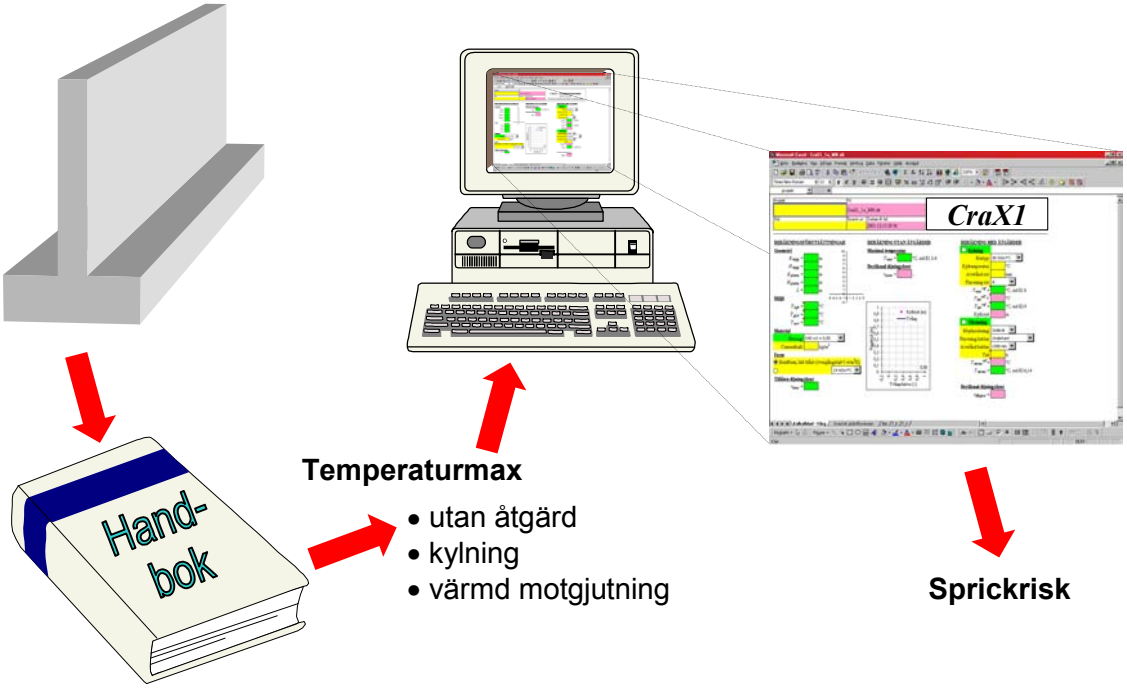
2001:14

LULEÅ TEKNISKA UNIVERSITET

TEKNISK RAPPORT

TEMPERATURSPRICKOR I BETONGKONSTRUKTIONER

Handbok med diagram för sprickriskbedömning inklusive åtgärder för några vanliga typfall



DEL D

BAKGRUND OCH BESKRIVNING AV FALLET VÄGG PÅ PLATTA

Jan-Erik Jonasson, Kjell Wallin, Mats Emborg, Annika Gram
Iad Saleh, Martin Nilsson, Mårten Larson och Hans Hedlund

Institutionen för Väg- och vattenbyggnad
Avdelningen för Konstruktionsteknik

01:14 • ISSN: 1402 - 1536 • ISRN: LTU - TR - - 01/14 - - SE

Teknisk rapport 2001:14

Temperatursprickor i betongkonstruktioner

- Handbok med diagram för sprickriskbedömning inklusive åtgärder för några vanliga typfall

DEL D. Bakgrund och beskrivning för fallet vägg på platta

av

Jan-Erik Jonasson, Kjell Wallin, Mats Emborg, Annika Gram, Iad Saleh, Martin Nilsson, Mårten Larson och Hans Hedlund

Avdelningen för Konstruktionsteknik

Institutionen för Väg-och Vattenbyggnad
LuleåTekniska Universitet
971 87 LULEÅ

Oktober 2003

TEMPERATURSPRICKOR I BETONGKONSTRUKTIONER. HANDBOK MED DIAGRAM FÖR SPRICKRISKBEDÖMNING INKLUSIVE ÅTGÄRDER FÖR NÅGRA VANLIGA TYPFALL

Del D. Bakgrund och beskrivning av fallet vägg på platta

Förord

Denna rapport är framtagen i ett SBUF-projekt med Kjell Wallin, Peab som projektledare. Projektet har genomförts i nära samarbete mellan Peab Sverige AB och Luleå tekniska universitet. Arbetet har inneburit att ett stort antal datorberäkningar har genomförts för bestämning av temperaturer för typfallet vägg-på-platta. Ett Excel-ark benämnt CraX1 har utvecklats för att beräkna sprickrisker baserade på dessa temperaturer. Excel-arket har i ett antal kontrollpunkter kalibrerats mot resultat beräknade med datorprogrammet ConTeSt Pro. Excel-arket CraX1 tillsammans med redovisade temperaturdiagram bildar beräkningsmetoden CraX1 – Handboksmetoden.

Del E innehåller de framtagna temperaturdiagrammen för fallet vägg-på-platta. Temperaturen redovisas för de tre situationerna: 1) Utan åtgärder, 2) Kylning av väggen och 3) Värmning av plattan. Detta utgör ett komplett underlag för att med hjälp av Excel-arket Crax1 genomföra en sprickriskbedömning för fallet vägg-på-platta och i förkommande fall bedöma omfattningen av erforderliga sprickbegränsande åtgärder.

Det studerade typfallet avser således en nygjuten betongvägg på en tidigare gjuten betongplatta, och randvillkoren för den sammansatta konstruktionen vägg-på-platta beskrivs med begreppen fri translation och fri rotation. Den sprickrisk som studeras är genomgående sprickor i väggen efter att väggens temperaturmaximum uppnåtts, dvs det som brukar benämnas genomgående sprickor under kontraktionsfasen.

Vi tror att CraX1-Handboksmetoden har en funktion att fylla i samband med projektering, produktionsplanering, utförande och uppföljning av betongkonstruktioner. De föreslagna åtgärderna är styrda till vissa typbeteenden, men vi tror att dessa begränsningar ska vara till hjälp vid den praktiska utformningen av betonggjutningen och den efterföljande härdningsstyrningen.

Vi hoppas att den redovisade metodiken ska uppfattas som attraktiv att använda, och att den därför kommer till nytta för olika aktörer inom betongbyggandet. Vid tillämpning av CraX1 – Handboksmetoden gäller dock att alla slutsatser och andra konsekvenser av genomförda beräkningar helt sker under användarens ansvar.

Delen D ger bakgrund och beskrivning av det valda typfallet vägg-på-platta samt beskrivning av villkoren kring de sprickbegränsande åtgärder som studeras. I delen E redovisas de diagram, figurer och tabeller som behövs för att genomföra sprickriskanalyser med Excel-arket CraX1.

Förutom SBUF, Peab och Luleå tekniska universitet har ett stort antal företag gett ekonomiskt bidrag till projektet enligt följande: Betongindustri, Bloco, Bloms Ingenjörsbyrå, Cementa, Centerlöf och Holmberg, ELU Konsult, Jacobsson och Widmark, Färdig Betong, KFS Anläggningskonstruktörer, Scandiaconsult, Swerock, Tyréns Byggkonsult, VBB och Västerbottens Byggbetong. Ett stort tack riktas till projektets samtliga bidragsgivare.

Projektet har haft en referensgrupp bestående av följande personer:

Katarina Kieski, Banverket
Björn Bodin, Bloco
Hans Janing, Bloms Ingenjörsbyrå
Arne Retelius, Cementa
Bengt Andersson, Centerlöf & Holmberg

Stig Bernander, Congeo
Ali Farhang, ELU Konsult
Bengt Lysedal, ELU Konsult
Tomas Kutti, Färdig Betong
Ola Johansson, Färdig Betong

Håkan Bond, Jacobsson & Widmark
Hans Klingenberg, KFS Anl. Konstr.
Jan Byfors, NCC
Bengt Ström, NCC
Mikael Hallgren, Scandiaconsult

Jan Olofsson, Skanska Teknik
Kyösti Tuutti, Skanska Teknik
Tom Ekman, Swerock
Christer Carlsson, Tyréns Byggkonsult
Anna Jacobsson, Tyréns Byggkonsult

Bo Westerberg, Tyréns Byggkonsult
Jesper Niland, VBB Anläggning
Robert Ronnebrant, Vägverket
Ken Ryberg, Vägverket
Thomas Österberg, Vägverket Produktion

Volmar Karlsson. Västerbottens Byggbetong

Under 2001 och 2002 har förhandsupplaga respektive remissupplaga av handboken tryckts i ett begränsat antal.

Stockholm och Luleå, oktober 2003

Jan-Erik Jonasson
Iad Saleh

Kjell Wallin
Martin Nilsson

Mats Emborg
Mårten Larson

Annika Gram
Hans Hedlund

INNEHÅLLSFÖRTECKNING Sid

1 INLEDNING 7

2 HUR ANVÄNDA DENNA RAPPORT 9

2.1 Allmänt om CraX1 – Handboksmetoden 9

2.2 Arbetsordning enligt CraX1 – Handboksmetoden 9

2.3 Ansvar vid tillämpning av CraX1 - Handboksmetoden 9

3 BERÄKNINGSEXEMPEL, CraX1 – Handboksmetoden 11

3.1 Allmänt 11

3.2 Studerad konstruktion 11

3.3 Uppstart av Excel-arket CraX1 12

3.4 Beräkningsförutsättningar 13

3.5 Beräkning utan åtgärder 14

3.6 Beräkning med åtgärder 16

3.6.1 Kylning 16

3.6.2 Värmning 19

4 BERÄKNINGSFÖRUTSÄTTNINGAR 25

4.1 Begränsningar 25

4.2 Geometri 27

4.3 Miljö 30

4.4 Material 37

4.5 Form 39

4.6 Tillåten töjningskvot 42

5 BERÄKNING UTAN ÅTGÄRDER 43

5.1 Maximal temperatur 43

5.2 Beräknad töjningskvot 44

5.2.1 Belastande temperatur 44

5.2.2 Töjningskvot 46

5.3 Maximal härdningstemperatur 47

6 BERÄKNING MED ÅTGÄRDER 49

6.1 Kylning 49

6.2 Värmning 67

6.3 Beräknad töjningskvot inklusive åtgärder 71

7 HUR UPPKOMMER TEMPERATURSPRICKOR 73

7.1 Temperatur- och spänningsförlopp i ung betong 73

7.2 Sagan om betongklossarna 74

7.3 Olika delar som ingår i uppbyggandet av spänning 82

7.4 Bestämning av tvång för fallet vägg-på-platta 83

7.5 Materialegenskaper för studerade betonger 88

8 KALIBRERING MOT KÄNDA RESULTAT 95

9 REFERENSER 105

1 INLEDNING

Ett vanligt fenomen vid gjutning av betongkonstruktioner är inverkan av återhållna volymsändringar på grund av temperaturförloppet under hydratationen. Temperatursprickor som kan bli konsekvensen härav kan medföra att beständigheten mot betongaggressiva ämnen minskar och att risken för armeringskorrosion ökar. Vidare reduceras konstruktionens vätske- och gastäthet. Vid oarmerad betong kan konstruktionens bärförmåga i vissa belastningsriktningar helt gå förlorad. Ofta vill man undvika sprickor även av estetiska skäl.

Oönskad sprickbildning i betong medför ofta kostsamma reparationer och det ligger i sakens natur att kostnadsansvaret kan bli föremål för tvist mellan beställare och entreprenör. Generellt sett borde det ligga *såväl i entreprenörens som byggherrens intresse att en betongkonstruktion inte redan vid sin tillblivelse tillfogas skador, som den eljest inte under sin livstid skulle erhålla på grund av nyttig last eller miljöpåverkan*.

Sprickbildningen på grund av temperatur- och fuktrelaterade rörelser den närmaste tiden efter gjutning har rönt allt större intresse under de senaste tio åren, vilket sammanhänger med att högre hållfasthetsklasser och större krav på beständighet blir vanligare i modernt byggande av både infrastrukturanläggningar och hus. Ett vanligt sätt är då att kräva lägre vattencementtal, vilket medför större cementmängder, högre värmeutveckling och att autogena krympningen (krympning av självuttorkning) innebär signifikanta rörelser i ung ålder. Situationen blir således mer komplicerad än tidigare, och det är viktigt att inom modernt betongbyggande beakta dessa mer komplexa förhållanden för undvikande av tidiga sprickor.

Med hjälp av modern beräkningsteknik och modern laborationsteknik har säkrare sprickriskbedömningar kunnat genomföras för betong av olika hållfasthetsklasser och cementtyp samt i olika gjutsituationer. Utförligare beskrivning av modelleringsteknik, försöksmetodik, konstruktionstillämpning, val av åtgärder m m ges i bl a Bernander (1973), Emborg (1989), Jonasson (1994), Bernander och Emborg (1994), Ekerfors (1995), Wallin, Emborg och Jonasson (1997), Westman (1999), Larson (2000 och 2003), Nilsson (2000 och 2003) och Hedlund (2000).

Ett EU-projekt benämnt IPACS (Improved Production of Advanced Concrete Structures, projekttid 1997 – 2001) inom området har nyligen avslutats. Betongindustri AB och Cementa AB var koordinatorer, och övriga svenska parter var Luleå tekniska universitet, Skanska AB och NCC AB. Inom några viktiga områden har det skett ett samarbete mellan arbetet i EU-projektet och här aktuell handbok. Speciellt kan nämnas ett omfattande samarbete vid framtagandet av mekaniskt mothåll för en krympande vägg förbunden med en icke krympande platta samt utvecklingen av förenklade beräkningsmetoder.

För att kunna förutsäga risk för temperatursprickor under hydratationen fordras kännedom om temperaturförlopp, mognadsutveckling och mekaniska egenskaper hos den unga betongen samt om det tvång som råder inom och mellan olika konstruktionsdelar. Därefter kan bedömningar göras beträffande sprickrisken som baseras på analyser av betongens belastning i form av spänningar och associerade töjningar. Samspelet mellan olika faktorer som inverkar på temperaturspänningarna är mycket komplicerat och i allmänhet krävs datorkraft för att spänningar och sprickrisker ska kunna bedömas tillräckligt noggrant. I vissa väldefinierade tillämpningar kan bedömningen av sprickrisken underlättas genom att beräkningsresultaten presenteras i diagram- eller tabellform. Det är också möjligt att kalibrera förenklade beräkningsmetoder mot resultat från mer omfattande datorberäkningar.

Föreliggande handbok avser analys av risken för genomgående sprickor i avsvalningsskedet i en nyligen gjuten väggkonstruktion, som samverkar med en tidigare gjuten platta. Beräkningen sker i ett för ändamålet framtaget Excel-ark benämnt CraX1. Diagram över

maximal temperatur utan åtgärder, maximal temperatur inklusive kylning samt temperaturer vid uppvärmning av plattan med värmekablar utgör underlag för beräkningarna. Sprickrisken uttrycks i form av spänningsrelaterade töjningar - ett mått som är direkt kopplat till rörelser i konstruktionen. Härmed fås ett rationellt underlag för att bedöma erforderliga åtgärder såväl vid höga som vid mycket höga belastningsnivåer.

Enligt Bro 2002, bilaga 11-4 ska risken för temperatursprickor begränsas med någon av metoderna 1, 2 eller 3:

- Metod 1 utgörs av temperaturkrav (gjut- och lufttemperatur) för ytsprickor respektive genomgående sprickor. Samtidigt är krav uppställda på cementhalt, geometri och fastlåsning.
- Metod 2 innebär att krav enligt Emborg m fl (1997) skall uppfyllas
- Metod 3 innebär att beräkningar av belastningsnivåer utförs med kända datorprogram/beräkningsmetoder. Materialparametrar skall vara väl undersökta. Randvillkor och fastlåsningsgrader skall vara väldokumenterade samt använda åtgärder skall vara väl kända.

För fallet tidiga sprickor under uppvärmningsfasen (vanligen ytsprickor) kan resultaten i Emborg m fl (1997) i många fall räcka för att kravet på sprickrisk enligt Bro 2002 kan anses uppfyllda. Däremot ger metodiken i Emborg m fl (1997) för fallet genomgående sprickor i avsvalningsfasen att kraven i Bro 2002 endast i ett relativt litet antal situationer kan anses uppfyllda. I de fall man för typfallet vägg-på-platta från Emborg m fl (1997) får svaret att någon form av åtgärd behövs, avser föreliggande beräkningsmetod CraX1 Handboksmetoden ge kompletterande information om vad som behöver göras. Som sprickreducerande åtgärder har både vattenkylning av väggen respektive uppvärmning av plattan studerats.

Rapporten Emborg m fl (1997) är uppdelad i följande delar:

Del A: *Grundläggande avsnitt* där bland annat bakgrunden till uppkomsten av temperatursprickor och inverkande faktorer i samband med olika fall av tvång diskuteras.

Del B: *Typfall* innehållande beskrivning av gjutsituationen och kommentarer kring beräkningsresultat.

Del C: *Diagramavsnitt* med maximal spänningsnivå som funktion av olika parametrar för olika typfall.

Föreliggande metod CraX1 – Handboksmetoden är uppdelad i följande delar:

Del D: *Bakgrund och anvisningar* där CraX1 - Handboksmetoden förklaras och där det ges bakgrund, förutsättningar och anvisningar för hur metoden ska användas.

Del E: *Erforderliga diagram* för maximal temperatur i en vägg, för maximal temperatur vid vattenkylning samt temperaturförloppet vid uppvärmning av en platta på mark. Excel-arket CraX1 ger hänvisning till dessa diagram som underlag för beräkning av maximal töjningsnivå.

Beräkningarna i det framtagna Excel-arket CraX1 är i ett stort antal punkter kalibrerat mot resultat med datorprogrammet ConTeSt Pro 1.4 (1999).

2 HUR ANVÄNDA DENNA RAPPORT

2.1 Allmänt om CraX1 - Handboksmetoden

Den här redovisade beräkningsmetoden ”CraX1 - Handboksmetoden” bygger till sin struktur på vad som kallats ”handberäkningsmetoden”, se t ex Löfquist (1946), Bernander (1973, 1982), Bernander och Emborg (1994) samt Larson (2000 och 2003). I Larson (2000 och 2003) redovisas tydligt hur man kan välja olika sätt och olika nivåer på förenklingarna för handberäkningsmetoden, och här väljs det som i Larson (2000 och 2003) kallas förenklad metod på töjningsform för praktiskt bruk.

För det valda typfallet vägg-på-platta studeras hur konstruktionens inre mothåll varierar över väggen i höjdled enligt Nilsson (2000 och 2003). Det framgår också av Nilsson (2000 och 2003) att för vald konstruktion med plattan grundlagd på packad fyllning behöver inte hänsyn tas till mothållet orsakat av markens motstånd mot deformation.

För mer information och bakgrund till vald metodik, se vidare *kapitel 6* och *kapitel 7*.

Beräkningarna i Excel-arket CraX1 har kalibrerats mot ett stort antal beräkningar med datorprogrammet ConTeSt Pro 1.4 (1999), vilket redovisas i *kapitel 8*.

2.2 Arbetsordning enligt CraX1 - Handboksmetoden

Arbetsordningen enligt CraX1 – Handboksmetoden omfattar de tre faser som framgår direkt av Excel-arkets första blad, se beräkningsexempel i *kapitel 3*, enligt:

Fas 1: Beräkningsförutsättningar, se vidare *kapitel 4*

Fas 2: Beräkningar utan åtgärder, se vidare *kapitel 5*

Fas 3: Beräkningar med åtgärder, se vidare *kapitel 6*

Fas 1 och 2 måste alltid genomföras, och i de fall där kravet på maximal belastningsnivå inte uppfyllts enligt fas 2, går man vidare med fas 3 för att studera vilka sprickreducerande åtgärder som krävs för att innehålla ställda krav.

Syftet med att *kapitel 4 – 6* knyts till *Excel-arkets huvudrubriker* är att i dessa kapitel behandlas förklaringar och anvisningar till de beräkningar som utförs i CraX1. De avser att vara en referensmanual till Excel-arket CraX1.

2.3 Ansvar vid tillämpning av CraX1 - Handboksmetoden

Crax1 – Handboksmetoden är ett hjälpmedel bestående av Excel-arket CraX1 och Teknisk Rapport 2001:14 från Luleå tekniska universitet – del D och E från september 2003. Med detta hjälpmedel kan temperaturbelastning och tillhörande spänningsnivå för definierade typsituationer bedömas. Ansvaret för alla användningssätt och ansvaret för alla slutsatser dragna av erhållna resultat från CraX1 – Handboksmetoden ligger på användaren.

3 BERÄKNINGSEXEMPEL, CraX1 – Handboksmetoden

3.1 Allmänt

I detta kapitel visas en tillämpning av CraX1 – Handboksmetoden för ett sommarfall. Några väsentliga områden kommenteras i samband med denna genomgång, men mer omfattande kommentarer, råd och anvisningar finns i följande kapitel

Kapitel 4. BERÄKNINGSFÖRUTSÄTTNINGAR

Kapitel 5. BERÄKNING UTAN ÅTGÄRDER

Kapitel 6. BERÄKNING MED ÅTGÄRDER

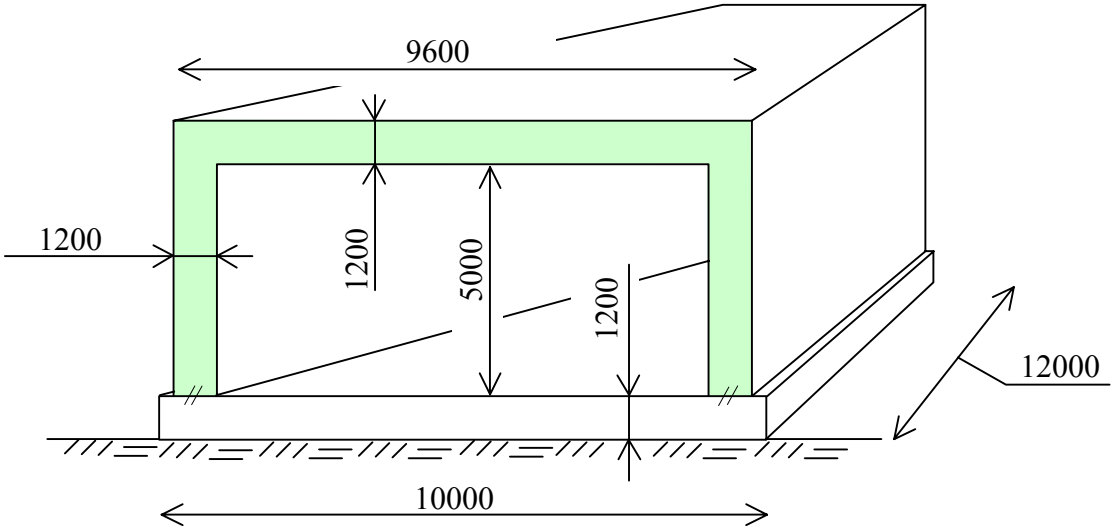
Kapitlen 4 – 6 och deras underrubriker följer helt strukturen i Excel-arket CraX1 för att underlätta sökandet efter informationen.

3.2 Studerad konstruktion

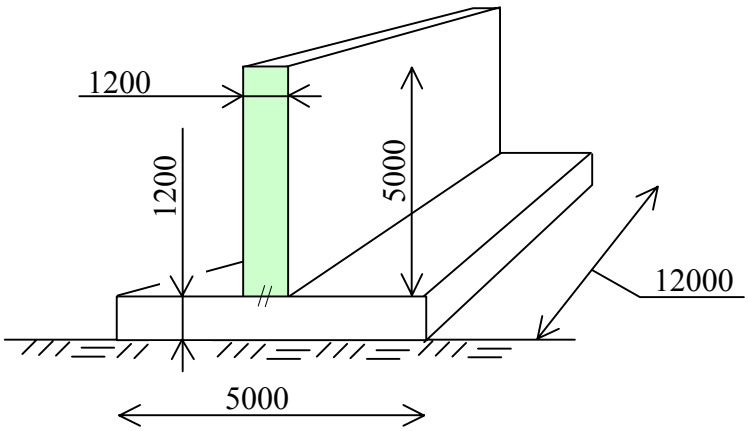
För tunneln visad i figur 3.1 skall väggarna och taket gjutas samtidigt på en platta som är 12 m lång. Plattan är tidigare gjuten och ligger på packad fyllning. Gjutfogen mellan platta och vägg är en stumfog. Mellan de 12 m långa monoliterna finns vertikala rörelsefogar som tillåter både fri expansion och fri kontraktion av monoliterna.

Om taket har ungefär samma tjocklek som väggarna och om det inte förekommer några omfattande dimensionsändringar av typen voter eller liknande behöver man inte speciellt studera risken för genomgående sprickor i taket, utan det är tillräckligt om man analyserar sprickrisken för väggen med typfallet vägg på platta, se figur 3.2.

Om man däremot väljer att först gjuta enbart väggarna och vid en senare tidpunkt gjuta taket, får man för denna senare gjutning en upprepning av problemställningen - men nu för konstruktionen ”tak-på-vägg”.



Figur 3.1 Tunnel där vägg och tak skall gjutas samtidigt för en monolit som är 12 m lång.



Figur 3.2 Typfallet vägg-på-platta tillämpat på konstruktionen visad i figur 3.1.

3.3 Uppstart av Excel-arket CraX1

I fortsättningen av detta kapitel hänvisas till filnamn samt namn eller kommandon i Excel-arket CraX1 genom att de skrivs i lutande fet stil, t ex ***CraX1***.

Öppna

Arbetsgången när man använder Excel-arket ***CraX1*** för en ny konstruktion är att man öppnar mallen som heter ***CraX1_.xlt***. Detta resulterar i ett aktivt Excel-ark med alla värdeceller tomma. Man kommer direkt till den sida som heter ***Kalkylblad – Färg***, och alla erforderliga uppgifter måste föras in på detta blad.

Spara

Ett gott tips är att man börjar med att spara det tomma arket under nytt namn (***Arkiv + Spara som …***), och när man gjort detta dyker det namn man angett upp i bladets huvud i en rödmarkerad cell under rubriken ***Fil***. När man senare sparar Excel-arket räcker det med kommandona ***Arkiv + Spara***. Tidpunkten när sista kommandot ***Spara som …*** eller ***Spara*** genomförs skrivs automatiskt i den röda cellen rubricerad ***Datum & tid***.

Utskrift

Det andra bladet kallat ***Svartvit utskriftsversion*** är en svartvit kopia av bladet ***Kalkylblad – Färg***. Detta gör att man själv får välja om man vill ha en färgutskrift av bladet ***Kalkylblad – Färg*** eller en svartvit utskrift av kalkylbladet ***Svartvit utskriftsversion***. Utskrift sker genom kommandot ***Arkiv + Skriv ut …***.

Aktiva celler

De aktiva cellerna i bladet ***Kalkylblad – Färg*** har tre olika färger (grön, gul eller röd) med följande betydelse

Grön färg	= indataceller som måste fyllas i av användaren. Dessa värden används vid beräkningen av töjningskvot som utförs i ***CraX1***.
Gul färg	= information som är väsentlig för beskrivning av situationen och senare för villkoren kring eventuella åtgärder. Många av dessa värden behövs för att ge information om var man hämtar erforderliga uppgifter i handboken. Detta är en hjälp både för den som utför kalkylen i Excel-arket ***CraX1*** och för den som i efterhand tittar på en utskrift och t ex skall göra en uppföljning/granskning av kalkylen, se vidare kommentarer i samband med genomgången av exemplet nedan.
Röd färg	= resultatceller som automatiskt fylls i av Excel-arket ***CraX1***. Dessa celler är låsta för användaren.

Projektidentifikation

I de gula cellerna i bladet ***Kalkylblad - Färg***:s huvud har man möjlighet att för sin egen identifikation fylla i lämplig information under rubrikerna ***Projekt***, ***Del*** och ***Konstr av***.

3.4 Beräkningsförutsättningar

För mer generell information kring ***Beräkningsförutsättningar*** än vad som ges här, se vidare kapitel 4.

Geometri

Av figur 3.2 framgår direkt storleken på alla erforderliga geometriska parametrar, vilka helt enkelt skrivs in i de gröna cellerna under rubriken ***Geometri***, se figur 3.4. Notera att strax till höger om inmatningscellerna för ***Geometri*** sker en uppritning av konstruktionens tvärsektion. Denna bild kan t ex användas för en visuell kontroll av inskrivna geometriska värden.

Miljö

Här avses att studera ett sommarfall, där dygnsmedeltemperaturen bedöms vara ca 15 °C och att betongmassan efter mottagning och hantering på bygget har en temperatur ”i formen” på ca 20 °C. Den tidigare gjutna betongplattan antas vara i jämvikt med luftens dygnsmedeltemperatur, varför dess temperatur vid tidpunkt för gjutning också sätts till 15 °C. Dessa tre siffervärden skrivs nu in i de tre gröna cellerna under rubriken ***Miljö***, se figur 3.4.

Material

Vi väljer en betong med krav på högsta vct = 0.4 tillverkad av anläggningscement, vilket motsvarar betongklass C32/40 alternativt C35/45. Vanligen styrs valet av betongkvalitet av regler eller rekommendationer i det normverk som är rådande för aktuellt bygge.

Cementhalten är satt till 420 kg/m^3. Ett gott tips när det gäller vilka värden som skall anges på gjuttemperatur och cementhalt är att man tar kontakt med den betongfabrik, som kommer att leverera betongen till bygget.

För aktuell situation bläddrar vi fram ***C32/40 alt. C35/45, vct = 0.40*** i listan ***Betong*** respektive skriver in siffran 420 i den gulmarkerade cellen för ***Cementhalt***. Cementhalten är ett av de värden som senare kommer att användas för att ge anvisning till vilka sidor i handboken man har aktuella diagram för avläsning av temperatur.

