

VÄRME ETT ALTERNATIV TILL KYLA

METODUTVECKLING OCH NY TEKNIK



Kjell Wallin, Betong & Stålteknik (Projektledare)
Anders Hösthagen, Betong & Stålteknik / LTU

2018-09-14

FÖRORD

Den organisation som sammanställts för att driva och administrera detta projekt består av en arbetsgrupp samt en referensgrupp, vilket även utgör projektets styrgrupp.

Arbetsgrupp:

Kjell Wallin, Betong & Stålteknik (Projektledare)
Anders Hösthagen, Betong & Stålteknik / Luleå Tekniska Universitet
Carsten Vogt, Betong & Stålteknik
Leif Thörner SVEVIA
Vilmer Andersson-Vass SVEVIA

Referensgrupp:

Arbetsgruppen
Thomas Österberg, Svevia
Kurt Palmqvist, Trafikverket
Hans Hedlund, Skanska Sverige AB / Teknik
Mats Emborg, Heidelberg Cement/Betongindustri AB

Ett stort tack riktas till SBUF, samtliga inblandade i organisationen och de personer som arbetat med de underliggande arbetena inom projektet.

Enköping, september 2018
Anders Hösthagen

SAMMANFATTNING

För att reducera risken av temperatur- och fuktrelaterad sprickbildning i nygjutna betongkonstruktioner kan ett flertal åtgärder vidtas. Exempelvis kan motgjutna betongkonstruktionsdelar förvärmas i syfte att minska de temperaturdifferenser som orsakar temperatursprickor. Inom anläggningsbyggandet är ingjutna värmekablar en vanlig förvärmningsmetod. Två nackdelar med värmekablarna är dels att de måste förberedas för och gutas in i anliggande konstruktionsdelar, och dels att de riskerar att gå sönder under gjutprocessen.

Aktuellt projekt syftar till att under produktionen av en 640 m lång betongtunnel genom Gamla Uppsala arbeta i full skala med tester och verifiering av en alternativ förvärmningsmetod; förvärmning m.h.a. värmemattor med låg och kontinuerlig effekt. Den tekniska och ekonomiska potentialen analyseras parallellt med utvecklings- och uppföljningsarbetet för att etablera metodiken på ett antal monoliter.

Värmemattan är uppbyggd på samma sätt som så kallade tjältiningsmattor, men har en lägre effekt. Tack vare den lägre effekten ska den, utan att riskera överhettning, kunna användas kontinuerligt i ett antal dagar och på så vis öka medeltemperaturen i motgjuten betongkonstruktion. Värmemattan kan i många fall tjäna som ett direkt substitut till värmekablar i planeringsarbetet inför gjutning av nya betongkonstruktioner, och även fungera som en sprickriskbegränsande metod vid reparation eller påbyggnad av äldre konstruktioner.

Fem delarbeten ligger till grund för denna rapport. I tre arbeten (del 1, 3 och 4) har värmemattans sprickriskbegränsande funktion undersökts. En beräkningsmodell för genomförda spänningsberäkningar är framtagen i del 2. I del 5 beskrivs och åskådliggörs genomförd sprickkartering för samtliga ingående ramben (även kallad ”väggar” i delar av rapporten) i fullskaligprojektet, järnvägstunneln i G:a Uppsala:

Del 1; Examensarbete av Vilmer Andersson- Vass ”Temperatursprickor i betong – Metodutveckling för sprickriskbegränsning och uppföljning av uppsprickning i en tunnelkonstruktion”, se appendix A.1. 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. Vidare beskrivs två gjutningar av ramben i 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.

Del 2; Artikel av Anders Hösthagen et al. ” Thermal Crack Risk Estimations of Concrete Walls – Temperature and Strain Measurements Correlated to the Equivalent Restraint Method”. I denna del används mätdata från projektet för att undersöka en utvecklad temperatursprickrisksanalysmetod där tvånget uppskattas m.h.a. elastiska 3D-beräkningar. Metoden kallas Equivalent Restraint Method, ERM, och ligger till grund för samtliga spänningsberäkningar inom ramben för SBUF-rapporten.

Del 3; Efterkalkyler av temperatursprickrisken för 34 st ramben i järnvägstunnel i G:a Uppsala.

Del 4; Artikel av Jonny Nilimaa et al. "Thermal Crack Risk of Concrete Structures – Evaluation of Theoretical Models for Tunnels and Bridges". I artikeln har efterkalkyler av temperatursprickrisken gjorts för tre platt-ram-broar där mätresultat från SBUF-projektet ingått som en del. Artikelns mål var att undersöka hur genomförd förvärmning av motgjutna bottenplattor har påverkat temperatursprickrisken.

Del 5; Sprickkartering dokumenterad under perioden 2015-03-11 t.o.m. 2017-05-04, se appendix A.3.

Del 2 och 4 återfinns i Hösthagen A. "Thermal Crack Risk Estimation and Material Properties of Young Concrete", Licentiatavhandling. Luleå 2017. ISSN 1402-1757.

Prominenta resultat från de fem delarbetena är;

- Värmemattan är lämplig som en temperaturspricksbegränsande åtgärd, åtminstone för väggar gjutna på bottenplattor med tjocklek upp till minst 750 mm.
- Värmemattans effekt på temperaturen i bottenplattan kan beräknas med tillfredställande precision.
- Samtliga väggar där beräknad töjningskvot är >70% uppvisar sprickor med sprickvidder >0,1 mm. Detta oberoende om vidtagen temperaturspricksbegränsande åtgärd varit värmematta eller värmekabel.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1	INLEDNING	5
1.1	Indelning; Examensarbete om värmemattor.....	6
1.2	Indelning; Artikel om beräkningsmodellen Equivalent Restraint Method.....	7
1.3	Indelning; Efterkalkyler av temperatursprickrisken.....	8
1.4	Indelning; Artikel om utvärdering av flera temperatursprickriskanalyser.....	8
1.5	Indelning; Sprickkartering.....	10
2	METOD	10
2.1	Metod; Examensarbete om värmemattor.....	10
2.2	Metod; Artikel om beräkningsmodellen Equivalent Restraint Method.....	17
2.3	Metod; Efterkalkyler av temperatursprickrisken.....	19
2.4	Metod; Artikel om utvärdering av flera temperatursprickriskanalyser.....	20
2.5	Metod; Sprickkartering.....	21
3	RESULTAT	22
3.1	Resultat; Examensarbete om värmemattor.....	22
3.2	Resultat; Artikel om beräkningsmodellen Equivalent Restraint Method.....	26
3.3	Resultat; Efterkalkyler av temperatursprickrisken.....	28
3.4	Resultat; Artikel om utvärdering av flera temperatursprickriskanalyser.....	30
3.5	Resultat; Sprickkartering.....	31
4	ANALYS	33
4.1	Analys; Examensarbete om värmemattor.....	34
4.2	Analys; Artikel om beräkningsmodellen Equivalent Restraint Method.....	34
4.3	Analys; Efterkalkyler av temperatursprickrisken.....	35
4.4	Analys; Artikel om utvärdering av flera temperatursprickriskanalyser.....	35
4.5	Analys; Sprickkartering.....	36
5	DISKUSION	37
6	APPENDIX	38
A.1.	Examensarbete.....	38
A.2.	Utvärderade materialparametrar.....	38
A.3.	Sprickkartering.....	38
A.4.	Sammanställning av sprickkartering.....	39

1 INLEDNING

Syftet med denna SBUF-rapport är att undersöka en temperaturspricksbegränsade metod; uppvärmning av motgjuten konstruktion med hjälp av värmematta.

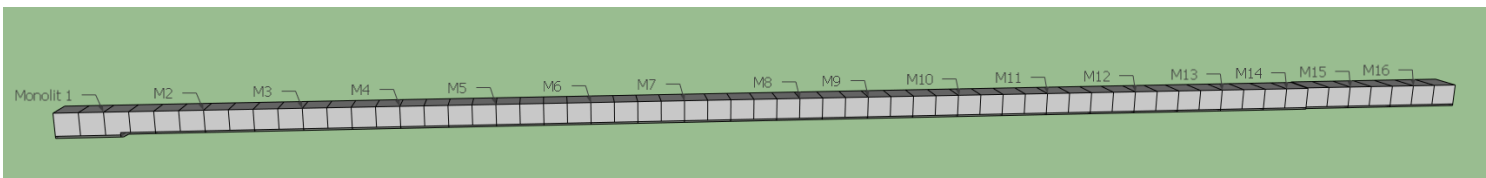
Fem delarbeten ligger till grund för denna rapport. I tre arbeten (del 1, 3 och 4) har värmemattans sprickriskbegränsande funktion undersökts. En beräkningsmodell för genomförda spänningsberäkningar är framtagen i del 2. I del 5 beskrivs och åskådliggörs genomförd sprickkartering för samtliga ingående väggar i ett fullskaligprojekt, 640 m järnvägstunnel i G:a Uppsala.

Rapporten är uppbyggd så att en övergripande kommentar till de fem arbeten som ligger till grund ges i början av varje kapitel. Därefter följer underrubriker där antingen utdrag av de underliggande arbetena (i de fall där en extern rapportering är genomförd) eller originalrapportering ges.

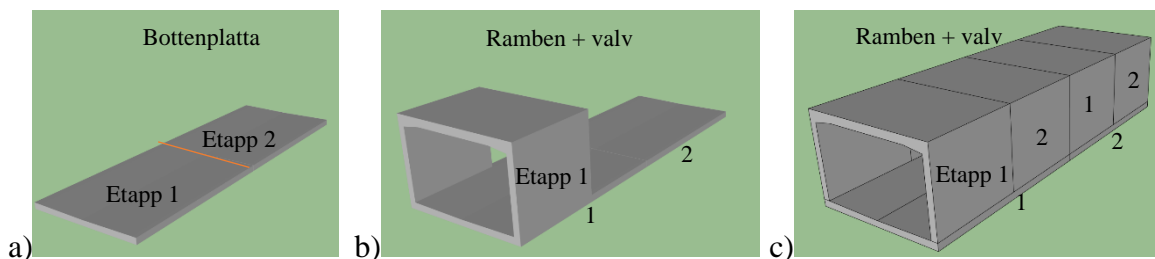
I flera delar av rapporten hänvisas till specifika gjutetapper för bottenplatta, ramben eller valv. En översiktlig skiss av Gamla Uppsalas järnvägstunnel visas i figur 1.1 där monolitnumren är markerade. Nomenklaturen för varje konstruktionsdel anges enligt;

monolitnummer.bottenplattsetapp.rambensetapp

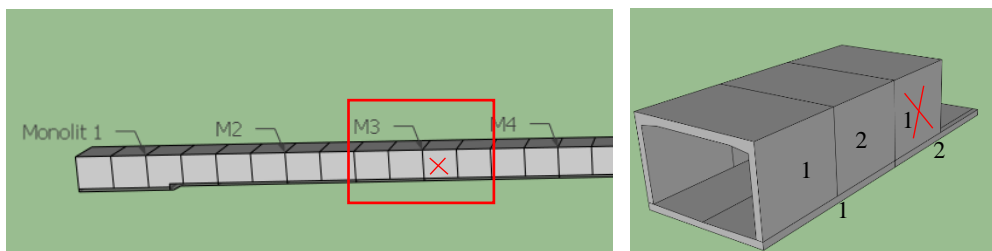
I varje monolit, sinsemellan avskilda med dilatationsfogar, ingår två bottenplattsetapper och fyra rambensetapper, se figur 1.2. Valv och ramben gjöts i ett stycke. Figur 1.3 visar grafiskt konstruktionsdel 3.2.1.



Figur 1.1. Översiktlig skiss av Gamla Uppsalas järnvägstunnel med markerade monolitnummer.



Figur 1.2. Skiss över ingående gjutetapper i varje monolit.



Figur 1.3. Grafisk åskådliggörning av benämningen på konstruktionsdel 3.2.1.

Angivna referenser återfinns i de olika delarbetena.

1.1 Indelning; Examensarbete om värmemattor

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.

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 gjuts 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. En annan nackdel med båda metoderna är att det material som gjuts in går förlorat. Värmekablarna gjuts in och kan inte återanvändas och de ingjutna hålrum som skapas för kylrören måste gjutas igen i efterhand. Det händer även att värmekablarna går sönder när de gjuts 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 motgjuten betongkonstruktion utan att bli överhettad.

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.

1.2 Indelning; Artikel om beräkningsmodellen Equivalent Restraint Method

Mothållna rörelser, orsakade av förändrade temperatur- och/eller fuktillstånd, i ung betong under konstruktionsfasen är den huvudsakliga anledningen till sprickbildning. Alla motgjutna konstruktionsdelar och underlag ökar risken för sprickbildning eftersom de eventuellt ger upphov till tvång för det uppkomna rörelserna.

Uttorkningskrympning påverkar främst tunna/slanka konstruktioner, så för grövre anläggningskonstruktioner blir i normalläget (då fukthårdning utförs enligt standard) rörelser orsakade av uttorkningskrympning underordnad temperaturrörelserna.

Åtgärder för att undvika sprickbildning orsakad av temperaturrörelser görs ofta på byggarbetsplatsen. Åtgärderna kan bestå i att förvärma motgjuten konstruktion, kyla den unga betongen, anpassa betongreceptet eller använda långa formrivningstider. De givna åtgärderna medför samtliga att den differentiella rörelsen mellan motgjutning och den unga betongen blir mindre, vilket leder till minskad temperatursprickrisk.

Att kunna upprätta pålitliga modeller för uppskattning av tvånget från anliggande tvångsgivande strukturer har stor betydelse då det kommer till att föreskriva temperatursprickriskbegränsande åtgärder. Detta gäller särskilt då temperatursprickriskproblematiken behandlas med hjälp av kylsystem och dimensionering av den samma. Vid förenklade temperatursprickriskanalyser är tvånget oftast en osäkerhetsfaktor jämfört mot full elastoplastisk 3D-analys av temperaturinducerade spänningar. Fullständiga 3D-analyser är oftast mycket tidskrävande varvid förenklade analysmetoder oftast är betydligt snabbare och i många fall ger en likvärdig analys. För att uppskatta tvånget finns flera metoder att tillgå, så som handberäkningsmetoder, kalkylblad-baserade och FEM-baserade metoder.

För att förenkla tvångsuppskattningen inför temperaturspänningsanalyser kan metoder som Local Restraint Method (LRM) eller Equivalent Restraint Method (ERM) användas. Detta arbetet stödjer sig på ERM. Metoden använder sig av elastiska 3D FEM-beräkningar för att

uppskatta tvånget, sedan överförs tvångssituationen till en analysmodell baserad på Compensated Plane Method (2D FEM). Metoden är tidseffektiv och godtyckliga temperaturpåverkande åtgärder kan modelleras, så som värmning av anliggande tvångsgivande strukturer och eller kylning av den unga betongen.

