekablarna har ungefär samma effekt som att minska värmekonduktiviteten i isoleringen: det ökar temperaturen i hela betongens tjocklek men mest närmast kablarna. En skillnad var dock att temperaturskillnaderna mellan olika effekter ökar långsammare ju längre värmningen pågick medan skillnaderna mellan isoleringarna ökade snabbare ju längre värmningen pågick. Denna skillnad ses om figur Figur A-31 jämförs med Figur A-35.

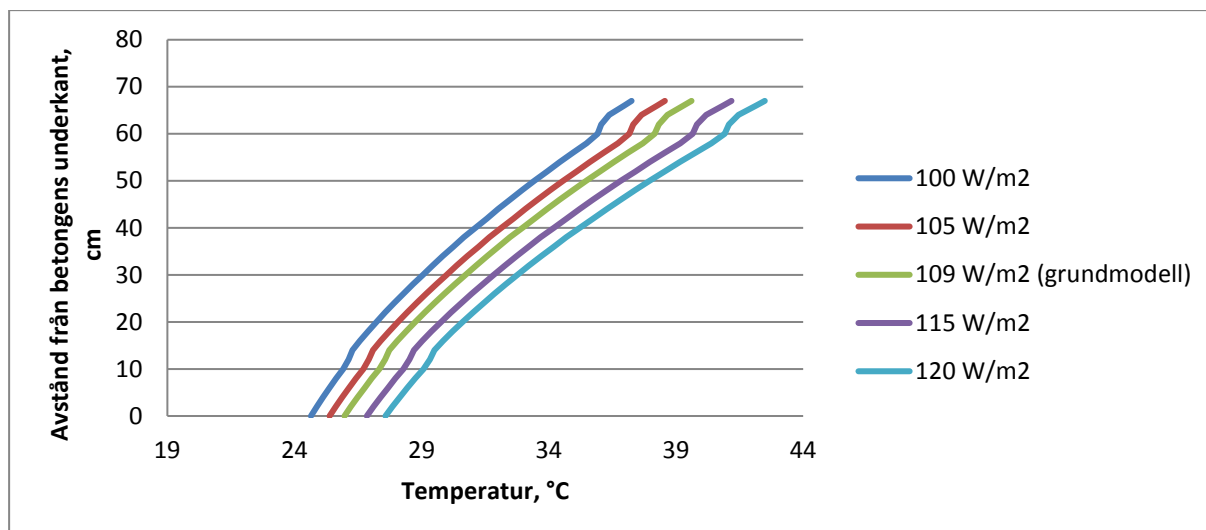


Figur A-34 Skillnad i medeltemperatur mellan modeller med olika effekt i värmemattan jämfört med grundmodellen. Försök 3, västra mätpunkter.

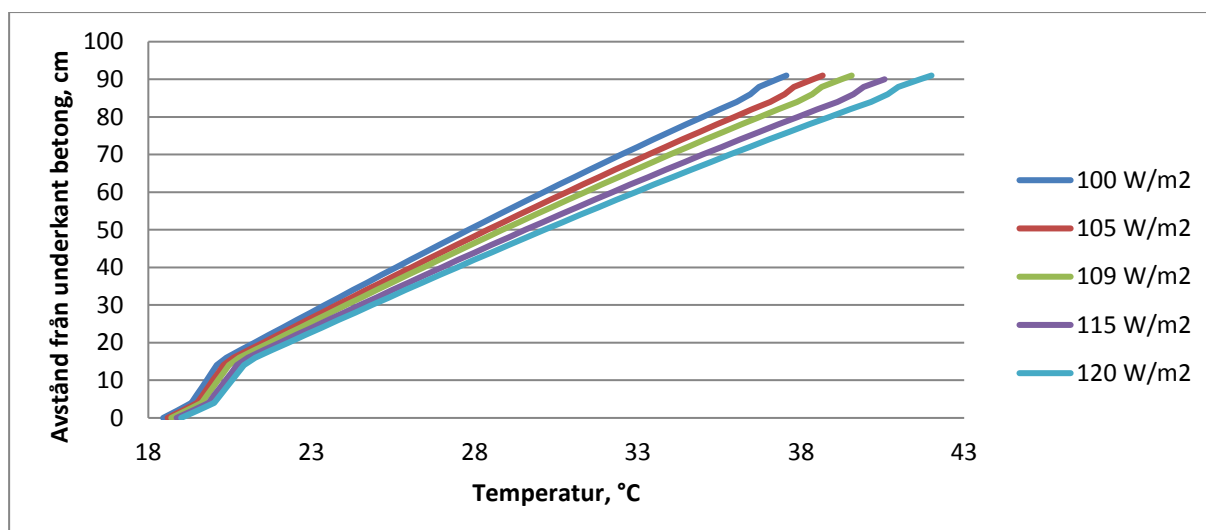


Figur A-35 Skillnad i medeltemperatur mellan modeller med olika effekt i värmemattan jämfört med grundmodellen. Försök 4.