Form

Vanligtvis används i Sverige 22 mm brädform (eller likvärdig Plywood-form) vid gjutning av anläggningskonstruktioner, varför denna form är första valet under rubriken ***Form***. Om man vill göra beräkningar för annan formtyp måste man markera det andra valet under rubriken ***Form*** och bläddra fram det värmeövergångstal som skall studeras. För exakt de värden som anges i listan finns temperaturdiagram i handboken, se vidare kapitel 4 och handboken – del E. Samtliga beräkningar förutsätter att formen rivs fyra dygn eller senare (≥ 4d) efter gjutningen.

Tillåten töjningskvot

I t ex Vägverkets bestämmelse Bro 2002 anges kravet på sprickrisker i form av olika värden på minsta spricksäkerhet, S. Det inverterade värdet anger tillåten spännings- eller töjningskvot, se vidare avsnitt 4.6. Ett vanligt värde på tillåten töjningskvot = 0.7, vilket används i detta exempel.

3.5 Beräkning utan åtgärder

För mer generell information kring ***Beräkning utan åtgärder*** än vad som ges här, se vidare kapitel 5.

Maximal temperatur och beräknad töjningskvot

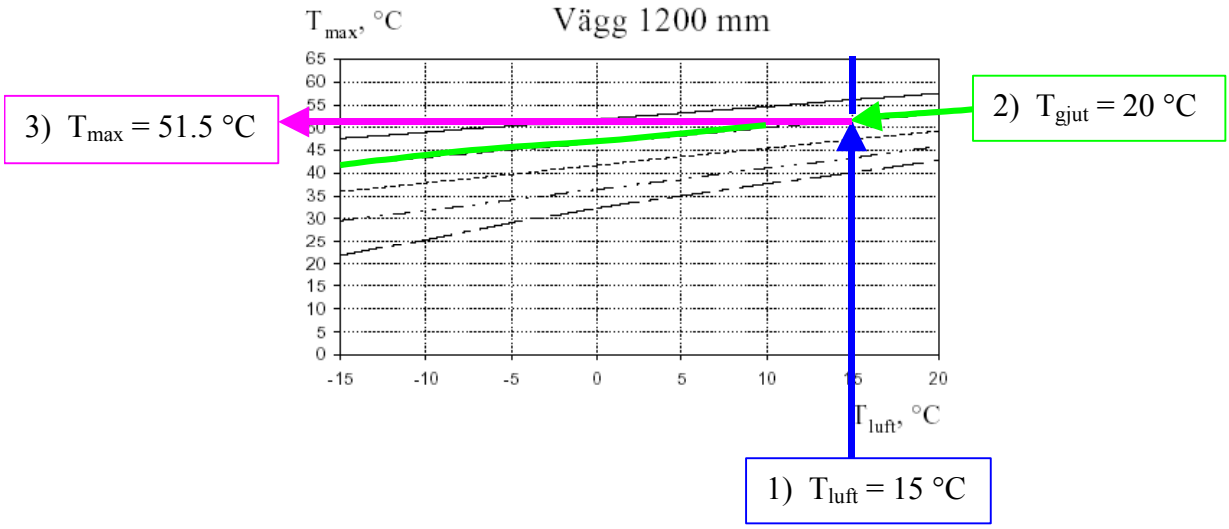
Med ledning av värdet på cementhalt (se under rubriken ***Material*** ovan) och värmeövergångstal (styrs av typen av ***Form***) ges direkt till höger om den grönmarkerade cellen för T_{max} en hänvisning till vilken sida eller vilka sidor att läsa av i del E av handboken med temperaturdiagram för aktuella fall.

Om bara en sida är aktuell för temperaturavläsning, kommer bara hänvisning till den. Om cementhalten inte överensstämmer exakt med de som anges i diagrammen, kommer hänvisning till sidor som redovisar närmast föregående och närmast efterföljande cementhalt. Ligger cementhalten utanför de som använts vid beräkningarna av diagrammen kommer sidhänvisning till de två närmaste cementhalterna. Excel-arket CraX1 har inte någon form av inter- eller extrapoleringshjälp, utan det är här helt upp till användaren att välja strategi.

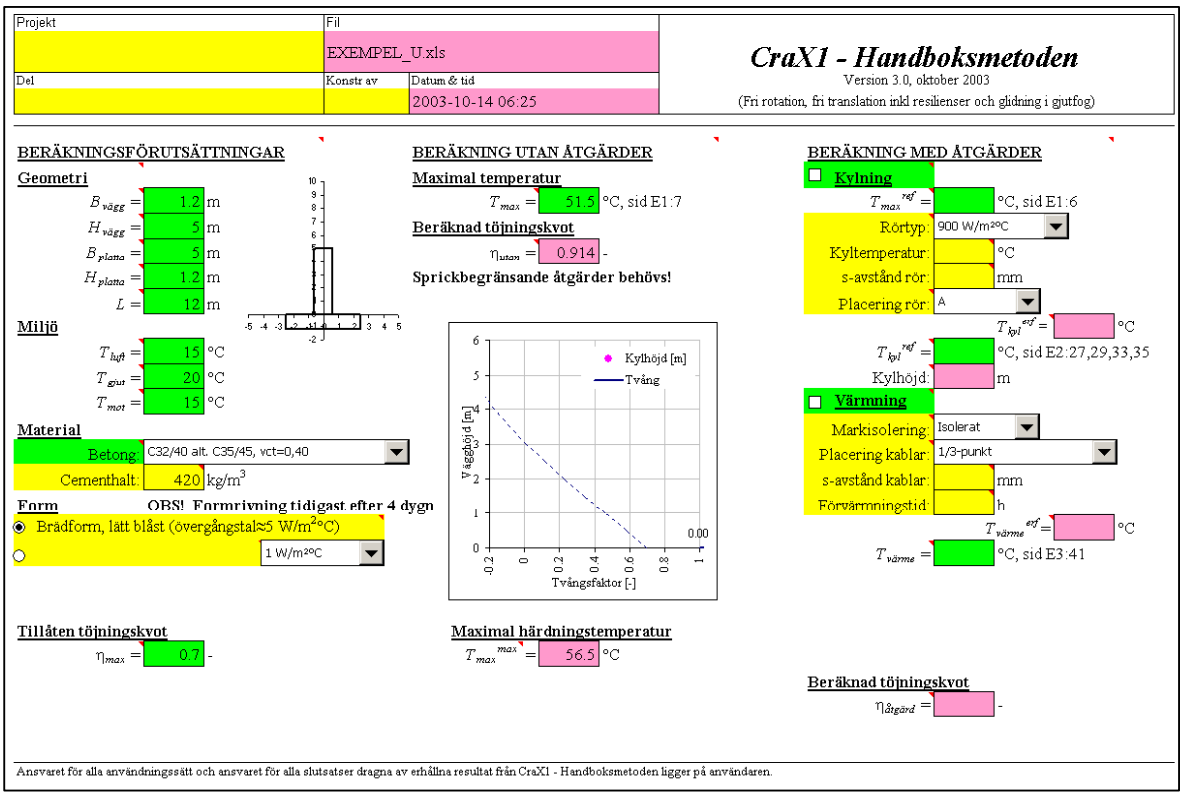
När vi har läst av T_{max} och skrivit in det i den grönmarkerade cellen och bekräftat värdet genom tryckning på ”Enter” anges storleken på ***Beräknad töjningskvot*** i den rödmarkerade resultatcellen. Beroende på om man under- eller överskrider kravet på ***Tillåten töjningskvot*** skrivs direkt under resultatcellen antingen ***Spricksäkerhetskravet uppfyllt!*** eller ***Sprickbegränsande åtgärder behövs!*** Finns inget värde i cellen T_{max} anges ingen text.

För aktuellt exempel anges i Excel-arket ***CraX1*** att vi skall läsa av temperaturen på ***sid E1:7***, se figur 3.3 som är ett utdrag av delfiguren ”Vägg 1200 mm” från denna sida. En avläsning med 1) T_{luft} = 15 °C och 2) T_{gjut} = 20 °C ger 3) $\mathbf{T_{max}}$ = 51.5 °C. När detta värde anges och

bekräftas i den gröna cellen, se figur 3.4, beräknas värdet på ***Beräknad töjningskvot*** (η_{utan}) till 0.914. Eftersom detta värde är större än ***Tillåten töjningskvot*** på 0.7, kommer texten ***Sprickbegränsande åtgärder behövs!*** Detta avslutar beräkningen utan åtgärder, och vi vet att någonting måste göras för att uppfylla ställt töjningskvotskrav.



Figur 3.3 Avläsning av T_{max} i delfigur ”Vägg 1200 mm” på sid E1:7 i handboken del E för aktuellt exempel.



Figur 3.4 Beräkning av töjningskvot utan åtgärder för aktuellt exempel. Kopia av bladet ”Kalkylblad – Färg” i Excel-arket CraX1.

3.6 Beräkning med åtgärder

Allmänt

För mer generell information kring ***Beräkning med åtgärder*** än vad som ges här, se vidare kapitel 6.

När ***Beräknad töjningskvot*** är större än ***Tillåten töjningskvot*** måste något göras, och om valet av betong och situationen i övrigt inte kan påverkas har man alltid möjlighet att minska temperaturbelastningen genom att utföra kylning av den nygjutna betongen eller i de fall, som här, att plattan kan deformeras fritt, öka dess storlek före gjutning genom uppvärmning med hjälp av ingjutna värmekablar.

Inga generella rekommendationer går att utforma vilken väg man skall välja av kylning eller värmning. Det beror bl a på vilken utrustning man har tillgång till, vilken erfarenhet man har och om det är lätt att få fram vatten eller elström i erforderlig mängd. En generell åsikt är att man vintertid kan använda ingjutna värmekablar både som vintergjutningsåtgärd och samtidig sprickreducerande åtgärd, vilket i vissa lägen kan ge ekonomisk fördel för värmning.

För det studerade exemplet presenteras både hur en kylning kan genomföras och hur en värmning av plattan kan utformas.

3.6.1 Kylning

Om man väljer ***Kylning*** måste man börja med att markera detta med en bock strax till vänster om rubriken ***Kylning***.

Referenstemperatur för kylning, T_{max}^{ref}, avläses alltid på sid E1:6.

Det första man därefter gör är att läsa av och skriva in maximal referenstemperatur, T_{max}^{ref}, i den grönmarkerade indatacellen strax under rubriken ***Kylning***. Denna referenstemperatur ska *alltid* skrivas in för *cementhalten 400 kg/m*^{3}, eftersom alla kylningsberäkningar har genomförts för referenshalten 400 kg/m^3. ***Sid E1:6*** är alltid aktuell, vilket också anges till höger om indatacellen. I de flesta fall är det någon enstaka sida vid sidan om den som användes vid avläsning av temperaturmaximum för fallet utan åtgärder.

Rörtyp, Kyltemperatur, s-avstånd rör och Placering rör

Här väljs att kyla med ”1 tums tunnväggiga stålrör”, vilket i Excel-arket ***CraX1*** innebär att vi väljer ***Rörtyp 900 W/m^2 °C***. Vad gäller övriga parametrar, ***Kyltemperatur***, ***s-avstånd rör*** respektive ***Placering rör***, skall de väljas så att

$$T_{kyl}^{ref} \leq T_{kyl}^{erf}$$

Detta innebär att maximala betongtemperaturen (medelvärde över tvärsnittet) vid kylning skall vara högst lika med erforderlig maximal temperatur för att uppfylla kravet på ***Tillåten töjningskvot***. I aktuellt fall fås att medeltemperaturen i betongen skall underskrida 37.53 °C.

De kylalternativ som är möjliga får man fram genom att läsa av T_{max} i avsnitt E2 i handboken del E. För det alternativ man markerat genom angivna värden på ***Rörtyp***, ***Kyltemperatur***, s-

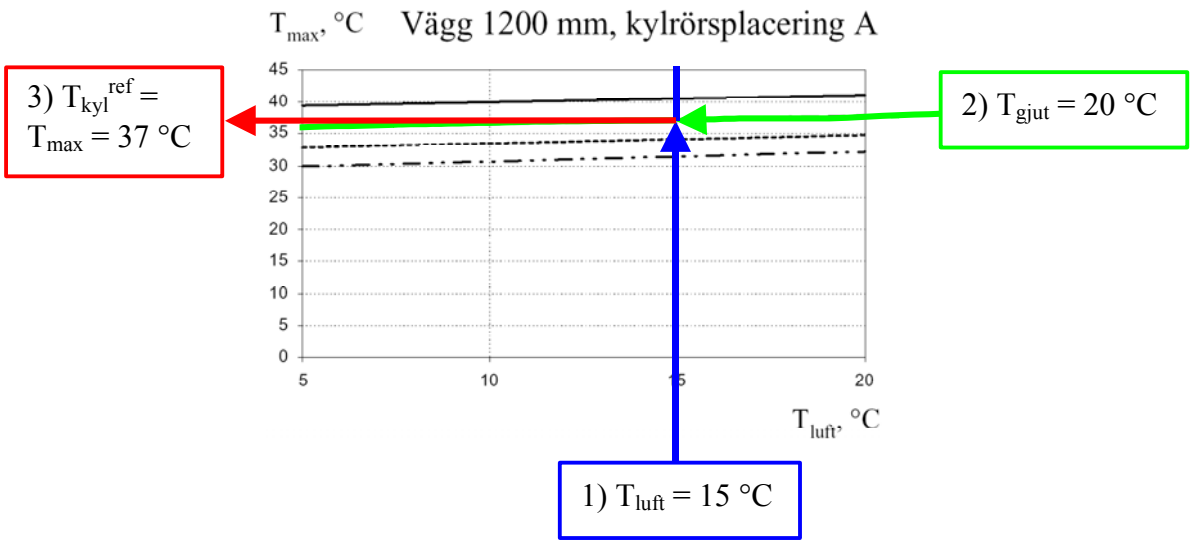
avstånd rör och ***Placering rör*** visas till höger om inmatningscellen T_{kyl}^{ref} vilken sida eller vilka sidor som är aktuella att läsa av i handboken del E.

Om vi här tänker oss att använda ett befintligt vattenförsörjningsnät med en ***Kyltemperatur*** på ca 12 °C, kan erforderligt kylkrav uppfyllas för ***s-avstånd rör*** = 400 mm och ***Placering rör*** = A, se figur 3.5, som ger T_{max} = 37 °C. Med detta värde insatt som T_{kyl}^{ref} i den grönmarkerade inmatningscellen uppfylls kylkravet precis, och ***Beräknad töjningskvot*** blir 0.69, se den rödmarkerade resultatcellen längs ner till höger på ***Kalkylblad - Färg*** i figur 3.6. Av den utmatade texten strax under resultatcellen framgår också att kylkravet är uppfyllt, eftersom där står ***Spricksäkerhetskravet är uppfyllt***.

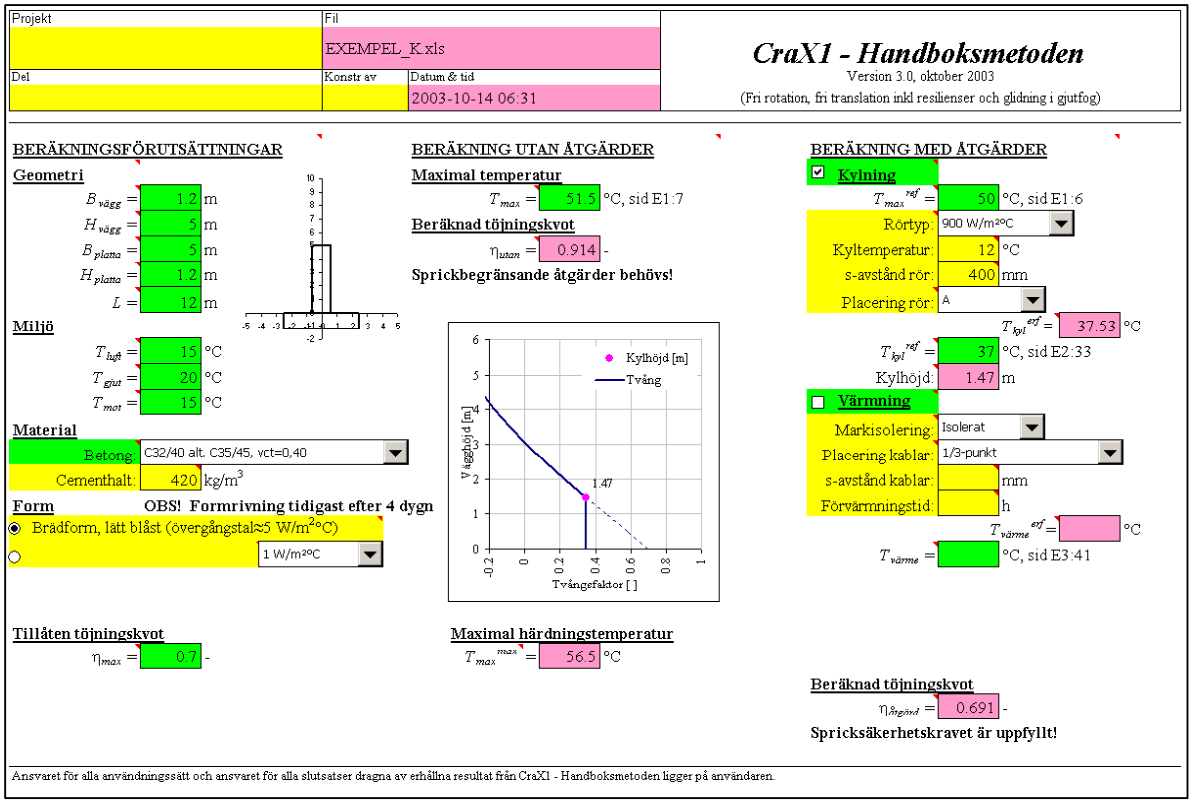
Man kan notera att den alternativa möjligheten ***Placering rör*** = B (placering på speciella monteringsstänger, se sid E2:6) med i övrigt bibehållna förhållanden minskar T_{kyl}^{ref} till 32 °C, vilket resulterar i att ***Beräknad töjningskvot*** blir ca 0.6. (Verifiera gärna detta med egna beräkningar!)

Notera att vägg 1200 mm är den tjockaste vägg som kylrörsplacering A finns beräknad för, vilket innebär att för väggtjocklekar > 1200 mm finns i CraX1 – Handboksmetoden bara kylrörsplacering B att tillgå. Detta beror på att en 1200 mm vägg bedöms vara på gränsen att kunna ha kylrören monterade på befintlig armering ca 80 mm innanför formens insida, eftersom temperaturgradienterna i väggens tjockleksriktning annars kan bli för stora. Dessutom blir kylinsatsen ineffektiv, eftersom det blir stora avstånd mellan kylrören i väggens tjockleksriktning.

För väggtjocklekar ≤ 1200 mm finns valet mellan kylrörsplacering A och B. Man har t ex att ta hänsyn till arbetsplatsens behov av enkelhet i monteringen kontra möjligheten till effektivare kylning samt arbetsplatsens behov av att ha arbetsutrymme inne i väggen vid och efter montering av kylrören. En generell rekommendation är att det alltid bör ske samråd mellan konstruktör och arbetsplats innan det slutliga valet görs.



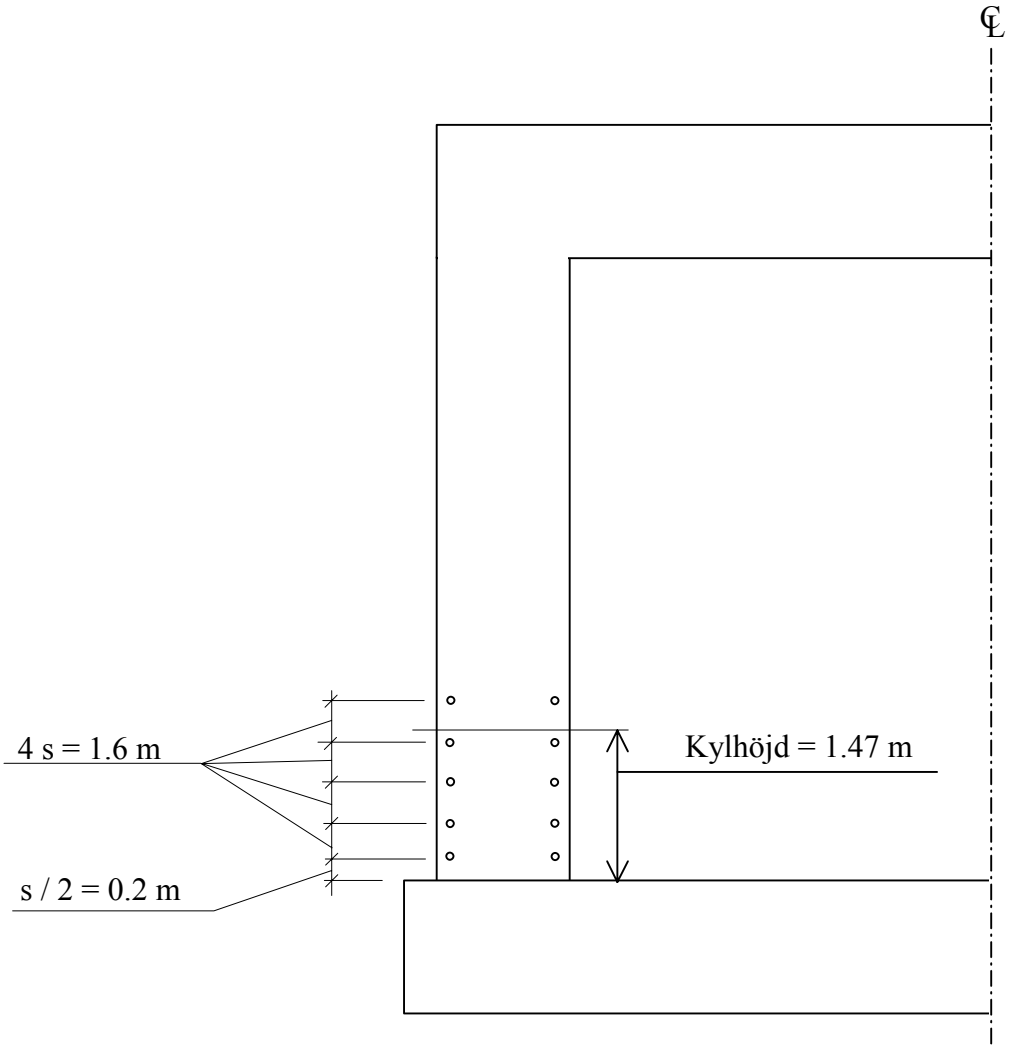
Figur 3.5 Avläsning av $T_{max} = T_{kyl}^{ref}$ i delfigur ”Vägg 1200 mm, kylrörsplacering A” på sid E2:33 i handboken del E för aktuellt exempel.



Figur 3.6 Beräkning av töjningskvot med åtgärden ”Kylning” för aktuellt exempel. Kopia av bladet ”Kalkylblad – Färg” i Excel-arket CraX1.

I utmatningscellen ***Kylhöjd*** står 1.47 m. Denna beräknade kylhöjd framgår också av diagrammet mitt på bladet ***Kalkylblad – Färg***, se figur 3.6. Denna kylhöjd anger placeringen av kylrören så att översta kylrören/kylröret placeras minst denna sträcka upp i väggen, se figur 3.7.

Av diagrammet i figur 3.6 framgår också hur tvångsfaktorn varierar i väggens höjdled.



Figur 3.7 Placering av kylrör med valt alternativ enligt figur 3.6.

Kylningen skall påbörjas direkt vid start av gjutningen och avslutas tidigast 48 timmar och senast 60 timmar efter gjutstart, se vidare kapitel 6.1.

3.6.2 Värmning

Erforderlig värmning

Om man väljer ***Värmning*** måste man börja med att markera detta med en bock strax till vänster om rubriken ***Värmning***. Direkt detta är gjort kommer i resultatcellen $\boldsymbol{T_{värme}^{erf}}$ minsta erforderliga medeltemperatur i plattan för att uppfylla det ställda kravet på ***Tillåten töjningskvot***. Uttryckt i temperaturer, se figur 3.8, fås här

$$\boldsymbol{T_{värme}} \geq \boldsymbol{T_{värme}^{erf}} = 21.31\ °C$$

Då fallet ***Värmning*** väljs anges den aktuella sidan för avläsning av temperaturförlopp under värmning av plattan, och för aktuellt fall, se figur 3.9, hänvisas till sid E3:41. Det som styr hänvisningen är platthöjden, H_{platta}, och lufttemperaturen, T_{luft}.

Markisolering

Två fall med ingjutna värmekablar är beräknade, nämligen ***Oisolerat*** för fallet att plattan gjuts direkt mot packad fyllning och ***Isolerat*** om plattan gjuts mot en markisoleringsskiva. I aktuellt fall sker gjutning av plattan direkt mot marken, varför alternativet ***Oisolerat*** valts.

Placering kablar

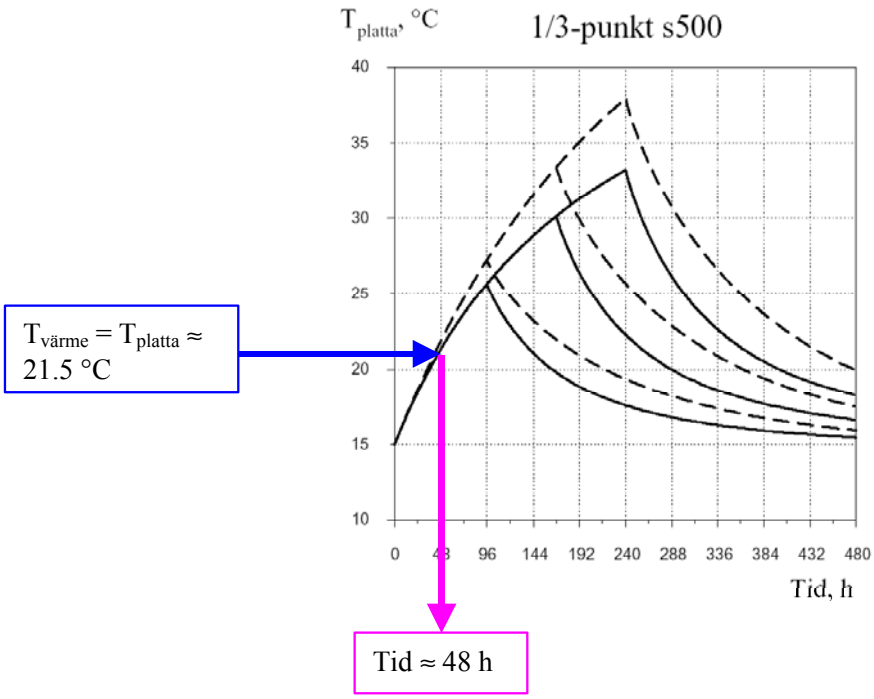
För platthöjden 1.2 m finns två möjliga kabelplaceringar, nämligen i ***1/3-punkter*** och ***1-2-3***. Detta innebär antingen två kabelnivåer (1/3-dels-punkterna) eller tre kabelnivåer i höjdled (underkant, mitten och överkant), se sid E3:2. Här väljs placering i 1/3-dels-punkterna, varför ***1/3-punkt*** markeras i informationscellen till höger om texten ***Placering kablar***.

För andra platthöjder kan andra kabelplaceringsalternativ vara aktuella, se sid E3:2, och endast de som är giltiga för stunden utgör alternativen i blädderlistan till höger om cellen ***Placering kablar***.

s-avstånd kablar

Det enda som nu återstår är att bestämma är värmekablarnas centrum-centrum-avstånd, ***s-avstånd kablar***. För kabeleffekten 30 W/m finns alternativen ***s300***, ***s400*** och ***s500*** mm redovisade, se sid E3:41. Det krav som skall uppfyllas är $T_{värme} \geq 21.31$ °C, se $T_{värme}^{erf}$ i figur 3.8. Om vi väljer ***s500*** mm fås enligt figur 3.8

$T_{värme} \approx 21.5$ °C vid förvärmningstid ≈ 48 h.

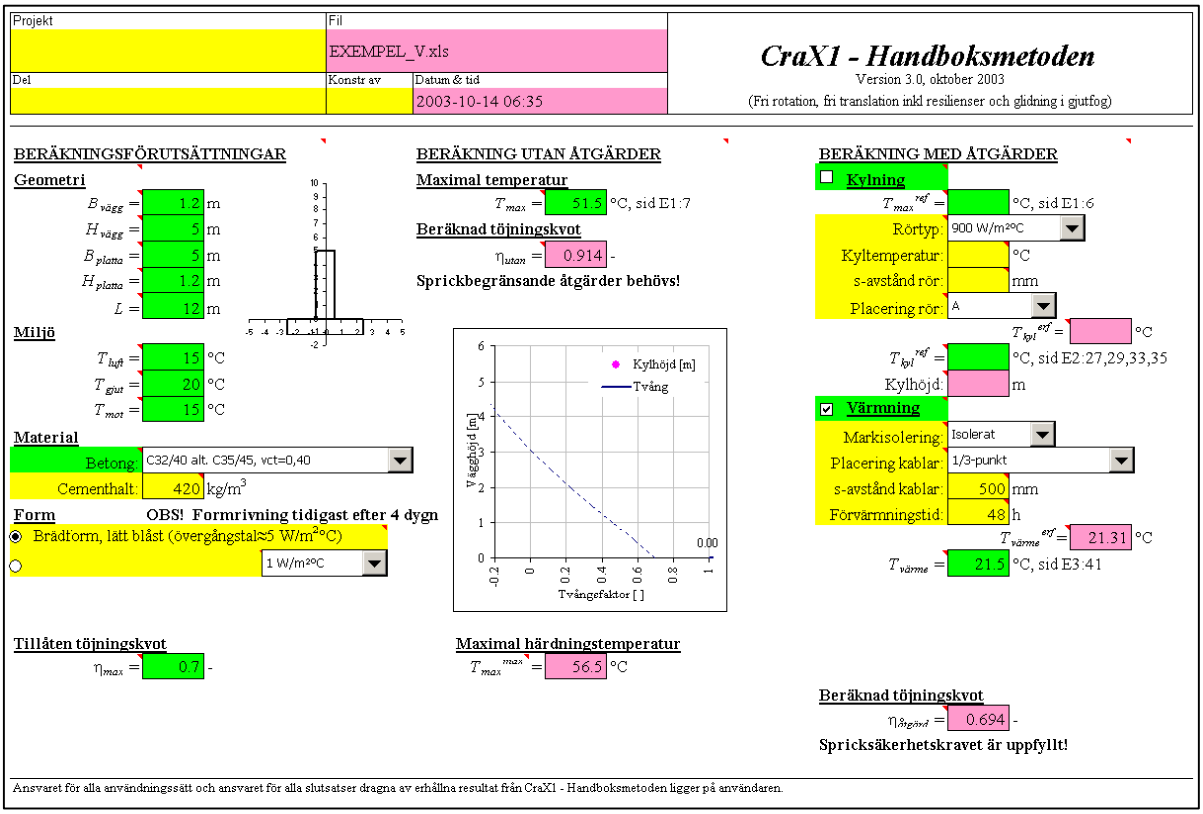


Figur 3.8 Avläsning av förvärmningstid för $T_{värme} = T_{platta} \approx 21.5$ °C i delfigur ”1/3-punkt s500” på sid E3:41 i handboken del E för aktuellt exempel.