Tidigare har en utvärdering gjorts huruvida temperaturspänningsberäkningsresultaten från ERM korrelerar med observationer gjorda vid bygget av en sekventiellt byggd vägtunnel. Den utvärderingen baserades endast på jämförelser mellan beräknade och uppmätta temperaturer tillsammans med korrelationen mellan beräknade töjningskvoter och observerade sprickor. En betydande osäkerhet i utvärderingen var att tidpunkterna för uppkomna sprickor inte dokumenterats med noggrannhet.

I detta arbete har den genomgående temperatursprickrisken analyserats för två väggar i en järnvägstunnel i syfte att göra en förfinad utvärdering av ERM. Utvärderingen grundar sig på korrelationen mellan beräknad tidpunkt för teoretisk temperatursprickbildning och mätt tidpunkt för sprickbildning. Inga sprickriskbegränsande åtgärder vidtogs inför aktuell gjutning. Följande förbättringspunkter har genomförts jämfört med tidigare utvärdering; 1) materialtester och efterföljande utvärdering har gjorts på använd betong för att få en komplett uppsättning karaktäristiska materialparametrar lämpade för beräkningsmodellen, 2) utökade temperaturmätningar i och runt analyserad konstruktion och 3) töjningsmätningar genomförda med trådtöjningsgivare.

1.3 Indelning; Efterkalkyler av temperatursprickrisken

Att i efterhand genomföra beräkningar av temperatursprickrisken hos en redan gjuten konstruktionsdel görs oftast som ett led i att bestämma orsaken för uppkomna sprickor. Genom att ställa upp en beräkningsmodell där så många betong-, åtgärds- och miljövariabler som möjligt beaktats ger en god bild av huruvida betongen spruckit av temperaturrelaterade fenomen eller ej. Efterkalkyler för fall där endast en typisk genomgående temperaturspricka uppkommit i närheten av konstruktionsdelens mitt kan användas för att stämma av om beräkningsuppställningen (med avseende på bl.a. tvångssituation, materialparametrar, omgivande temperatur- och vindförhållanden) ger en tillförlitlig analys av spännings- och töjningsnivåerna.

I artikeln om beräkningsmodellen Equivalent Restraint Method (delarbete 2) gjordes en grundlig genomgång av flera parametrar i beräkningsuppställningen, speciellt med avseende på tvångssituationen. Beräkningsresultat av töjningskvoten jämfördes med genomförda töjningsmätningar i två av Gamla Uppsalas järnvägstunnelväggar. Resultatet från denna analys ligger till grund för de genomförda efterkalkylerna av temperatursprickrisken som gjorts i detta delarbete.

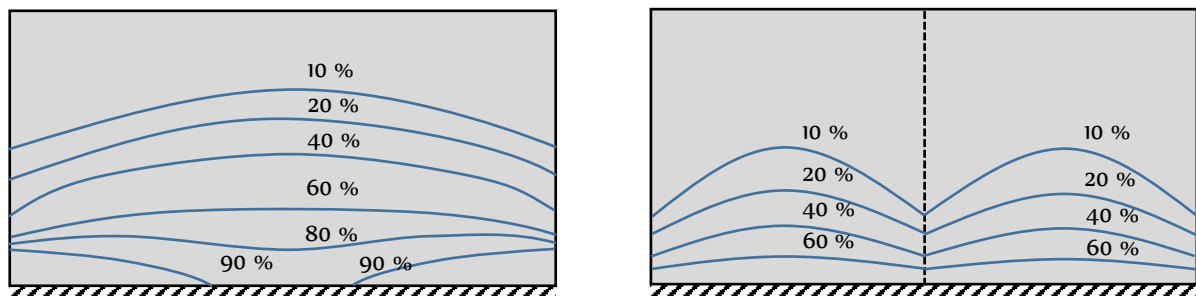
1.4 Indelning; Artikel om utvärdering av flera temperatursprickriskanalyser

Temperatursprickbildning riskerar att uppstå i den tidiga härdningsfasen av betong. Den exotermiska reaktionen för hydratationsprocessen leder till ökande temperaturer i en konstruktion och leder till en materialutvidgning av betongen. Förhindras denna deformation genom någon tvångsgivande intilliggande struktur uppstår tryckspänningar i konstruktionen. Då hydratationshastigheten avtar svalnar konstruktionen av och drar ihop sig. För en tvångsutsatt betongkonstruktion medför detta att dragspänningar uppkommer. Överskrider

dragspänningarna materialets draghållfasthet uppstår sprickbildning. Dragspänningar kan också uppkomma genom en icke homogen deformation orsakad av olika temperaturförhållanden sett över ett tvärsnitt av en konstruktionsdel.

Undersökningar av olika tvångssituationer har bl.a. gjorts i Knoppik-Wróbel, 2015, Nilsson 2003 och Wiess 1998. Tvångsgraden i en betongkropp påverkas av intilliggande strukturer och varierar mellan 0 – 100%. Fullständigt tvång motsvarar en situation där betongkroppen är totalt fastlåst mot oeftergivliga strukturer utan tvångsreducering från gjutfogsglidning eller resilienseffekter.

Denna artikel behandlar två typer av tvångssituationer: (1) Gjutning av en fri väggetapp på en bottenplatta. (2) Gjutning av en väggetapp mot en intilliggande väggetapp, ovan på en bottenplatta. Figur 1.4.1. åskådliggör tvångssituationen för de studerade fallen.



Figur 1.4.1. Tvångssituationen för två studerade fall.

Risken för temperatursprickor, η , kan beräknas en spännings- eller töjningskvot

$$\eta = \left(\frac{\sigma_t(t)}{f_{ct}(t)} \right)^{max} \approx \left(\frac{\varepsilon_t(t)}{\varepsilon_{ct}(t)} \right)^{max}$$

där $\sigma_t(t)$ är dragspänningen vid tid t
 $f_{ct}(t)$ är dragspänningsstyrkan vid tid t
 $\varepsilon_t(t)$ är dragtöjningen vid tid t
 $\varepsilon_{ct}(t)$ är maximal dragtöjning innan brott vid tid t

Spricksäkerhetsnivån, S , definieras som invers av η :

$$S = \frac{1}{\eta}$$

Om η är för stor enligt definierad spricksäkerhetsnivå angiven i AMA Anläggning behövs åtgärder vidtas för att minska risken för temperatursprickbildning. Typiska åtgärder är att förvärma motgjuten konstruktion med hjälp av värmekablar eller värmemattor, eller kyla den nygjutna konstruktionen med hjälp av ingjutna kylrör.

Syftet med denna artikel är att studera den svenska modellen för begränsning av temperatursprickor och undersöka angivna spricksäkerhetsnivåer för några utvalda betongkonstruktioner. I studien görs för tre platt-ramkonstruktioner där sprickbegränsande åtgärder har vidtagits genom att förvärma bottenplattorna inför gjutning av ramben.

1.5 Indelning; Sprickkartering

Uppföljningar av genomförda gjutningsarbeten är av stor vikt vid bedömmandet av hur väl ett arbete genomförts samt vid erhållandet av erfarenheter. I varje gjutarbete är det därför naturligt att syna konstruktionen på sprickor och dokumentera var de uppkommit, omfattningen på sprickan m.a.p. utbredning och vidd samt när i tiden de observerats. En väl utförd sprickkartering tillsammans med noggrant dokumenterade betongspecifikationer och miljövariabler (t.ex. betongrecept, luft- och betongtemperaturförlopp, formmaterial, vindhastigheter, luftfuktighet, solstrålningsförhållanden) är en gedigen grund inför bedömmandet av vilken eller vilka mekanismer som kan ha orsakat en sprickbildning.

I arbetet med Gamla Uppsalas järnvägstunnel genomfördes karteringar vid flera tillfällen och observationerna gjorda för varje ramben har dokumenterats i en sammanställning.

2 METOD

Metoden för att utvärdera värmemattans temperaturspricksbegränsande effekt består av att ta fram en värmematta och genomföra temperaturmätningar i, av mattan, uppvärmd betong. Dessa mätningar jämförs sedan med temperaturberäkningar utförda i programmet ConTeSt Pro 5.0. Teoretiska spänningsnivåer i järnvägstunnelväggar, där vissa motgjutna bottenplattssektioner förvärmats med värmemattor, har beräknats med beräkningsmodellen Equivalent Restraint Method i ConTeSt Pro 5.0. Betongen i projektet har testats i laboriemiljö vid Luleå tekniska universitet och resultaten är utvärderade så att en uppsättning specifika materialparametrar anpassade för ConTeSt Pro 5.0 har erhållits. Beräknade spänningsnivåer i väggarna har jämförts med motsvarande sprickkarteringar och i två fall även mot töjningsmätningar.

Nedan beskrivs kortfattat de metoder som använts vid respektive ingående rapportdel.

2.1 Metod; Examensarbete om värmemattor

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. Försöken gick ut på att med hjälp av temperaturgivare mäta temperaturutvecklingen i ett antal punkter i betongen som mattorna värmdes. Tre av försöken genomfördes på tunnelns bottenplattor medan ett genomfördes på tunnelns valv. För översiktliga försöksspecifikationer se Tabell 2.1.1. 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. De uppmätta temperaturerna jämfördes sedan med beräknade temperaturer.

	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

Tabell 2.1.1

Översiktlig information för de fyra genomförda försöken.

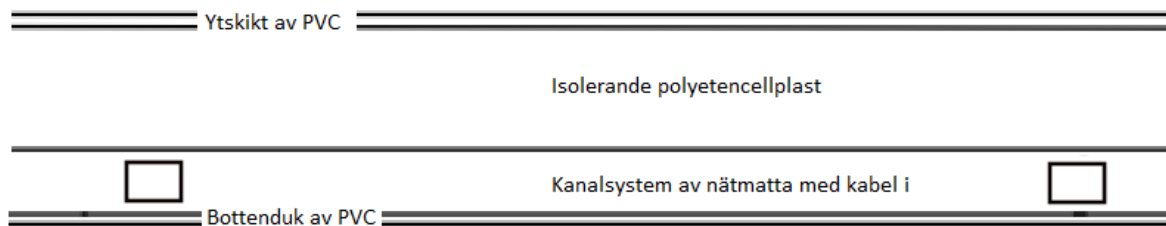


Figur 2.1.1 Värmemattan som behandlas i detta arbete. Den högra bilden visar schematiskt hur värmekablarna är dragna.

Värmemattorna placerades så att de täckte en radie av minst två meter runt de mätpunkter som gjutits in i betongen.

Den individuella värmemattan har en storlek av 5×1 meter och visas i figur 2.1.1. 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.

Värmemattan är uppbyggd av ett antal lager vilket illustreras av figur 2.1.2. 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 W/m·K. Ovanför isoleringen skyddas mattan av ett övre ytskikt av PVC-material. 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 till examensarbetet ”Temperatursprickor i betong”. Effekten beräknades till omkring 550-600 watt.



Figur 2.1.2 Principiell uppbyggnad av värmemattan.

	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)	

Tabell 2.1.2. Betongrecept för den uppvärmda betongen.

Betongtyperna i bottenplattan och valvet är två sorters anläggningsbetong i hållfasthetsklass C30/37 med specificerat vattencementtal 0,50, se tabell 2.1.2. Lufthalten provas före gjutning och ska vara minst 4 %. Densiteten var cirka 2280 kg/m³ hos betongmassan enligt tillverkaren.

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.

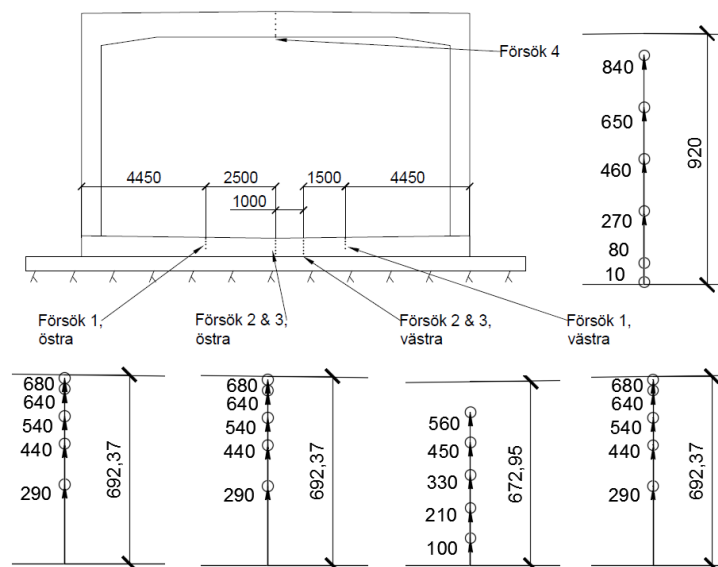
Bottenplattan och valvet är armerat med ett lager i överkant och ett i underkant. Täcksiktet är 40 mm i överkant och 110 mm i underkant för bottenplattorna och 40 mm i över- och underkant för valvet. Armeringskvaliteten är B500BT.

När bottenplattorna och valvet 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.

En bädd av 500 mm sprängsten är lagd direkt på berget och utgör underlag för de bottenplattor som studerats.

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 ± 0,5 grader. Testologgern har en intern noggrannhet på ± 0,3 grader (Nordtech, IU). Temperaturmätningarna som gjorts borde alltså ha en noggrannhet bättre än ± 1 grader.

Mätpunkternas placering i tunnelkonstruktionen visas i figur 2.1.3.



Figur 2.1.3 Mätseriernas placering i tunneltvårsnittet och deras mätpunkters höjd i betongen. Mått i millimeter.

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 2.1.3.

Tunneln sträcker sig i syd-nordlig riktning. Tio mattor användes varav de fem längst österut täcktes med 10 mm tjocka betongtäckmattor, se figur 2.1.4. 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. Det regnade timmarna innan temperaturmätningen startade, varvid mattorna var fuktiga under hela försöket. 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.

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 2.1.5. Försökssituationen som den såg ut innan och efter värmemattorna täcktes visas i figur 2.1.5. 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.



Figur 2.1.4 Mattor (gula) och isolering (grå) utlagda på bottenplattan vid försök 1. De västra mattorna täcktes med 10 mm betongtäckmatta.



Figur 2.1.5 a) Värmemattorna innan de täcktes med isolering vid försök 2. Två markeringar för mätpunkternas horisontella läge. b) Värmemattorna täckta med betongtäckmattor.

Vid försök 3 användes samma temperaturgivare som vid försök 2 och som visas i figur 2.1.3. 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. 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 2.1.6. 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. 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.



Figur 2.1.6 Värmemattorna vid utläggning efter att de täcktes med isolering, försök 3. Mätpunkternas horisontella läge markeras av de två hinkarna.



Figur 2.1.7 Värmemattorna vid utläggning innan de täcktes med isolering, försök 4.

Vid försök 4 gjöts temperaturgivarna in i betongen på glasfiberstag på samma sätt som för försök 2 och 3 och deras läge visas i figur 2.1.3. Lufttemperaturen uppskattades med hjälp av en närliggande väderstation vid Uppsala flygplats. Värmemattornas placering på valvet visas i figur 2.1.7.