Temperaturgradienten vid avslutad värmning skiljer sig åt mellan bottenplattorna och valven eftersom valvet under hela värmningen kyls av uteluften underifrån medan sprängstenen ökar i temperatur vilket möjliggör en ökning i temperatur även i underkanten av betongen. Effekten på värmekablarna påverkar därför temperaturen i den övre delen av valvets betong mycket mer än i den undre delen. Denna skillnad gäller också vid uppvärmning av bottenplattorna men är inte lika stor vilket ses när Figur A-36 jämförs med Figur A-37.



Figur A-36 Temperaturgradienter i bottenplattan då värmen stängdes av, 165 timmar efter påbörjad värmning, för olika effekt i värmemattan. Försök 3, västra mätpunkter.



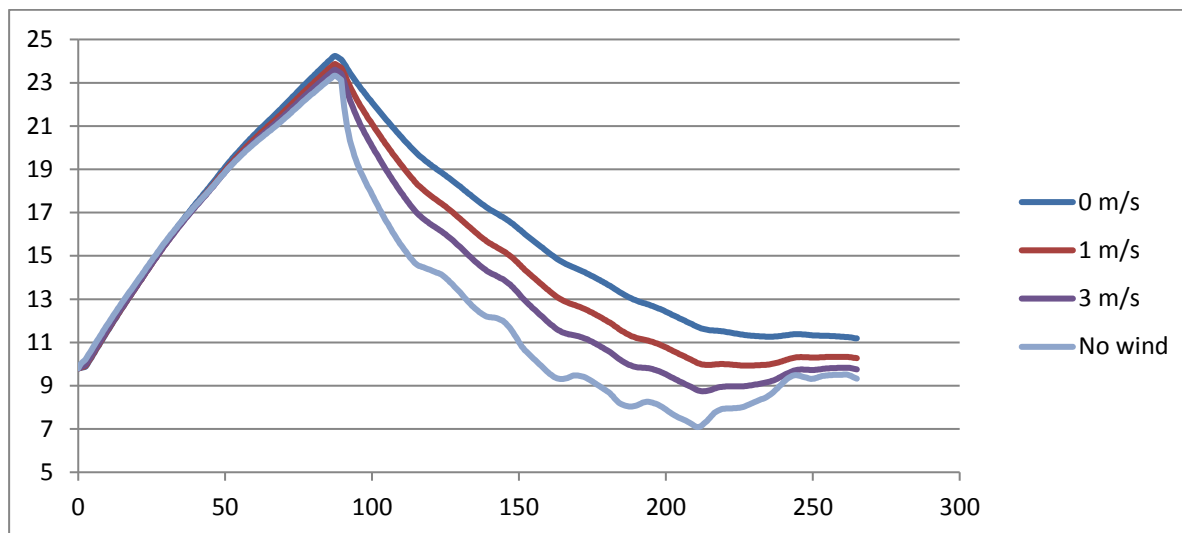
Figur A-37 Temperaturgradienter i bottenplattan då värmen stängdes av, 136 timmar efter påbörjad värmning, för olika effekt i värmemattan. Försök 4.

Vindhastighet

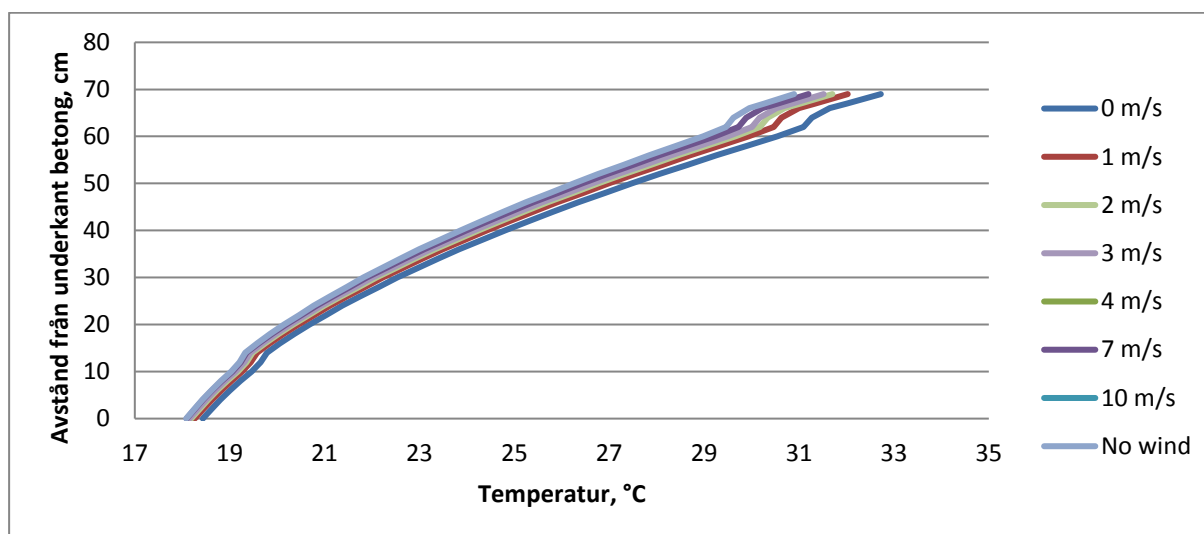
Vindhastigheten påverkar värmeövergångsmotståndet mellan luften och en yta. I avsnitt ”2.7.2 Temperaturberäkningar” beskrivs hur temperaturberäkningarna i Contest beror av vilken vindhastighet som anges för en rand. I den valda metoden att räkna med värmemattan, metod 1, läggs värmemotstånd in i randen för att motsvara den isolering som mattan och eventuell ytterligare isolering utgör. Till detta läggs det värmemotstånd som finns i gränssnittet mellan ytor och luft och som beror av vindhastigheten. Som Figur A-38 är ett exempel på hade inte vindhastigheten någon stor påverkan för temperaturutvecklingen i uppvärmningsfasen, medan den däremot hade stor påverkan på temperaturutvecklingen i avsvältningsfasen. Detta berodde på att det värmemotstånd som fanns i gränsen mellan luft och material i uppvärmningsfasen är litet jämfört med det bidrag till randens värmemotstånd som kom från mattans isolering. Vid avsvältningsfasen utgjordes däremot randens värmemotstånd enbart av det som fanns i gränssnittet mellan yta och luft vilket gör att en