Nu införs uppgifterna ***s-avstånd kablar*** = 500 mm och ***Förvärmningstid*** = 48 h i sina informationsceller samt $T_{värme}$ = 21.5 °C skrivs in i den grönmarkerade indatacellen. I resultatcellen kommer då ***Beräknad töjningskvot*** = 0.694 och strax därunder skrivs texten ***Spricksäkerhetskravet är uppfyllt!***, se figur 3.9. Beräkningarna för fallet med värmning är nu färdiga, om de faktiska värmekablarna har effekten 30 W/m. I annat fall skall man för samma effekt per ytenhet beräkna ett nytt s-avstånd med hjälp av tabell 3.1.

Tabell 3.1 Beräkning av s-avstånd för kablar med effekt 20, 30 eller 40 W/m.

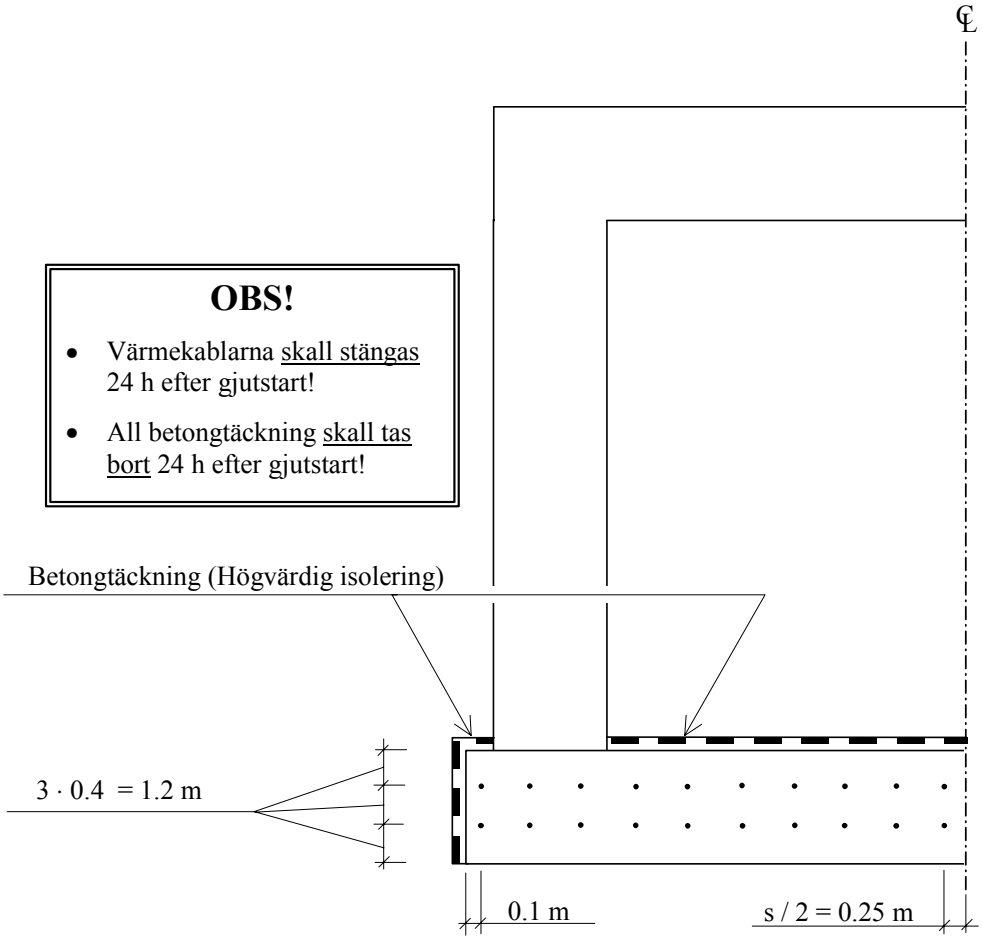
Valt värmningssystem i Excel-arket CraX1	**s-avstånd för kabel med effekten**		
	20 W/m	**30 W/m**	**40 W/m**
s300 mm, 100 W/m^2	200 mm	300 mm	400 mm
s400 mm, 75 W/m^2	260 mm	400 mm	530 mm
s500 mm, 60 W/m^2	330 mm	500 mm	660 mm



Figur 3.9 Beräkning av töjningskvot med åtgärden ”Värmning” för aktuellt exempel. Kopia av bladet ”Kalkylblad – Färg” i Excel-arket CraX1.

I aktuellt fall förutsätts att kablarna har effekten 30 W/m, varför kablarnas s-avstånd = 500 mm även i verkligheten, se skiss över kabelplaceringen i figur 3.10. Det är lämpligt att placera värmekablar ca 0.1 m från sidoytorna, vilket vanligtvis är mindre än s/2-värdet. Detta ger en mer likvärdig temperatur i hela plattan.

För att bibehålla större delen av tillförd värme skall plattans överyta och sidoytor täckas med högvärdig isolering från start av värmning. Sidotäckningen kan ersättas av kvarsittande form eller motfyllning av plattan. Kablarna skall slås av och täckningen skall tas bort 24 h efter gjutstart för att undvika situationen att plattan håller på att förstoras samtidigt som väggen krymper.



Figur 3.10 Placering av värmekablar med valt alternativ enligt figur 3.8. Kabeleffekt = 30 W/m i två lager med 10 st kablar i varje lager. Värmningen skall upphöra 24 h efter gjutstart, då även betongtäckningen tas bort helt.

Jämförelse ConTeSt Pro och CraX1

Det exempel som presenteras här i kapitel 3 har inte ingått i den genomförda regressionsanalysen, som presenteras i kapitel 8. Det är därför av intresse att se hur stora avvikelserna är mellan de med CraX1 – Handboksmetoden framtagna resultaten och resultatet vid tillämpning av ConTeSt Pro 1.4, se tabell 3.2.

Tabell 3.2 Jämförelse mellan beräkningar av töjningskvoter med ConTeST Pro och CraX1 – Handboksmetoden för exemplet i kapitel 3.

Beräkningsfall	**Töjningskvoter enligt**		**Avvikelse för CraX1, %**
	ConTeSt Pro 1.4	**CraX1 – Handboksmetoden**	
Utan åtgärder	0.905	0.914	1.0
Inkl kylning	0.664	0.691	4.1
Inkl värmning	0.696	0.694	-0.3

Som framgår av tabellen ligger avvikelserna för exemplet i kapitel 3 inom ± 5 %, vilket överensstämmer med resultaten från regressionsanalysen, se vidare kapitel 8.

4 BERÄKNINGSFÖRUTSÄTTNINGAR

4.1 Begränsningar

I tabell 4.1 sammanfattas kortfattat de viktigaste begränsningarna vid tillämpning av CraX1 – Handboksmetoden.

CraX1 – Handboksmetoden behandlar endast en konstruktionstyp, *nygjuten vägg på tidigare gjuten betongplatta* grundlagd på packad fyllning samt endast en sprickтyp, *spricka som går genom väggen och uppkommer under kontraktionsfasen*.

Beräkningarna förutsätter att *väggformen sitter kvar minst fyra dygn* (4 d) efter gjutningen.

Notera speciellt att *gjutning mot berg inte omfattas* av CraX1 – Handboksmetoden. Detta beroende på att kunskapen om hur berget ska behandlas är begränsat. Det har därför inte etablerats någon allmänt accepterad beräkningsmodell. Resultatet vad gäller sprickrisker är starkt beroende av egenskaper både i berget, i kontaktytan och i betongkonstruktionen, och det krävs mer forskning för att klargöra dessa komplicerade områden. Bl a kan begreppet berg innebära många olika ”bergkvaliteter”, vilket i många fall endast kan avgöras av personer med specialistkunskaper.

Övriga begränsningar i tabell 4.1 är mer av arten vilka dimensioner och vilka förutsättningar som använts vid beräkning av fallen utan åtgärder respektive för de sprickreducerande åtgärderna vid uppbyggnaden av redovisade handboksdiagram. Dessa gränser kan ibland tillåtas överskridas något, eftersom man med god ingenjörsteknik i många fall kan extrapolera resultaten.

Det finns en viss inbyggd styrning i de sprickreducerande åtgärderna, eftersom den angivna metodiken måste följas för att handbokens diagram ska vara giltiga.

Tabell 4.1 Några viktiga begränsningar vid tillämning av CraX1 – Handboksmetoden.

Område	**Begränsning**
Konstruktionsfall, se figur 4.1	Nygjuten vägg på tidigare gjuten betongplatta grundlagd på packad fyllning (OBS! Gjutning mot berg innefattas inte.)
Spricktyp, se figur 4.1	Töjningskvot beräknas för genomgående spricka i väggen under kontraktionsfasen
Formrivning	Beräkningarna förutsätter att väggformen sitter kvar minst fyra dygn (≥ 4d) efter gjutningen.
Väggens bredd ($B_{vägg}$ i figur 4.2)	Temperaturbelastningar presenteras i diagramform för väggbredder mellan 300 mm och 1800 mm.
Plattans höjd (H_{platta} i figur 4.2)	Temperaturförlopp vid uppvärmning av plattan med hjälp av värmekablar presenteras för platthöjder mellan 400 mm och 1400 mm.
Betongklass och cementsort	Följande betonger tillverkade med anläggningscement har studerats: - Betong C25/30, C28/35 alt. C30/37, vct = 0.50-0.55 - Betong C30/37 alt. C32/40, vct = 0.45 - Betong C32/40 alt. C35/45, vct = 0.40
Lufttemperaturer	För temperaturbelastningar utan åtgärder har lufttemperaturer mellan -15 °C och 20 °C studerats. För de lägre temperaturnivåerna har risken för frysning vintertid inte speciellt beaktats, utan man bör i varje enskilt fall göra speciell utredning. För temperaturbelastningar vid kylning av väggen har gjuttemperaturer mellan 5 °C och 25 °C studerats. Nedre gränsen på 5 °C är vald med tanke på att vid dygnsmedeltemperaturen 5 °C finns en uppenbar risk att temperaturen sjunker under 0 °C någon gång under dygnet.
Placering av rör vid kylning av väggen	Två principiellt olika placeringar redovisas i handboken enligt: A) montering på befintlig armering, och B) placering för effektiv kylning. Respektive placeringar måste bibehållas vid det val som görs vid tillämpning av kylning. Övriga begränsningar/förutsättningar framgår enklast vid beskrivning av fallet kylning i avsnitt 6.1
Placering av värmekablar vid värmning av plattan	Två principiellt olika placeringar redovisas i handboken enligt: A) montering på befintlig armering i över- respektive underkant av plattan, och B) placering för effektiv värmning. Respektive placeringar måste bibehållas vid det val som görs vid tillämpning av värmning. Övriga begränsningar/förutsättningar framgår enklast vid beskrivning av fallet värmning i avsnitt 6.2

4.2 Geometri

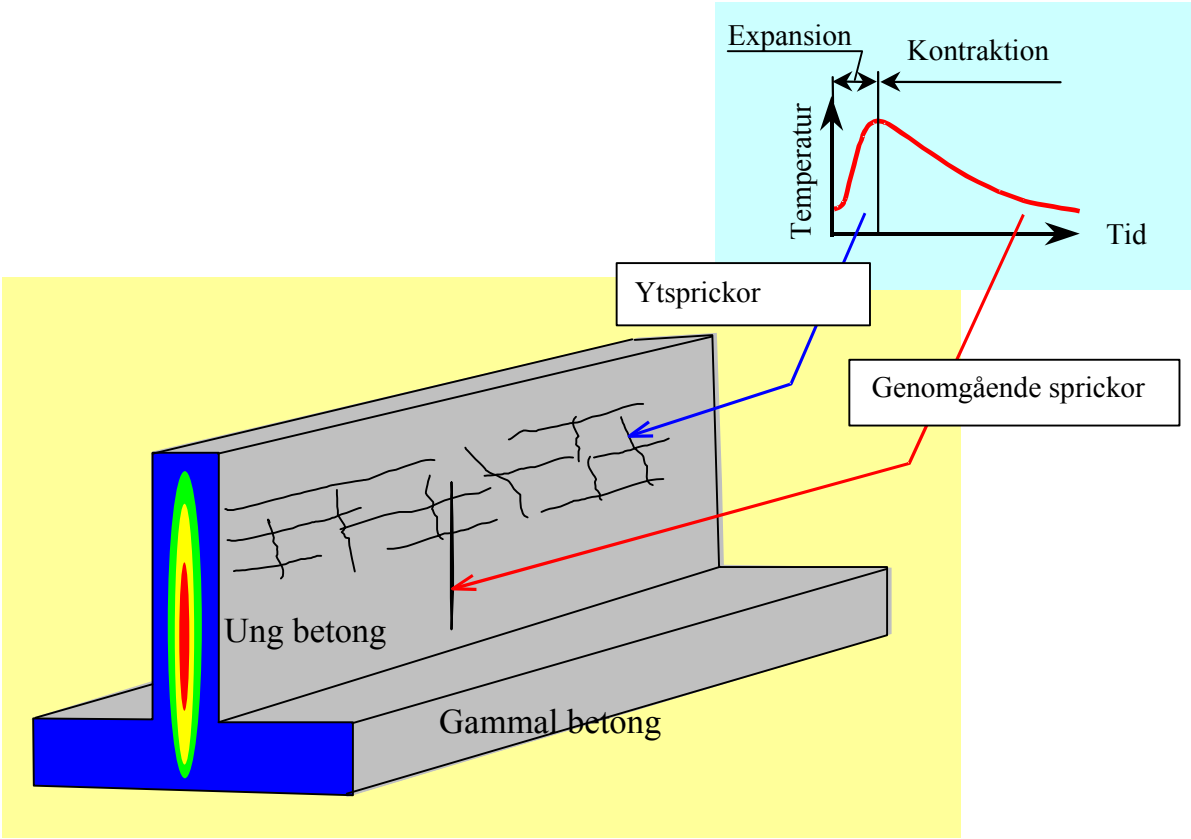
Den studerade konstruktionen är en nygjuten vägg på en tidigare gjuten betongplatta, se figur 4.1. Traditionellt delas risken för sprickor i tidig ålder in i

- ytsprickor under expansionsfasen, och
- genomgående sprickor under kontraktionsfasen

En stor del av bedömningarna av riskerna för ytsprickor kan analyseras med hjälp av ett av typfallen i Emborg m fl, 1997, dvs metod 2, och endast ett fåtal situationer måste studeras med metod 3 (=speciella beräkningar).

För genomgående sprickor under kontraktionsfasen är bilden den omvända: endast ett fåtal situationer utan åtgärder kan analyseras med metod 2, och man är i övrigt hänvisad till att göra egna beräkningar.

För typfallet vägg-på-platta utgör CraX1 – Handboksmetoden en beräkningsmetod som både analyserar situationen för genomgående sprickor utan åtgärder och tar fram erforderliga sprickreducerande åtgärder i form av kylning, värmning eller en kombination av dessa.



Figur 4.1 Typfallet ”vägg-på-platta” avser en konstruktion i form av en nygjuten vägg på en tidigare gjuten betongplatta.

Nödvändiga geometriska mått, se figur 4.2, är

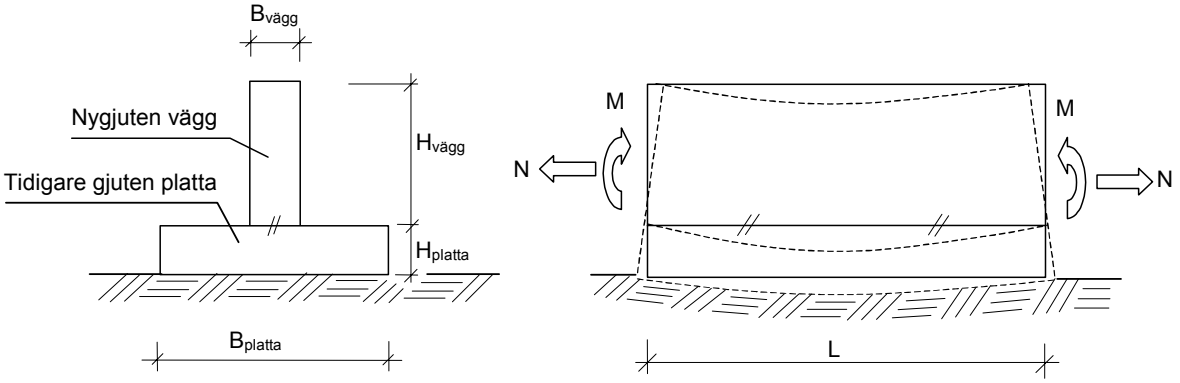
$B_{vägg}$ = väggens bredd, m

$H_{vägg}$ = väggens höjd, m

B_{platta} = plattans bredd, m

H_{platta} = plattans höjd, m

L = fri gjutlängd, m

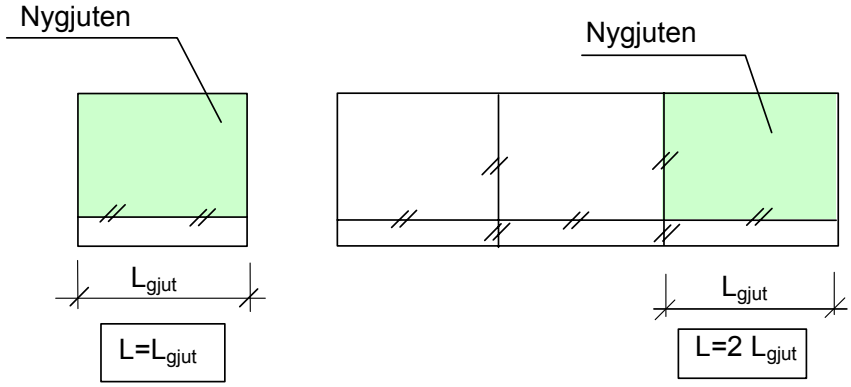


Figur 4.2 Definition av typfallet vägg-på-platta grundlagd på packad fyllning.

Det enda randvillkor som studeras i CraX1 – Handboksmetoden är det som beskrivs med ”fri yttre rörelsemöjlighet”, vilket i högra delen av figur 4.2 innebär att de yttre krafterna (M och N) är lika med 0. Detta kan också uttryckas med att den sammansatta konstruktionen vägg + platta fritt kan ha en axiell rörelse (fri translation) och fritt kan böjas (fri rotation). Detta uppkommer eftersom konstruktionen är grundlagd på packad fyllning, se vidare kapitel 7.4.

Situationen i figur 4.2 och figur 4.3a kan beskrivas som gjutning av enskild fristående monolit. Samma randvillkor uppkommer om man gjuter en angränsande monolit med konstruktiva vertikala rörelsefogar (dilatationsfogar) mellan gjutetapperna. För att denna situation ska uppkomma är det viktigt att rörelsefogarna utformas så att konstruktionens rörelser verkligen kan ske utan motstånd även under expansionsfasen.

En annan mycket vanlig gjutmetod är att man enbart har stumfogar vid successiva gjutetapper av platta respektive vägg, se figur 4.3b. Då ska man i Excel-arket sättas in L = fri gjutlängd lika med *dubbla den faktiska gjutlängden*.



a) Enskild monolit b) Successiv gjutning av etapper med stumfogar

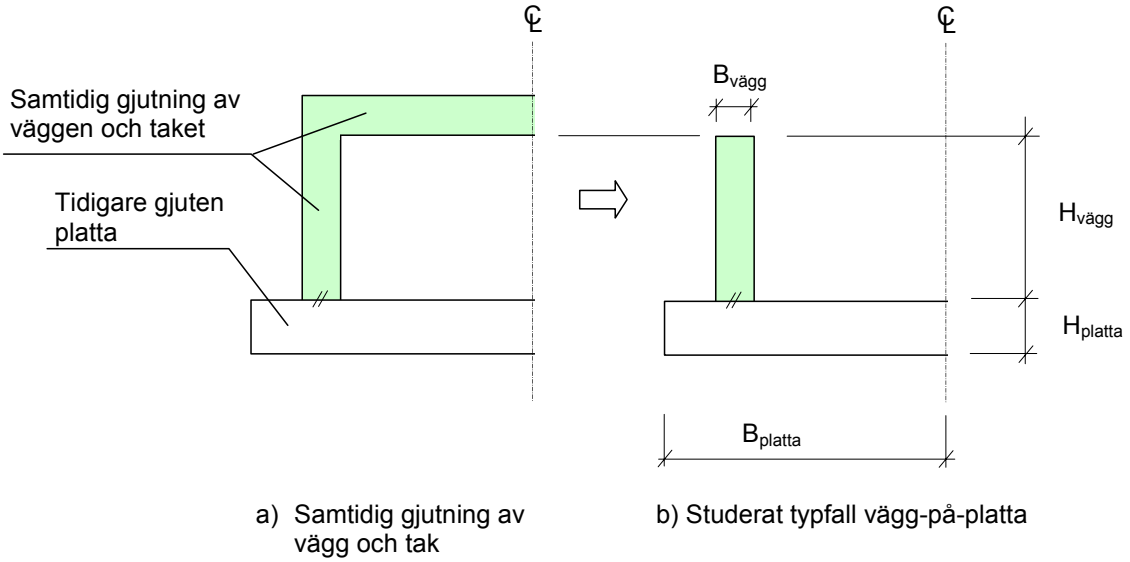
Figur 4.3 Illustration av L = fri gjutlängd vid gjutning av vägg på platta.

Måttet på fri gjutlängd behövs för att beräkna hur lång väggen är i förhållande till sin höjd (=förhållandet L/H). Kortare värden på L/H kan beskrivas som höga balkar. Denna situation är gynnsammare än långa balkar, eftersom en mindre andel av väggen blir utsatt för höga påkänningar. Man bör hålla måttet på den fria gjutlängden så litet som möjligt, och en generell rekommendation kan vara att, om möjligt, begränsa L/H till ca 2 á 3. Dessutom tillkommer att man kan få gynnsam inverkan av korta gjutlängder av glidningar i gjutfogen. För mer information om belastningens beroende av längden, se vidare kapitel 7.

Samtidig gjutning av vägg och tak

Typfallet ”vägg-på-platta” kan appliceras på många gjutsituationer, t ex plattrambroar, tunnlar, stödmurar och liknande konstruktioner. När den verkliga konstruktionen består av en konstruktiv vägg som gjuts på en konstruktiv platta är det uppenbart att direkt använda det valda typfallet. I fallet att man gjuter en takplatta/farbaneplatta i direkt följd efter väggjutningen är också typfallet vägg på platta tillämpbart, se figur 4.4. Det man behöver göra är att sätta väggens höjd lika med avståndet mellan bottenplattan och taket.

Man bör dock vara medveten om att en mer detaljerad studie som även inkluderar taket kan vara aktuell om det är betydande dimensionsskillnader mellan vägg och tak eller det finns stora dimensionsändringar i taket, t ex voter eller liknande.

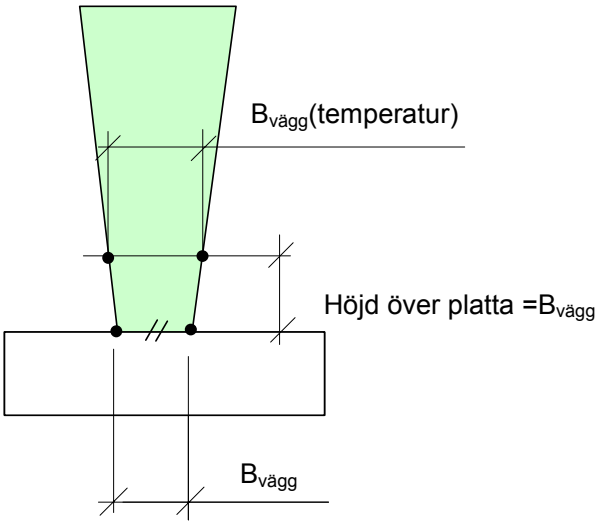


Figur 4.4 Transformering av samtidig gjutning av vägg och tak till typfallet vägg-på-platta. I figuren visas ena halvan av en symmetrisk konstruktion.

Variabel väggtjocklek

Det är relativt vanligt att väggen görs tjockare uppåt, se figur 4.5. I detta fall får man för typfallet vägg-på-platta betrakta två olika väggbredder enligt:

I. $B_{vägg}$	för att ge beräkningsförutsättningarna för geometrin.
II. $B_{vägg}$(temperatur)	vid avläsning av maximal temperatur och vid analys av sprickreducerande åtgärden att använda ingjutna kylrör.



Figur 4.5

Transformering av variabel väggtjocklek till typfallet vägg-på-platta.

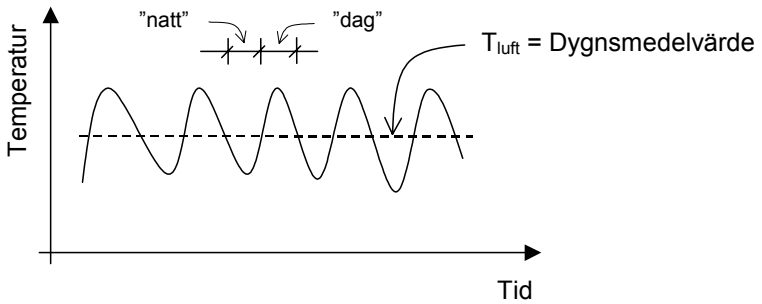
4.3 Miljö

För beskrivning av miljö anges följande parametrar:

T_{luft} = lufttemperatur, °C
T_{gjut} = gjuttemperatur, °C
T_{mot} = motgjutningstemperatur, °C

Lufttemperatur

Lufttemperaturen avser ett relevant dygnsmedelvärde från gjutning till tidpunkten för maximal spänning, se figur 4.6. Maximal spänning uppnås vanligen inom en vecka (tunna väggar, ca 0.5 m) till en månad (tjocka väggar, ca 2 m). Skälet till detta är att situationen för genomgående sprickor påverkas endast marginellt av normala dygnsvariationer.



Figur 4.6 Lufttemperatur avser dygnsmedelvärdet

Motgjutningstemperatur

I vårt typfall vägg-på-platta innebär motgjutningstemperaturen den medeltemperatur som plattan har vid tiden för gjutning av väggen. Vanligen är tidigare gjuten konstruktion i temperaturjämvikt med lufttemperaturen, vilket innebär att:

Vanligen: Motgjutningstemperatur = Lufttemperatur

Man måste dock alltid själv avgöra hur den faktiska situationen är, och härvid är det konstruktionens medeltemperatur från gjutning av väggen och ca ett dygn framåt som är aktuell att bedöma som motgjutningstemperatur. T ex kan den tidigare gjutna konstruktionen bestå av relativt nyligen gjuten betong och därför har en genomsnittstemperatur som skiljer sig från lufttemperaturen. Det kan också vara så att den tidigare gjutna konstruktionen har sådana dimensioner att den inte hunnit komma i fullständig jämvikt med lufttemperaturen.

Om man har värmt upp den motgjutna konstruktionen med hjälp av tillförd värme betraktas det här som sprickreducerande arbetsplatsåtgärd. För valda typfall med ingjutna värmekablar, se vidare avsnitt 6.2

Motgjutningstemperaturen avser en beskrivning av den motgjutna betongkonstruktionens ”utgångstorlek” vid tidpunkten för gjutning av den unga betongen. Detta är en viktig parameter, eftersom en temperaturdifferens mellan den nygjutna konstruktionen och den tidigare gjutna betongkonstruktionen leder till spänningar i respektive konstruktionsdel.

Gjuttemperatur

Gjuttemperaturen avser den temperatur som betongmassan har i formen efter hantering och bearbetning på arbetsplatsen. För att få en uppfattning av vilka betongtemperaturer som har förekommit respektive kan tänkas förekomma i olika delar av Sverige, se figurerna 4.7 – 4.14. Vilka orter respektive figur avser och typen av statistik som använts framgår av tabell 4.2. Allra bäst är naturligtvis om man har sin egen statistik eller direkta uppgifter från den lokala betongfabrik, där man normal beställer betongen.

Tabell 4.2 Förteckning av figurer visande betong-, vatten- och lufttemperaturer för några orter i Sverige.