För att så noggrant som möjligt kunna modellera värmemattan i beräkningsprogrammet ConTeSt PRO undersöktes fyra modelleringsmetoder, se figur 2.1.8, så att en föreslagen metod kan anges inför modellering av mattan. När en föreslagen modelleringsmetod bestämts behöves generella värden på ingående parametrar bestämmas, genom att jämföra uppmätta temperaturer vid de fyra olika försöken med respektive beräknade temperaturer. De ingående parametrarna varieras så att en de beräknade temperaturerna på bästa sätt överensstämmer med de uppmätta. Innan denna jämförelse genomförs upprättades en känslighetsanalys, se avsnitt 3.4.2 i examensarbetet ”Temperatursprickor i betong”. Nedan följer en beskrivning av de fyra undersökta beräkningsmetoderna;

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 räknats 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 ($W/m^2 \cdot K$).

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 ($W/m^2 \cdot K$).

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:

- Effekttalet 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.

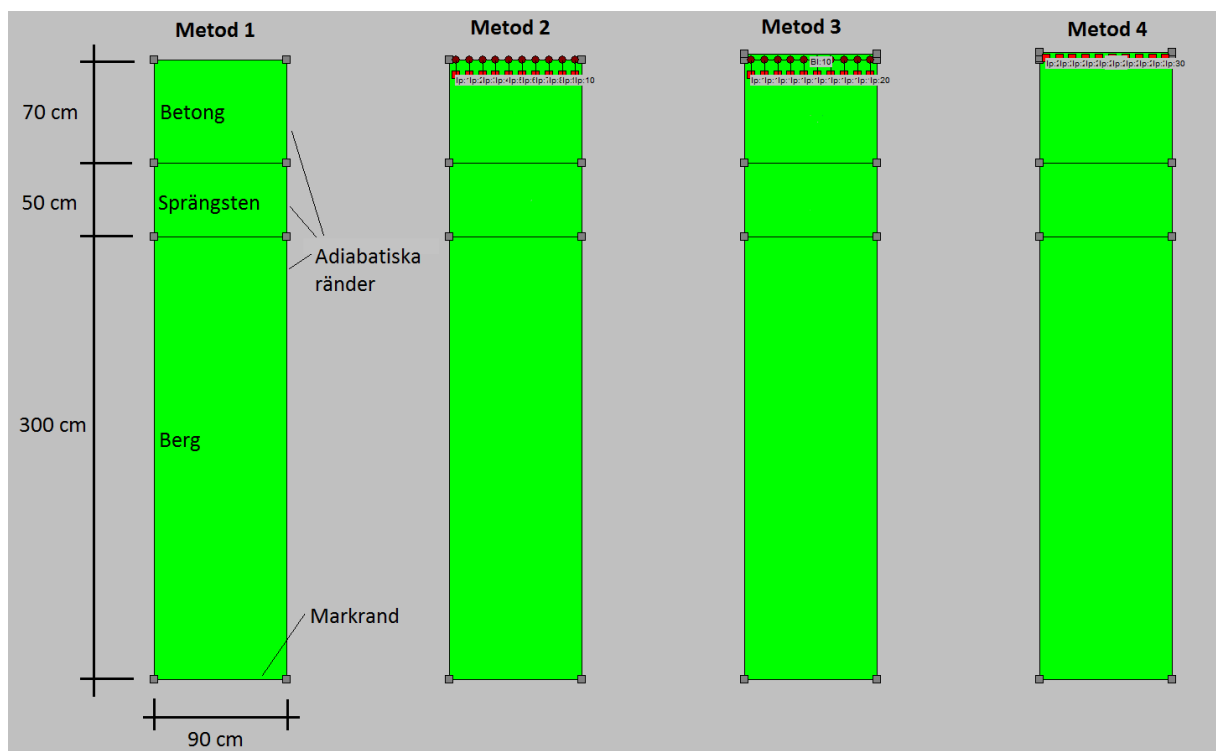
- Isoleringsblockets tjocklek (m).
- Isoleringsblockets temperaturegenskaper: värmeledningsförmåga ($W/m \cdot K$), specifik värmekapacitet ($J/kg \cdot K$) och densitet (kg/m^3).
- Värmeövergångstalet mellan isoleringsblocket och luften.

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:

- Effekttalet 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 ($W/m \cdot K$), specifik värmekapacitet ($J/kg \cdot K$) och densitet (kg/m^3).

Värmeövergångstalet mellan isoleringsblocket och luften.

När metoderna jämfördes sinsemellan i Contest ansattes ekvivalent effekt och ekvivalent isolering för de fyra metoderna.



Figur 2.1.8 Modeller vid jämförelse mellan metod 1,2,3 och 4.

En ekonomisk jämförelse mellan användandet av värmematta jämfört med värmekablar genomfördes genom att uppskatta kostnaderna för ett hypotetiskt fall där 40 m² betongplatta med tjockleken 70 cm värms, vilket för fallet med värmekablar innebär att 100 meter värmekabel läggs ut. Det analyserade fallet är någorlunda representativt för många gjutsituationer i anläggningsbranschen där 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. 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. Ett antagande gjordes om 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. Uppskattningen av kostnaderna utgick från de ungefärliga priser som redovisas i Tabell 2.1.3.

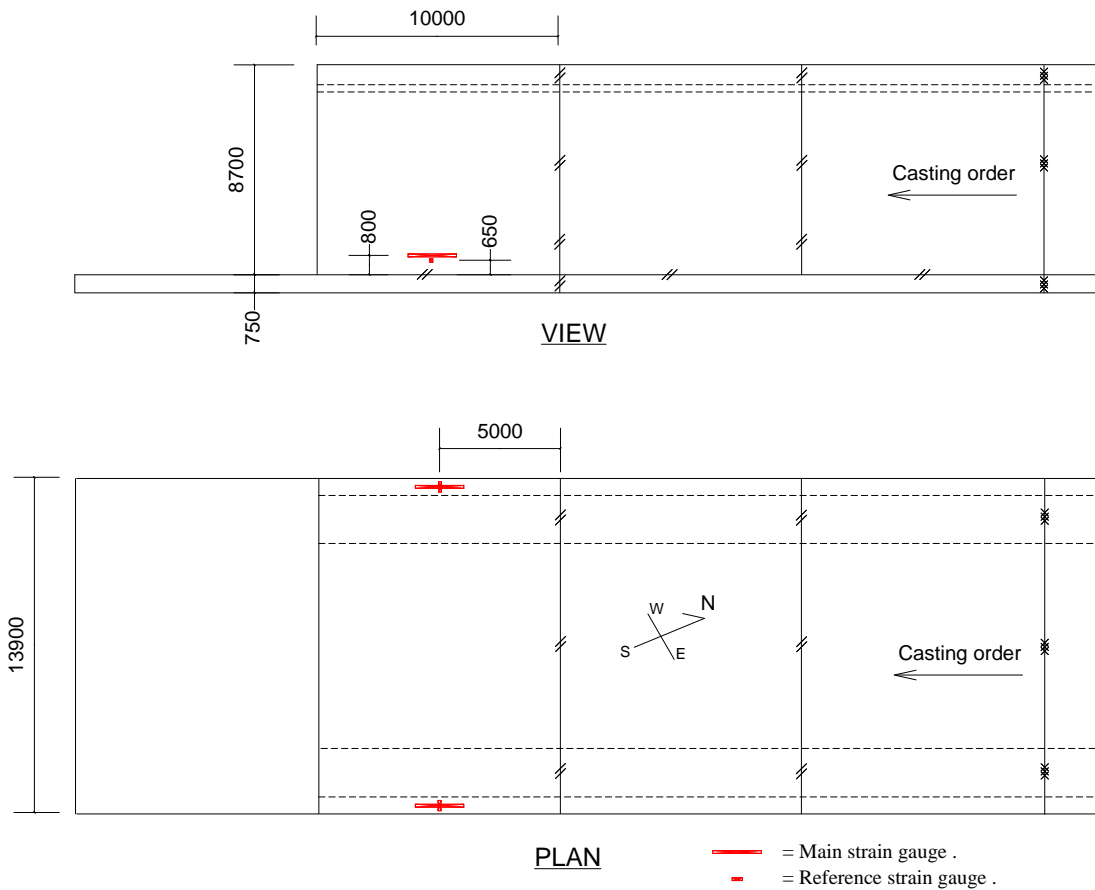
Produkt	Pris (kr)
Värmematta	5000
Värmekabel 35 meter	375
Värmekabel 85 meter	575
Betongtäckmatta 50×2 m	1000
Arbetad timma	500
Kilowattimma	0,8

Tabell 2.1.3 Priser relaterade till de två värmningsmetoderna.

2.2 Metod; Artikel om beräkningsmodellen Equivalent Restraint Method

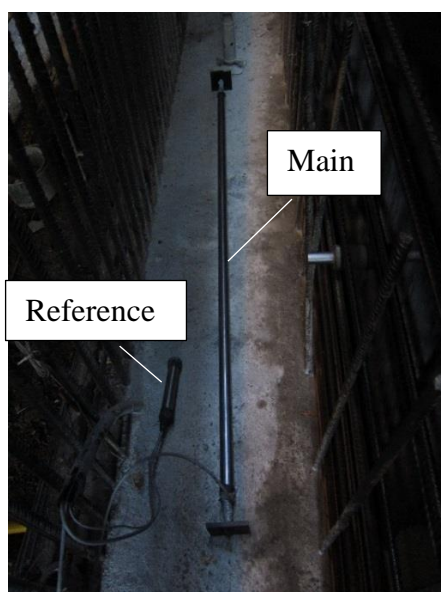
Utvärderingen av ERM-beräkningsmodellen är genomförd i fem steg. Första steget; laborietester och utvärdering av testerna har genomförts för att fastställa materialegenskaperna hos den betong som använts vid byggandet av järnvägstunneln. Andra steget; en ERM-modell är etablerad för att analysera temperatur- och töjningsutveckling för valda bottenplattor och väggar. Flera Local Restraint Method-modeller behövs för att upprätta en ERM-modell. Tredje steget; temperatur och töjningsmätningar gjordes i två motstående väggar i järnvägstunnel. Väggarna gjöts samtidigt tillsammans med ovanliggande valvdel utan förvärmning av bottenplattan. Töjningsmätningarna genomfördes med trådtöjningsgivare och referensgivare. Fjärde steget; uppmätta temperaturer (omgivande temperatur, temperatur hos bottenplatta och initial betongtemperatur) importerades till ERM i syfte att erhålla teoretisk temperaturutveckling för analyserade väggpartier. Teoretiska och uppmätta temperaturutvecklingar jämfördes. Förutsättning för det femte steget var att tunnelns väggar skulle spricka på grund av temperaturrörelser. Om någon vägg inte skulle spricka spontant fanns det ingjutna värmekablar i bottenplattan så att plattan skulle kunna expandera och tvinga fram sprickbildning i väggen.

Studerad geometri är åskådliggjord i Figur 2.2.1 och består av två väggar med ovanpåliggande tak som gjuts i ett stycke på en redan gjuten bottenplatta. Bottenplattan är

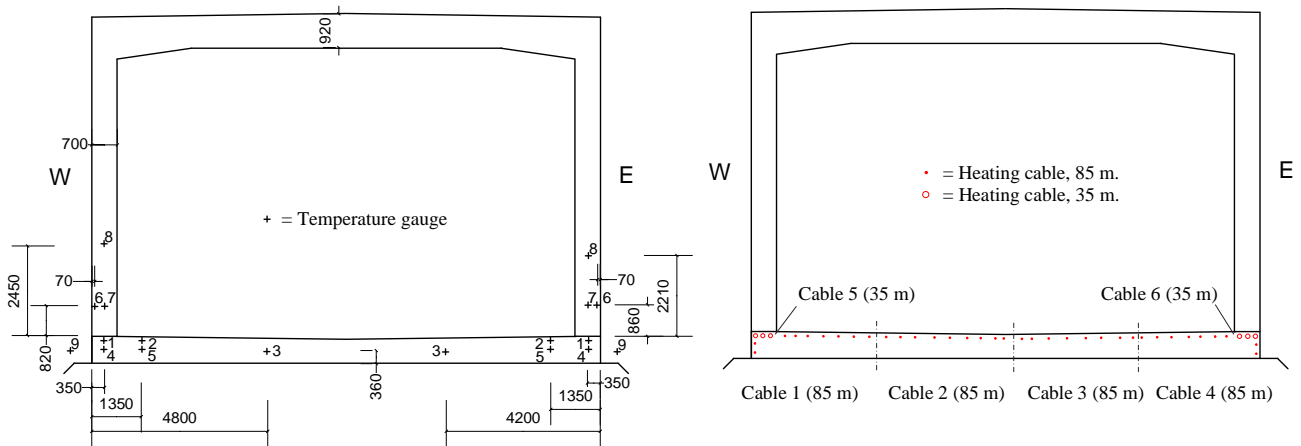


Figur 2.2.1. Huvudmått för analyserad tunnelsektion, samt placering av trådtöjningsgivare.

grundlagd på packad fyllning. I Figur 1 är även placeringen för trådtöjningsgivarna illustrerad. Fyra givare användes, två givare användes för att mäta temperaturrörelsen i väggens längdriktning, betecknade "Main" och två givare placerades vinkelrätt mot väggens längdriktning för att mäta temperaturens påverkan på givarna, betecknade "Reference". Figur 2.2.2 visar en bild av de två olika typerna av använda trådtöjningsgivare.



Figur 2.2.2 Bild av två trådtöjningsgivare, "Main" och "Reference", innan placering på plats för mätning i väggen.



Figur 2.2.3 Inmätning av temperaturgivare och töjningsgivare samt schematisk indelning av värmekablar.

Flera temperaturgivare monterades i bottenplatta och väggar, Figur 2.2.3 visar deras placering. Tio givare användes för att registrera temperaturen i bottenplattan och sex givare i väggarna. Figuren visar även placeringen av sex värmekablar. Då endast den östra väggen sprack spontant, användes de tre västra kablarna för att expandera den delen av bottenplattan för att tvinga fram sprickbildning i den västra väggen.

2.3 Metod; Efterkalkyler av temperatursprickrisken

En grundläggande beräkningsmodell med provade materialmodellparametrar, antagna parametrar för formens värmeledningsförmåga, antagen vindhastighet och med tvångssituation bestämd i arbetet med artikeln om beräkningsmodellen Equivalent Restraint Method användes. Denna modell modifierades vid varje enskild analys för respektive ramben. Modellspecifika parametrar var; initial betongtemperatur, omgivande temperaturförhållanden, modellerade åtgärder (värmematta, värmekablar, isolering), formrivningstid och konstruktionslängd. Beräkningsresultaten resulterade bl.a. i en töjningskvot (momentan töjning / momentan maximal töjning innan brott) som jämfördes med sprickarteringarna.

Beräkningstiden för modellerna spänner mellan 1000 och 1700 timmar, beroende på tiden mellan gjutning av bottenplatta och ramben. För att undersöka hur spänningsnivåerna i rambenen schematiskt avtar med tiden, utan inverkan på årsvariationer, ställdes även beräkningar upp med beräkningstider på 10 000 timmar (ca 1 år och 2 månader). Temperaturmodelleringen av omgivningen gjordes med varierande temperatur, i enlighet med uppmätta temperaturer, fram till ca 50 timmar efter formrivning. Därefter ansattes en konstant temperatur på 2,5°C vilket var en ungefärlig medeltemperatur för en 1-veckasperiod efter formrivning.