ändrad vindhastighet fick större genomslag på temperaturutbytet mellan betong och omgivning.

Temperaturgradienterna i Figur A-39 visar att skillnader i huvudsak fanns i den övre delen av betongen.



Figur A-38 Temperaturutveckling vid modellering med olika vindhastigheter, medeltemperaturer. Försök 1, västra.

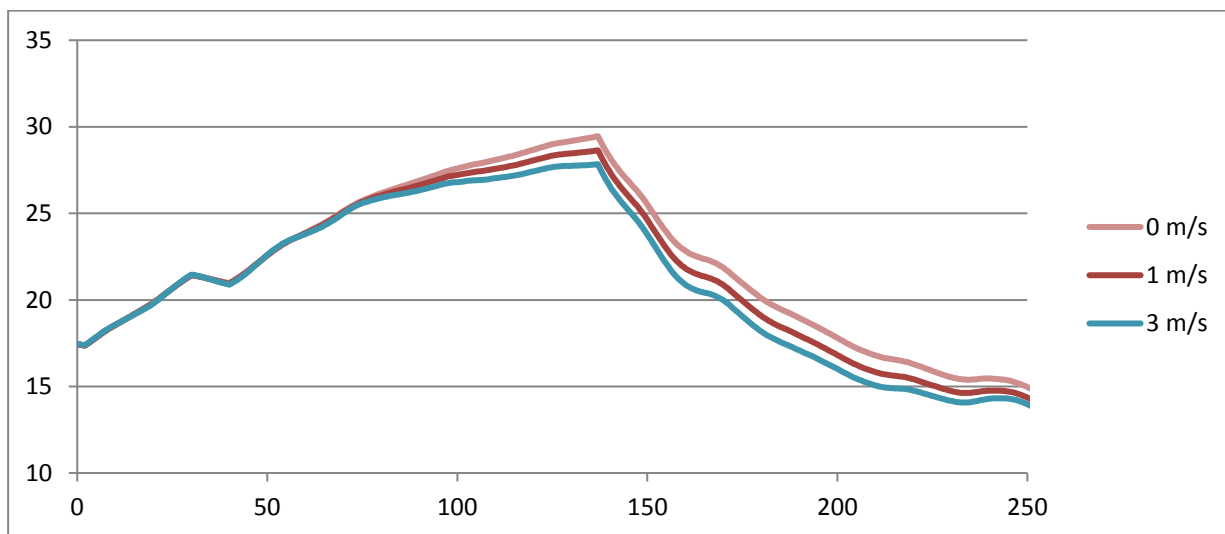


Figur A-39 Temperaturgradienter i bottenplattan då värmen stängdes av för olika vindhastigheter. Försök 1, västra mätpunkter.

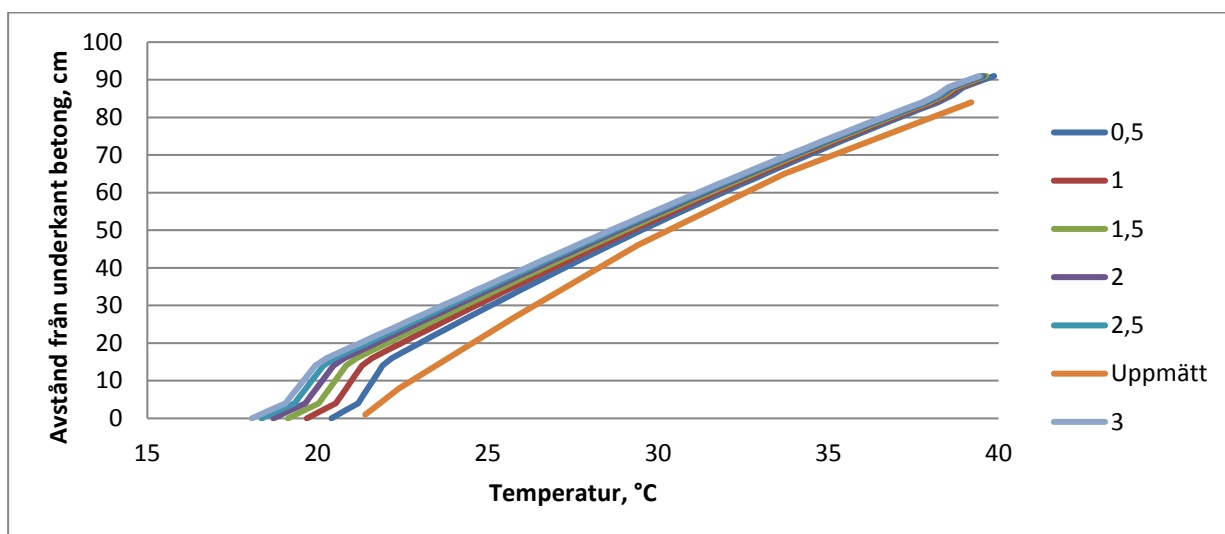
Undersidan av det valv som värmdes i försök 4 var inte täckt. I Figur A-40 har vindhastigheten varierats i för den undre randen men inte för den övre. I avsvälningsskedet erhöles en viss skillnad mellan de olika vindhastigheterna men inte i samma storleksordning som i avsvälningsskedet i Figur A-38. Detta berodde troligen på att det mesta av värmen är lagrad i den övre delen av betongen och inte i den undre. Variationer i ytans värmeövergångstal i nederkant fick mindre betydelse för betongens avsvälning eftersom betongen själv utgjorde ett värmemotstånd mellan den varma övre delen och den nedre