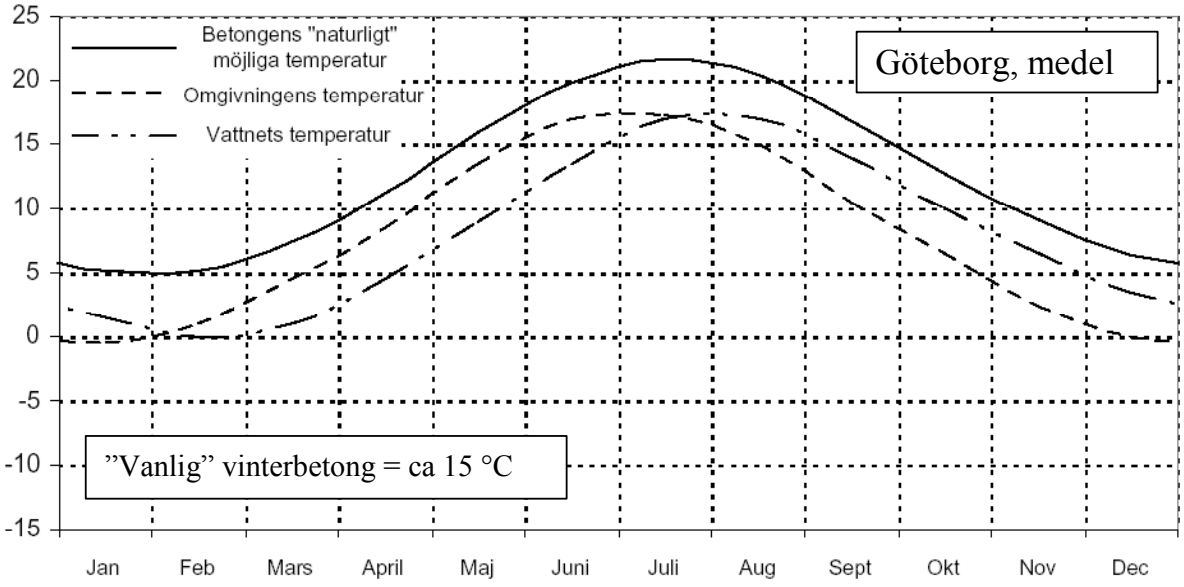
Figur	Ort
4.7	Göteborg, medel[1]
4.8	Stockholm, år 2000
4.8	Stensele, normal[2]
4.10	Falun, normal[2]
4.11	Jönköping, normal[2]
4.12	Luleå, normal[2]
4.13	Stockholm, normal[2]
4.14	Malmö, normal[2]

1) Enligt uppgifter i Betonghandboken – Arbetsutförande, 1982
2) Ortens medeltemperatur enligt SMHI:s referensnormaler tiden 1961-90.

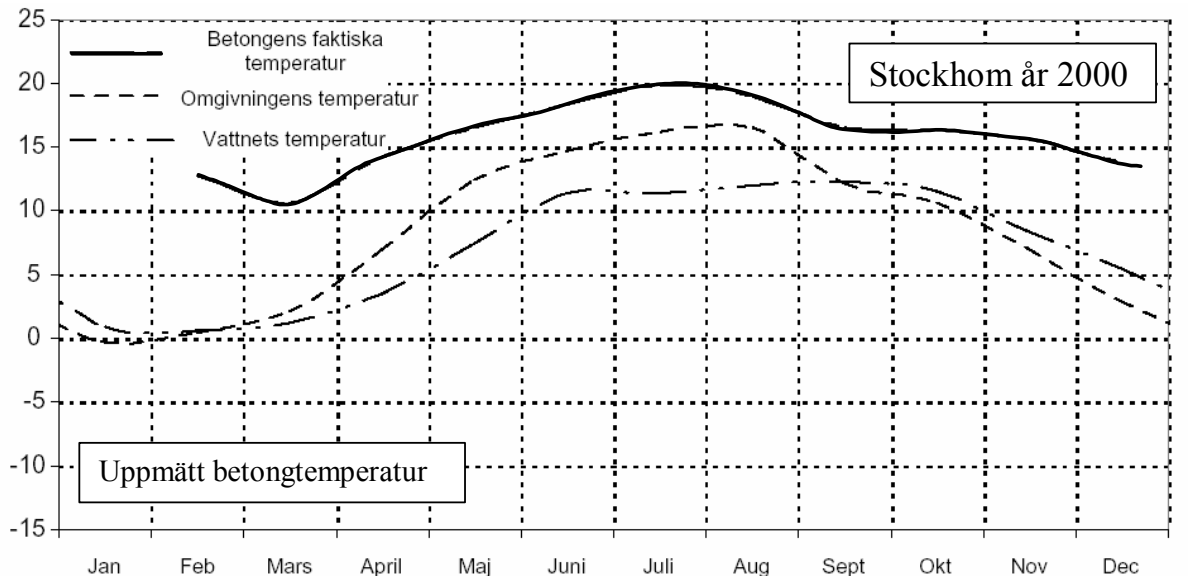
Den betongtemperatur som redovisas i figur 4.7 samt figurerna 4.9 – 4.14 avser betongens ”naturligt” möjliga temperatur. Med detta menas att man inte har tillfört extra värme till betongmassan i form av uppvärmt vatten utan man använder det tillgängliga vattnets ”naturliga” temperatur för årstiden. Detta utgör en möjlig potential att på ett enkelt sätt få en låg betongtemperatur. För att önskvärd situation ska uppnås krävs att det etableras ett samarbete mellan de olika aktörerna: konstruktör, materialleverantör och entreprenör.

Det är enkelt att från betongfabriken beställa en vinterbetong med temperaturer på betongmassan större än 15 °C. Denna situation ska dock undvikas aktivt, eftersom den s k ingångsdifferensen ($T_{gjut} – T_{mot}$, se vidare avsnitt 5.2.1) kan bli mycket stor vintertid. Det vanligaste förfarandet vintertid är att betongfabrikerna levererar en betong med viss mängd varmvatten tillsatt, vilket ger en gjuttemperatur på ca 15 °C, se figur 4.8, som visar ett exempel på faktiska betongtemperaturer enligt gjorda mätningar. Att värma betongmassa till ca 15 °C vintertid betecknas i figurerna 4.7 och 4.9 – 4.14 som ”vanlig” vinterbetong.

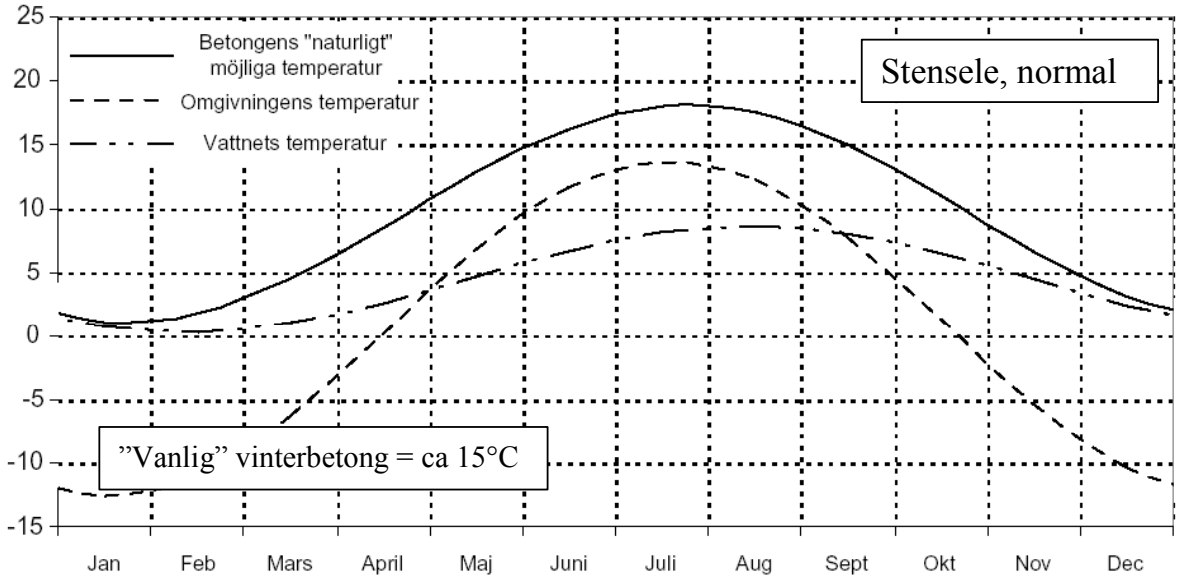
Av figur 4.7 och figurerna 4.9 – 4.14 framgår att betongtemperaturer ner till ca 10 °C kan erhållas genom att beställa minskad varmvatteninblandning. Gjuttemperaturer inom intervallet 0 – 10 °C kräver att konstruktören/entreprenören gör speciella utredningar för att kontrollera att uppkomna formtryck kan accepteras och att det inte förekommer någon risk för tidig frysning.



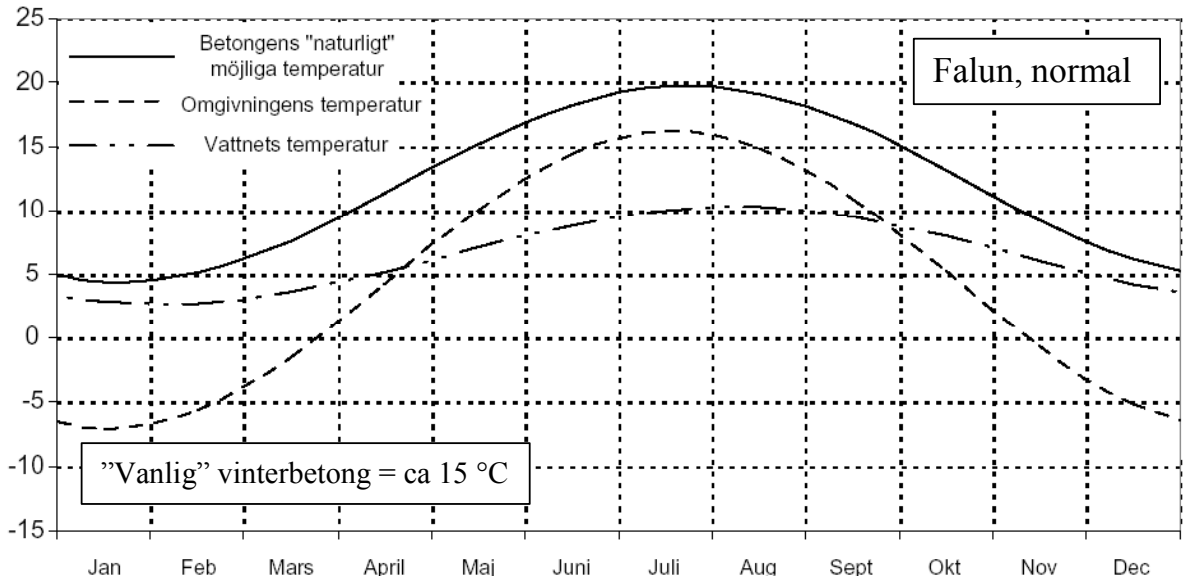
Figur 4.7 Diagrammet visar luftens medeltemperatur i Göteborg. Den genomsnittliga vattentemperaturen är mätt i Göta Älv och betongens temperatur är den förväntade leveranstemperaturen under förhållanden enligt Betonghandbok – Arbetsutförande, andra upplagan, 1982 (Bernander S). Beteckningen ”vanlig” vinterbetong avser att varmvatten tillsätts och att betongtemperaturen blir ca 15 °C.



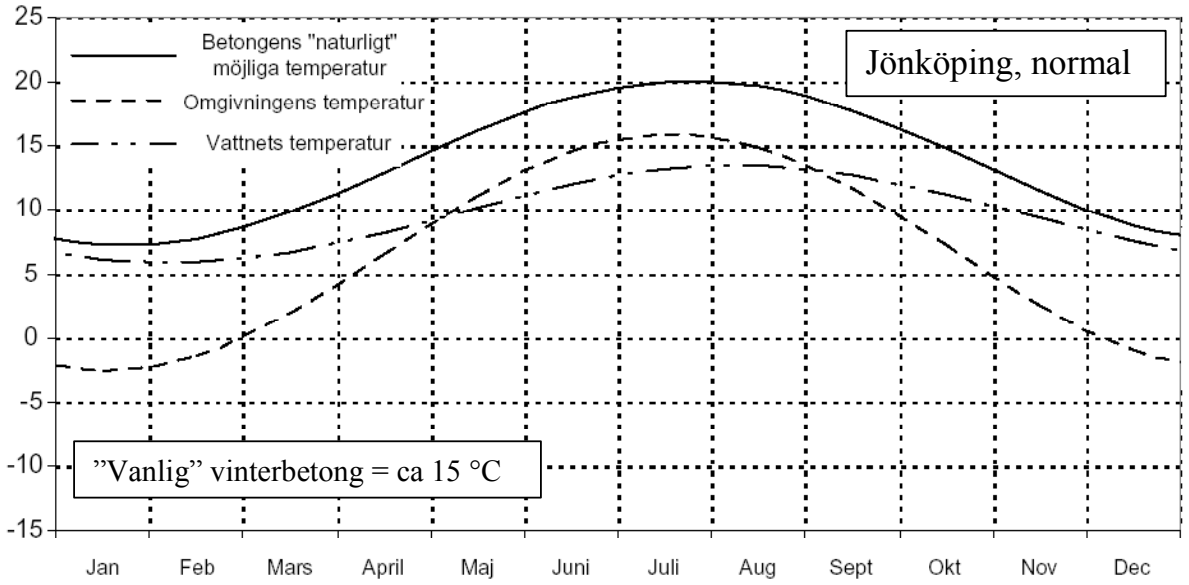
Figur 4.8 Den heldragna kurvan är den uppmätta betongtemperaturen på Swerocks samtliga fabriker i Stockholm år 2000. Här syns tydligt (jämför figur 4.7) att varmvatten tillsats på höstkanten från och med oktober till och med mitten av april.



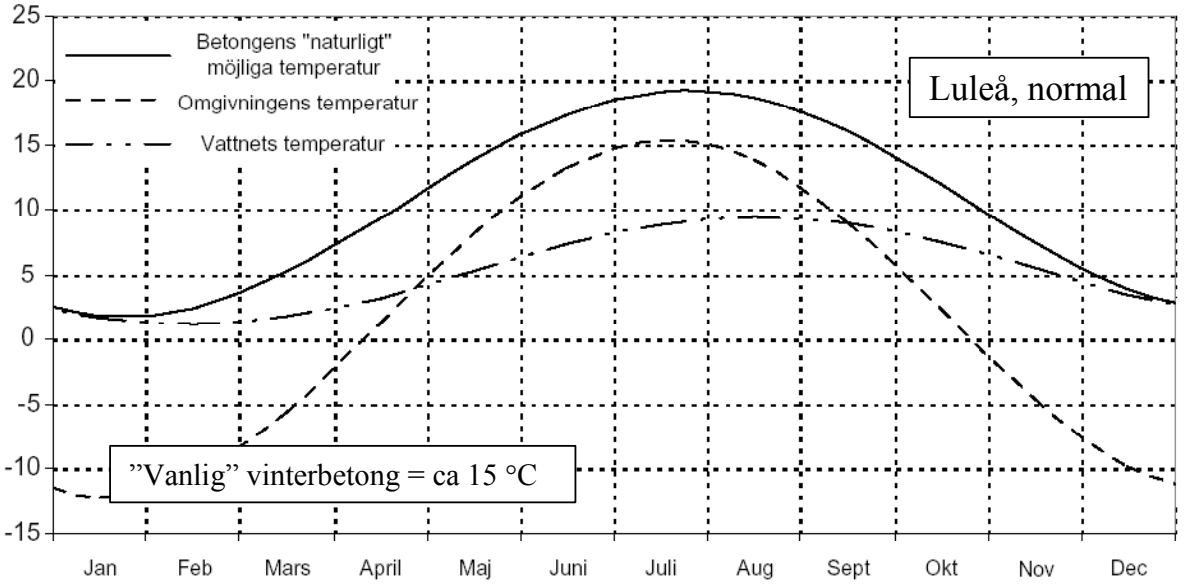
Figur 4.9 Här ses betongtemperaturens årstidsvariation för Stensele beroende av vatten- och utomhustemperaturen. Omgivningens maximum inträder i mitten av året, och vattentemperaturen har sitt högsta värde något senare på året. Betongtemperaturen beror av båda dessa temperaturer och ligger alltid högre än dessa med ett högsta värde mellan omgivningens och vattnets maximala läge.



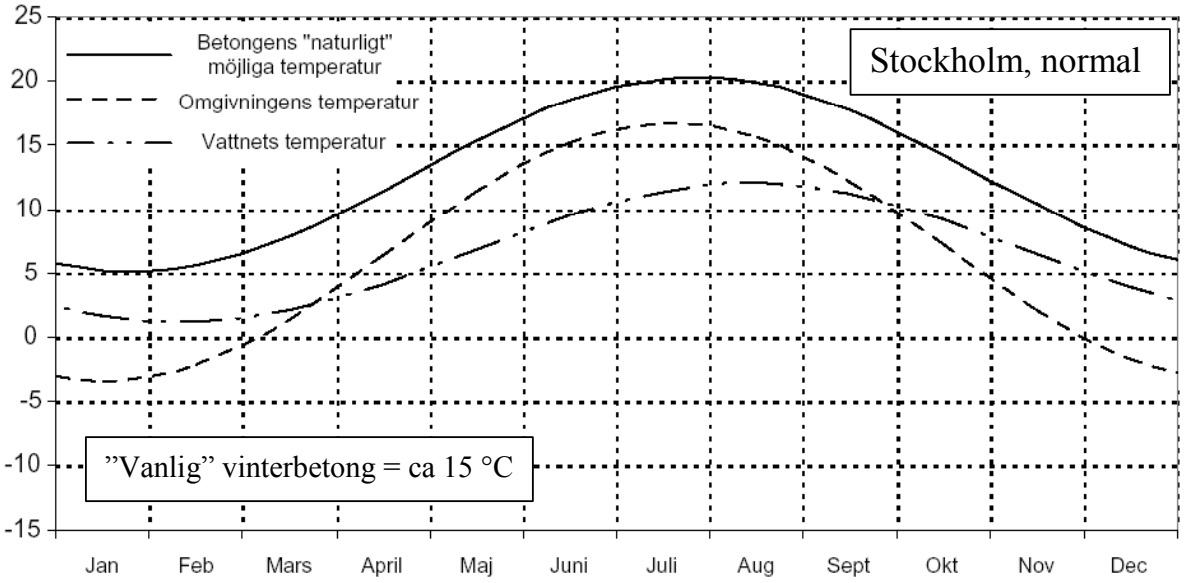
Figur 4.10 Här ses betongtemperaturens årstidsvariation för Falun beroende av vatten- och utomhustemperaturen. Omgivningens maximum inträder i mitten av året, och vattentemperaturen har sitt högsta värde något senare på året. Betongtemperaturen beror av båda dessa temperaturer och ligger alltid högre än dessa med ett högsta värde mellan omgivningens och vattnets maximala läge.



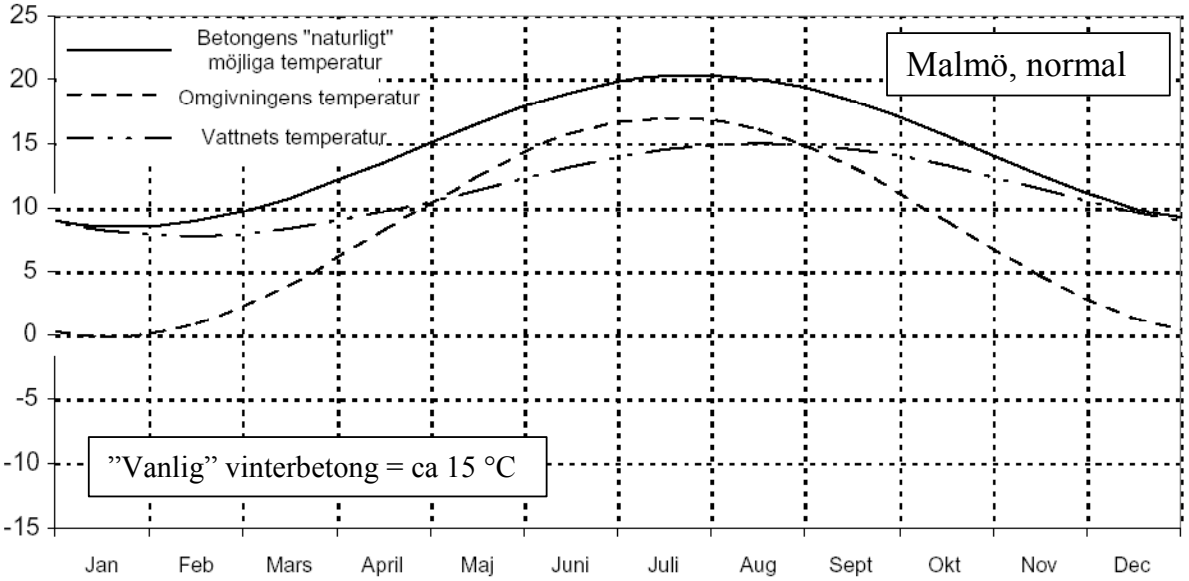
Figur 4.11 Här ses betongtemperaturens årstidsvariation för Jönköping beroende av vatten- och utomhustemperaturen. Omgivningens maximum inträder i mitten av året, och vattentemperaturen har sitt högsta värde något senare på året. Betongtemperaturen beror av båda dessa temperaturer och ligger alltid högre än dessa med ett högsta värde mellan omgivningens och vattnets maximala läge.



Figur 4.12 Här ses betongtemperaturens årstidsvariation för Luleå beroende av vatten- och utomhustemperaturen. Omgivningens maximum inträder i mitten av året, och vattentemperaturen har sitt högsta värde något senare på året. Betongtemperaturen beror av båda dessa temperaturer och ligger alltid högre än dessa med ett högsta värde mellan omgivningens och vattnets maximala läge.



Figur 4.13 Här ses betongtemperaturens årstidsvariation för Stockholm beroende av vatten- och utomhustemperaturen. Omgivningens maximum inträder i mitten av året, och vattentemperaturen har sitt högsta värde något senare på året. Betongtemperaturen beror av båda dessa temperaturer och ligger alltid högre än dessa med ett högsta värde mellan omgivningens och vattnets maximala läge.



Figur 4.14 Här ses betongtemperaturens årstidsvariation för Malmö beroende av vatten- och utomhustemperaturen. Omgivningens maximum inträder i mitten av året, och vattentemperaturen har sitt högsta värde något senare på året. Betongtemperaturen beror av båda dessa temperaturer och ligger alltid högre än dessa med ett högsta värde mellan omgivningens och vattnets maximala läge.

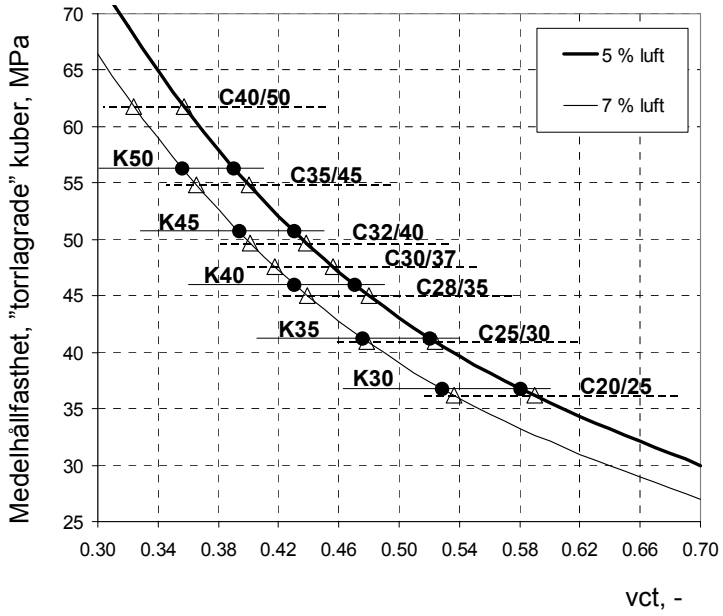
4.4 Material

Betong

I Excel-arket CraX1 kan man välja mellan tre materialbeskrivningar för betonger (med beteckningar enligt SS-EN 206-1 och SS 137003) med anläggningscement enligt:

- Betong C25/30, C28/35 alt. C30/37, vct = 0.50 – 0.55 (BBK94: Btg K40)
- Betong C30/37 alt. C32/40, vct = 0.45 (BBK94: Btg K40 alt. K45)
- Betong C32/40 alt. C35/45, vct = 0.40 (BBK94: Btg K45)

Dessa betonger är de i Sverige vanligast förekommande vid gjutning av anläggningskonstruktioner. Vanligen beror valet av betong på vilken exponeringsklass (BBK94: miljöklass) konstruktionen befinner sig i och/eller på konstruktörens krav på hållfasthet. Exponeringsklassen leder till ett högsta tillåtet vattencementtal (vct), men kopplingen till klass för tryckhållfasthet är inte helt entydig. I figur 4.15 visas tendenssamband mellan medelhållfasthet och vct. Begreppet medelhållfasthet avser medelhållfastheten för hela populationen vid tillverkning av betong i olika klasser för tryckhållfasthet på en viss betongfabrik. Av figuren framgår direkt att en sänkning av vct krävs då man ökar lufthalten i betongen. Bland andra faktorer som också påverkar betongsammansättningen kan nämnas typen av tillsatsmedel och ballastgraderingen. Dessutom måste betongfabriker med stor spridning i hållfasthetsresultaten lägga sig på en högre medelhållfasthet för att uppfylla ett specifikt krav, likväl som att en betongfabrik med liten spridning i hållfasthet kan ha en lägre medelhållfasthet för att uppfylla ett visst formellt krav för en hållfasthetsklass. Sammantaget innebär dessa variationsmöjligheter att för en bra information om betongsammansättningar för en viss region eller en viss betongfabrik, måste konstruktören och/eller entreprenören samråda med betongtillverkaren.



Figur 4.15 Tendensvärden för medelhållfastheter för tillverkning av betong med anläggningscement klassad enligt BBK94 (K30 - K50) samt enligt SS-EN 206-1 och SS 137003 (C20/25 – C40/50). Analysen är genomförd av Swerock.

Figur 4.15 visar samband mellan 28-dygnshållfasthet för ”torrlagrade” kuber och vct vid tillverkning av betong med anläggningscement. Med begreppet torrlagrade kuber avses det som vid tillämpning av BBK94 och SS 137210 betecknas ”normlagring”, dvs fukthärdning i en vecka och luftlagring i tre veckor samt provtryckning av torra kuber vid 28 dygns ålder. Betong klassad enligt SS-EN 206-1 och SS 137003 vattenlagras hela härdningstiden och provtryckningen sker med våt provkropp. Dessa senare hållfastheter är i figur 4.15 omräknade att gälla för torrlagrade kuber för att med materialtekniska aspekter kunna göra jämförelser mellan olika betonger i de bägge klassningssystemen. Vid framtagning av sambanden i figur 4.15 har även hänsyn tagits till att analysen av utborrade prover har ändrats från BBK94 till motsvarande regler enligt SS-EN 206-1 och SS 137003 samt Bro 2002 Bilaga 4-13 ändring 2002-12-10.

Av figur 4.15 framgår att ur materialteknisk synpunkt gäller att betong K45 motsvaras närmast av betong C32/40, dvs med ett fordrat kubhållfasthetsvärde enligt SS-EN 206-1 och SS 137003 på 40 MPa. Beroende på t ex omständigheter som krav på vct och aktuell betongfabriks erfarenhet och arbetssätt respektive kravet på hållfasthet kan man säga att betong enligt BBK94 i normalfallet kan ”ersättas” med olika betonger. T ex kan man tänka sig att ersätta en betong K45 med antingen C32/40 eller C35/45. Som tidigare nämnts spelar flera faktorer in vid det slutliga valet av betongsammansättning. Med hänsyn till risken för sprickor i ung ålder, dvs det område som behandlas i denna handbok, bör man inte i onödan välja högre hållfasthetsklass än vad som krävs av t ex beständighetsskäl och att erforderliga laster kan bäras av konstruktionen. Med hjälp av figur 4.15 kan man för olika krav på vct komma fram till att följande kan anses gälla för att minska risken för temperatursprickor:

- C25/30 är att föredra framför C28/35 som ersättare av K35 för vct ≤ 0.55
- C28/35 är att föredra framför C30/37 som ersättare av K40 och vct ≤ 0.50
- C30/37 är en lämplig ersättare av K40 och vct ≤ 0.45
- C32/40 är en lämplig ersättare av K45 och vct ≤ 0.45
- C32/40 är att föredra framför C35/45 som ersättare av K45 och vct ≤ 0.40

I miljöklass A2 är kravet enligt BRO 94 att vct skall vara högst 0.50. För motsvarande exponeringsklasser är enligt SS-EN 206-1 och SS 137003 kravet på högsta vct 0.55, varför man kan förmoda att betonger jämförbara med frostbeständig K35 i framtiden kommer att användas inom anläggningsbyggandet i tillämpliga exponeringsklasser.

Förenklat kan man säga att ju lägre vct är ju större blir sprickrisken för i övrigt likartade förhållanden. Kopplingen till vct är framför allt att ju lägre vct desto större autogen krympning. Dessutom innebär vanligen lägre vct högre cementhalt, vilket ökar temperaturbelastningen på grund av högre hydratationsvärme. I praktiken kan man säga att den autogena deformationen blir försumbart liten för vct > 0.5. Detta senare innebär att hållfasthetsklasserna C25/30, C28/35 och C30/37, om vct större än ca 0.5, blir med god approximation enbart beroende av cementhalten för en sprickriskanalys enligt Excel-arket CraX1. Detta beror på att inom ett relativt begränsat område av hållfasthetsvariation är betongens dragtöjningskapacitet ungefär konstant trots att hållfastheten varierar.

Valet av hållfasthetsklass kan sammanfattas med en generell rekommendation att inte i onödan öka risken för tidiga temperatursprickor, vilket innebär:

> Välj inte betong med lägre vct eller högre hållfasthet än nödvändigt !
>
> Samråd mellan konstruktör, entreprenör och betongtillverkare är önskvärt!