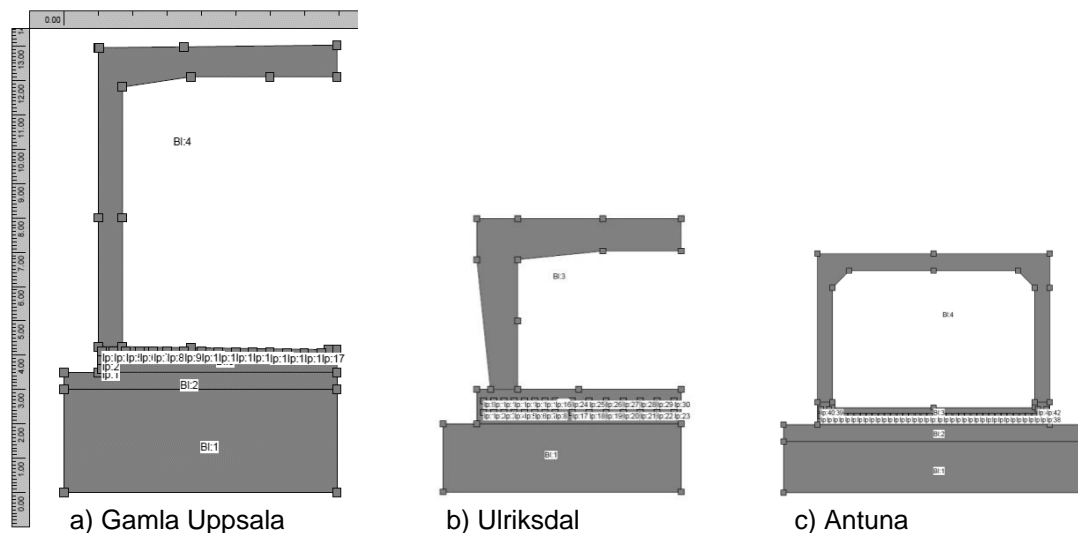
2.4 Metod; Artikel om utvärdering av flera temperatursprickrisikanalyser

Metoden för denna studie kan grovt delas upp i sex delar;

1. Identifiera lämpliga konstruktioner med tillräckligt omfattande byggdokumentation m.a.p. temperaturloggar, betongrecept och dyl.
2. Studera dokumentationen.
3. Studera tillhörande arbetsbeskrivning med föreslagna temperaturspricksbegränsande åtgärder.
4. Upprätta temperatursprickrisksberäkningar, efterkalkyler, baserade på parametrar dokumenterade i byggdokumentationen.
5. Genomföra sprickkartering.
6. Analysera proceduren och pricksäkerheten hos sprickrisksberäkningarna.

Tre betongstrukturer valdes ut till studien; en järnvägstunnel i Gamla Uppsala (2016), en platt-rambro i Ulriksdal (1990) och en platt-rambro i Antuna (1993). Beräkningsuppställningen för temperatursprickrisksanalyserna gjordes i programmet ConTeSt PRO och geometrin visas i figur 2.4.1 och strukturerna generella parametrar är listade i tabell 2.4.1.

Temperatursprickrisksbegränsande åtgärder utfördes vid byggandet av de tre konstruktionerna enligt specifikationer i respektive arbetsbeskrivning. Åtgärderna bestod av att förvärma bottenplattorna inför gjutning av ramben med antingen ingjutna värmekablar eller värmemattor. Uppmätta luft- och betongtemperaturer användes vid efterkalkylerna i ConTeSt Pro.



Figur 2.4.1 Modellerad geometri för de tre studerade platt-ramkonstruktionerna. a) järnvägstunnel b-c) vägtunnlar.

Namn	Konstruktionsår	Längd	Etapplängder (ramben)	Höjd	Tjocklek (ramben)	Referenser
Gamla Uppsala	2014-2016	610 m	10,0 m	9,5 m	0,7 m	[9-10]
Ulriksdal	1989-1990	41,6 m	10,4 m	6,0 m	0,8-1,2 m	[11]
Antuna	1993	35 m	35 m	5,0 m	0,45 m	[11]

Tabell 2.4.1 Analyserade konstruktioner.

2.5 Metod; Sprickkartering

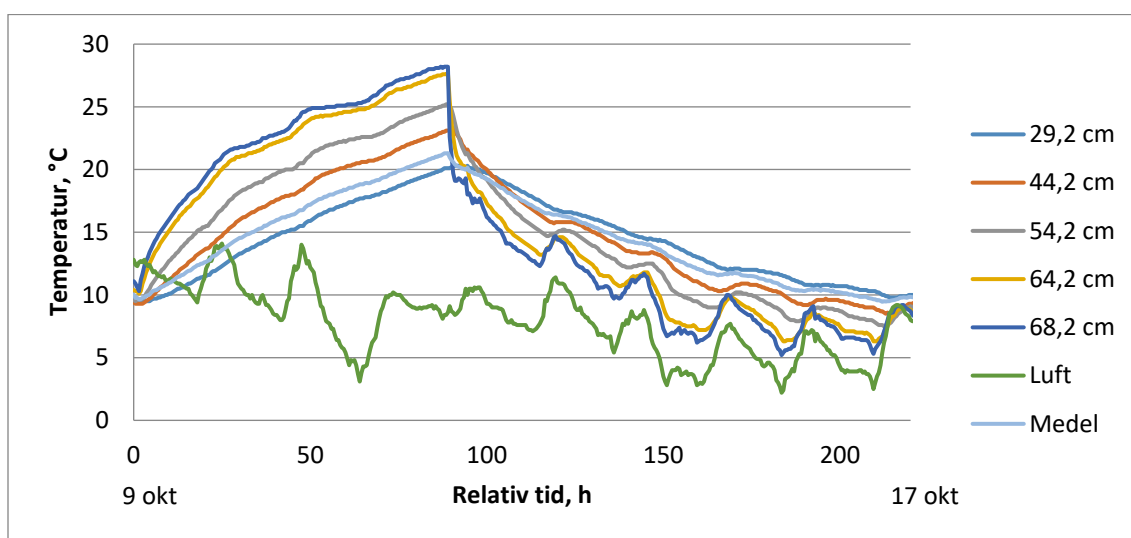
Vid projektet Gamla Uppsalas järnvägstunnel gjordes flera visuella sprickkarteringar vid olika tidpunkter. Som dokumentationsunderlag användes en A4-mall för en sidovy av bottenplatta, ramben och valv, där anteckningar om datum och sprickor fördes. Insidan på varje ramben synades efter sprickor och ungefärlig utbredning och sprickvidd dokumenterades för sprickor med vidd på 0,1 mm eller mer. Sprickor där vidden är 0,1 mm eller mer antas kunna vara genomgående sprickor, och därmed vara möjliga genomgående temperatursprickor. De dokumenterade sprickorna gavs ett löpnummer (internt för varje gjutetapp) så att en tydlig referering kunde ges i textform. Övriga sprickor, småsprickor, ritades aningen in i mallen eller angavs som en totalsiffra. Sprickkartering har utförts i omgångar under perioden 2015-03-11 t.o.m. 2017-05-04.

3 RESULTAT

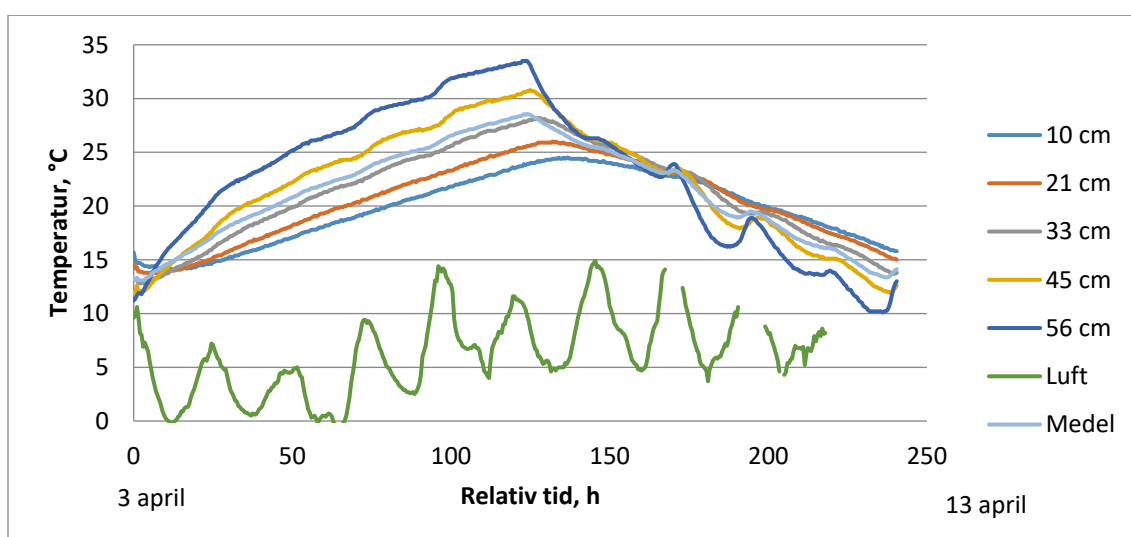
Redovisning av samtliga eller utvalda resultat från de underliggande arbetena återfinns vid underliggande rubriker.

3.1 Resultat; Examensarbete om värmemattor

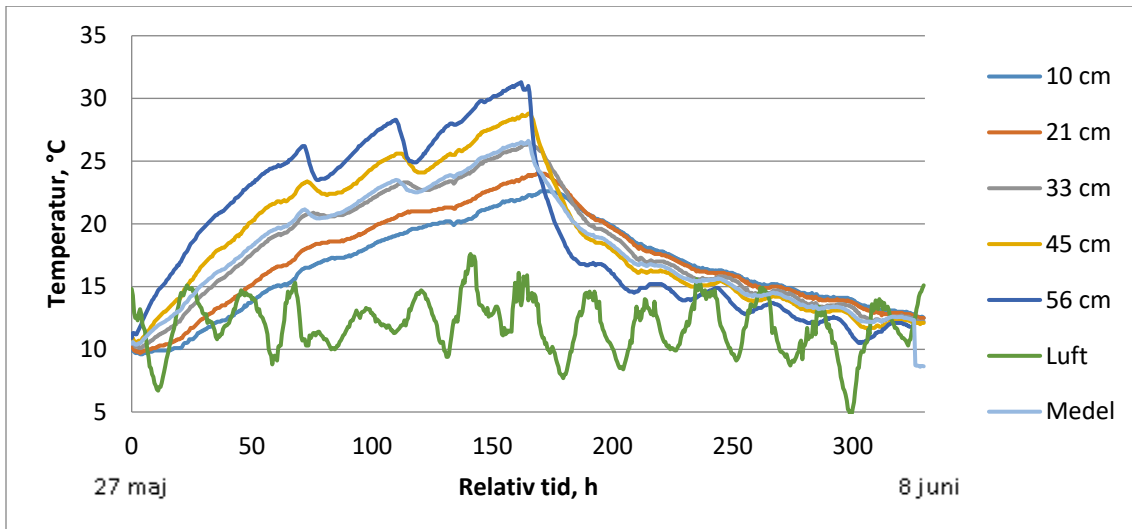
Temperaturförloppen vid försök 1 för de västra mätpunkterna i betongen presenteras i figur 3.1.1. I figur 3.1.2 visas de uppmätta temperaturerna för den västra mätserien vid försök 2. I figur 3.1.3 visas de uppmätta temperaturerna för den östra mätserien vid försök 3. De temperaturförlopp som uppmättes vid försök 4 (valv) visas i figur 3.1.4.



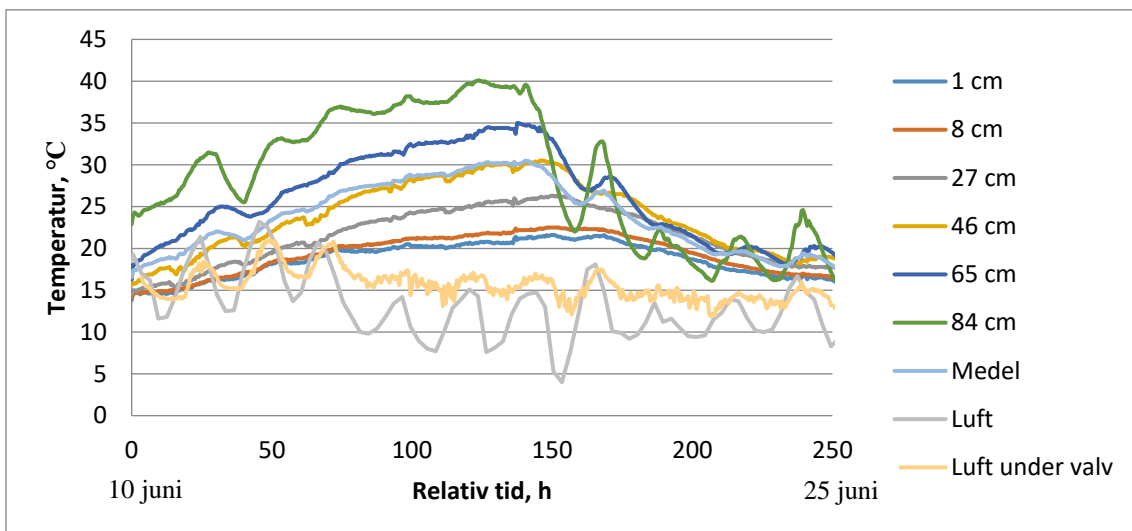
Figur 2.1.1 Temperaturutveckling på olika avstånd från underkant betong. Försök 1, västra mätpunkter.



Figur 2.1.2 Uppmätt temperaturutveckling i betongen på olika avstånd från underkant betong. Försök 2, västra mätpunkter.

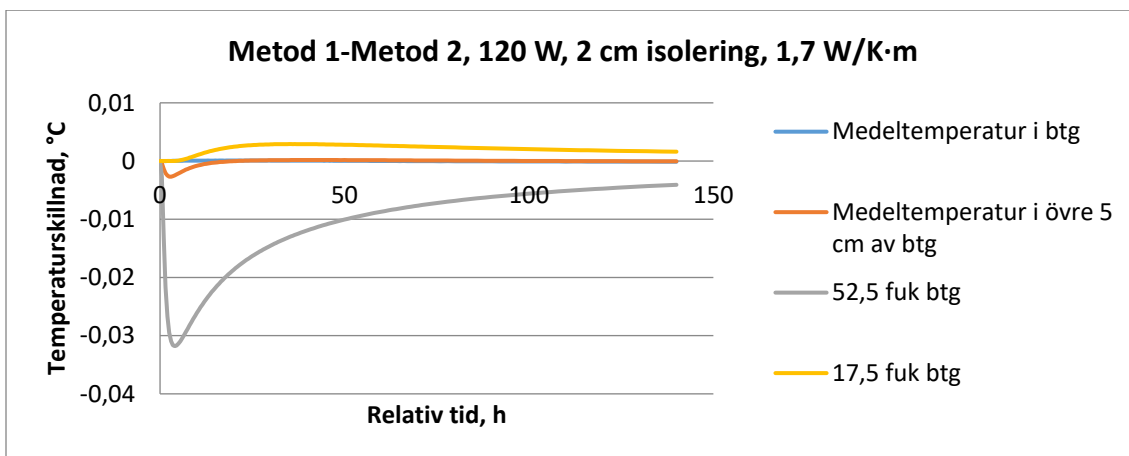


Figur 3.1.3 Uppmätt temperaturutveckling i betongen på olika avstånd från underkant betong. Försök 3, östra mätpunkter.