randen. I uppvärmningsfasen fanns skillnader i medeltemperaturen och de skapas först efter cirka 70 timmar in i försöket.

Figur A-41 visar att temperaturskillnaderna främst uppstod i underkant.



Figur A-40 Temperaturutveckling vid modellering med olika vindhastigheter vid valvets underkant, betongens medeltemperaturer. Försök 4, skuggad lufttemperatur.



Figur A-41 Temperaturgradienter i bottenplattan då värmen stängdes av, 136 timmar efter påbörjad värmning, för olika vindhastigheter i underkant. Försök 4.

Bilaga B

B Mätningar vid fältförsöken

B.1 Strömförbrukning i värmemattorna

I tabellerna nedan redovisas uppmätta värden. När enbart det objekt som strömmen mäts på var kopplat har skrivits "ensam". Vid försök 2 mättes strömmen också på den sista mattan i en serie av ikopplade mattor, då har skrivits "serie".

Tabell B-1 Uppmätt strömförbrukning vid start och avstängning vid försök 2. De inom parantes angivna värdena är motsvarande effekt vid 230 volts spänning.

Objekt	Matta 1	Matta 2	Matta 3	Matta 4	Matta 5	Matta 6	Matta 7	Matta 1-4	Matta 5-7
Ström ensam (A)	2,5 (575)	2,5 (575)	2,6 (598)	2,5 (575)	2,5 (575)	2,5 (598)	2,5 (575)	9,8 (564)	7,3 (560)
Resistans (Ω)	93 (568)	91 (581)	92 (575)	93 (568)	94 (562)	92 (575)	91 (581)		
Ström serie (A)				2,4 (552)			2,5 (575)		

Tabell B-2 Uppmätt strömförbrukning vid start och avstängning vid försök 3. De inom värden som är angivna inom parantes är motsvarande effekt vid 230 volts spänning.

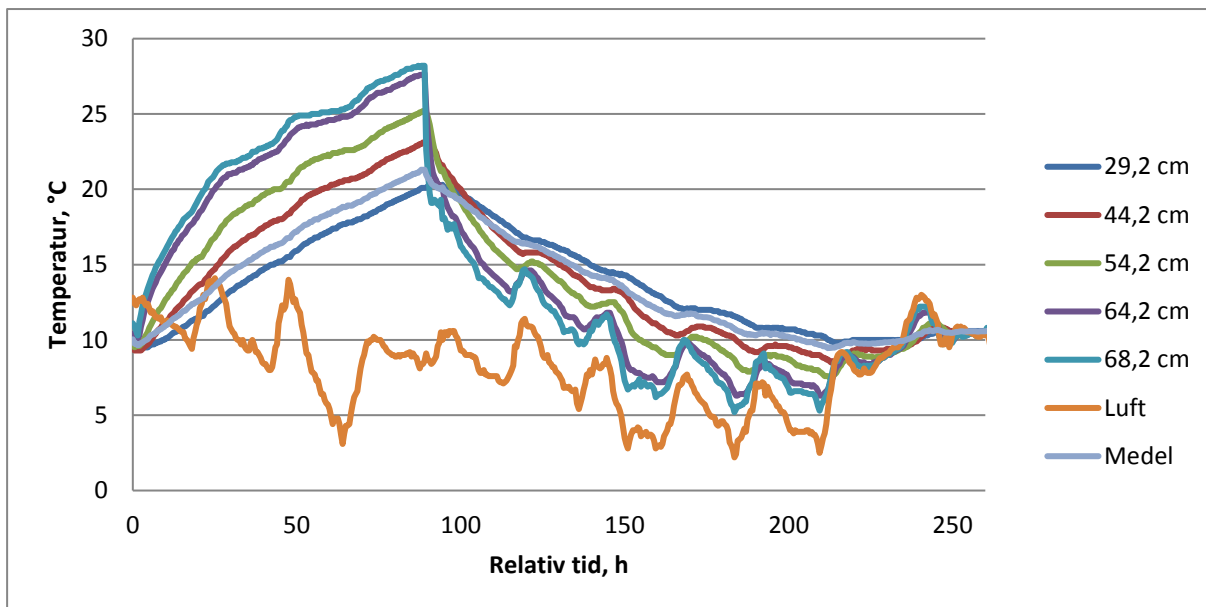
Objekt	Matta 1	Matta 2	Matta 3	Matta 4	Matta 5	Matta 1-2	Matta 1-3	Matta 4-5
Ström ensam (A)	2,5 (575)	2,5 (575)	2,6 (598)	2,5 (575)	2,5 (575)	4,8 (552)	7,3 (560)	5,0 (575)

Tabell B-3 Uppmätt strömförbrukning vid start och avstängning vid försök 4. De inom parantes angivna värdena är motsvarande effekt vid 230 volts spänning.