Cementhalt

Vid beräkning med Excel-arket CraX1 ska användaren ange cementhalten för den aktuella betongen. Vid leverans av betong från en betongfabrik framgår inte alltid cementhalten av följesedeln. För en del recept varierar cementhalten med konsistensklassen, vilket kan medföra att det för t ex 100 mm respektive 130 mm sättmått inte är samma cementhalt, om inte detta särskilt överenskommits. Det är således lämpligt att alltid inhämta uppgifter från betongleverantören vilka cementhalter som kan vara aktuella.

Cementhalten påverkar framför allt temperaturökningen. I handboken redovisas temperaturvärden för följande cementhalter:

C = 360, 380, 400, 420 respektive 440 kg/m^3

Om den aktuella cementhalten inte överstämmer med någon av dessa cementhalter, är det upp till användaren att antingen välja den högre cementhalten (= på säker sida) eller använda en inter- respektive extrapolationsteknik med värden från flera diagram.

För uppskattning av cementhalten kan, för betong med 27 mm maximal stenstorlek och användning av luftporbildare och vattenreducerare vid ca 100 mm sättmått, riktvärden enligt tabell 4.3 användas vid en förkalkylering.

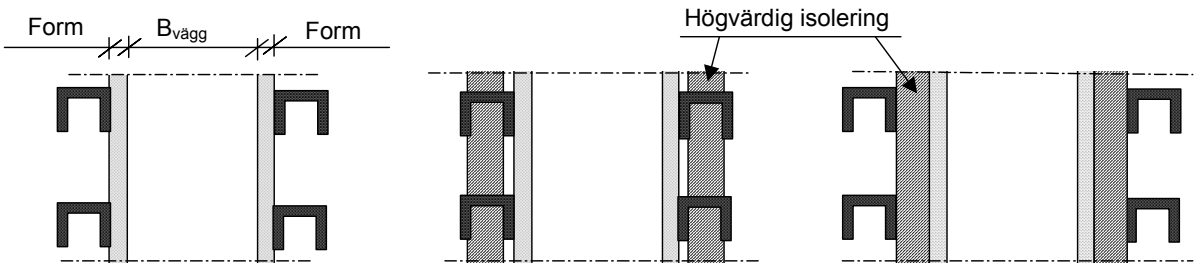
Tabell4.3 Ungefärliga cementhalter för svenska betonger med anläggningscement.

Klass för tryckhållfasthet* enligt SS-EN 206-1 och SS 137003	Hållfasthetsklass enligt BBK94	vct	C, kg/m^3
C25/30 alt. C28/35	K35	0.55	360
C28/35 alt. C30/37	K40	0.50	380
C30/37 alt. C32/40	K40 alt. K45	0.45	400
C32/40 alt. C35/45	K45	0.40	420

*) Beteckningar enligt SS-EN 206-1 och SS 137003 anges i Excel-arket CraX1.

4.5 Form

Formens utformning inverkar framför allt på värmeövergångstalet för beskrivning av mängden värme som överförs från betongytan till luften. Här inverkar också vindhastigheten i anslutning till formkonstruktionen. I figur 4.16 definieras begreppen normal- respektive välisolerad form. Framräknade övergångstal för de tre formtyperna enligt figur 4.16 för några vanliga formmaterial vid varierande vindhastigheter redovisas i tabellerna 4.4 – 4.6.



a) Osiolerad form b) Normalisolering c) Välisolerad form

Figur 4.16 Väggformar med olika isoleringssätt.

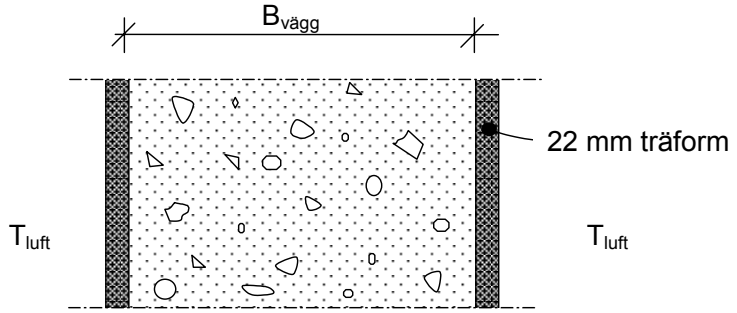
En form bestående av 22 mm trä (”1-tums råplanade bräder”) utan isolering är en vanligt förekommande formtyp inom anläggningsbyggandet i Sverige, se figur 4.17. Av tabell 4.4 framgår att för vindhastigheten ca 3 – 8 m/s är övergångstalet 5 W/m^{2}K ett representativt värde. Vidare förutsätts att formen sitter kvar minst 4 dygn för att inte orsaka onödigt stor temperatursänkning i väggytan i samband med formrivningen. Därför har i denna handbok valts:

Representativt värmeövergångstal = 5 W/m^{2}K och formrivningstid minst fyra dygn (> 4 d) efter gjutning.

Övergångstal för trä kan även gälla för motsvarandetjocklekar av formplywood. Värmeövergångstalet 5 W/m^{2}K har använts vid beräkning av de temperaturer som redovisas i kapitel E1 ochE2 i diagramdel E, vilket sammanfattas enligt:

Övergångstal = 5 W/m^{2}K för:	E1. Maximala temperaturer utan att arbetsplatsåtgärder för sprickreducering vidtagits E2. Maximala temperaturer inklusive inverkan av kylning

För andra övergångstal än 5 W/m^{2}K redovisas i kapitel E4 i diagramdelen E maximitemperaturer utan att speciella åtgärder för sprickreducering har genomförts. I Excel-arket CraX1 måste användaren själv aktivt välja fallet ”annat övergångstal” för att markera att avläsning sker från kapitel E4.



Figur 4.17 Studerat väggtvärsnitt med vanligt förekommande form av 22 mm trä.

Tabell 4.4 Värmeövergångstal från betongytan till luft för oisolerade formar

Typ av form	Värmeövergångstal (W/m^2K) för vindhastigheten						
	1 m/s	2 m/s	3 m/s	5 m/s	8 ms/	10 m/s	15 m/s
3 mm stål	9.5	13.5	17.4	26.6	38.4	45.7	62.6
12 mm trä	5.3	6.3	7.0	8.1	9.0	9.3	9.8
16 mm trä	4.6	5.3	5.8	6.6	7.1	7.3	7.7
18 mm trä	4.3	4.9	5.4	6.0	6.5	6.6	6.9
22 mm trä	3.8	4.3	4.7	5.1	5.5	5.6	5.8
25 mm trä	3.5	4	4.2	4.6	4.9	5,0	5.1
38 mm trä	2.7	2.9	3.0	3.2	3.4	3.4	3.5
45 mm trä	2.3	2.5	2.6	2.8	2.9	2.9	3.0
62 mm trä	1.8	1.9	2.0	2.1	2.1	2.2	2.2

Tabell 4.5 Värmeövergångstal från betongytan till luft för normalisolerade* formar

Typ av form	Värmeövergångstal (W/m^2K) för vindhastigheten						
	1 m/s	2 m/s	3 m/s	5 m/s	8 m/s	10 m/s	15 m/s
3 mm stål	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.6	2.7
12 mm trä	1.8	1.9	2.0	2.1	2.1	2.2	2.2
16 mm trä	1.7	1.8	1.9	2.0	2.0	2.0	2.1
18 mm trä	1.7	1.8	1.8	1.9	2.0	2.0	2.0
22 mm trä	1.6	1.7	1.7	1.8	1.9	1.9	1.9
25 mm trä	1.6	1.6	1.7	1.7	1.8	1.8	1.8
38 mm trä	1.4	1.4	1.5	1.5	1.5	1.5	1.6
45 mm trä	1.3	1.3	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4
62 mm trä	1.1	1.1	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2

*) Isolering mellan formbalkarna, se figur 4.16.

Tabell 4.6 Värmeövergångstal från betongytan till luft för välisolerade** formar

Typ av form	Värmeövergångstal (W/m^2K) för vindhastigheten						
	1 m/s	2 m/s	3 m/s	5 m/s	8 m/s	10 m/	15 m/s
3 mm stål	1.0	1.0	1.0	1.1	1.1	1.1	1.1
12 mm trä	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
16 mm trä	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0
18 mm trä	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	1.0
22 mm trä	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
25 mm trä	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
38 mm trä	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
45 mm trä	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
62 mm trä	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7

**) Obruten isolering utan köldbryggor via formbalkarna, se figur 4.16.

4.6 Tillåten töjningskvot

I Vägverkets bestämmelse Bro 2002 anges kravet på sprickrisker i form av olika värden på minsta spricksäkerhet, S. Det inverterade värdet anger tillåten spännings- eller töjningskvot. Vid tillämpningen av Excel-arket CraX1 beräknas töjningskvoten. Med känt värde på minsta spricksäkerhetstal, S, framgår av tabell 4.7 motsvarande värden på tillåten töjningskvot, η_{max}.

Tabell 4.7 Samband mellan spricksäkerhet och töjningskvot.

Minsta sprick-säkerhet, S	Tillåten töjningskvot, η_{max}
1.05	0.95
1.11	0.9
1.18	0.85
1.25	0.8
1.33	0.75
1.42	0.7
1.54	0.65
1.67	0.6
2.0	0.5

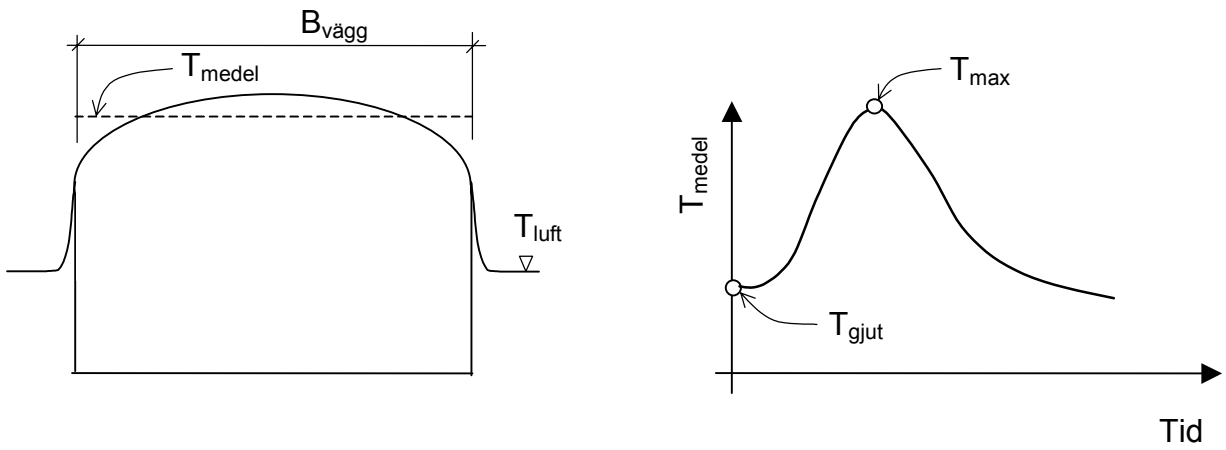
5 BERÄKNING UTAN ÅTGÄRDER

Med beräkning utan åtgärder avses den situation som uppkommer utan att man på arbetsplatsen genomför några sprickreducerande åtgärder. Att välja annan betong eller att styra gjuttemperaturen är också aktiva sprickreducerande åtgärder, men räknas här inte in i åtgärder utförda på arbetsplatsen. Däremot kan man i CraX1 – Handboksmetoden analysera även dessa situationer, men formellt som beräkning utan åtgärder.

De arbetsplatsåtgärder som är inbyggda som alternativ i Excel-arket CraX1 och som kommer att behandlas senare är kylning av den hydratiserande betongen respektive värmning av den motgjutna konstruktionen, se vidare kapitel 6.

5.1 Maximal temperatur

Med begreppet maximal temperatur, T_{max}, avses den i tiden största medeltemperaturen över tvärsnittet, se figur 5.1.



a) Tvärsnittstemperatur b) Temperatur-tid-förlopp

Figur 5.1 Definition av maximal temperatur, T_{max}

De parametrar, som används redovisning av T_{max} i diagrammen i handboken, är följande:

- Väggtjocklek ($B_{vägg}$ i figur 5.1)
- T_{luft} = lufttemperatur = dygnsmedelvärde
- T_{gjut} = gjuttemperatur = betongmassans utgångstemperatur
- Cementhalt
- Övergångstal

Direkt i samband med avläsning av T_{max} i respektive diagram kan interpoleringar genomföras vad gäller luft- respektive gjuttemperaturen, medan det för övriga parametrar kan finnas ett behov av att göra inter- eller ibland extrapoleringar med hjälp av flera diagram. Något stöd för hur detta ska göras presenteras inte i handboken. Däremot presenteras i Excel-arket vilka diagramsidor som är aktuella, och det är därefter upp till användaren att göra erforderliga bedömningar.

5.2 Beräknad töjningskvot

I Excel-arket CraX1 beräknas den belastande nivån som en töjningskvot relaterad till rörelse per l.e. (längdenhet) enligt

$$\eta_{utan} = \text{Töjningskvot utan åtgärder} = \frac{\textit{Spänningsbelastande rörelse per l.e.}}{\textit{Betongens dragtöjningskapacitet}}$$

Uppkomst av spricka i betongen kan anses ske när töjningskvoten utan åtgärder blir lika med ett ($\eta_{utan} = 1$).

I det fall beräknad töjningskvot utan åtgärder överstiger dimensionerande värde ($\eta_{utan} > \eta_{max}$) måste något förändras, varvid beräkningar med Excel-arket CraX1 kan genomföras för arbetsplatsåtgärderna kylning av väggen, förvärmning av plattan eller en kombination av kylning/värmning, se vidare kapitel 6. Analyser för t ex varierande gjuttemperaturer eller andra betongtyper kan naturligtvis också genomföras enligt CraX1 - Handboksmetoden.

5.2.1 Belastande temperaturer

De temperaturdifferenser som leder till belastande deformationer kan för fallet utan åtgärder indelas i två delar enligt:

1. Ingångsdifferens, $T_{gjut} - T_{mot}$, se figur 5.2 och figur 5.3.
2. Hydratationsvärme, $T_{max} - T_{gjut}$, se figur 5.2 och figur 5.3.

Den totala temperaturdifferensen som leder till belastande deformationer för fallet utan åtgärder utgöres av summan av ingångsdifferens och hydratationsvärme enligt

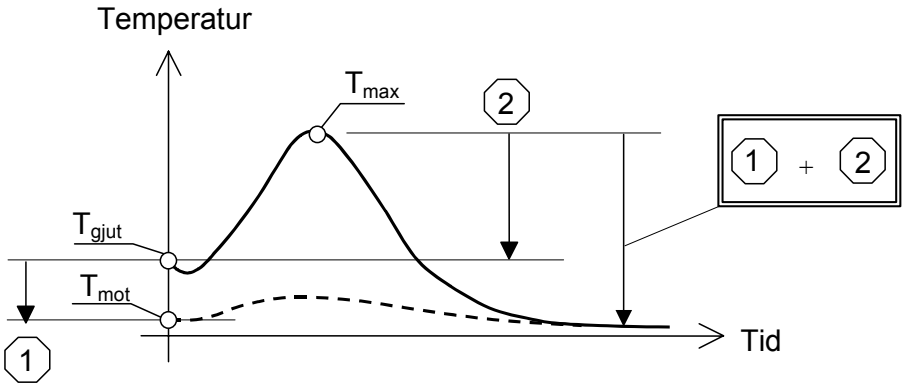
1 + 2 Total belastande differens för fallet utan åtgärder.

Ingångsdifferensen

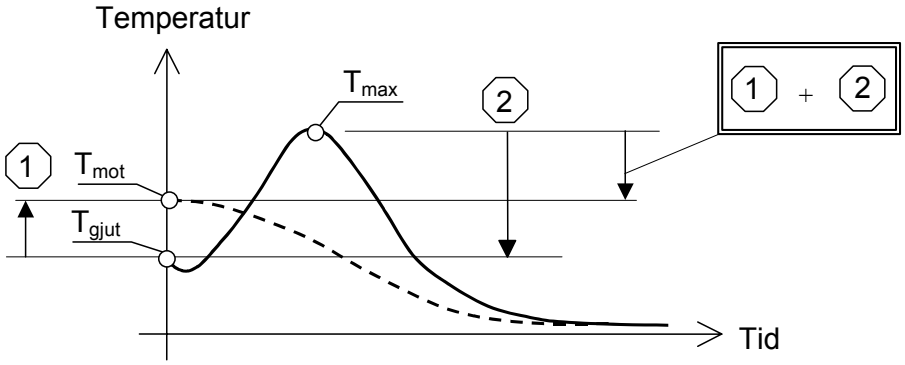
Temperaturdifferensen mellan den nygjutna och den motgjutna, äldre konstruktionen kan betraktas som att man fogar samman konstruktionerna med en inbyggd rörelsedifferens. Detta belastar konstruktionsdelarna när de senare uppnår temperaturjämvikt.

En *lägre motgjutningstemperatur*, $T_{mot} < T_{gjut}$, innebär att den nygjutna konstruktionen kommer att trycka ihop den motgjutna konstruktionen som bjuder motstånd, se figur 5.2. Detta leder vid temperaturjämvikt till dragspänningar i den nygjutna konstruktionen och tryckspänningar i den motgjutna delen. Det inses att lägre motgjutningstemperatur är ogynnsam (=högre total belastande differens) och denna separata del kan vara stor vintertid, om den motgjutna konstruktionen är i temperaturjämvikt med lufttemperaturen.

En *högre motgjutningstemperatur,* T_{mot}, > T_{gjut}, innebär att den motgjutna konstruktionen kommer att trycka ihop den nygjutna konstruktionen som bjuder motstånd, se figur 5.3. Detta leder till att ingångsdifferensen ger tryckspänningar (eller minskade dragspänningar) i den nygjutna konstruktionen och dragspänningar i den motgjutna delen. Detta är således gynnsamt (=lägre total belastande differens).



Figur 5.2 Temperaturdifferenser som skapar belastande deformationer för fallet utan arbetsplatsåtgärder med *lägre motgjutningstemperatur* än gjuttemperatur. Markeringen ”1+2” anger den totalt belastande differensen. Heldragen linje = medeltemperaturen i väggen och den streckade linjen = medeltemperaturen i plattan.



Figur 5.3 Temperaturdifferenser som skapar belastande deformationer för fallet utan arbetsplatsåtgärder med *högre motgjutningstemperatur* än gjuttemperatur. Markeringen ”1+2” anger den totalt belastande differensen. Heldragen linje = medeltemperaturen i väggen och den streckade linjen = medeltemperaturen i plattan.

Hydratationsvärmen

I handboken är det risken för genomgående sprickor under kontraktionsfasen som studeras, jämför figur 4.1. Den belastande rörelsen från hydratationsvärmen uppkommer vid den nygjutna konstruktionens sammandragning efter att temperaturmaximum har inträffat.

I figurerna 5.2 och 5.3 kan den separata inverkan av hydratationsvärmen betraktas vara likvärdig, och det är samverkan mellan ingångsdifferens och hydratationsvärme som avgör hur stor den totala belastande deformationen, se markeringen ”1+2” i figurerna 5.2 och 5.3, blir för väggen.

Det är dock inte enbart temperaturrörelser som sker, eftersom betonger med lägre vattencementtal än ca 0.50 i tillägg får en krympning orsakad av betongens inre uttorkning, s k autogen krympning. För betong med vct 0.40 (C32/40 alternativt C35/45) är den autogena krympningen signifikant, men utgör en mindre andel av den totala kontraktionen, se vidare den mer detaljerade materialbeskrivningen i avsnitt 7.5.

5.2.2 Töjningskvot

Om temperatur- och fuktrörelserna får ske utan motstånd, vilket för gjutning av vägg på tidigare gjuten platta tankemässigt skulle motsvara att vidhäftningen mellan vägg och platta upphör, uppkommer inga spänningar. Dessa *frirörelser* kan beskrivas på följande sätt:

Frirörelsen består av:	Inbyggd rörelsedifferens vid gjutningen Kontraktionen efter T_{max}

Situationen för frirörelser kan också betecknas med att tvångsfaktorn = 0.

Den andra ytterligheten är helt fastlåst konstruktion, vilket för gjutning av vägg på tidigare gjuten platta tankemässigt skulle motsvara fullständig vidhäftning mellan vägg och platta med ”oändligt” styv platta, vilket kan beskrivas som fullständigt tvång. I det senare fallet uppkommer spänningar som kan benämnas fixspänningar, vilket också kan beskrivas med att tvångsfaktorn = 1.

Verkligheten vid gjutning av vägg på platta som vilar på packad fyllning ligger någonstans mellan frirörelser (tvångsfaktor = 0) och fixspänningar (tvångsfaktor = 1), och allmänt kan den spänningsbelastande rörelsen beskrivas enligt:

Spänningsbelastande rörelse = belastningsfaktor x frirörelse x tvångsfaktor

Belastningsfaktorn beskriver att vid mer eller mindre stort motstånd mot frirörelsen ($0 <$ tvångsfaktorn ≤ 1) enbart en del av frirörelsen ger upphov till belastning (= spänning) främst beroende på att betongen kryper. För praktisk tillämpning har belastningsfaktorn visat sig vara i storleksordningen 0.6 á 0.7 (Larson, 2000 och 2003).

Uppkomst av spricka i den unga betongen kan beskrivas antingen med att dragspänningen blir lika med draghållfastheten eller att den spänningsbelastande rörelsen uppnår betongens dragtöjningskapacitet. I Excel-arket CraX1 beräknas den spänningsbelastande nivån enligt

$$\eta_{utan} = \text{Beräknad töjningskvot} = \frac{\textit{Spänningsbelastande rörelse per l.e.}}{\textit{Betongens dragtöjningskapacitet}}$$

Spänningsbelastande rörelse per längdenhet (l.e.) innebär en relativ rörelse, dvs formellt ett dimensionslöst tal eller m/m. Betongens dragtöjningskapacitet är en materialegenskap kopplat till den unga betongens egenskaper, och typiska värden är i storleksordningen $100 – 150 \cdot 10^{-6}$ (= 0.1 – 0.15 mm/m).

Om beräkningen utan åtgärder leder till att det ställda kravet på tillåten töjningskvot är uppfyllt innebär det att sprickriskberäkningen är klar, medan man i annat fall går vidare t ex med att beräkna erforderliga arbetsplatsåtgärder. Detta beskrivs av

$$\eta_{utan} \begin{cases} \leq \eta_{max} : \text{OK!} \\ > \eta_{max} : \text{Sprickbegränsande åtgärder erfordras !} \end{cases}$$

I Excel-arket CraX1 beräknas tvångsfaktorer utifrån konstruktionens geometriska dimensioner, se vidare avsnitt 7.4.

5.3 Maximal härdningstemperatur

Man vill begränsa maximal härdningstemperatur i en nygjuten betongkonstruktion för att minska risken för eventuella skador av produkter som bildas vid härdning under förhöjd temperatur. Enligt rekommendationerna i BBK94 bör betongens härdningstemperatur:

inte överstiga 60 °C

vilket är liktydigt med kravet:

$$\mathbf{T_{max}^{max} \leq 60\ °C}$$

där T_{max}^{max} = Maximala betongtemperaturen i väggen under betongens första temperaturcykel orsakad av hydratationsvärmen.

I Excel-arket CraX1 visas om detta villkor är uppfyllt eller inte genom att en beräkning av T_{max}^{max} sker utifrån regressionssamband. Följande parametrar beaktas:

$B_{vägg}$	= Väggens tjocklek, m
T_{luft}	= Omgivande luftens medeltemperatur, °C
T_{gjut}	= Betongmassans temperatur vid gjutning, °C
C	= Betongens cementhalt, kg/m^3
vct	= Betongens vattencementtal, -

De i Excel-arket CraX1 inbyggda regressionssambanden för T_{max}^{max} avser täcka ”alla praktiskt intressanta fall för gjutning av anläggningskonstruktioner av typen vägg-på-platta” med begränsningen att endast användning av 22 mm brädform (värmeövergångstal = 5 W/m^2°C) analyserats. För andra övergångstal är man hänvisad att göra egna beräkningar av maximal härdningstemperatur. För de enskilda parametrarna som studerats kan följande noteras:

Väggens tjocklek

För väggtjocklekar under 0.8 m anges att T_{max}^{max} < 60 °C för samtliga fall. Parametrarna i regressionssambanden är framtagna för väggtjocklekarna 0.8m, 1.0m, 1.2m, 1.4m och 1.8m.

Omgivande luftens medeltemperatur

Parametrarna i regressionssambanden är framtagna för luftens medeltemperatur mellan

–15 °C och 20 °C.

Betongens temperatur vid gjutning

Parametrarna i regressionssambanden är framtagna för gjuttemperaturer mellan 5 °C och 25 °C.

Cementhalt

Parametrarna i regressionssambanden är framtagna för cementhalter mellan 340 kg/m^3 och 440 kg/m^3.

Vattencementtal

Parametrarna i regressionssambanden är framtagna för vattencementtalen 0.4, 0.45 och 0.50.

6 BERÄKNING MED ÅTGÄRDER

Beräkning med åtgärder omfattar antingen *kylning* i den nygjutna konstruktionen eller *värmning av plattan* (utvidgad platta) före gjutning av väggen. Beräkningen kan antingen genomföras för en av dessa åtgärder eller för en kombination av dem.

Arbetsplatsåtgärderna illustreras i figurerna 6.1 och 6.14 enligt följande:

3 Kylinsats, $T_{max} - T_{kyl}$

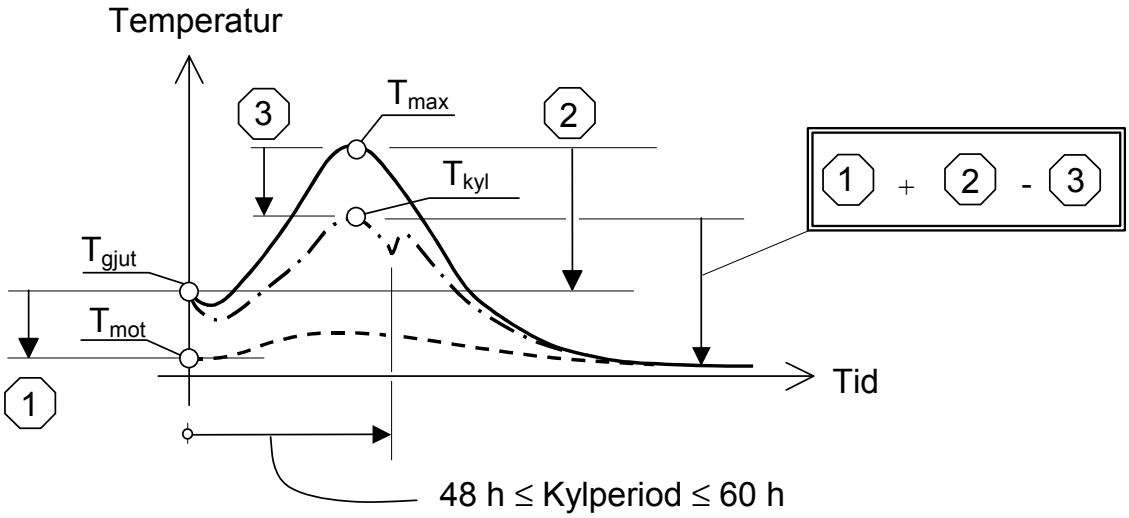
4 Värmningsinsats, $T_{värme}$ - T_{mot}

6.1 Kylning

- Före gjutning: provkör kylanläggningen för kontroll av läckage i rör- och slangkopplingar.
- Kylperioden skall vara mellan 48 och 60 timmar räknat från gjutstart

Kylinsats

Kylinsatsen utgöres av del 3 i figur 6.1 och avser en sänkning av maximala medeltemperaturen i väggen med storleken av $T_{max} - T_{kyl}$.



Figur 6.1 Temperaturdifferenser som skapar belastande deformationer för fallet med *kylning*. Markeringen ”1+2-3” anger den totalt belastande differensen vid kylning. Heldragen linje = medeltemperaturen i väggen utan åtgärder, den streckade linjen = medeltemperaturen i plattan och den streck-prickade linjen = medeltemperaturen i väggen med kylning under kylperioden.

För att begränsa antalet beräkningar inkluderande kylning i handboken är de utförda enbart för cementhalten (C) = 400 kg/m^3, vilket betecknas

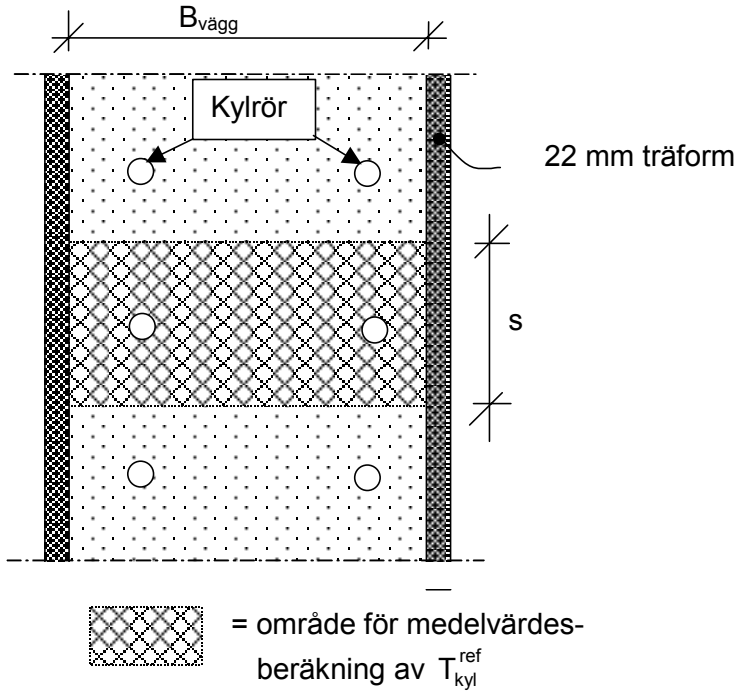
$$\text{Kylinsats} = T_{max}^{ref} - T_{kyl}^{ref} \text{ beräknad för } C^{ref} = 400 \text{ kg/m}^3$$

där T_{max}^{ref} avser maximal temperatur i väggen utan åtgärd för C^{ref} = 400 kg/m^3

Denna temperatursänkning bedöms vara *likvärdig med sänkningen i en betong med annan cementhalt*, varför man vid tillämpning för annan cementhalt måste göra dubbla avläsningar för fallet utan åtgärder, dels för aktuell cementhalt dels för C^{ref} = 400 kg/m^3. Den maximala temperaturen efter kylning, T_{kyl}, beräknas i Excel-arket CraX1 enligt

$$\boxed{T_{kyl} = T_{max} - (T_{max}^{ref} - T_{kyl}^{ref})}$$

T_{kyl}^{ref} avser medeltemperaturen i väggen för C^{ref} = 400 kg/m^3, och området för medelvärdesberäkningen illustreras i figur 6.2. Samtliga beräkningar inklusive kylning är genomförda för värmeövergångstalet 5 W/m^{2}K, vilket gäller för form av 22 mm trä för vindhastigheten ca 5 m/s, se vidare avsnitt 4.4.