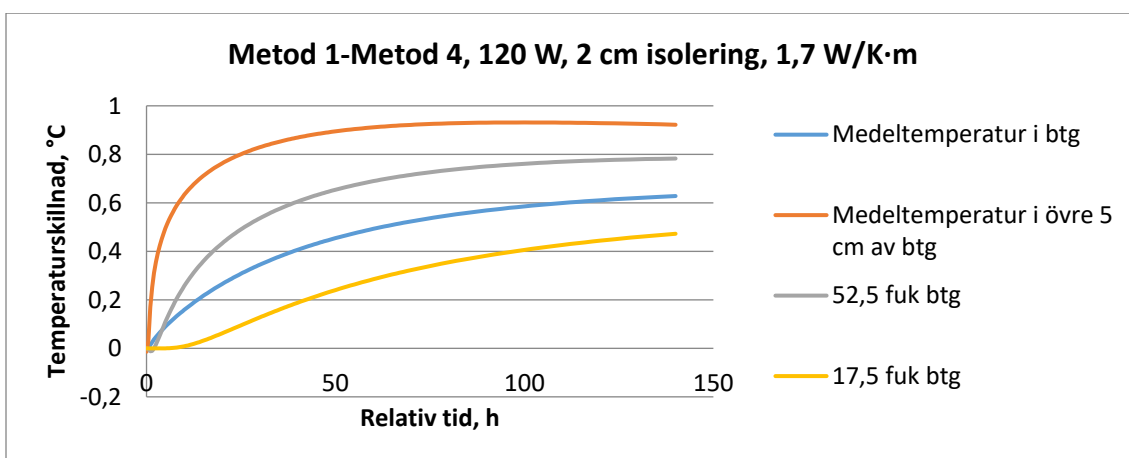


Figur 3.1.4 Uppmätt temperaturutveckling i betongen på olika avstånd från underkant betong. Försök 4, västra mätpunkter.

Resultatet från jämförelsen mellan de fyra modelleringsmetoderna visade att modellering enligt metod 1, 2 och 3 inte gav någon skillnad i temperaturförlopp för de jämförda mätpunkterna. I figur 3.1.5. visas vilken skillnad i temperatur som metod 2 gav i förhållande till metod 1. 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 3.1.6. för punkten 52,5 cm från underkant kan möjligen vara kopplat till rutnätets uppbyggnad.



Figur 3.1.5 Skillnad i temperatur mellan metod 1 och 2.

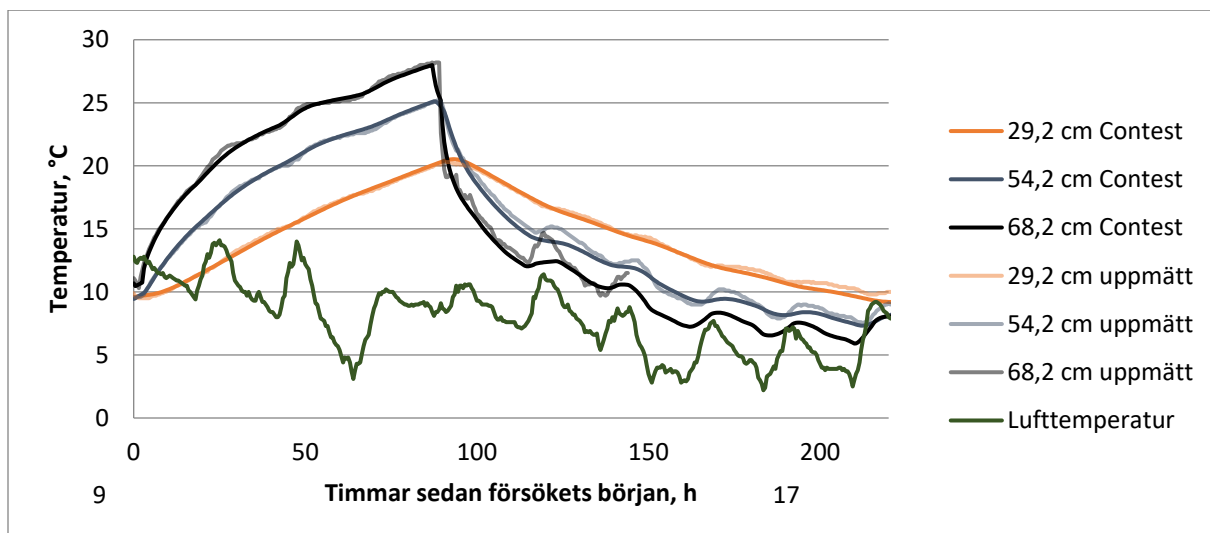


Figur 3.1.6 Skillnad i temperatur mellan metod 1 och 4.

Metod 4 skiljer sig från de övriga tre 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.

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.

En jämförelse mellan mätta och beräknade temperaturer för försök 1 där betongtäckmatta lagts på värmemattorna ses i figur 3.1.7. Modelleringsmetod 1 användes vid beräkning av temperaturen. Fler figurer för de andra försöken redovisas i examensarbetet ”Temperatursprickor i betong”, och en sammanställning finns i tabell 3.1.1.



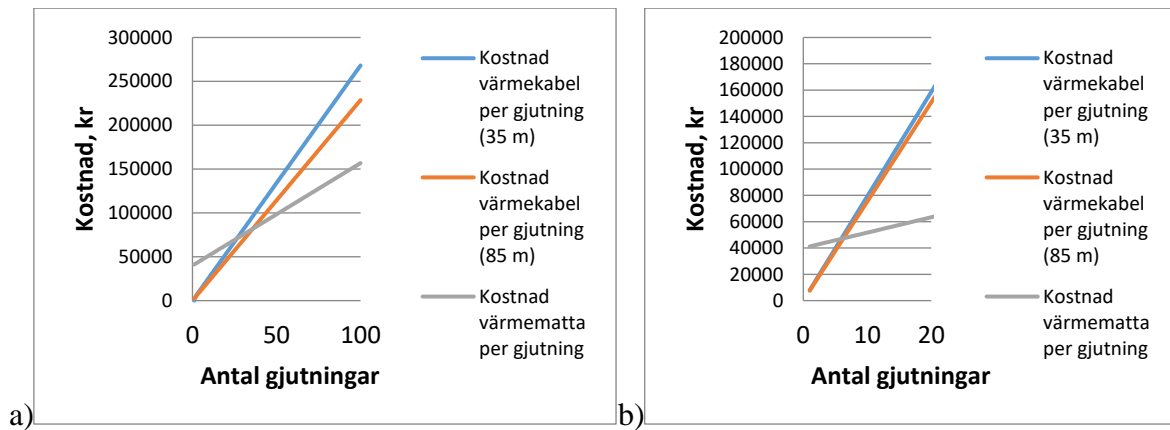
Figur 3.1.7 Grundmodellen, men med $\lambda_{iso} = 0,04 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ och $P_k = 92 \text{ W/m}^2$. Försök 1, isolerad.

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

Tabell 3.1.1 Sammanställning av de parametrar som gav bäst överensstämmelse med uppmätta resultat. Mätserier med extra isolering.

Resultaten talar för att det är en god idé att vid modelleringar av värmemattan i Contest tillföra effekten 90 W/m^2 till randen och att ange värmekonduktiviteten $0,04 \text{ W/m}\cdot\text{K}$. Dessa generella värden är på den säkra sidan eftersom de för alla mätserier gav en sämre uppvärmning än vad som uppmätts vid försöken.

Uppskattningen av de ekonomiska förhållanden mellan användandet av värmematta jämfört med värmekablar åskådliggörs i figur 3.1.8. Figuren visar att värmekablar är ett bra alternativ då ett mindre antal gjutningar skall göras då den inledande engångskostnaden det innebär att köpa in värmemattorna att värmekablar är relativt hög. Överstiger antalet gjutningar ungefär 30 stycken blir värmemattorna lönsamma enligt den gjorda beräkningen, se figur 3.1.8.a. 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 3.1.8.b.

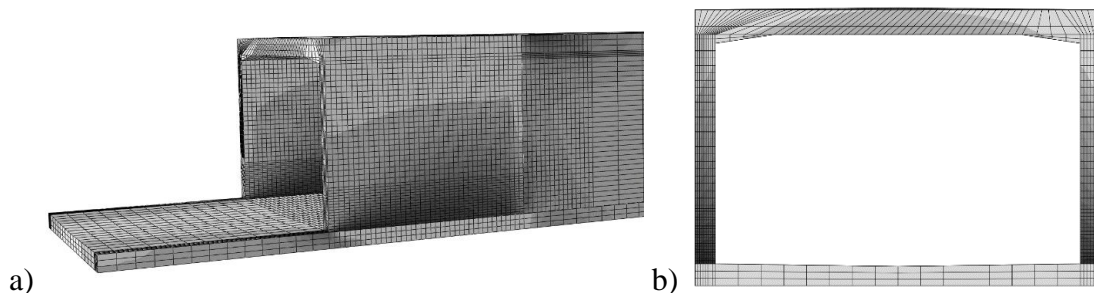


Figur 3.1.8 a) Ekonomisk jämförelse mellan värmekablar och värmematta som sprickbegränsande åtgärd. b) Ekonomisk jämförelse mellan värmekablar och värmematta som sprickbegränsande åtgärd med fler arbetstimmar för fallet med värmekablar.

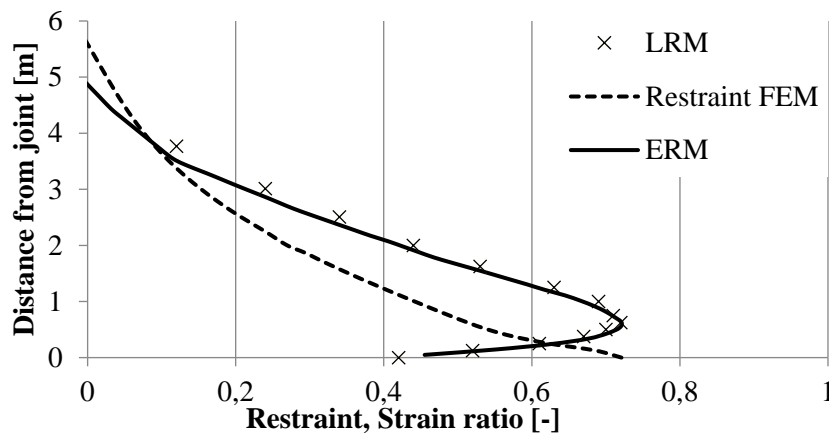
3.2 Resultat; Artikel om beräkningsmodellen Equivalent Restraint Method

Materialparametrar: Utvärderade materialparametrar presenteras i appendix A.2.

Upprättande av ERM modell: Figur 3.2.1 visar resultatet av tvångsberäkningen för de analyserade väggarna samt i det tvärsnitt där högst tvång beräknats. I Figur 3.2.2 visas tvångsprofilen, beräknade töjningskvoter för flera LRM-modeller och töjningskvotsprofil beräknad med ERM-modell för det analyserade tvärsnittet, Figur 3.2.1 b).



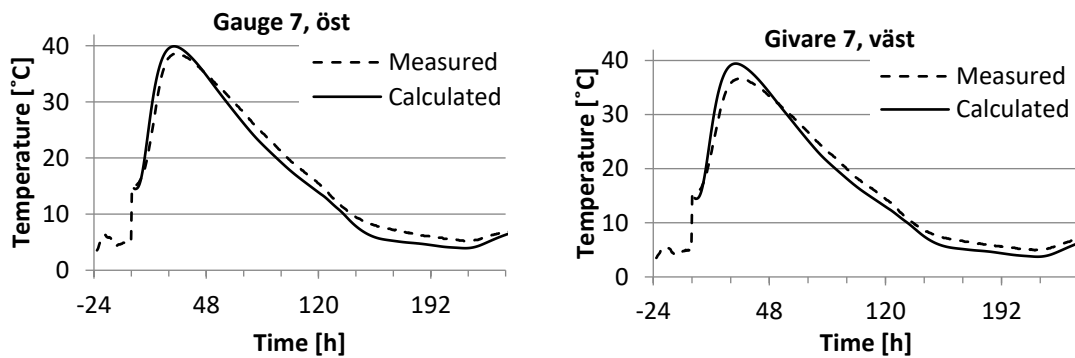
Figur 3.2.1 Tvång, uppskattat med hjälp av elastiska 3D FEM-beräkning. Maximalt tvång är 0.72. a) tvång längs tunnels längdriktning. b) tvång i mitten av analyserad tunnelsektion.



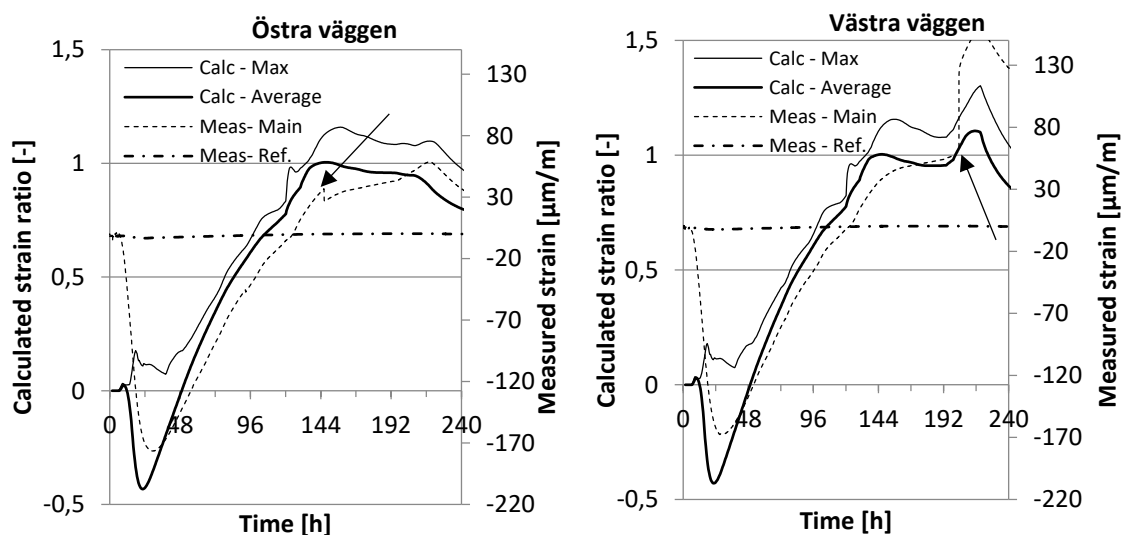
Figur 3.2.2 Beräknat tvång, töjningskvoter beräknade m h a LRM-modeller och anpassad ERM-tvångsprofil.