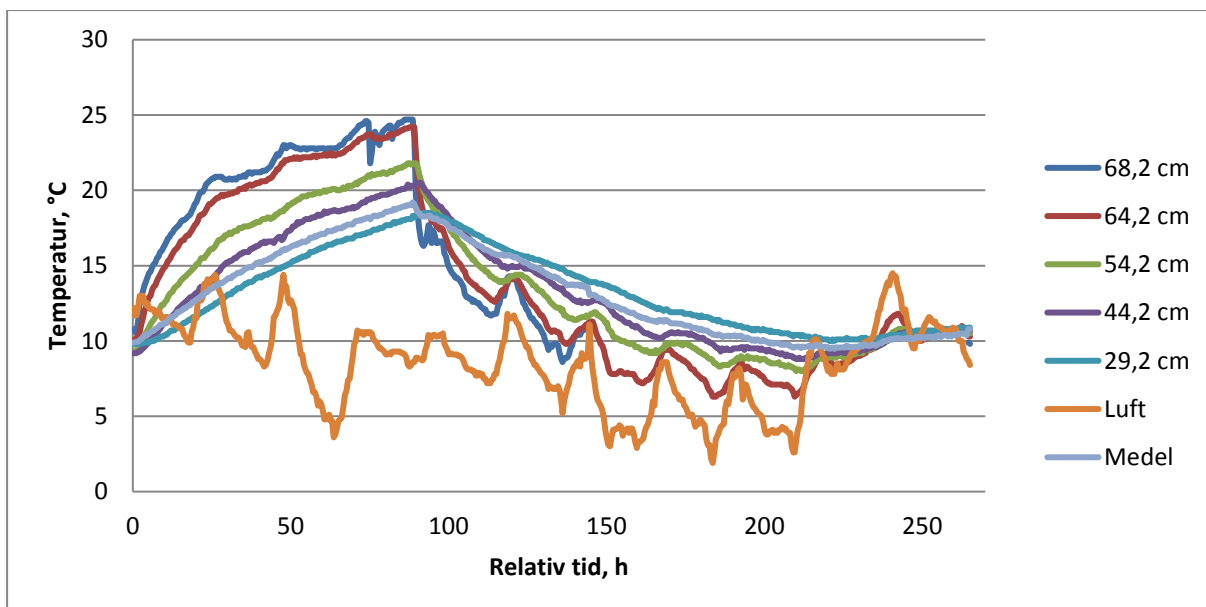
Objekt	Matta 1	Matta 2	Matta 3	Matta 4	Matta 5	Matta 1-3	Matta 4-5
Ström ensam start (A)	2,5 (575)	2,5 (575)	2,6 (598)	2,5 (575)	2,5 (575)	7,5 (575)	5,0 (575)
Ström ensam avstängning (A)	2,5 (575)	2,5 (575)	2,6 (598)	2,5 (575)	2,5 (575)	7,4 (567)	4,9 (564)
Resistans start (Ω)	90 (588)	90 (588)	89 (594)	91 (581)	90 (588)		
Resistans avstängning (Ω)	92 (575)	91 (581)	90 (588)	93 (569)	92 (575)		

Siffrorna inom parantes avser den effekt som den uppmätta strömmen respektive resistansen motsvarar vid en nätspänning på 230 volt.