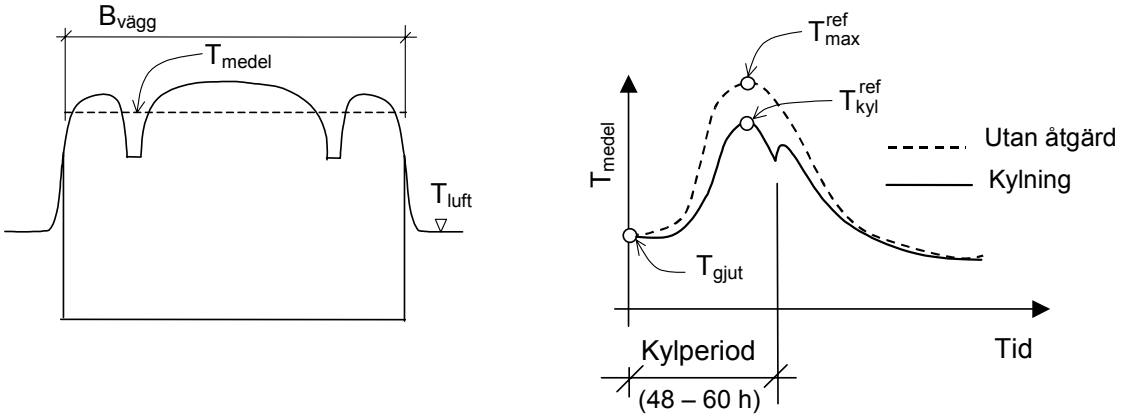
Figur 6.2. Vertikalt snitt i väggen med markering av området för beräkning av referenstemperaturen vid T_{kyl}^{ref} kylning.

Kylperiod

Före start av gjutningen bör kylanläggningen provköras för att kontrollera att inga läckage finns i rör- och slangkopplingar. När kylrören täckts med betong påbörjas kylningen.

Kylningen ska pågå *mellan 48 och 60 timmar* efter gjutningen, se figur 6.3. Detta innebär att kylningen måste pågå i minst 48 timmar men vara avslutat högst 60 timmar efter start av respektive kylslinga. Inom detta intervall har studerade fall visat sig uppfylla villkoren att

1) temperaturmaximum passeras med rimlig marginal
2) den efterföljande temperaturhöjningen (”återstudsen”) inte ger upphov till negativa effekter på beräknad sprickrisk.



a) Temperaturer längs en linje som korsar två kylrör i väggen

b) Temperatur-tid-förlopp

Figur 6.3 Illustration av betongtemperaturer. Referenstemperaturerna i delfigur b avser beräkningar för cementhalten 400 kg/m^3.

Rörtyp

Rörtypen avgörs av värmeövergångstalet från betongen till kylvattnet, och följande två typer har studerats

I. Övergångstal = 900 W/m^{2}K: Stålrör, diameter = 25 mm

II. Övergångstal = 80 W/m^{2}K: Plaströr, diameter = ca 30 mm

Kyltemperatur

Studerade kyltemperaturer är 5, 12 och 20 °C, vilket avser kylvattnets ingångstemperatur. En generell rekommendation är att temperaturhöjningen mellan ingående och utgående vattentemperatur bör vara maximalt ca 2 á 3 °C, vilket kan kontrolleras genom mätningar. Vid för hög temperaturdifferens bör vattenflödet ökas.

Avstånd rör

Beräkningarna som redovisas i diagramdelen E har genomförts för centrumavstånden 400, 500 respektive 600 mm.

Placering rör

Som huvudalternativ har två principer att placera kylrören studerats enligt

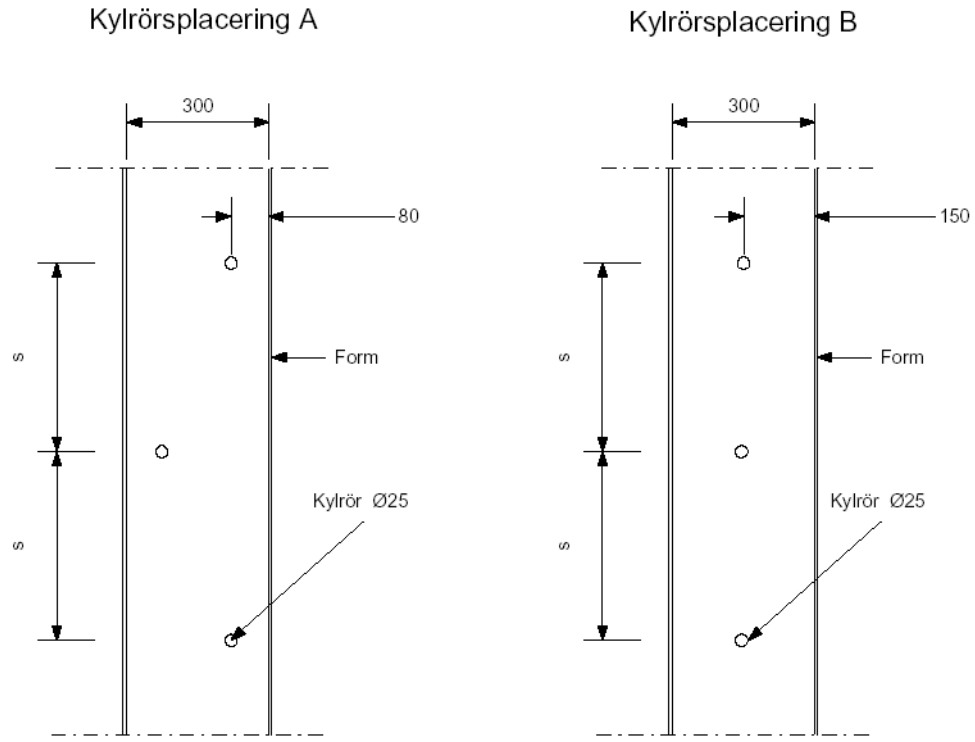
A. Placering ca 80 mm innanför formen, vilket avser fallet att placera rören mot befintlig armering

B. Placering ungefär i ¼-punkterna eller för tjockare väggar något innanför dessa lägen, vilket vanligen kräver inläggning av speciell monteringsarmering

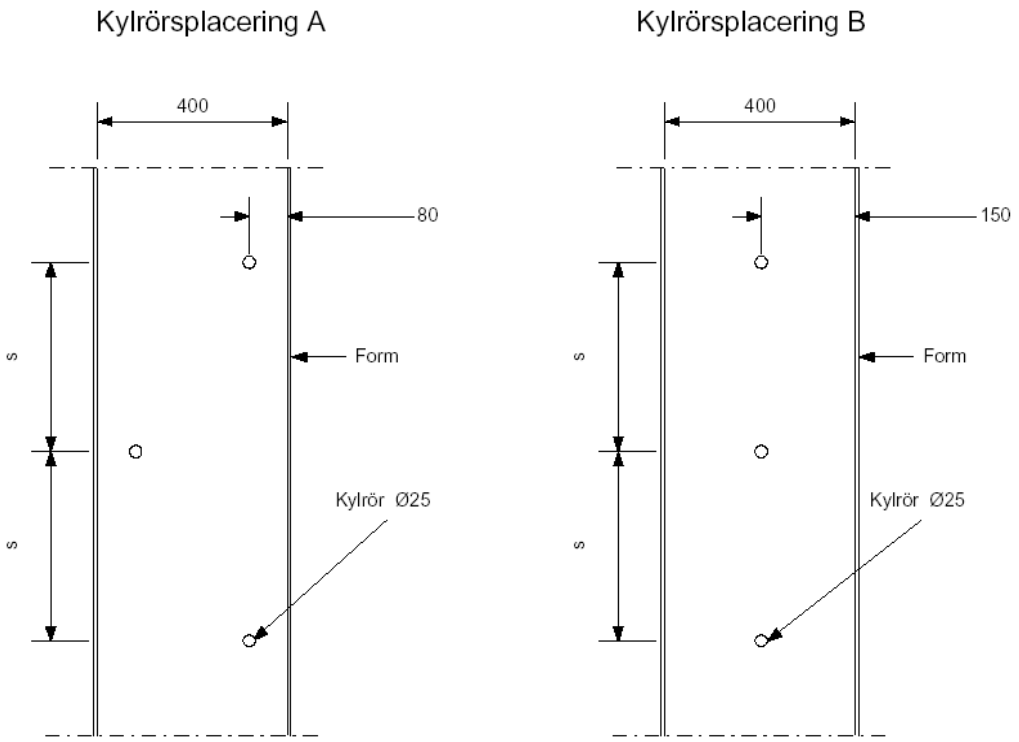
Placeringsalternativet A är praktiskt enklare att montera, men ger något sämre kylverkan vid i övrigt likartade förhållande. För väggtjocklekar över 1200 mm har inte placeringsalternativ A studerats. I lägen där man vill kunna vistas inne i väggen efter montering av kylrören kan alternativ A vara att föredra. Även möjligheten att föra ner pumpslang och vibratorstavar underlättas vid kylrörsplacering A för tunnare väggar.

Placeringsalternativ B kräver vanligen extra armeringsstänger vid monteringen men ger å andra sidan bättre kylverkan vid i övrigt likartade förhållanden.

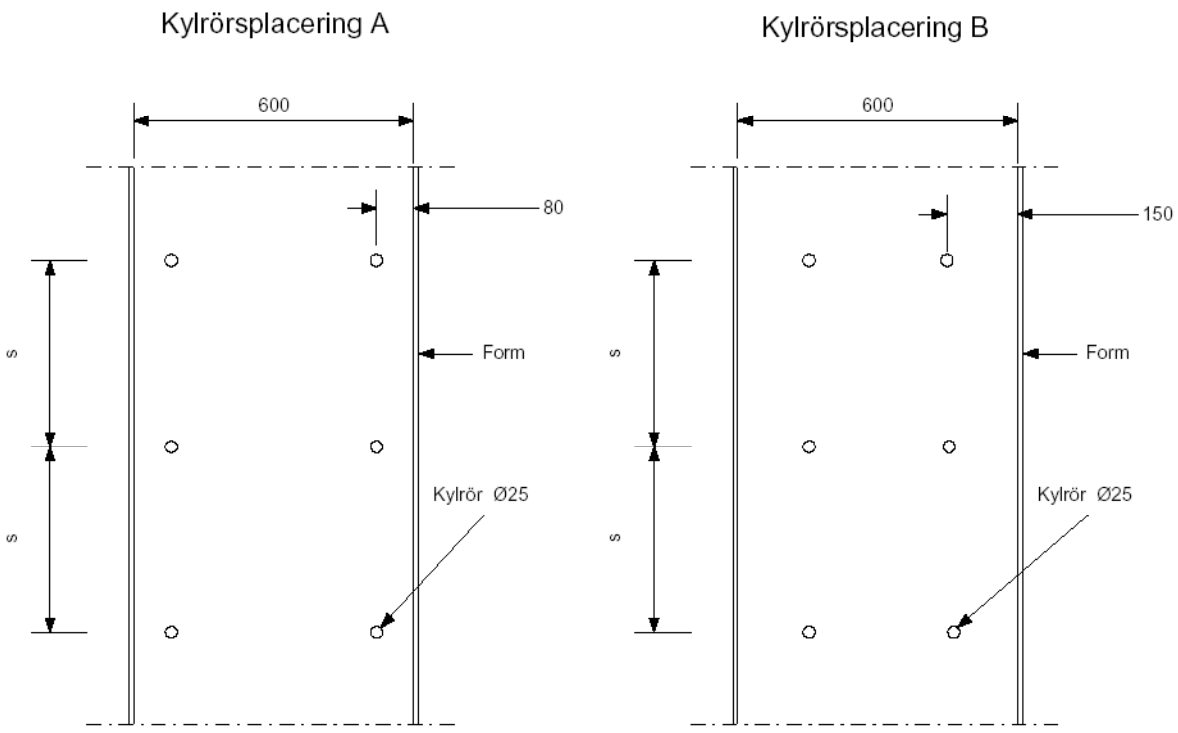
De placeringsalternativ som studerats finns redovisade i figur 6.4 – 6.11.



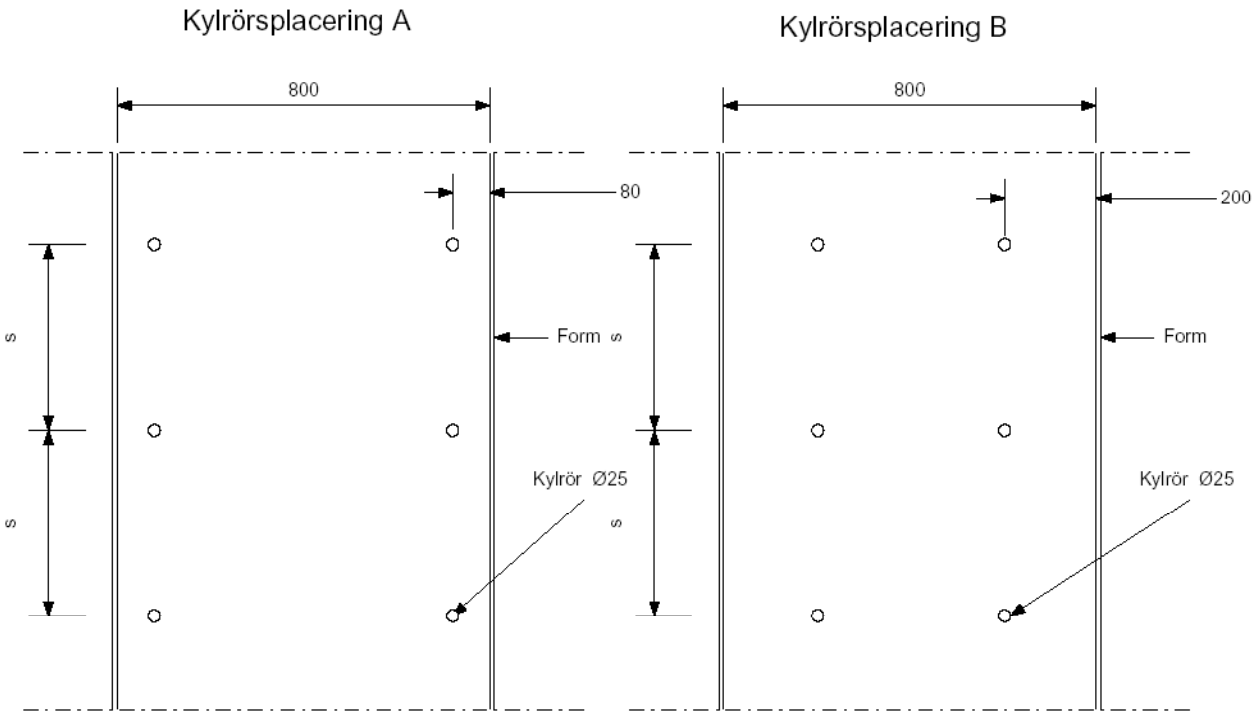
Figur 6.4 Placering av kylrör, $B_{vägg}$ = 300 mm



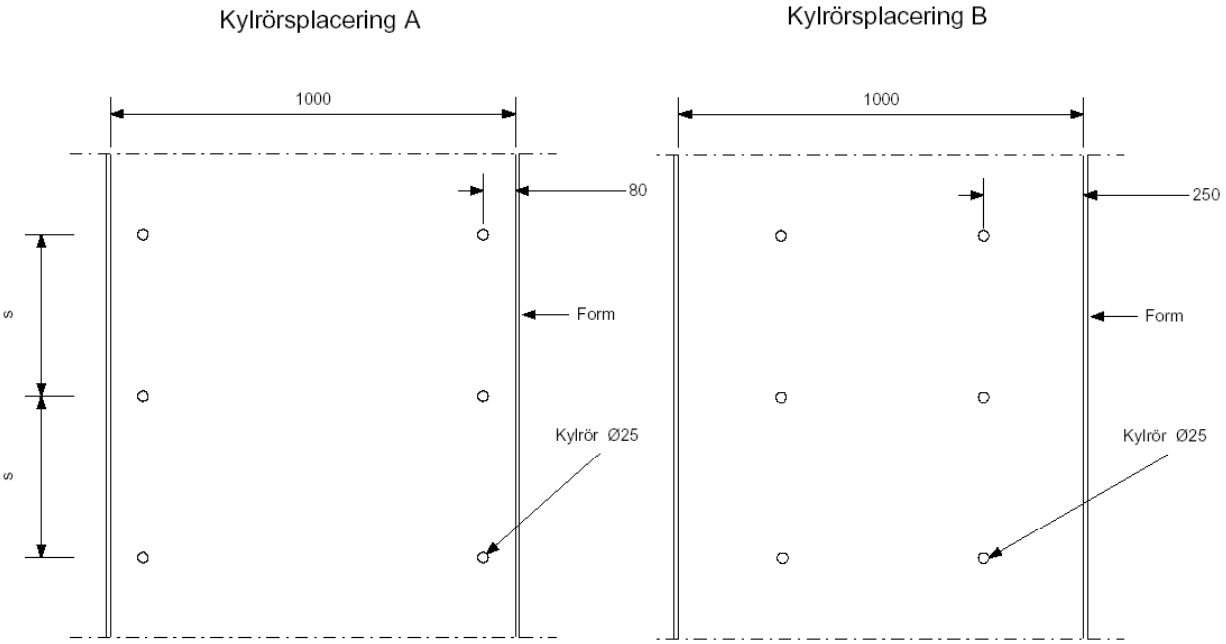
Figur 6.5 Placering av kylrör, $B_{vägg}$ = 400 mm



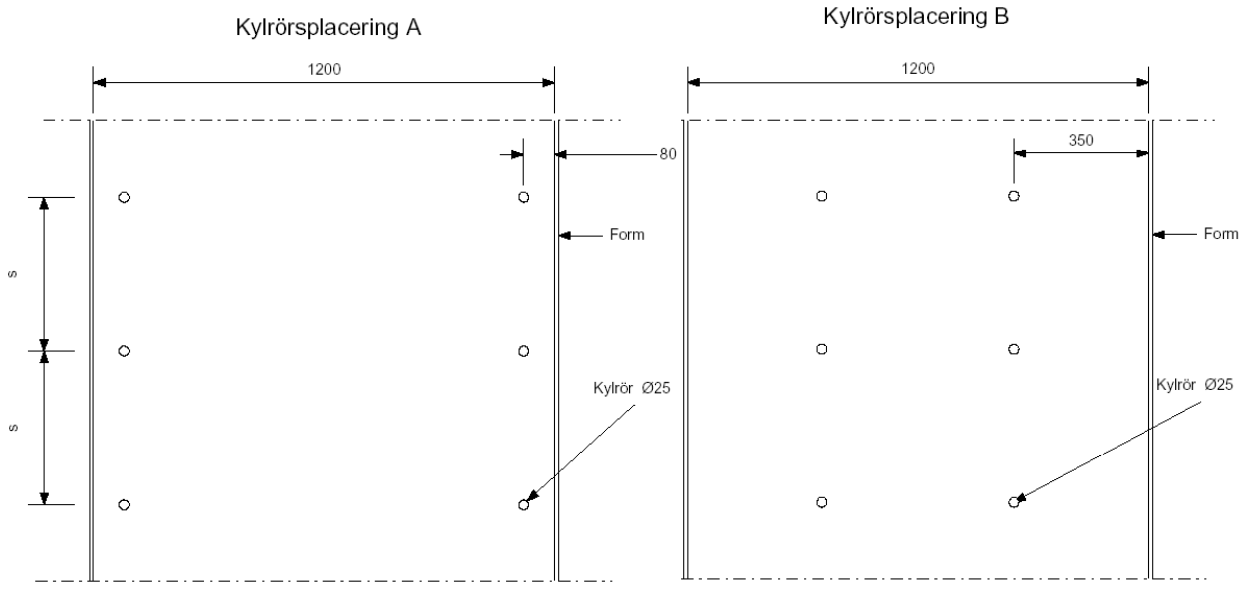
Figur 6.6 Placering av kylrör, $B_{vägg}$ = 600 mm



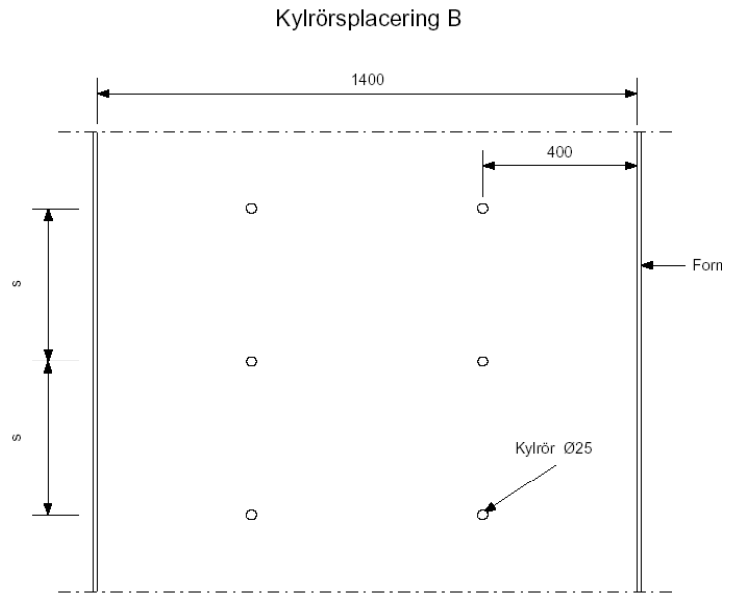
Figur 6.7 Placering av kylrör, $B_{vägg}$ = 800 mm



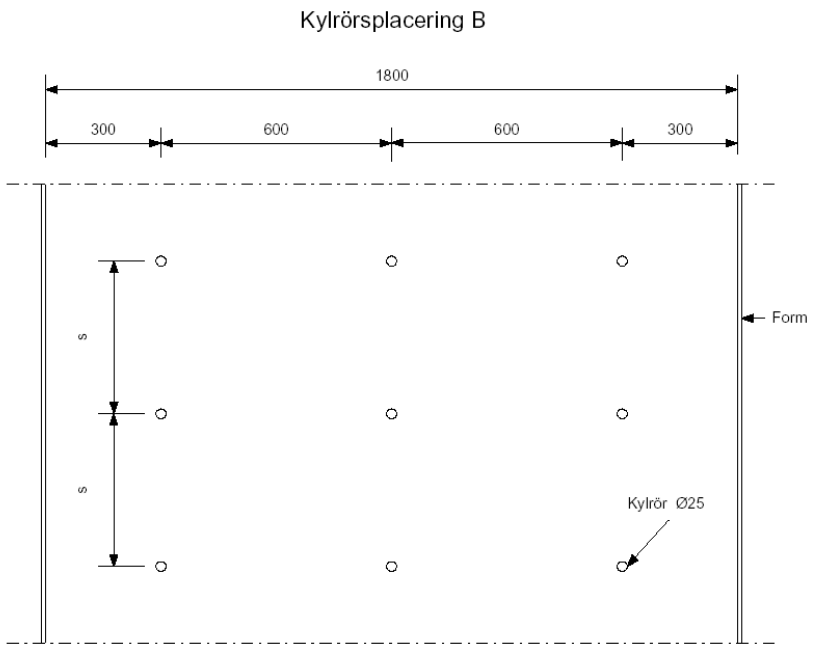
Figur 6.8 Placering av kylrör, $B_{vägg}$ = 1000 mm



Figur 6.9 Placering av kylrör, $B_{vägg}$ = 1200 mm



Figur 6.10 Placering av kylrör, $B_{vägg}$ = 1400 mm



Figur 6.11 Placering av kylrör, $B_{vägg}$ = 1800 mm

Maximal temperatur vid kylning

Den maximala temperatur som erfordras för att uppfylla det ställda kravet på tillåten töjningskvot beräknas av Excel-arket CraX1och redovisas som T_{kyl}^{erf}. Denna beräkning av erforderlig kylinsats tar hänsyn till om samtidig värmning av plattan finns eller inte. Det är nu upp till användaren att dimensionera ett kylsystem som uppfyller villkoret

$$\boxed{\text{Krav för val av kylsystem: } T_{kyl}^{ref} \leq T_{kyl}^{erf}}$$

De parametrar som används vid redovisning av T_{kyl}^{ref} i diagrammen i handboken (se kapitel E2 i del E) för användning av stålrör (övergångstal = 900 W/m^{2}K) eller användning av plaströr (övergångstal = 80 W/m^{2}K), är följande:

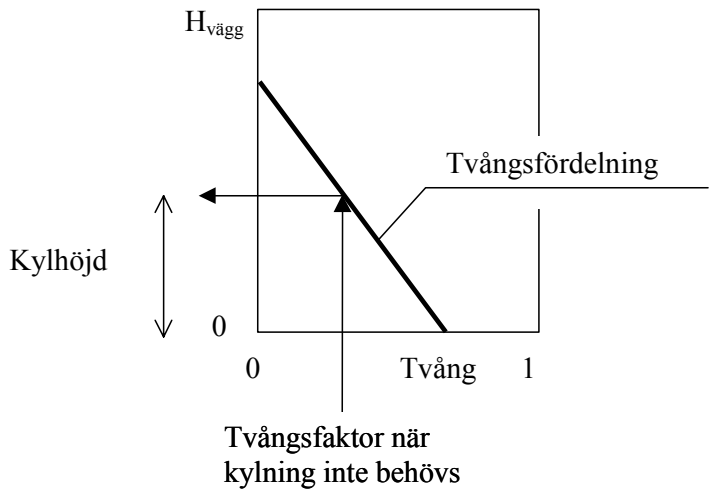
- Väggtjocklek ($B_{vägg}$ i figur 6.2)
- T_{luft} = lufttemperatur = dygnsmedelvärde
- T_{gjut} = gjuttemperatur = betongmassans utgångstemperatur
- Kyltemperatur
- s-avstånd = centrum-centrum-avstånd mellan kylrören
- Kylrörsplacering A eller B, se figurerna 6.4-6.11.
- Cementhalten = 400 kg/m^3 = C^{ref} för samtliga diagram

Direkt i samband med avläsning av T_{kyl}^{ref} i respektive diagram kan interpoleringar genomföras vad gäller luft- respektive gjuttemperaturen, medan det för övriga parametrar kan finnas ett

behov av att göra inter- eller ibland extrapoleringar med hjälp av flera diagram. Något stöd för hur detta ska göras presenteras inte i handboken. Däremot presenteras i Excel-arket vilka diagramsidor som är aktuella, och det är därefter upp till varje användare att göra erforderliga bedömningar.

Kylhöjd

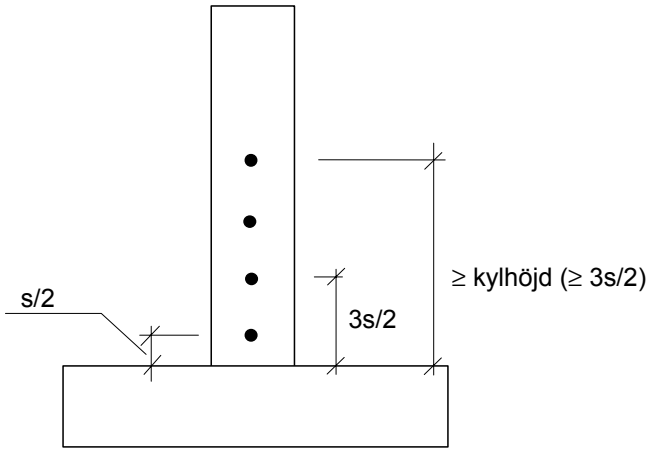
I det diagram som redovisas på Excel-arket CraX1:s arbetsblad redovisas både den beräknade tvångsfaktorfördelningen i väggen och kylhöjden, som innefattar området från gjutfogen mellan platta och vägg till det läge där tvångsfaktorn har blivit så liten att kylning inte längre erfordras, se figur 6.12. Därvid tas ”automatiskt” hänsyn till om samtidig värmning av plattan förekommer.