Temperatur: Temperaturmätningarna startade 29 respektive 2 dygn före gjutning av västra och östra väggen. Gjutning av bottenplattan skedde 28 dygn innan gjutning av väggarna. I Figur 3.2.3 görs en jämförelse av beräknade och uppmätta temperaturer för givare 7 (se Figur 2.2.3) som är placerad i närheten av det område där högst töjning förväntas, nära töjningsgivarna. I figurerna används tidpunkten för start av väggjutningarna som nollpunkt. Skillnaden för beräknad och uppmätt temperatur för givare 7 är 2.8°C för den västra väggen och 1.3°C för den östra.

Töjning: Den östra väggen sprack spontant efter 146 timmar efter gjutstart, vilket kan ses i Figur 3.2.4. som en minskning av töjningen. Sprickan uppträdde strax utanför mätområdet. För att få den västra väggen att spricka användes de i bottenplattan ingjutna värmekablarna. Bottenplattans vertikala yta isolerades med 10 mm cellplast innan aktivering av kablarna. De aktiverades 199 timmar efter gjutstart och 5 timmar senare (204 timmar efter gjutstart) sprack väggen. Sprickan uppträdde över västra väggens töjningsgivare, varvid en kraftig och snabb töjning uppmättes.



Figur 3.2.3 Beräknade och uppmätta temperaturer för givare 7 i östra och västra väggen.



Figur 3.2.4 Beräknade töjningskvoter m h a ERM-modeller och uppmätta töjningar för den östra och västra väggen. Pilarna indikerar tidpunkt för mätt sprickbildning.

3.3 Resultat; Efterkalkyler av temperatursprickrisken

I tabell 3.3.1 presenteras de beräknade töjningskvoterna, η , för 36 analyserade ramben. I tabellen redovisas även datum för gjutstart, om rambenet gjutits mot tidigare etapp (se Etappnummer), när formen togs bort, vilken sprickriskbegränsande åtgärd som vidtagits (endast värmekablar eller kablar plus värmemattor) med start och stopptider, när isoleringen togs bort, uppmätt betongtemperatur vid gjutstart, medelvärde för lufttemperaturen, uppmätt maximal betongtemperatur, ansatt initial betongtemperatur i beräkningen (för att matcha mätt och beräknad maximal betongtemperatur), beräknad maximal betongtemperatur, beräknad töjningskvot, totala antalet sprickor lika med eller bredare än 0,1 mm vid sista karteringstillfället, antalet sprickor under 0,1 mm vid sista karteringstillfället.

Formrivningstiden anges ibland med två tider, den första avser då flyttandet av formvagn och den andra tiden rivning av dubbling. Angivna start- och stopptider för värmekablar och värmemattor är givna som starttid innan gjutstart respektive stopptid efter gjutstart.

Hur den beräknade töjningskvoten avtar med tiden för två analyserade ramben redovisas i figurerna 3.3.1 och 3.3.2. I figurerna görs en medelvärdesbildning, för kommentarer kring den se kapitel 3.4.

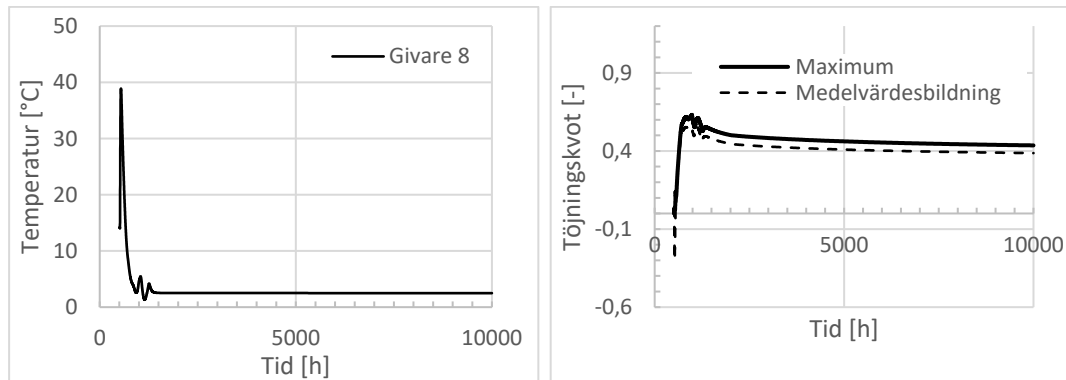
I figur 3.3.1 visas resultaten för beräkningarna över temperatur- och töjningsutvecklingen för östra rambenet i gjutetapp 9.1.2. Den maximala töjningskvoten var 0.55 och inträffade 330 timmar eftergjutstart (835 timmar in i beräkningen), vid beräkningstidens slut var töjningskvoten 0.39.

I figur 3.3.2 visas resultaten för beräkningarna över temperatur- och töjningsutvecklingen för östra rambenet i gjutetapp 16.2.1. Den maximala töjningskvoten var 1.06 och inträffade 336 timmar eftergjutstart (865 timmar in i beräkningen), vid beräkningstidens slut var töjningskvoten 0.67.

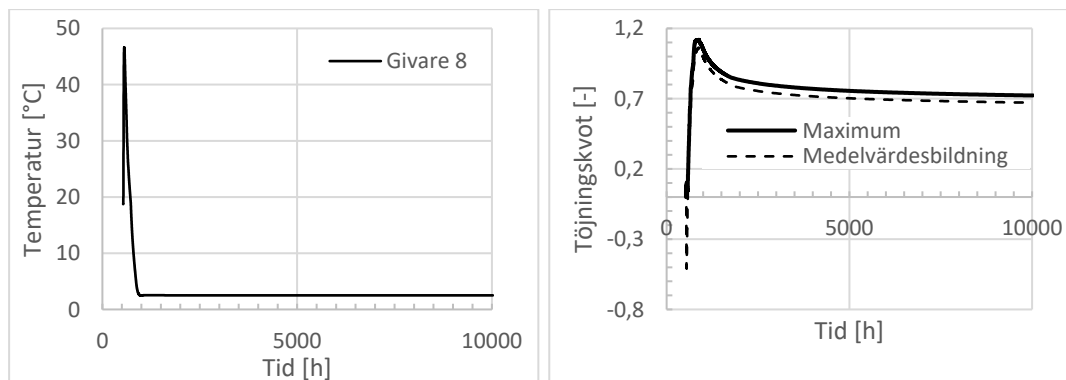
Gjutstart	Etapp- nr	Sekvens	Förutsättningar				Uppmätt			Beräknat			Kartering		
			Formriv	Kablar	Mattor	Isolering	T _{BTG}	T _{LUFT}	T _{MAX}	T _{BTG}	T _{MAX}	η	Sprickor	Småsprickor	
			[h]	[h / h]	[h / h]	[h]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[-]	[#, > 0.1 mm]	[#]	
15-02-12	2	2.1.2	Öst	100	192 / 48	192 / 48	48	16.3	3	42.6	19.5	42.3	0.17		18
15-02-12	2	2.1.2	Väst	100	192 / 48	192 / 48	48	15.2	3	43.8	20	42.8	0.17		2
15-03-19	4	2.2.2	Öst	104	140 / 24	140 / 24	24	16.4	3	43.5	21.5	43.1	0.69	7	6
15-03-19	4	2.2.2	Väst	104	140 / 24	140 / 24	24	17.1	3	45.1	20	44.5	0.73	3	10
15-04-01	1	3.1.1	Öst	192	93 / 53	48 / 53	53	15.6	5	41.9	15.6	41.6	0.42	1	11
15-04-01	1	3.1.1	Väst	192	93 / 53	93 / 53	53	14.8	5	41.2	14.8	39.9	0.31	1	12
15-04-17	4	3.1.2	Öst	147 / 315	159 / 38	159 / 38	38	15.1	8	40.8	14.9	41	0.68	3	5
15-04-17	4	3.1.2	Väst	147 / 315	159 / 38	159 / 38	38	14.9	8	40.6	14.9	41	0.61	1	1
15-12-09	2	5.1.2	Öst	146	158 / 24	...	24	16.2	2	42.9	17.5	42.7	0.93	2	17
15-12-09	2	5.1.2	Väst	146	158 / 24	...	24	16.6	2	43.6	18.5	43.6	0.97	3	25
15-12-22	3	5.2.1	Öst	314	160 / 32	160 / 32	32	17.4	-2	45.3	19.5	45	0.88 / 1.06	1	12
15-12-22	3	5.2.1	Väst	314	160 / 32	160 / 32	32	17.9	-2	46.1	20.3	45.8	0.90 / 1.08	1	21
16-01-26	4	5.2.2	Öst	78 / 173	310 / 48	310 / 48	48	19.2	5	45.7	20.8	45.7	0.86	1	10
16-01-26	4	5.2.2	Väst	78 / 173	...	310 / 48	48	18.6	5	45.5	20.4	45.3	1.01	1	5
15-11-18	3	6.1.2	Öst	121	...	...	...	14.6	2	39.8	14.9	40.4	1.05	1	12
15-11-18	3	6.1.2	Väst	121	...	...	...	14.9	2	39.8	14.9	39.9	1.01	1	6
15-11-04	2	6.2.1	Öst	122	...	138 / 30	30	16	10	...	16	42.1	0.62	1	15

15-11-04	2	6.2.1	Väst	122	138 / 0	138 / 30	30	16	10	41.5	16	42.1	0.63		17
15-02-16	1	9.1.2	Öst	506	70 / 48	21 / 49	54	18.3	2	38.7	14.4	38.9	0.55	2	1
15-02-16	1	9.1.2	Väst											2	7
15-03-03	1	9.2.1	Öst	170 / 890	111 / 26	111 / 26	26	16.5	3	40.1	14.4	39.7	0.84	3	10
15-03-03	1	9.2.1	Väst	194 / 890	111 / 26	111 / 26	26	17.8	3	39.6	14.4	39.7	0.83	1	14
15-05-13	2	10.1.2	Öst	126	117 / 27	117 / 27	27	16.9	11	44.6	19.8	44.4	0.82	2	11
15-05-13	2	10.1.2	Väst	126	117 / 27	117 / 27	27	17.4	11	44.9	20.3	44.9	0.88	3	17
15-02-24	2	12.1.2	Öst	120	190 / 48	190 / 48	48	14.2	2	40.2	16	40.8	0.54		7
15-02-24	2	12.1.2	Väst	120	190 / 48	190 / 48	48	13.2	2	38.8	14	38.9	0.47	2	8
16-03-07	3	12.2.1	Öst												1
16-03-07	3	12.2.1	Väst	72	157 / 48	157 / 48	48	18	5	43	18	43.2	0.51		2
16-03-02	4	13.1.1	Öst	121	186 / 48	186 / 48	48	14.7	2	39.3	15.4	39.4	0.71	3	6
16-03-02	4	13.1.1	Väst	121	186 / 48	186 / 48	48	16.7	2	41.3	17.3	41.2	0.69		7
15-03-26	1	14.1.2	Öst	123 / 435	62 / 51	62 / 51	51	14.4	4	42	16.4	41.8	0.53		16
15-03-26	1	14.1.2	Väst	123 / 435	62 / 51	62 / 51	51	15	4	40	14.4	39.9	0.48		2
15-04-30	1	15.1.1	Öst	146 / 314	...	...	...	17.6	10	42.6	16.6	43	0.75	6	13
15-04-30	1	15.1.1	Väst	146 / 314	...	...	...	17.2	10	42.4	16	42.6	0.73	1	7
15-08-21	1	16.1.1	Öst	75	...	...	...	22.3	17	51.9	24.3	51.6	0.74	1	2
15-08-20	1	16.1.1	Väst	99	...	...	...	21.6	15	47.3	20.3	48.1	0.72	2	7
15-09-25	3	16.2.1	Öst	195	...	...	...	19	11	47.7	20.1	47.8	1.04	1	10
15-09-25	3	16.2.1	Väst	195	...	...	...	18.3	11	46.4	18.8	46.6	1.02	1	6

Tabell 3.3.1 Sammanställning av efterkalkyler för töjningskvoten, η , hos 36 ramben.



Figur 3.3.1 Beräknade temperatur- och töjningskvotsförlopp för östra rambenet i 9.1.2 vid beräkningstid på 10 000 timmar. För position av givare 8, se figur 2.2.3.



Figur 3.3.2 Beräknade temperatur- och töjningskvotsförlopp för östra rambenet i 16.2.1 vid beräkningstid på 10 000 timmar. För position av givare 8, se figur 2.2.3.

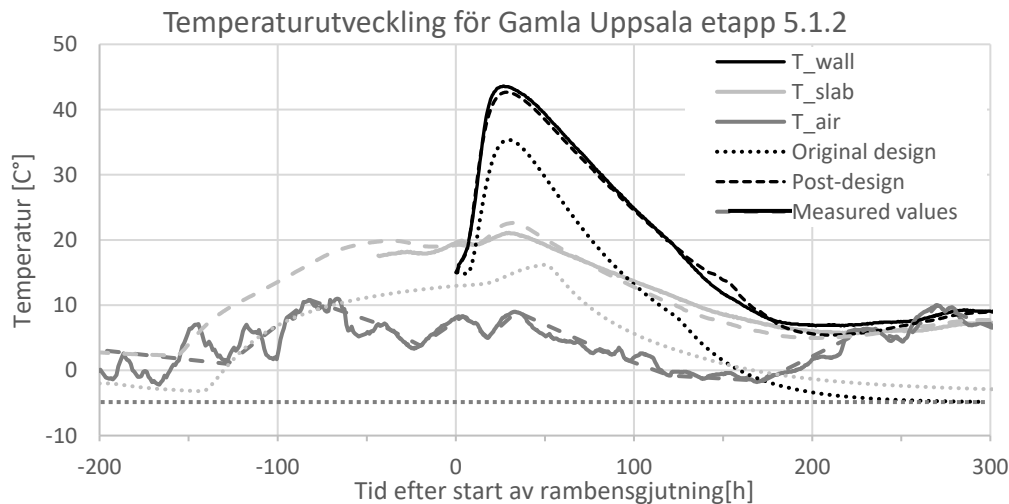
3.4 Resultat; Artikel om utvärdering av flera temperatursprickriskanalyser

Nitton beräkningsuppställningar för efterkalkyler gjordes de tre konstruktionerna och resultatet visas i tabell 3.4.1.