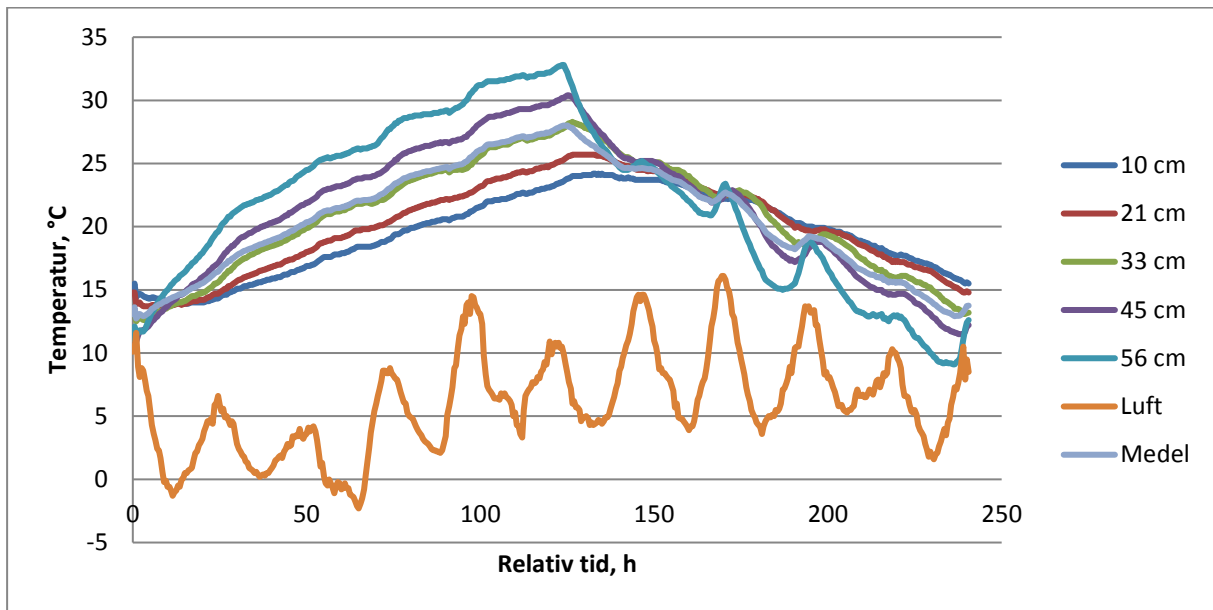
B.2 Diagram med samtliga temperaturmätningar



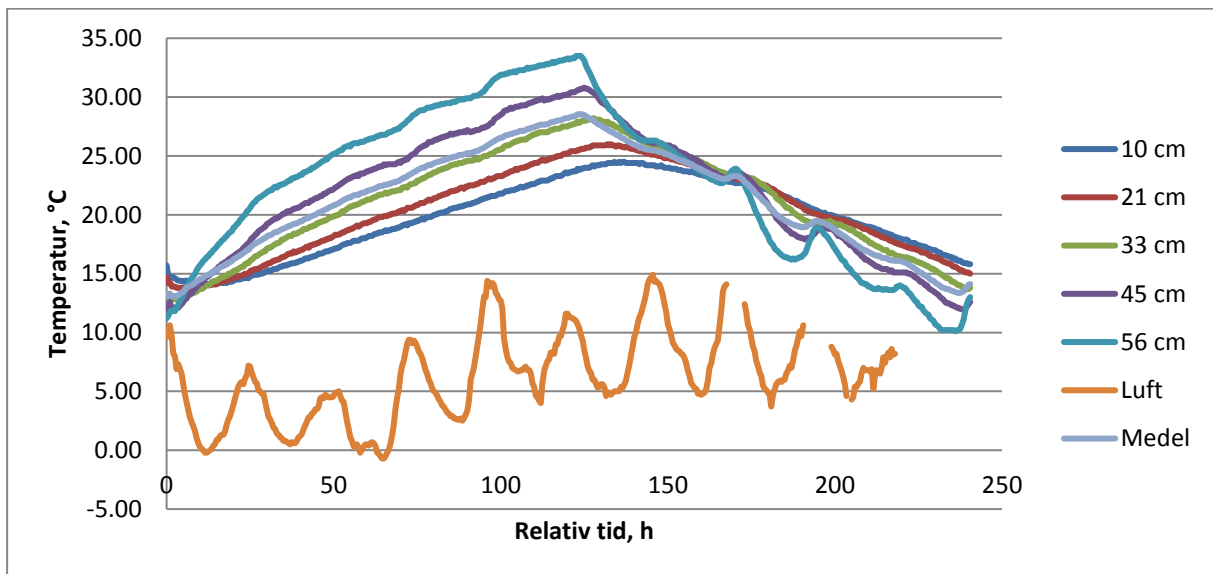
Figur B-1 Försök 1, västra, isolerad.



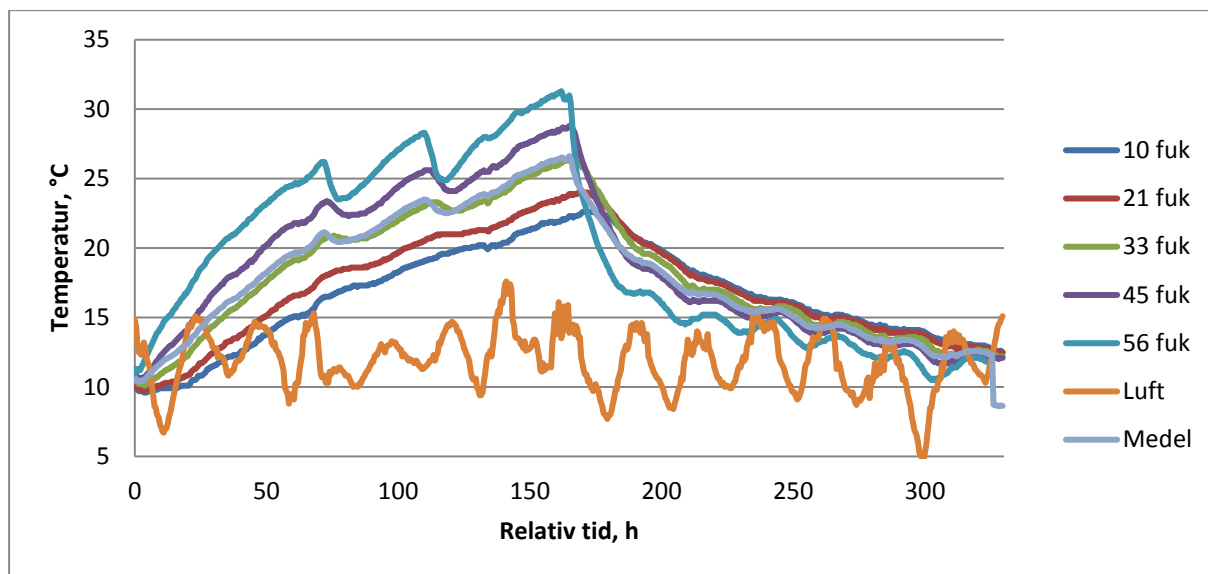
Figur B-2 Försök 1, östra, oisolerad.