Figur 6.12 Princip vid beräkning av erforderlig kylhöjd

Den praktiska placeringen av kylrören i väggens höjdled skall utföras, se figur 6.13, enligt följande:

- den understa rörplaceringen monteras ett halvt s-avstånd upp i väggen
- därefter placeras ett antal rörlager med konstant s-avstånd upp genom väggen
- den översta rörplaceringen är placerad minst den beräknade kylhöjden upp i väggen
- minst 2 rörlager används, dvs även om den beräknade kylhöjden är mindre än ett halvt s-avstånd. Detta innebär att minsta praktiska kylhöjd är ett och ett halvt s-avtånd upp i väggen

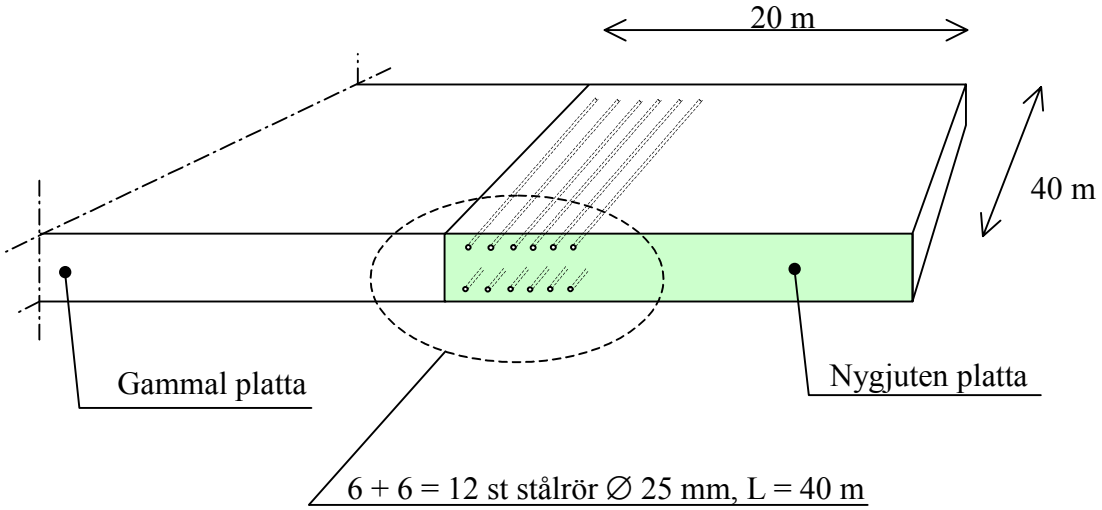


Figur 6.13 Placering av kylrör i väggens höjdled

Dimensionering av ett öppet kylvattensystem med egen pump

Förutsättningar
Detta exempel visar en dimensionering av ett öppet verkligt kylvattensystem med egen pump. Principerna kan dock användas i mer generell mening i öppna kylsystem. Man kan även analysera ett system med anslutning till befintlig vattenledning, om sambandet mellan tryck och flöde vid anslutningspunkten är känt (eller att man etablerar ett sådant samband).

En platta på mark ska gjutas, se skissen i figur 6.14, och man har vid beräkningar funnit att erforderligt krav på spricksäkerhet uppfylls om man lägger in 6 + 6 = 12 st tunnväggiga stålrör (∅25/23) och kyler med vatten som håller temperatur ca 12 °C. Detta vatten finns att tillgå i en tjärn ca 200 m från byggarbetsplatsen, se figur 6.15. I detta fall ska alltså en lämplig pump väljas.



Figur 6.14 Skiss över kylning med stålrör i en nygjuten platta.

Med hjälp av mätningar av fungerande kylsystem har man erhållit följande empiriska överslagsformel:

$$\frac{\Delta T \cdot F}{L} \approx 1 \quad °C \text{ lit /m min} \qquad (6.1)$$

där ΔT = skillnad i temperatur mellan ingående och utgående vatten, °C
F = vattenflöde, lit/min
L = rörlängd (per slinga), m

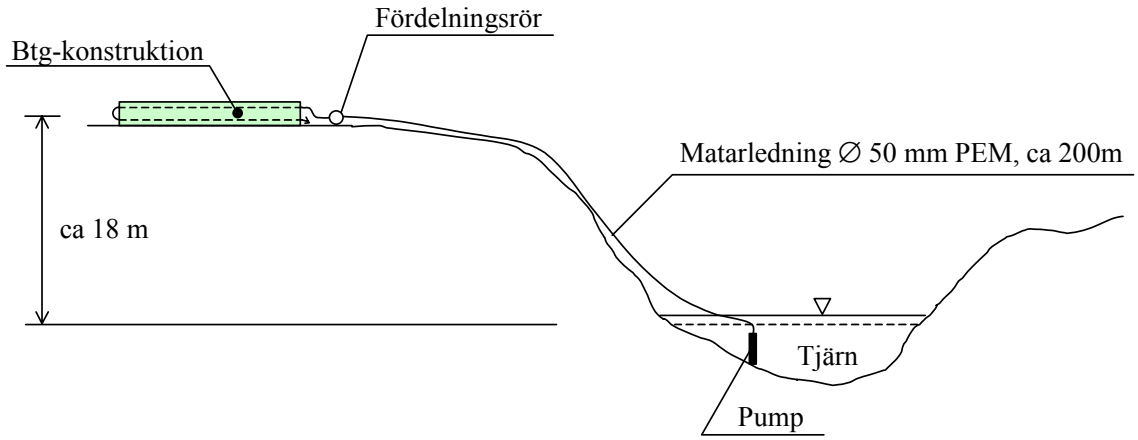
Med $\Delta T_{max} \approx$ 2 á 3 °C fås för att undvika alltför stora tryckförluster (< ca 1.0 kp/cm^2 ≈ 10 m vattenpelare, kollas senare) i varje rörslinga:

$L_{max} \approx$ 60 á 80 m

$F_{min} \approx$ 20 á 27 lit/min

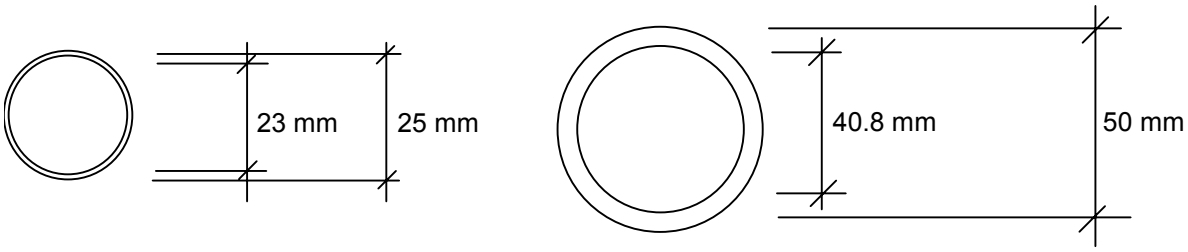
”Fullängdsslinga”

I vårt fall startar vi med: L = 80 m och F = 25 lit/min. (Enligt överslagsformeln, ek 6.1 ovan, fås $\Delta T \approx 3.2$ °C, vilket bedöms vara OK). L = 80 m innebär att rören i figur 6.14 kopplas ihop två och två, och vi får 6 st rörslingor med L = 80 m vardera, vilket ger totala vattenmatningen $F_{tot} = 25 \cdot 6 = 150$ lit/min. Med en viss marginal väljs här $F_{tot} = 160$ lit/min.



Figur 6.15 Skiss visande läget av betongkonstruktionen i förhållande till tjärnen

Tryckförluster
Inner och ytterdiametrar för kylrören av stål med ∅ = 25 mm och matarledning av Pem ∅ = 50 mm framgår av figur 6.16.



a) Stålrör ∅ 25 mm b) Pem ∅ 50 mm

Figur 6.16 Inner- och ytterdiametrar för använda rörtyper

Ett sätt att beräkna tryckförluster i ledningar är att använda Mannings formel

$$v = M \cdot R^{2/3} \cdot J^{1/2} \tag{6.2}$$

där v = vattnets hastighet, m/s
M = Mannings koefficient ≈ 90 á 100 för aktuella rörtyper
R = hydrauliska radien, m
J = energilinjens lutning i absoluta tal, [m(vp)/m(rör)]

Hydrauliska radien beräknas enligt

$$R = A / p \tag{6.3}$$

där A = rörets area, m^2
p = våta perimetern, m

För ett vattenfyllt rör fås enligt ekvation 6.3:

$$R = \frac{\pi \cdot \varnothing^2 / 4}{\pi \cdot \varnothing} = \frac{\varnothing}{4} \tag{6.4}$$

Samband mellan flöde och vattenhastighet för ett vattenfyllt rör beräknas enligt

$$v = \frac{F}{A} \tag{6.5}$$

där F = vattenflödet, m^3/s

Om man känner hydrauliska radien (ekv 6.4) och vattenhastigheten (ekv 6.5) kan man med Mannings formel (ekv 6.2) räkna ut energilinjens lutning enligt

$$J = \left(\frac{v}{M \cdot R^{2/3}} \right)^2 \tag{6.6}$$

Med energilinjens lutning känd kan man räkna ut tryckförlusten enligt

$$\Delta z = J \cdot L \tag{6.7}$$

där Δz = tryckförlusten, m(vp)

L = rörlängden, m

Om man vill uttrycka tryckförlusten i kp/cm^2 gäller

$$\Delta p = \frac{\Delta z}{10} \tag{6.8}$$

där Δp = tryckförlust, kp/cm^2

För SI-enheten Pa = N/m^2 gäller approximativt: 1 kp/cm^2 ≈ 0.1 MPa = 100 kPa. Vilken enhet man väljer beror på vilken enhet som finns på den tryckmätare man använder.

I det här aktuella fallet har vi två delar, matarledningen och kylrören, och tryckförlustberäkningen vid tillämpning av ekvationerna 6.4 – 6.8 visas i tabell 6.1. Dessa beräkningar kan också göras med den bifogade Excel-mallen ” Tryckfall_kylsystem.xlt”.

Tabell 6.1 Beräkning av tryckförluster i rördelarna för M = 90 i ekv 6.6.

Rördel	**L, m**	**F, lit/min**	**R, m**	**v, m/s**	**J, -**	**Δz, m(vp)**	**Δp, kp/cm^2**
Matarledning $\varnothing_{inre}$ = 23 mm	200	160	0.0102	2.039	0.2320	46.4	4.64
Kylrör $\varnothing_{inre}$ = 40.8 mm	80	25	0.00575	1.025	0.1205	9.6*	0.96

*) < 10 m(vp), vilket är satt som den övre gränsen för tryckfall inom kylslingan.

Summering av tryckförluster för hela systemet enligt:

Matarledningen:	46.4 m(vp)
Höjdskillnad tjärn - fördelarröret:	18
”Övertryck” i fördelaren**:	5
Kylslingorna (höjdskillnad ≈ 0) :	9.6

**) Behövs för intrimning av flöden i respektive kylslinga, se tipsruta nedan.

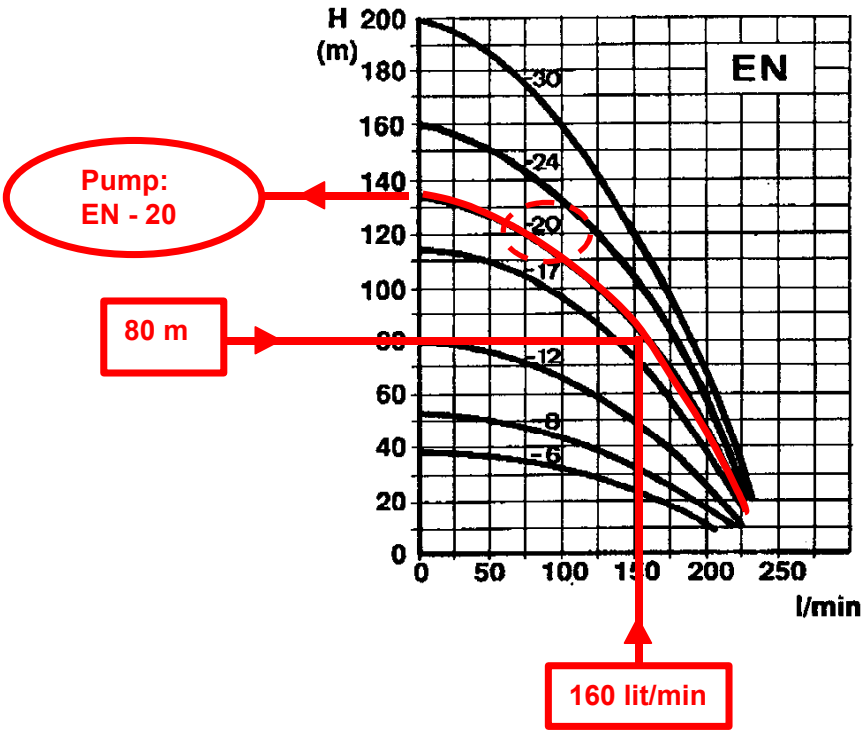
TOTAL TRYCKFÖRLUST	80 (79.0) m(vp)

Vi skall alltså söka efter en pump som klarar en uppfordringshöjd på minst 80 m för flödet 160 lit/min. Enligt pumpkurvorna i figur 6.19 och 6.20, se fig 6.17, fås att pumptyp EN-20 ska väljas.

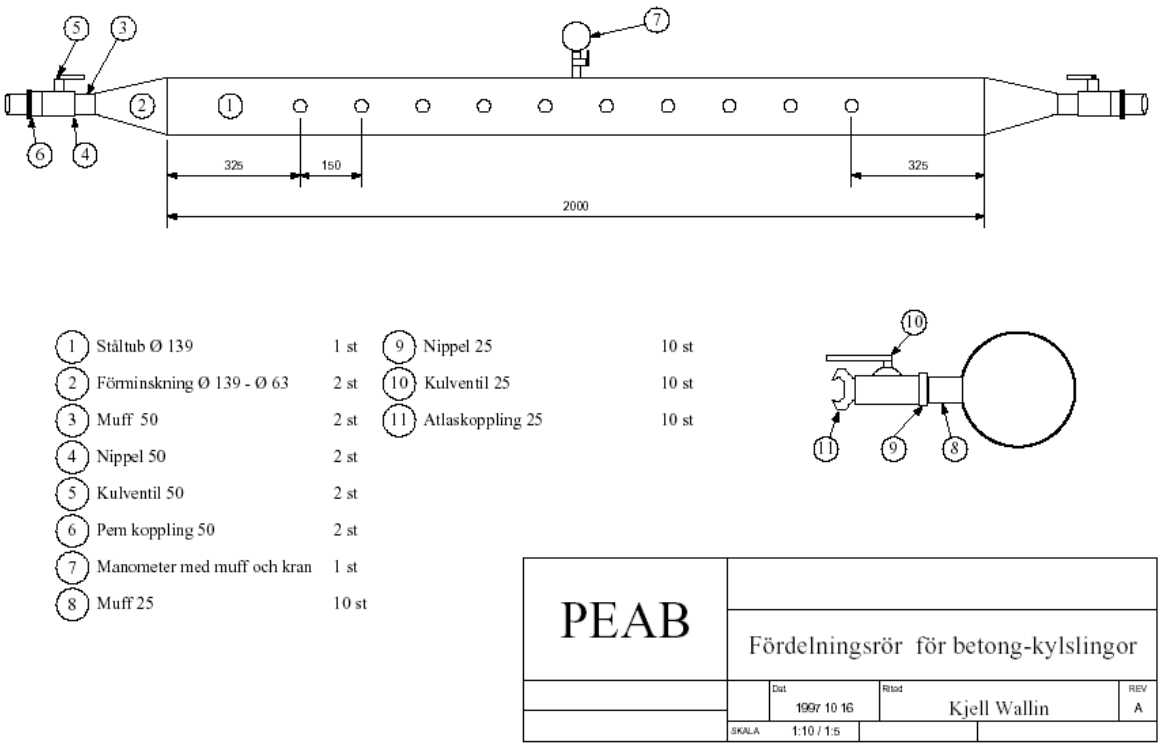
Erfarenheter från dimensionering och utförande av öppna kylsystem har lett till följande tips:

Generell tipsruta:

- Att trycket i start av varje kylslinga ska var högst 10 m(vp) eller 1 kp/cm^2 är lämpigt för att inte överbelasta de första kopplingarna på kylslingan.
- Ett extra tryck på 5 m(vp) eller 0.5 kp/cm^2 behövs i fördelningsröret för att justera flödena till att bli exakt lika i alla kylslingor.
- Koppla inte ihop utgående vattenslangar utan låt de ”flöda fritt”. Annars uppkommer onödiga tryckförluster som måste kompenseras med högre tryck vid start av slingan (vid fördelningsröret)!
- Utifrån de fritt utrinnande vattnet i utgående slangar kan flödet i respektive kylslinga

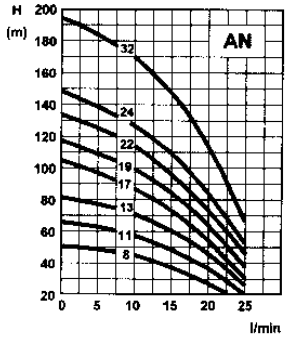


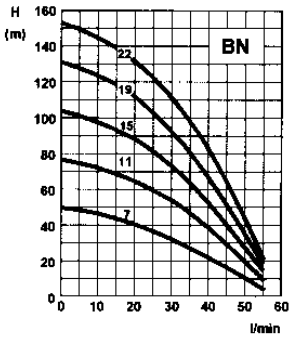
Figur 6.17 Val av pump EN – 20

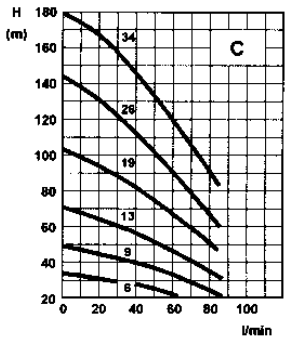


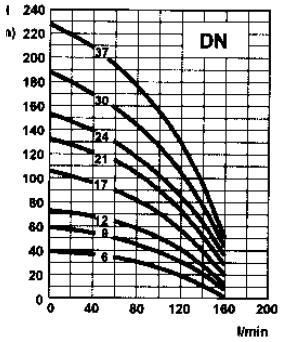
Figur 6.18 Fördelningsrör för betong-kylslingor

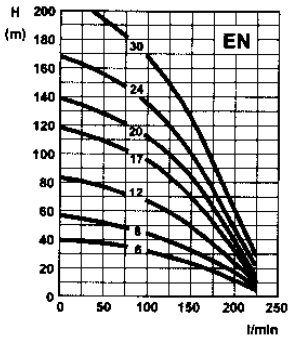
Debe 4" undervattenspumpar för borrade brunnar

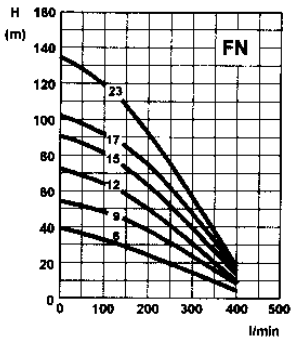


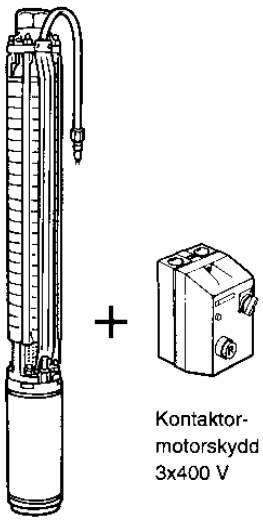


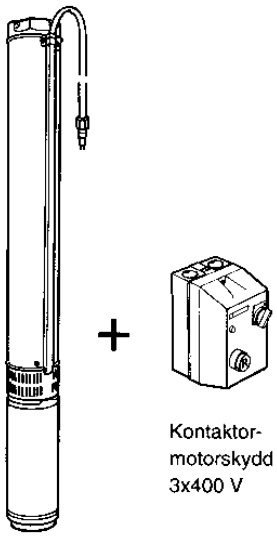


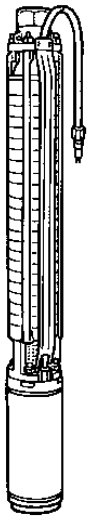












Debe 4" 3x400 V
AN - BN - C
Sid. 4

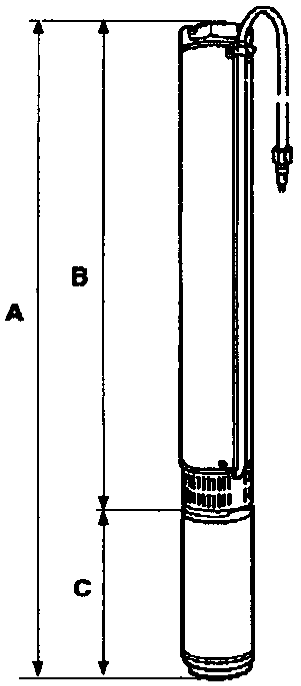
Debe 4" 3x400 V
DN - EN - FN
Sid. 5

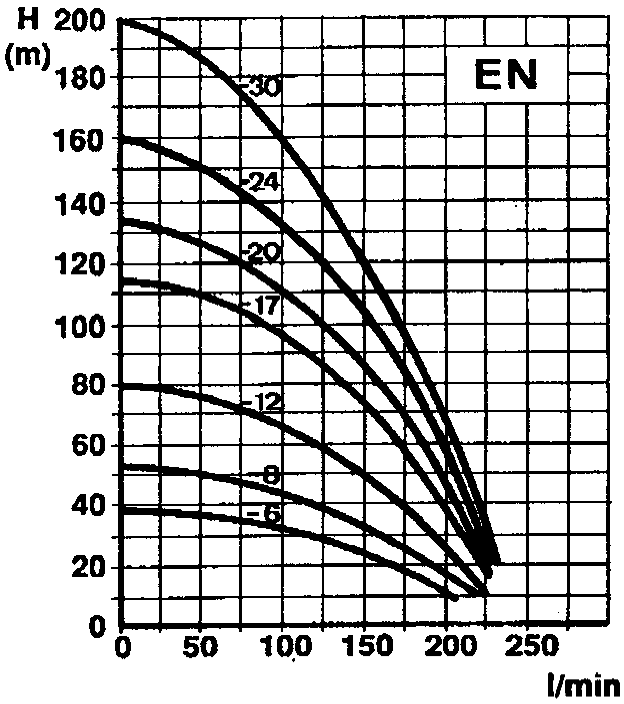
Debe 4" 1x230 V 2-wire
AN - BN - C
med inbyggt startrelä
Sid. 6

Figur 6.19 Pumpkurvor för ett antal undervattenspumpar ∅ 96 mm (4”)

Debe 4" undervattenspumpar

3x400 V, 50 Hz





Backventil ingår i
samtliga 4"- pumpar

Största utv. diameter = 96 mm
Min. brunnsdiameter = 104 mm
Max. föroreningsgrad i pumpmediet = 25 g sand/m³

Pumptyp Kapacitet	Motor	Märkström 3x400 V	Mått mm			Vikt	Röransl.
4500-15000 l/h (75-250 l/min)	kW	A	A	B	C	kg	G
EN- 6	1,10	3,0	829	530	299	15,6	50
EN- 8	1,50	4,0	962	635	327	17,5	50
EN-12	2,20	5,9	1126	770	356	20,5	50
EN-17	3,00	7,8	1533	1110	423	25,1	50
EN-20	4,00	10,0	1920	1330	590	33,8	50
EN-24	4,00	10,0	2135	1545	590	35,4	50
EN-30	5,50	13,7	2584	1860	704	43,2	50

DEBE PUMPAR AB

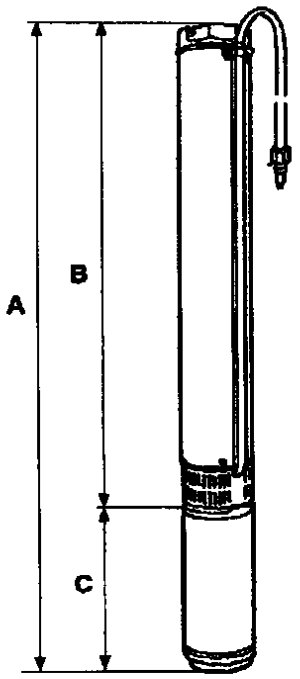
Enköpingsvägen 106
S-174 46 Sundbyberg
Tel: +46(0)8-628 11 85
Fax: +46(0)8-628 11 90
E-mail: info@debe.se

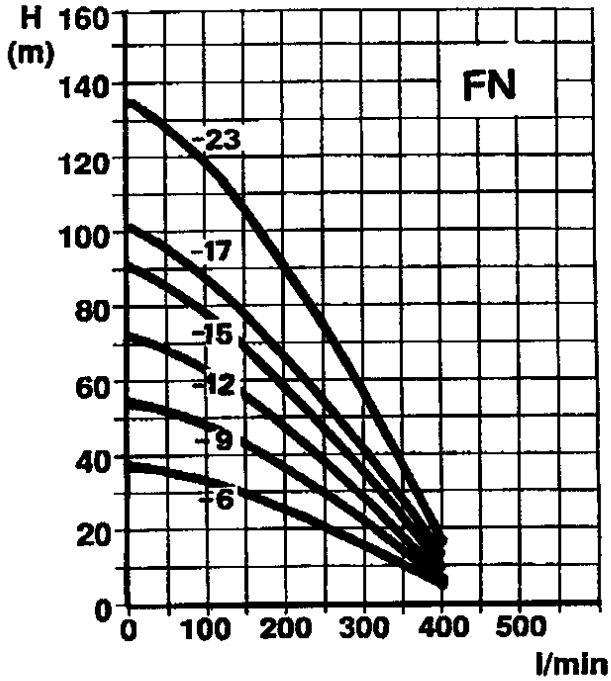
Figur 6.20 Pumpkurvor för undervattenspumpar EN ∅ 96 mm (4")

DEBE 708 P04

Debe 4" undervattenspumpar

3x400 V, 50 Hz





Backventil ingår i
samtliga 4"- pumpar

Största utv. diameter = 96 mm
Min. brunnsdiameter = 104 mm
Max. föroreningsgrad i pumpmediet = 25 g sand/m³

Pumptyp Kapacitet	Motor	Märkström 3x400 V	Mått mm			Vikt	Röranst.
7500-25800 l/h (120-430 l/min)	kW	A	A	B	C	kg	G
FN- 6	1,50	4,0	1222	895	327	19,6	50
FN- 9	2,20	5,9	1285	929	356	21,7	50
FN-12	3,00	7,8	1585	1162	423	25,0	50
FN-15	4,00	10,0	2079	1489	590	33,5	50
FN-17	4,00	10,0	2216	1626	590	34,5	50
FN-23	5,50	13,7	2868	2164	704	40,8	50

DEBE PUMPAR AB

Enköpingsvägen 106
S-174 48 Sundbyberg
Tel: +46(0)8-626 11 85
Fax: +46(0)8-626 11 90
E-mail: info@debe.se

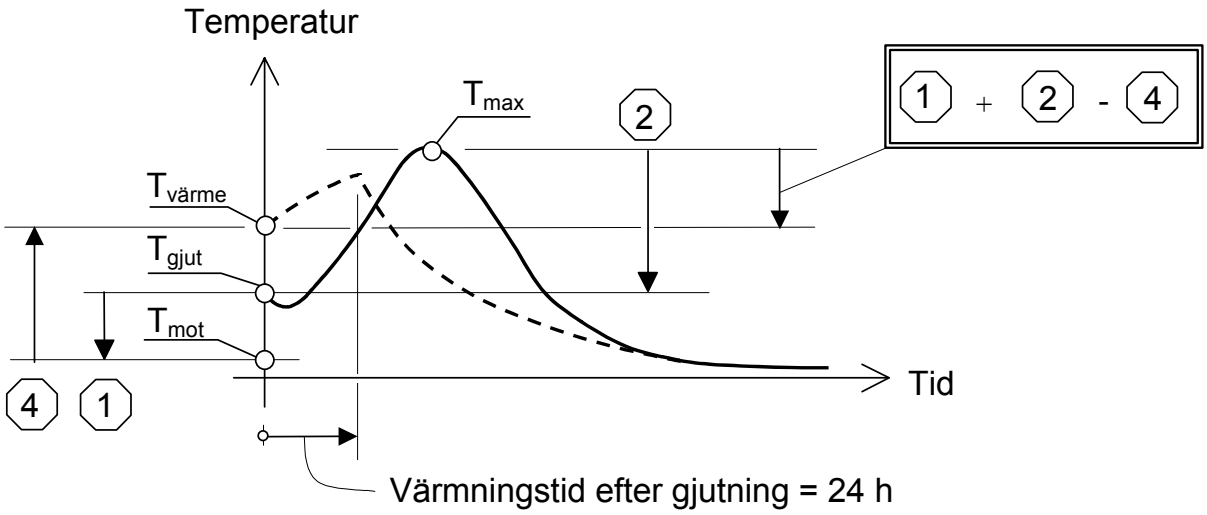
Figur 6.21 Pumpkurvor för undervattenspumpar FN ∅ 96 mm (4")

6.2 Värmning

- Värmekablar skall slås av 24 timmar efter gjutstart.
- Plattan skall täckas med isolering under hela förvärmningen tills kablarna slås av.
- Plattan förutsätts ha kvarsittande form, sidoåterfyllning eller nedhängande isolering.
- Vintertid ska även marken täckas med isolering intill 600 mm från plattan.

Värmningsinsats

Värmningsinsatsen utgöres av del 4 i figur 6.22 och avser en höjning av plattans medeltemperatur vid tidpunkt för gjutning med storleken av $T_{värme} - T_{mot}$.

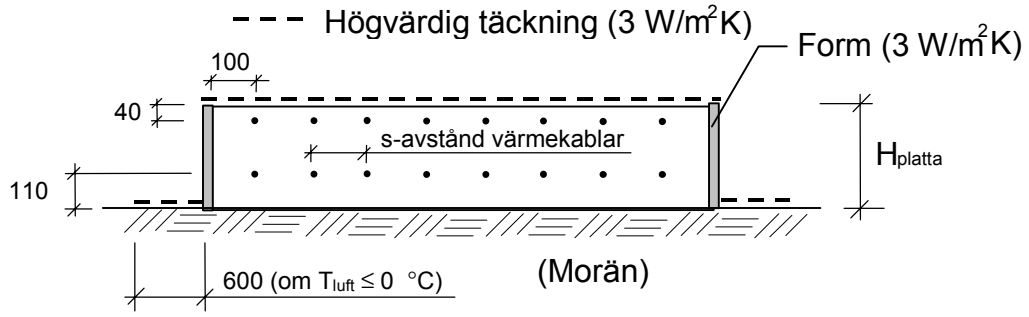


Figur 6.22 Temperaturdifferenser som skapar belastande deformationer för fallet med *värmning*. Markeringen ”1+2-4” anger den totalt belastande differensen vid värmning av plattan. Heldragen linje = medeltemperaturen i väggen utan åtgärder och den streckade linjen = medeltemperaturen i plattan.