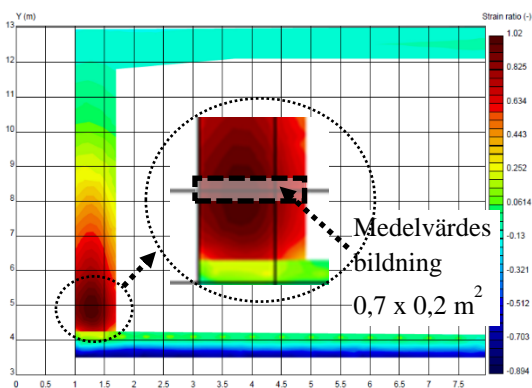
Som ett exempel visas i figur 3.4.1 luft-, rambens- och bottenplattstemperaturerna för gjutetapp 5.1.2 i Gamla Uppsala. I figuren anges beräknade temperaturer framtagna av den åtgärdsdimensionerandeberäkningen (original design), temperaturer beräknade i efterkalkylen (post-design) och mätt temperaturer (measured values).

Etapp	Exponerings klass	η_{exp}	$\eta_{förekalkyl}$	$\eta_{efterkalkyl}$	Temp. sprick >0,1 mm	Sprickvidd, mm	Antal småsprickor $\leq 0,1$ mm
Gamla Uppsala							
3.1.1	XC4/XF4 Testade materialparametrar	0,90	0,57	0,58	1	0,20	25
3.1.2			0,77	0,55	0	-	6
3.2.1			0,77	0,97	1	0,20	30
5.1.1			0,77	0,67	0	-	23
5.1.2			0,77	0,90	1	0,30	38
5.2.1			0,77	1,01	1	0,20	27
5.2.2			0,77	0,75	1	0,30	11
6.1.1			0,77	0,65	1	0,20	28
6.1.2			0,77	1,04	2	0,40	15
6.2.1			0,77	0,69	0	-	31
8.1.1			0,57	0,49	0	-	13
9.1.2			0,77	0,81	4	0,40	8
9.2.2			0,77	0,74	2	0,20	32
10.2.2			0,77	0,84	3	0,37	17
Ulriksdal							
1	XD3/XS3 360 < C < 430	0,70	0,70	0,693	1	0,4	-
2			0,70	0,461	0	-	-
3			0,70	0,438	0	-	-
4			0,70	0,809	3	0,27	-
Antuna							
1	XD3/XS3	0,70	0,70	0,55	0	-	-

Tabell 3.4.1 Sammanställning av beräknade töjningskvoter från före- och efterkalkyler samt karterade sprickor.



Figur 3.4.1 Mätta, för-beräknade och efterkalkylerade temperaturer för bottenplattor, ramben och luft för gjutetapp 5.1.2 i Gamla Uppsala tunneln.



Figur 3.4.2 Töjningskvotsnivåer och medelvärdesbildningsområde för ett tvärsnitt i gjutetapp 5.1.2 vid Gammal Uppsalas järnvägstunnel.

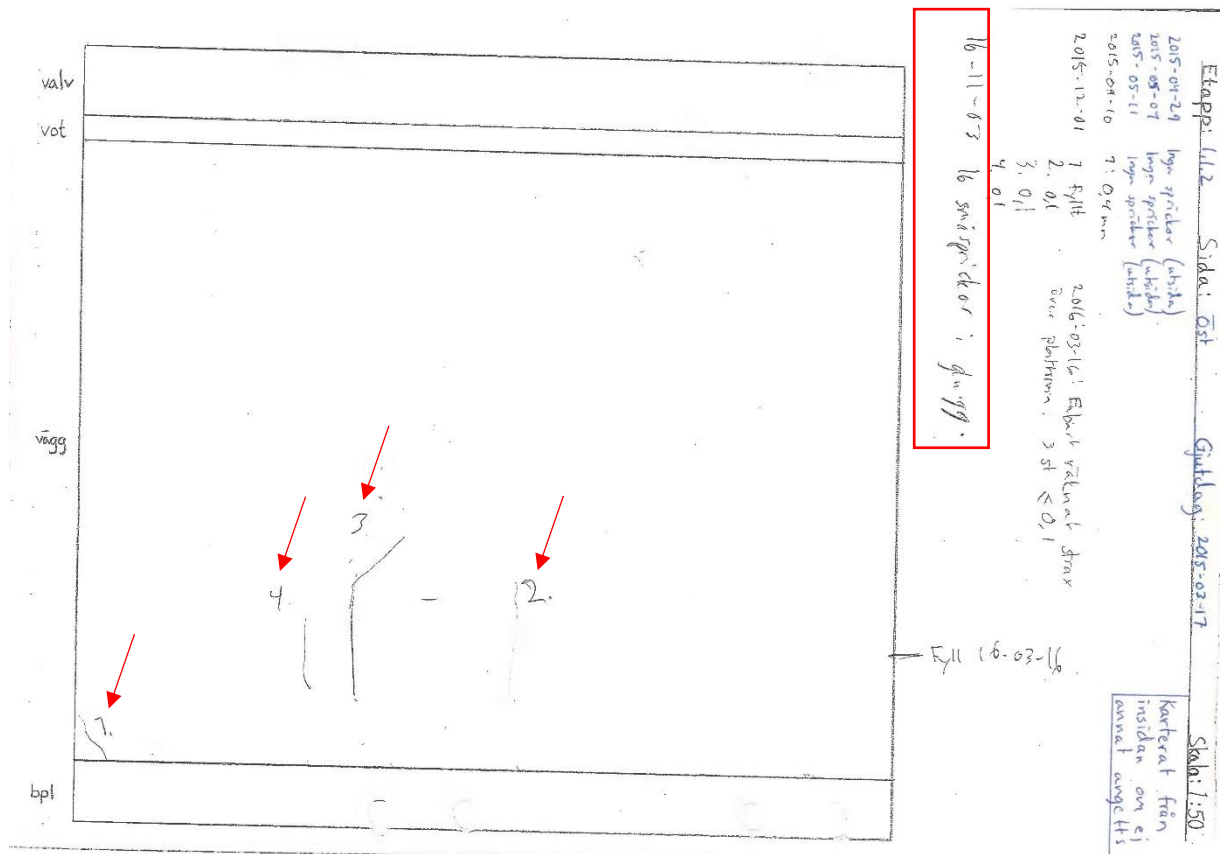
Den genomgående temperatursprickbildningen antas initieras då ett medelvärde av töjningskvoten över en begränsad del av tvärsnittet överskrider 1. För att analysera töjningskvotsnivån vid det mest ansatta området i beräkningsmodellen, görs en medelvärdesbildning, se figur 3.4.2. De maximala medelvärdesbildade töjningsnivåerna vid den åtgärdsdimensionerandeberäkningen och för efterkalkylen beräknades till $\eta = 0,77$ respektive $\eta = 0,90$. Den mest utmärkande skillnaden mellan de olika beräkningarna är att generella materialparameter användes vid den åtgärdsdimensionerandeberäkningen men i efterkalkylen användes testade parametrar. Även den initiala betongtemperaturen och omgivande temperatur skiljer vid de två olika beräkningarna.

3.5 Resultat; Sprickartering

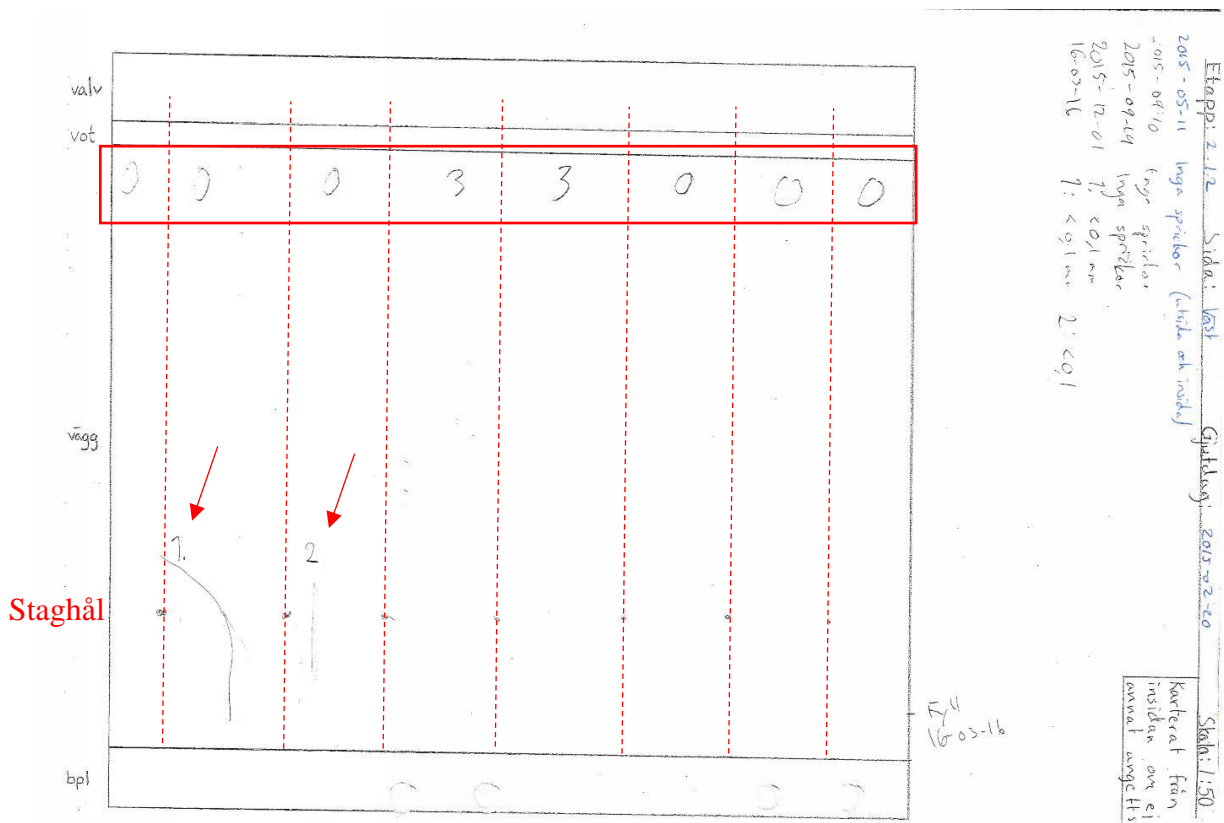
Resultatet från sprickartering återfinns i appendix A.3. Samtliga ramben uppvisar sprickor. Alla ramben hade inte spruckit vid första karteringen, utan sprickbildningen för flera ramben har uppkommit upp till året efter gjutning. De allra flesta sprickorna är vertikalt orienterade med några få undantag.

En översiktlig sammanställning av de genomförda karteringarna för respektive ramben återfinns i tabell A.4.1 i appendix A.4.

I figur 3.5.1 och 3.5.2. visas två exempel på genomförd kartering, det förra exemplet visas en kartering där sprickor över 0,1 mm karterats (röda pilar) och sprickor under 0,1 mm angetts som en totalsiffra vid kartering utförd 2016-11-03 (röd rektangel). I det senare exemplet visas en kartering där sprickor över 0,1 mm karterats (röda pilar) och antalet sprickor under 0,1 mm angetts inom området mellan två staghål (röda streckade linjer, röd rektangel).



Figur 3.5.1 Exempel på kartering, östra rambenet i gjutetapp 1.1.2.



Figur 3.5.2 Exempel på kartering, västra rambenet i gjutetapp 2.1.2.

4 ANALYS

I de fem delarbetena är det visat att;

- Värmemattan är lämplig som en temperaturspricksbegränsande åtgärd, åtminstone för väggar gjutna på bottenplattor med tjocklek upp till minst 750 mm.
- Värmemattans uppvärmningseffekt på temperaturen i bottenplattan kan beräknas med tillfredställande precision.
- Samtliga väggar där beräknad töjningskvot är $>70\%$ uppvisar sprickor med sprickvidder $\geq 0,1$ mm. Detta oberoende om vidtagen temperaturspricksbegränsande åtgärd varit värmematta eller värmekabel.

Flera av rambenet har analyserats m.a.p. teoretiska töjningskvoter vid två tillfällen. Resultatet från genomförandet av efterkalkyler av temperatursprickrisker redovisas i tabell 3.3.1 (och tabell A.3.1), och för utvärdering av flera temperatursprickriskanalyser ges i tabell 3.4.1. I beräkningarna som ligger till grund för resultatet i tabell 3.3.1 har en mer noggrann modellering av ingående parametrar gjorts, speciellt m.a.p. luftens temperaturvariationer, än i tabell 3.4.1.

4.1 Analys; Examensarbete om värmemattor

Analys över resultatet från jämförelsen mellan modelleringsmetoder ger att vitsen av 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.

Resultaten från jämförelserna mellan modelleringar och försök vid bestämmandet av ingående parametrar talar för att det är en god idé att vid modelleringar av värmemattan i Contest tillföra effekten 90 W/m^2 till randen och att ange värmekonduktiviteten $0,04 \text{ W/m}\cdot\text{K}$. Dessa generella värden är på den säkra sidan eftersom de för alla mätserier gav en sämre uppvärmning än vad som uppmätts vid försöken.

4.2 Analys; Artikel om beräkningsmodellen Equivalent Restraint Method

En anmärkningsvärt god överensstämmelse mellan beräknad och mätt tidpunkt för genomgående sprickbildning i den västra och östra väggen kan ses i resultatdelen. Den östra väggen sprack cirka ett dygn efter formrivning. Skillnaden mellan beräknad och uppmätt tidpunkt för genomgående sprickbildning var en timme. För att den västra väggen skulle spricka krävdes användning av de i bottenplattan ingjutna värmekablarna. Skillnaden mellan beräknad och uppmätt tidpunkt för genomgående sprickbildning var två timmar.

Många faktorer som spelar in på risken att sprickor ska uppkomma och det är ofta mycket svårt att modelleringsmässigt ansätta adekvata värden för alla faktorer. Detta medför en modelleringsosäkerhet och en större noggrannhet hos följande faktorer skulle öka precisionen hos beräkningsmodellens uppskattning av temperaturer ytterligare; initial betongtemperatur, vindhastighet runt formen, värmeledningsförmågan för formen, värmekonduktiviteten för betongen samt utökad temperaturmätning i betongen och utanför formen. Den initiala betongtemperaturen i modellen ska representera medeltemperaturen för betongen under hela fyllningsprocessen. I detta fall pågick gjutningen under flera timmar och flera lass med varierande temperatur behövdes. Men då ingen detaljerad dokumentation angående fyllningsprocessen finns att tillgå användes den temperatur som givare 7 uppmätte vid sin första kontakt med betong. Det är viktigt att påpeka att temperaturen i betongen potentiellt kan variera flera grader i alla riktningar runt givaren, vilket gör att uppskattningen av initial betongtemperatur kan vara mindre representativ än önskat. Endast en grads skillnad ger märkbar effekt på beräknad töjningskvot. Ytterligare är vinden runt formen en viktig faktor när det gäller betongens avsvalnande. Ingen givare för vindmätning fanns på plats, men vinden varierade markant över tid och position runt formen. Osäkerheten kring vindhastigheten tillsammans med att inget test för formens värmeledningsförmåga genomförts gör formens isolerande förmåga till en osäkerhetsfaktor. Detsamma gäller för betongens värmekapacitet. En ökad temperaturmätning i den unga betongen och kring form hade kunnat användas i beräkningsmodellen för att på ett mer säkert sätt ansätta initial betongtemperatur samt randtemperaturer.