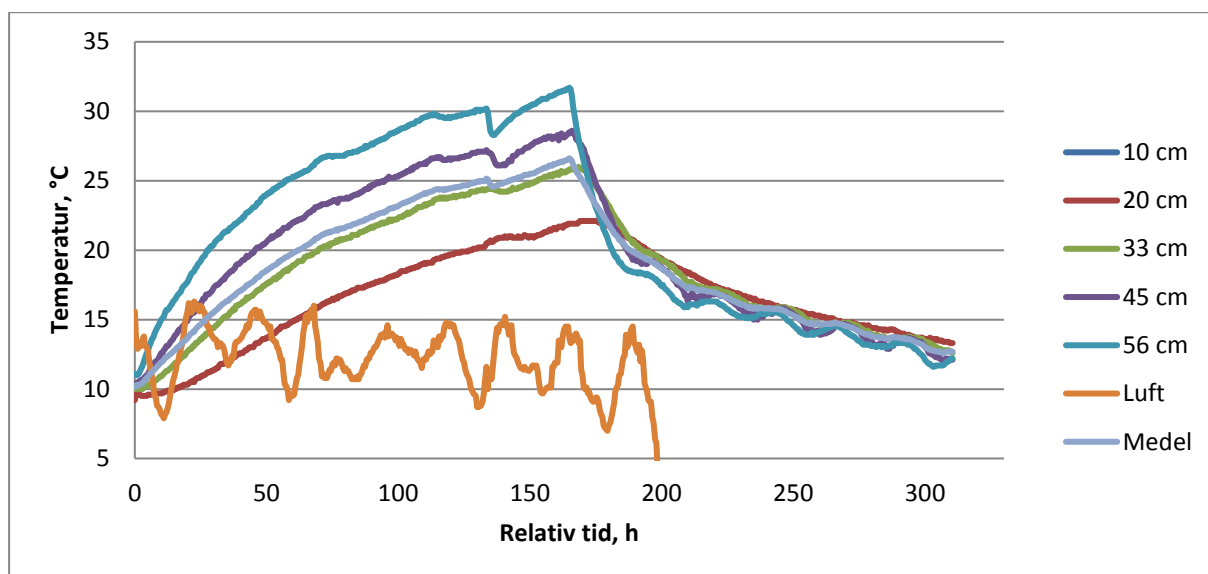
Figur B-3 Försök 2, östra, isolerad.



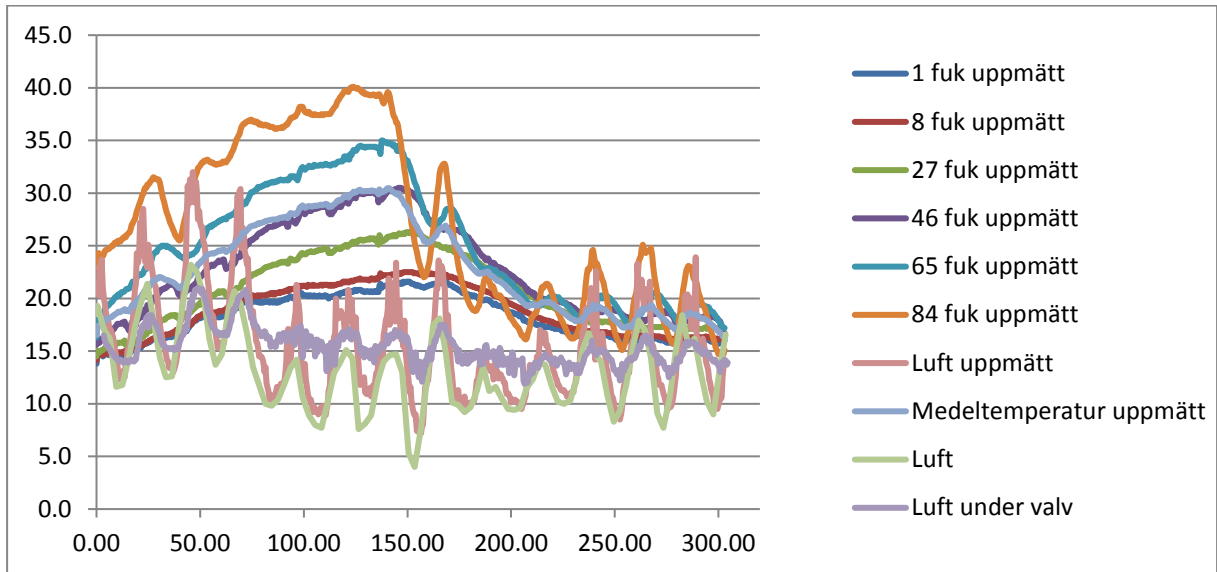
Figur B-4 Försök 2, västra, isolerad.