Trots flera osäkerheter i ingående beräkningsfaktorer har i detta fall ERM-modellen kunnat uppskatta töjningen hos väggarna med hög precision. Slutsatsen blir att ERM-modellen lyckas uppskatta tvånget på ett tillfredställande vis.

4.3 Analys; Efterkalkyler av temperatursprickrisken

En beskrivning av när de olika sprickorna uppstått för respektive ramben återfinns i tabell A.4.1 i appendix A.4.

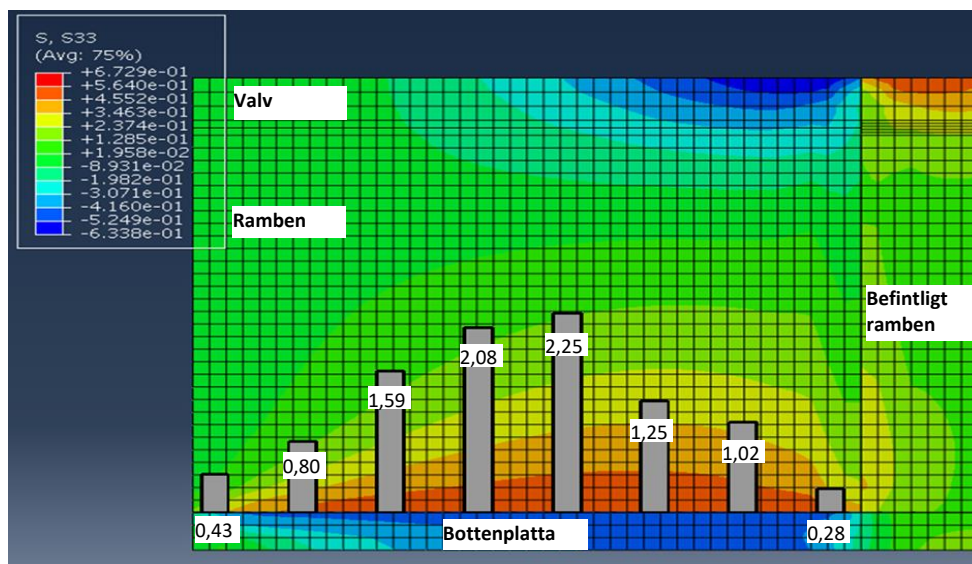
Samtliga väggar där beräknad töjningskvot är >70% uppvisar sprickor med sprickvidder $\geq 0,1$ mm. Detta oberoende om vidtagen temperatursprickbegränsande åtgärd varit värmematta eller värmekabel

Analys av den långsiktiga töjningskvotsutvecklingen ger att den teoretiska krypningen i betongen för de två beräknade exemplen är som störst fram till ca 2000 timmar in i beräkningen (ca 2 månader efter gjutstart), för att sedan avta märkbart. Krypningens effekt i beräkningarna beroende på den materialmodell som används. I detta fall utgör åtta kopplade Maxwell-element den mekaniska modellen.

4.4 Analys; Artikel om utvärdering av flera temperatursprickriskanalyser

I tabell 3.4.1 visas att alla ramben har spruckit där töjningskvoten, beräknade i efterkalkylerna, överskrider 70%. Uppsprickning har även skett för några ramben där en lägre töjningskvot beräknats. Från denna observation kan relevansen av spricksäkerhetsnivåerna i AMA Anläggning diskuteras, då de spänner från 60 till 95% beroende på exponeringsklass och använda beräkningsparametrar. I detta avseende finns ett behov av en utökad studie där fler konstruktioner ingår för att kunna göra rättvisande slutsatser.

Sprickkarteringen av 144 ramben vid Gamla Uppsalas järnvägstunnel påvisar ett tydligt samband mellan tvångsgraden och antalet dokumenterade sprickor, se figur 4.4.1.



Figur 4.4.1 Illustration över förhållandet mellan beräknat tvång och frekvensen av sprickor under 0,1 mm. Siffrorna anger hur många sprickor som i snitt uppkommer vid de angivna lägena i rambenen. Färgerna anger den tvångsnivå rambenen utsätts för vid olika platser.

4.5 Analys; Sprickkartering

I uppföljningssyfte, framförallt vad gäller korrelationen mellan verklig sprickbildning och temperatursprickrisikanalyser, är så precisa tidsangivelser för uppkomna sprickor som möjligt av stor vikt. I detta arbete har rambenen karterats sporadiskt med olika tidsintervaller mellan gjutstart och första kartering. Vid varje karteringstillfälle har karteringen gjorts för hela eller stora delar av den befintliga konstruktionen. Vad gäller genomgåendesprickor till följd av temperaturrörelser är tidsperioden för formrivning, och några dygn efteråt, av stort intresse. En första kartering bör alltid göras direkt efter formrivning för att avgöra om konstruktionsdelen spruckit i formen. De första efterföljande karteringarna bör ske med ca 1 dygns mellanrum under knappt en veckas tid för att observera den eventuella sprickbildning som uppkommer då konstruktionen kyls av mot omgivande lufttemperatur vilket leder till att en snabbare kontraktion sker. Den relativt snabbare deformationen ger upphov till större spänningar i konstruktionen och en förhöjd sprickrisk. En förutsättning för detta förlopp är att medeltemperaturen i konstruktionsdelen är högre än medeltemperaturen för omgivningen.

Då endast insidan karterats är det inte möjligt att avgöra om en specifik spricka är genomgående eller inte. Majoriteten av de observerade sprickorna är troligen orsakade av temperaturrörelser men även förändrade fuktillstånd ger deformationer i betongen och påverkar spänningarna i konstruktionen. Den individuella inverkan från förändrade temperatur- respektive fuktförhållanden på spänningsnivån i en konstruktionsdel superpositioneras, detta kan i vissa fall göra det mycket svårt att avgöra vad om en spricka är en renodlad temperaturspricka eller inte. I fallet för Gamla Uppsalas järnvägstunnel har betongen ett vatten-cement-tal (vct) på 0,50 vilket generellt gör betongen okänslig för moderata fuktförändringar, och därmed antas att de potentiellt genomgående sprickorna generellt är orsakade av temperaturrörelser. Påverkan från exempelvis sättningar i grundläggningen eller närliggande sprängningsarbeten kan också deformera konstruktionen med sprickor till följd.

5 DISKUSION

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 iaktas kring dem, man bör till exempel undvika att gå på dem för att inte värmekablarna i dem ska gå sönder. 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 vägen. 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 kan, i vissa fall, 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.

6 APPENDIX

A.1. Examensarbete

Examensarbete av Vilmer Anderssson- Vass ”Temperatursprickor i betong – Metodutveckling för sprickriskebegränsning och uppföljning av uppsprickning i en tunnelkonstruktion”

A.2. Utvärderade materialparametrar

Utvärderade materialparametrar för ANL PP C30/37 w/C (vct) = 0.50

Reference curve for compressive strength	t_S [h]	t_A [h]	n_A [-]	f_A [MPa]	$f_{cc,28}$ [MPa]	s [-]	$n_{cc,28}$ [-]
	4.0	6.0	3.0	0.5	32.1	0.301	0.5

Maturity function	Θ_r ϵ_f [K]	κ_3 [-]	Δt_e^0 [h]	β_A [-]
	34 73	0.4 12	0	1

Heat of hydration	q_u [J/ kg]	t_1 [h]	κ_1 [-]
	27 0881	8.2 2347	2.228 77

Basic shrinkage and free thermal dilation	α_T [10 -6 /°C]	ϵ_{su} [10 -6]	t_{sh} [h]	η_{sh} [-]
	9.6	- 100	2.11	1.14

E-modulus and basic creep	$E_{c,28}$ [G Pa]	Δt_1 [d]	$a_1(5d)$ [10 ⁻¹² / Pa ¹⁰ log- unit]	$a_2(5d)$ [10 ⁻¹² / Pa ¹⁰ log- unit]	$a_1(28d)$ [10 ⁻¹² / Pa ¹⁰ log- unit]	$a_2(28d)$ [10 ⁻¹² / Pa ¹⁰ log- unit]
	32. 33	1.0	3.48	9.79	1.0	6.73

Tensile strength and strain/stress calculations	$f_{ct,28}$ [M Pa]	β_1 [-]	α_{ct} [-]	ρ_T [-]	ρ_φ [-]
	2.7 2	0.6 67	0.9	0	0

A.3. Sprickartering

Sprickartering

A.4. Sammanställning av sprickkartering

Tabell A.4.1 Sammanställning av sprickkartering för 36 ramben.

Gjutstart	Sekvens	η beräknad	2 veckor efter Gjutstart	2 veckor < Gjutstart < 6 månader	> 6 månader
15-02-12	2.1.2	Öst	0.17	15-05-11	15-09-14 15-12-01 16-03-16 16-11-03
Sprickor ≥ 1 mm					7 7 18
Hörsprickor ≥ 1 mm					
Sprickor < 1 mm					
15-02-12	2.1.2	Väst	0.17	15-05-11	15-09-10 15-09-14 15-12-01 16-03-16
					1 2
15-03-19	2.2.2	Öst	0.69	15-05-11 15-09-14	15-12-01 16-03-16
				1 2	1 6 3 6
15-03-19	2.2.2	Väst	0.73	15-03-23 15-03-31	15-09-10 15-09-19 15-12-01 16-11-03
				1 1	1 1 1 2 1 1 7 10
15-04-01	3.1.1	Öst	0.42	15-05-11 15-05-19 15-09-14	15-12-01 16-03-16 16-11-03
					1 6 6 11
15-04-01	3.1.1	Väst	0.31	15-05-11 15-05-19 15-09-14	15-12-01 16-03-16 16-11-03
				1	1 1 4 3 12
15-04-14	3.1.2	Öst	0.68	15-05-06 15-05-11 15-05-18 15-09-14	15-12-01 16-03-16 16-11-03
				1 1 1 1	1 1 2 2 2 5
15-04-14	3.1.2	Väst	0.61	15-05-11 15-05-18 15-09-14	15-12-01 16-03-16 16-11-03
					1 1 1 1 1
15-12-09	5.1.2	Öst	0.93	15-12-15 15-12-17	16-01-06 16-01-14 16-02-02 16-02-22
				2 2 2 2	16-11-03 17-05-04
				3 3 3 3	2 2
15-12-09	5.1.2	Väst	0.97	15-12-15 15-12-17	16-01-06 16-01-14 16-02-02 16-02-22
				3 3 3 3	16-11-03 17-05-04
				1	3 3
15-12-22	5.2.1	Öst	0.88	16-01-06	16-11-03 17-05-04
				1 4 4 4	23 25
15-12-22	5.2.1	Väst	0.90	16-01-06	16-11-03 17-05-04
				1	6 13
16-01-26	5.2.2	Öst	0.86	16-02-02 16-02-22	16-11-03 17-05-04
					1 1
16-01-26	5.2.2	Väst	1.01	16-02-02 16-02-22	16-11-03 17-05-04
				1 1	1 1
15-11-18	6.1.2	Öst	1.05	15-12-01	16-11-03 17-05-04
				1 1 1 1	3 5
					1 1
					6 12

15-11-18	6.1.2	Väst	1.01	15-12-01	15-12-16	15-12-21	16-02-02	16-02-22	16-11-03	17-05-04		
Sprickor	≥ 1 mm			1	1	1	1	1	1	1		
Hörsprickor	≥ 1 mm											
Sprickor	< 1 mm								6	6		
15-11-04	6.2.1	Öst	0.62	15-11-09	15-12-01	15-12-16	15-12-21	16-02-22	16-11-03	17-05-04		
						1	1	1	1	1		
									18	15		
15-11-04	6.2.1	Väst	0.63	15-11-09	15-12-01	15-12-16	15-12-21	16-02-22	16-11-03	17-05-04		
									13	17		
15-02-16	9.1.2	Öst	0.55		15-03-23	15-03-31	15-04-09	15-05-11	15-09-22	16-01-12	16-02-02	16-11-03
						2	2	2	2	2	2	2
												1
15-02-16	9.1.2	Väst	--		15-03-23	15-03-31	15-04-09	15-05-11	15-09-22	16-01-12	16-04-12	16-11-03
						2	2	2	2	2	2	2
									6	7	5	7
15-03-03	9.2.1	Öst	0.84		15-03-23	15-03-31	15-04-09	15-05-29	15-12-16	16-02-02	16-11-03	
										2	3	
									10	8	10	
15-03-03	9.2.1	Väst	0.83		15-03-23	15-03-31	15-04-09	15-05-11	16-01-12	16-04-12	16-11-03	
									1	1	1	
									8	13	14	
15-05-13	10.1.2	Öst	0.82	15-05-18	15-09-22				15-12-16	16-02-02	16-11-03	
										2	2	
					7				9	7	11	
15-05-13	10.1.2	Väst	0.88	15-05-18	15-09-22				15-12-01	16-11-03		
									1	3		
					7				10	17		
16-02-24	12.1.2	Öst	0.54	16-03-01	16-03-22	16-04-12			16-11-03	17-05-04		
									5	7		
16-02-24	12.1.2	Väst	0.47	16-03-01	16-03-22	16-04-12			16-11-03	17-05-04		
										2		
									7	8		
16-03-07	12.2.1	Öst	--	16-03-14	16-03-22	16-04-12			16-11-03	17-05-04		
												1
16-03-07	12.2.1	Väst	0.51	16-03-14	16-03-22	16-04-12			16-11-03	17-05-04		
									3	2		
16-03-02	13.1.1	Öst	0.71	16-03-08	16-03-22	16-04-12			16-11-03	17-05-04		
									3	3		
									2	6		
16-03-02	13.1.1	Väst	0.77	16-03-08	16-03-22	16-04-12			16-11-03	17-05-04		
									5	7		
15-03-26	14.1.2	Öst	0.53		15-05-18				15-12-17	16-02-01	16-11-03	
									14	14	16	
15-03-26	14.1.2	Väst	0.48		15-05-18				15-12-17	16-02-01	16-11-03	
									7	0	2	
15-04-30	15.1.1	Öst	0.75		15-05-18				15-12-17	16-02-01	16-11-03	
										1	6	

15-04-03	15.1.1	Väst	0.73		15-05-18			15	17	13
Sprickor	≥ 1 mm							15-12-17	16-02-01	16-11-03
Hörsprickor	≥ 1 mm									1
Sprickor	< 1 mm							11	9	7
15-08-21	16.1.1	Öst	0.74		15-09-22	15-12-17	16-02-01	16-11-03		
							1	1		
						1		2		
15-08-20	16.1.1	Väst	0.72		15-09-12	15-12-17	16-02-01	16-11-03		
								2		
						2	2	7		
15-09-25	16.2.1	Öst	1.04	15-10-08	15-12-17	16-02-01		16-11-03		
					1	1		1		
				1	1	1		10		
15-09-25	16.2.1	Väst	1.02	15-10-08	15-12-17	16-02-01		16-11-03		
				1	1	1		1		
								6		