Figur B-5 Försök 3, östra, isolerad.



Figur B-6 Försök 3, västra, isolerad.



Figur B-7 Försök 4, isolerad.

Bilaga C

C Ekonomisk betraktelse av värmemattan

C.1 Jämförelse med värmekablar

En jämförelse gjordes mellan att använda värmematta och värmekablar för att värma upp betong. De antaganden som gjordes och som ligger till grund för det diagram som visas i avsnittet "Ekonomisk betraktelse av värmemattan" visas på nästa sida.

Tabellen nedan visar vilka bedömningar som gjorts av produktpriser, material- och arbetstidsåtgång och av totalkostnad i figur 4-44. Bedömningarna har gjorts för fallet att en 70 cm tjock betongplatta värms upp med antingen värmekablar eller värmematta. Beloppen grundar sig på att 40 m² värms upp under 100 timmar för varje gjutning. Mängden värmekablar har anpassats för att motsvara värmemattans uppvärmning.

Tabell C-1 Priser, materialåtgång och bedömd arbetsåtgång för exemplet i figur 4-44.

Värmekabel					
Produkt	Pris	Åtgång per gjutning	Åtgång per m ²	Pris per gjutning	Pris per m ²
Värmekabel 35 meter	375 kr/st	2,86 st	0,0715	1 071 kr	27 kr
Värmekabel 85 meter	575 kr/st	1,18 st	0,0295	676 kr	17 kr
Isolering 100 m ²	1 000 kr	0,4	0,01	40 kr*	1 kr*
Kilowattimma	0,8 kr/st	400 st	10	320 kr	8 kr
Arbete lägga kablar	500 kr/h	2 h	3 min	1 000 kr	25 kr
Lägga ut/ ta bort isolering	500 kr/h	0,5 h	45 sek	250 kr	6 kr
				2681 kr/gjutning	67 kr/m ²
				2286 kr/gjutning	57 kr/m ²
Värmematta					
Produkt	Pris	Åtgång per gjutning	Åtgång per m ²	Pris per gjutning	Pris per m ²
Värmematta	5000 kr/st	8 st	0,2 st	40000/n kr	1000/n kr
Isolering 100 m ²	1 000 kr	0,4 st	0,01 st	40 kr*	1 kr*
Kilowattimma	0,8 kr/st	472 st	11,8	378 kr	9 kr
Arbete lägga ut/ ta bort mattor	500 kr/h	1 h	1,5 min	500 kr	13 kr
Arbete lägga ut/ ta bort isolering	500 kr/h	0,5 h	45 sek	250 kr	6 kr
				40000/n+1168 kr/gjutning	1000/n+29 kr/m ²

*Det har räknats med att isoleringen återanvänds 10 gånger.

Tabellen nedan visar vilka bedömningar som gjorts av produktpriser, material- och arbetstidsåtgång och av totalkostnad i figur 4-45. Bedömningarna har gjorts för fallet att en 70 cm tjock betongplatta värms upp med antingen värmekablar eller värmematta. Beloppen grundar sig på att 40 m² värms upp under 100 timmar för varje gjutning. Mängden värmekablar har anpassats för att motsvara värmemattans uppvärmning.

Tabell C-2 Priser, materialåtgång och bedömd arbetsåtgång för exemplet i figur 4-45.

Värmekabel					
Produkt	Pris	Åtgång per gjutning	Åtgång per m ²	Pris per gjutning	Pris per m ²
Värmekabel 35 meter	375 kr/st	2,86 st	0,0715	1 071 kr	27 kr
Värmekabel 85 meter	575 kr/st	1,18 st	0,0295	676 kr	17 kr
Isolering 100 m ²	1 000 kr	0,4	0,01	40 kr*	1 kr*
Kilowattimma	0,8 kr/st	400 st	10	320 kr	8 kr
Arbete lägga kablar	500 kr/h	12,5 h	19 min	6 250 kr	156 kr
Lägga ut/ ta bort isolering	500 kr/h	0,5 h	45 sek	250 kr	6 kr
				7931 kr/gjutning	198 kr/m ²
				7536 kr/gjutning	188 kr/m ²
Värmematta					
Produkt	Pris	Åtgång per gjutning	Åtgång per m ²	Pris per gjutning	Pris per m ²
Värmematta	5000 kr/st	8 st	0,2 st	40000/n kr	1000/n kr
Isolering 100 m ²	1 000 kr	0,4 st	0,01 st	40 kr*	1 kr*
Kilowattimma	0,8 kr/st	472 st	11,8	378 kr	9 kr
Arbete lägga ut/ ta bort mattor	500 kr/h	1 h	1,5 min	500 kr	13 kr
Arbete lägga ut/ ta bort isolering	500 kr/h	0,5 h	45 sek	250 kr	6 kr
				40000/n+1168 kr/gjutning	1000/n+29 kr/m ²

*Det har räknats med att isoleringen återanvänds 10 gånger.