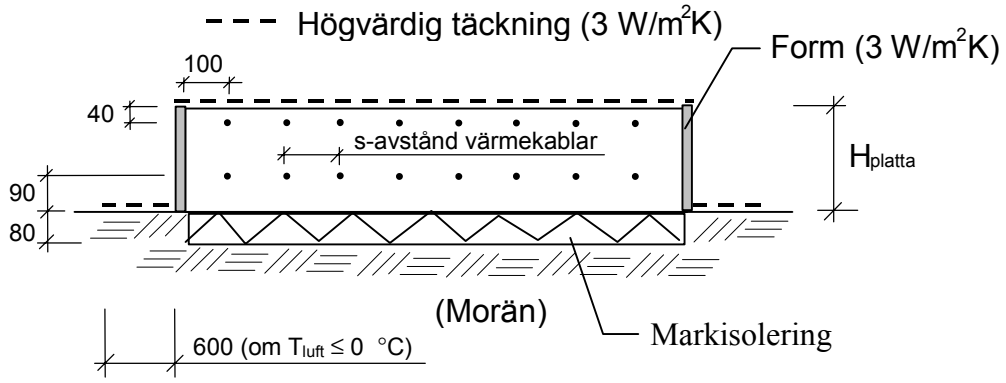
Markisolering

Konstruktören kan välja att lägga in markisolering under plattan, se figurerna 6.23 och 6.24. Eftersom värmningsförloppet med ingjutna värmekablar blir helt olika om markisolering finns eller inte måste användare av Excel-arket CraX1 starta med att markera fallet ”Markisolering, isolerat” eller fallet ”Markisolering, oisolerat”.

Placering av understa lagret värmekablar 110 mm från plattans underkant i figur 6.23 motsvarar att armeringen täckskikt är ca 70 mm. Det är ett representativt värde för täckskiktsområdet 50 – 100 mm, vilket har verifierats med kontrollberäkningar.



Figur 6.23 Beräkningsvillkor vid värmning av plattan med värmekablar (30 W/m) för fallet utan markisolering under plattan. Placering av värmekablarna är visad för undre respektive övre lagret monterat på befintlig armering.



Figur 6.24 Beräkningsvillkor vid värmning av platta med värmekablar (30 W/m) för fallet med markisolering under plattan. Placering av värmekablarna är visad för undre respektive övre lagret monterat på befintlig armering.

Samtliga värmningsförlopp är beräknade med:

Högvärdig isolering på plattans överyta under hela värmningsförloppet!

Med högvärdig isolerig (värmeövergångstal ca 3 W/m^{2}K, figur 6.23 och 6.24) menas användning av minst 10 mm expanderad polyeten eller isolerad betongtäckmatta. Beräknade övergångstal för några vanliga täckmaterial redovisas i avsnitt 4.5.

Plattans form förutsätts sitta kvar under hela värmningsperioden, vilket bedöms vara likvärdigt med att sidoåterfyllning har genomförts eller att isoleringen hängs ner längs sidoytorna. Vintertid har beräknats med förutsättningen att även marken täcks med högvärdig isolering inom området 600 mm från plattan, se figurerna 6.23 och 6.24. Alla dessa åtgärder med täckning syftar till att tillförd värme inte i onödan ska försvinna från plattan, eftersom värmningstiderna då skulle förlängas.

För att få hela bakgrunden till beräknade värmningsförlopp eller om man vill göra egna beräkningar är det av intresse att veta hur starttemperaturerna valts för de olika värmningsfallen. Detta visas på sidan E3:51 i del E av handboken.

Placering kablar

Värmekablarnas placering i plattans höjdled har valts beroende av platthöjden (H_{platta}) enligt figur 6.25.

Avstånd kablar

För de olika värmekabelplaceringarna enligt figur 6.24 har beräkningar av värmningsförlopp utförts för följande avstånd mellan kablarna i horisontalled:

s = 300 mm för kabel med effekt = 30 W/m, vilket motsvarar 100 W/m^2 i varje lager

s = 400 mm för kabel med effekt = 30 W/m, vilket motsvarar 75 W/m^2 i varje lager

s = 500 mm för kabel med effekt = 30 W/m, vilket motsvarar 60 W/m^2 i varje lager

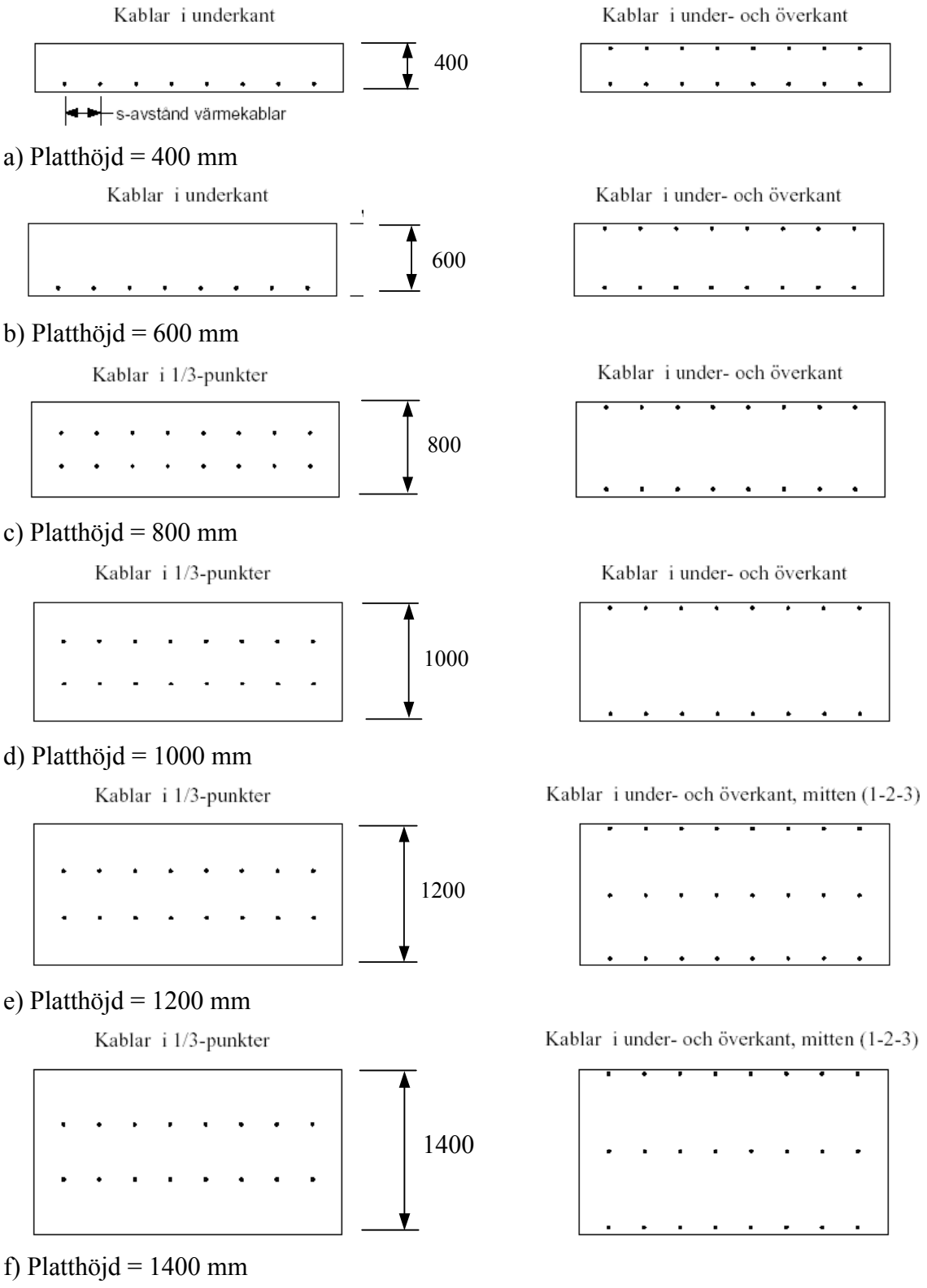
Den minsta temperatur som erfordras för att uppfylla det ställda kravet på tillåten töjningskvot beräknas av Excel-arket CraX1 och redovisas som $T^{erf}_{värme}$. Det är plattans medeltemperatur som avses, och beräkningen av erforderlig värmningsinsats tar hänsyn till om samtidig kylning av väggen finns eller inte. Det är nu upp till användaren att dimensionera ett värmningssystem som uppfyller villkoret

Krav för val av värmningssystem: $T_{värme} \geq T^{erf}_{värme}$ vid tidpunkt för gjutning

Man ska i Excel-arket CraX1 markera vilket av de tre redovisade alternativen (s300, s400 eller s500) som valts för att lösa problemet. Man ska komma ihåg att man egentligen har gjort ett val av tillförd *effekt per ytenhet*, och för kablar inom effektområdet ca 20 – 40 W/m kan man direkt proportionera till verkligt s-avstånd, vilket för kablar med effekt = 20, 30 respektive 40 W/m redovisas i tabell 6.1.

Tabell 6.2 Beräkning av s-avstånd för kablar med effekt 20, 30 eller 40 W/m.

Valt värmningssystem	s-avstånd för kabel med effekten		
	20 W/m	30 W/m	40 W/m
s300 mm, 100 W/m^2	200 mm	300 mm	400 mm
s400 mm, 75 W/m^2	260 mm	400 mm	530 mm
s500 mm, 60 W/m^2	330 mm	500 mm	660 mm



Figur 6.25 Valda placeringar av värmekablar för beräknade värmningsförlopp. Beteckningen ovanför respektive delfigur tillsammans med platthöjden identifierar fallet.

Tid för värmning

Den tid som finns angiven på Excel-arket CraX1 avser värmningstiden före gjutning för att minst komma upp i erforderlig temperatur vid tidpunkten för gjutning . Därefter gäller att

1) Plattan skall vara täckt och värmekablarna påslagna 24 h efter gjutningen.
2) När kablarna slås av 24 h efter gjutningen ska all täckning tas bort.

Principen är att alltid när värmning pågår ska så mycket som möjligt av tillförd värme bibehållas i plattan. När sedan värmningen slås av 24 h efter gjutningen vill man att väggen och plattan samtidigt ska vara utsatt för kontraktion för att differensrörelsen mellan vägg och platta ska bli så liten som möjligt.

När man använder metoden med ingjutna värmekablar ska man från tidpunkten för gjutning se till att inga värmekablar är påslagna strax under väggen (= kablar i överkant platta). Skälet är att man annars får en oönskad accelererad härdning i nedre delen av väggen samtidigt som den lokala kylningseffekten från plattan blir sämre. För tunnare väggar genomförs detta genom att inga värmekablar placeras precis under väggen, medan man vid tjockare väggar kan ha en lokal slinga för kablarna strax under väggen och att dessa kopplas ur vid tidpunkten för gjutning.

6.3 Beräknad töjningskvot inklusive åtgärder

Den töjningskvot, $\eta_{åtgärd}$, som redovisas i Excel-arket CraX1 under rubriken ”BERÄKNING MED ÅTGÄRDER” avser det slutresultat som beräkningen inklusive både kylning och värmning leder till, se figur 6.1. Den åtgärd som man vill ska vara med i analysen måste markeras med en bock strax under rubrikerna ”Kylning” respektive ”Värmning”. Om den beräknade töjningskvoten inklusive åtgärd/åtgärder uppfyller kravet på tillåten töjningskvot, är dimensioneringskedjan färdig för det aktuella fallet.

Det slutliga valet av åtgärd beror på en mängd faktorer såsom tillgång till utrustning, årstid, situationen vid arbetsplatsen, tidigare erfarenhet att genomföra olika åtgärder inom den tillgängliga organisationen etc. Naturligtvis är alltid en ekonomisk kalkyl intressant att genomföra, och beräkningar med Excel-arket CraX1 kan snabbt och enkelt erbjuda tekniskt möjliga alternativ att studera mer ingående.

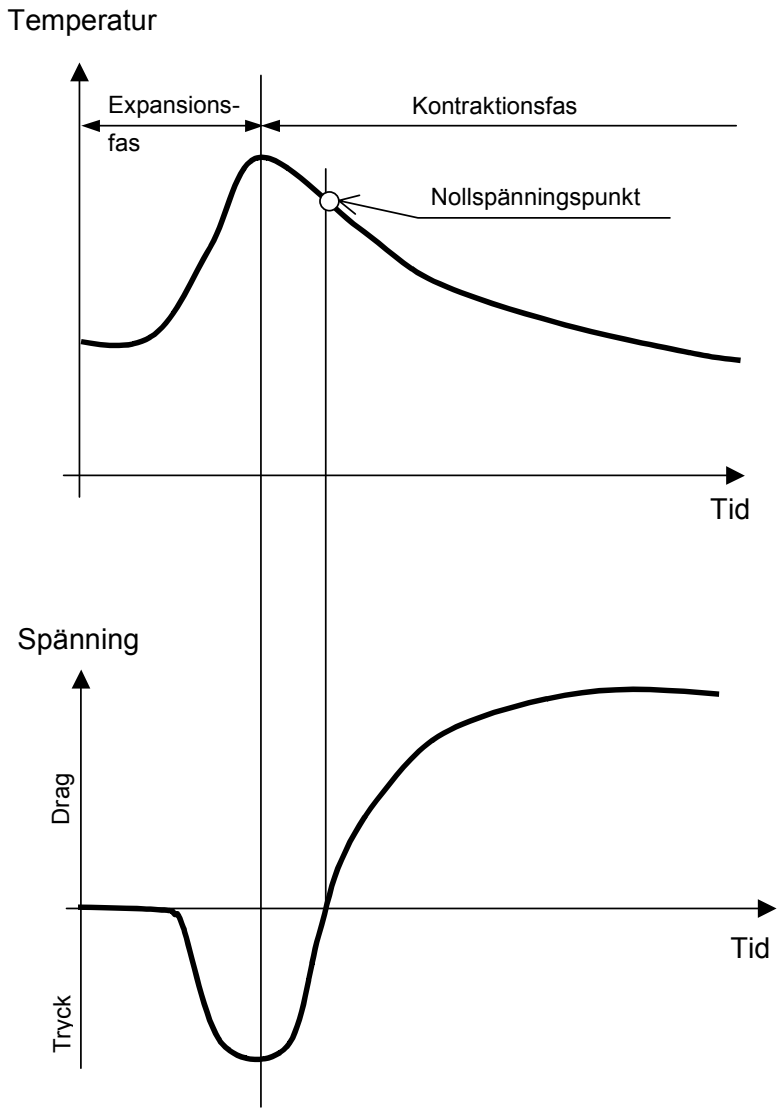
En annan användning av resultaten enligt Excel-arket CraX1 är att man kan göra många olika parametravariationer på kort tid, och att de mest intressanta lösningarna kan ligga till grund för utformningen av beräkningssystem med mer avancerade beräkningsverktyg för ett fåtal fall.

7 HUR UPPKOMMER TEMPERATURSPÄNNINGAR

7.1 Temperatur- och spänningsförlopp i ung betong

I figur 7.1 visas översiktligt hur temperaturförloppet och spänningsutvecklingen för en härdande betong ser ut. Kroppen utvidgar sig under expansionsfasen och drar sedan ihop sig under kontraktionsfasen.

Om det finns ett mothåll mot dessa rörelser från anslutande konstruktioner, uppstår spänningar, som är större ju styvare mothållet är. Efter nollspänningspunkten byggs dragspänningar upp i den unga betongen, och tillståndet orsakat av hydratationsvärmen slutar i dragspänningar. Om draghållfastheten överskrids uppkommer under kontraktionsfasen en spricka, som i normalfallet inte återsluts.



Figur 7.1 Temperatur och spänningsförlopp i en härdande betongkropp utsatt för visst mothåll.

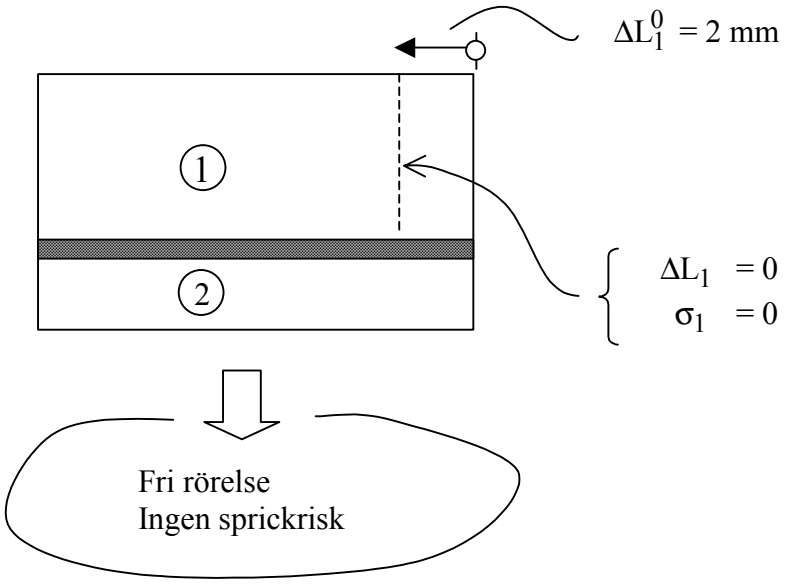
Skälet till att den tryckspänning som byggs upp under expansionsfasen snabbt förloras efter kort del av kontraktionsfasen är att betongen under expansionsfasen är mindre styv (låg elasticitetsmodul) och har hög krypning jämfört med under kontraktionsfasen.

7.2 Sagan om betongklossarna

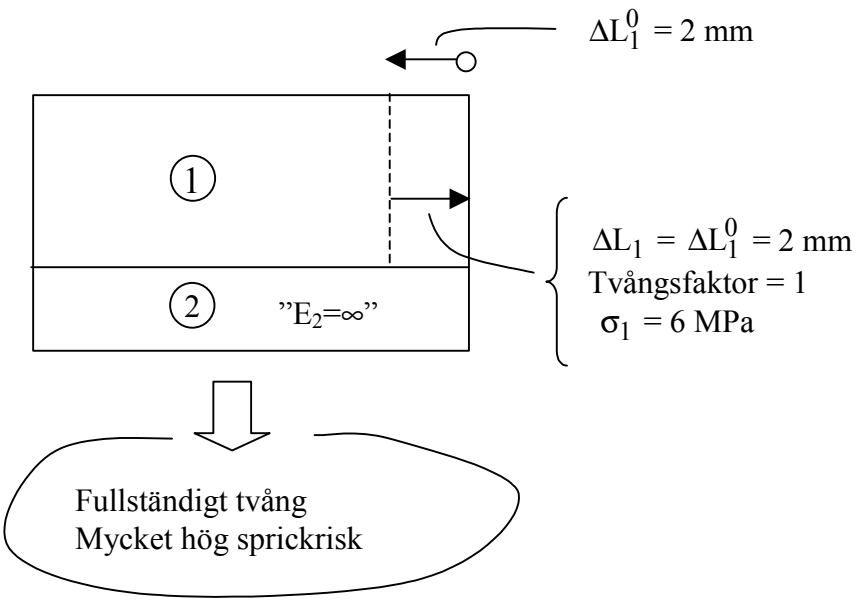
Förhållandena för betongen efter nollspänningspunkten illustreras nedan i form av schematiskt beteende för ett antal scenarios, se figur 7.2 – 7.7. Betongkloss 1 utgör en vägg som under olika villkor kopplas ihop med betongkloss 2, som är en platta.

Utgångsläget för grundfallet är att betongkloss 1 har temperaturen 30 °C och att betongkloss 2 är i termisk jämvikt med luften, vilket innebär temperaturen 10 °C. Denna utgångsskillnad i temperatur innebär att rörelseskillnaden mellan betongklossarna är 2 mm, om konstruktionens längd är 10 m.

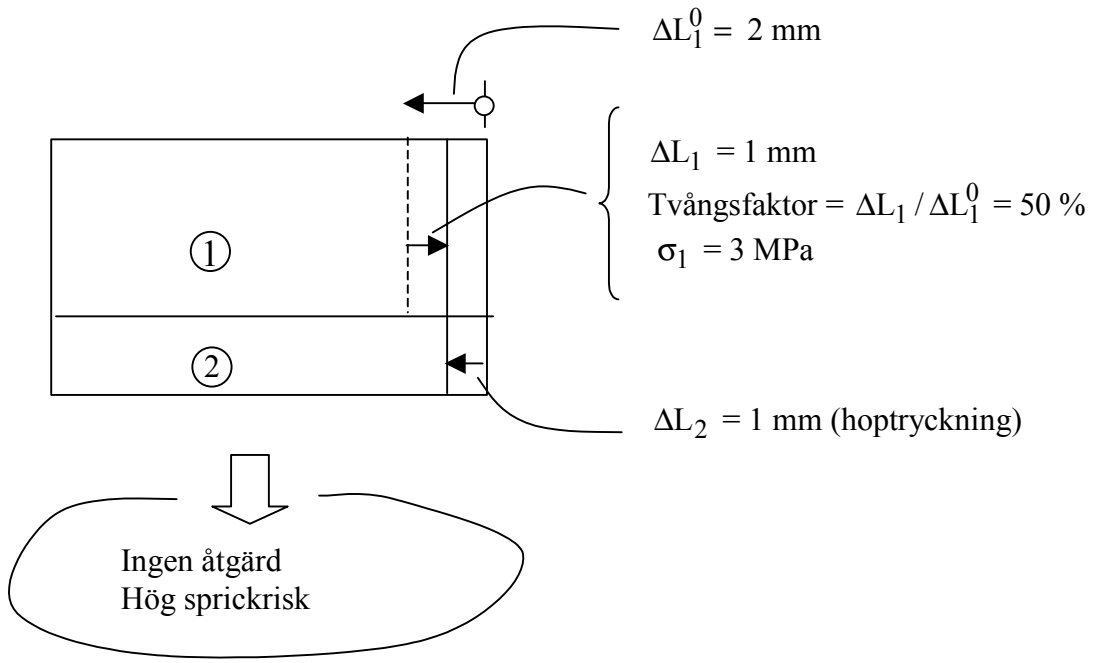
De olika scenarierna (A – E) kan kommenteras på följand sätt:



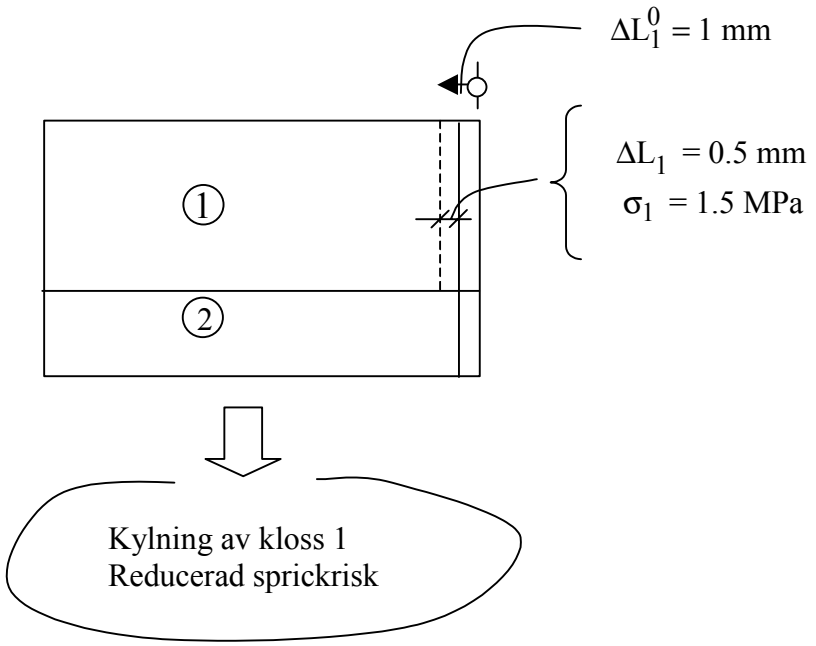
A) I det första scenariot finns ingen koppling mellan klossarna, vilket innebär att även efter uppnådd temperaturjämvikt är bägge klossarna spänningsfria. Detta är det gynnsammaste läget, och det kan beskrivas som fri rörelse, inget tvång eller mothåll = 0. Man kan också uttrycka det som att i det fall tvånget upphävts uppstår inga spänningar.



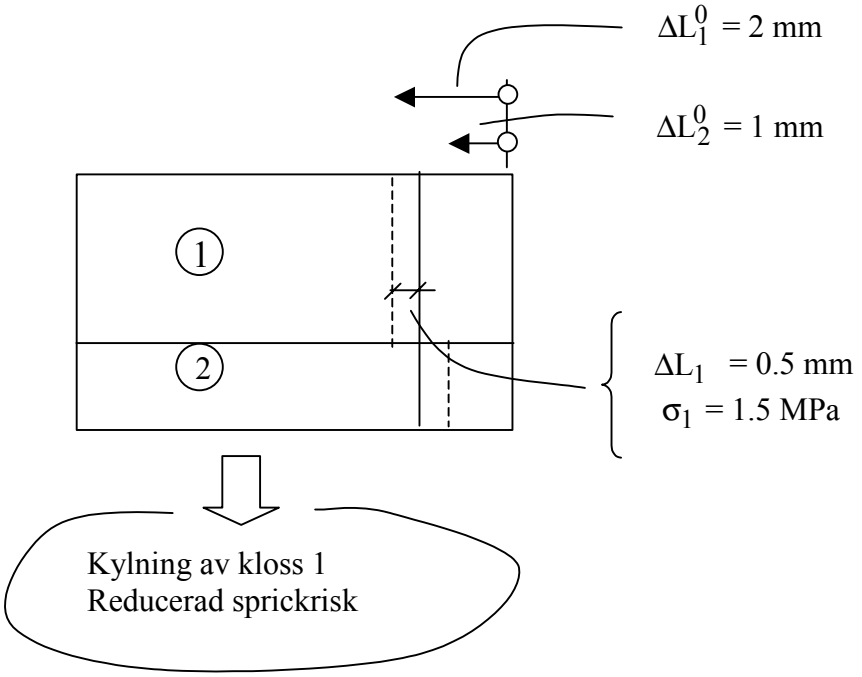
B) I nästa scenario tänker man sig det värsta fallet att vidhäftningen är fullständig och att betongklass 2 inte kan röra sig alls. Detta kan tänkas motsvara gjutning mellan två orörliga, massiva konstruktionsdelar med genomgående armering som ger full vidhäftning i fogarna. Formellt kan det beskrivas med "$E_2 = \infty$". I detta fall tas hela rörelseskillnaden ut som spänning, vilket med parametrar angivna i figur 7.4 motsvara en spänning på 6 MPa i betongkloss 1. Om man antar att betongen har en draghållfasthet på 3 MPa motsvarar det att kvoten dragspänning/draghållfasthet = 2. En dragspricka uppkommer sannolikt, vilket kan karakteriseras med mycket hög sprickrisk. Situationen kan uttryckas som fullständigt tvång, fixspänning eller tvångsfaktor = 1.



C) Det tredje scenariot avser att illustrera en mer normal situation vid hopgjutning av en vägg på en platta grundlagd på packad fyllning. Utgångssituationen är samma som i föregående två scenarier, dvs klossarnas rörelseskillnad är 2 mm. Om man förenklat förutsätter att klossarnas rörelser sker som ren translation, kommer de att självbalansera till horisontella summakraften = 0. Om man antar att de har ungefär samma tvärsnittsyta, får kloss 1 en dragspänning motsvarande 1 mm utdragning och kloss 2 får en tryckspänning motsvarande 1 mm hoptryckning. Utdragningen av kloss 1 i relation till dess frirörelse definierar tvånget, och i detta fall blir tvångsfaktorn = 1 mm/2 mm = 50 %. 1 mm utdragning motsvarar dragspänningen 3 MPa, och kvoten dragspänning/draghållfasthet blir nu = 1. Detta kan karakteriseras som hög sprickrisk, och är någorlunda representativt för många praktiska fall vid gjutning av vägg-på-platta. Eftersom man vid dimensionering måste innehålla en spänningskvot < 1, se avsnitt 4.6, innebär detta att i de allra flesta fallen vägg-på-platta måste man i praktiken vidta någon form av sprickreducerande åtgärd .



D) I detta scenario förutsätts att utgångsläget för kloss 1 är temperaturen 20 °C, vilket innebär att klossen har åtgärdats genom *kylning*. Nu ska kloss 1 sammandras från 20 till 10 °C, vilket motsvarar 1 mm rörelse. Med samma tvångsituation som i scenario C (50 % tvång) blir nu dragspänniungen ca 1.5 MPa (utdragning ca 0.5 mm av kloss 1) och spänningskvoten 0.5. Detta är nu en situation som man kan säga utgör ett godkänt dimensioneringsläge, och kravet på erforderlig spricksäkerhet är uppfyllt.



E) I det sista scenariot, se figur 7.7, år återigen utgångstemperaturen för kloss 1 30 °C, men kloss 2 har en förhöjd starttemperatur på 20 °C. Detta innebär en *värmning* och att kloss 2 är förstorad ca 1 mm jämfört med jämviktssituationen med omgivande luft. Nu sker 2 mm sammandragning för kloss 1 *samtidigt* som kloss 2 sammandras 1 mm. *Rörelseskillnaden* mellan klossarna är 1 mm, vilket innebär att vid slutjämvikten har vi en situation som liknar scenario D, nämligen att kloss 1 får ca 1.5 MPa dragspänning (0.5 mm utdragning). Även i detta fall kan man säga att kravet på erforderlig spricksäkerhet är uppfyllt.

Händelseförloppen för scenarierna A – E sammanfattas i tabell 7.1.

Tabell 7.1 Sammanställning av händelseförloppen för scenarierna A – E, se figurerna 7.2 - 7.7.

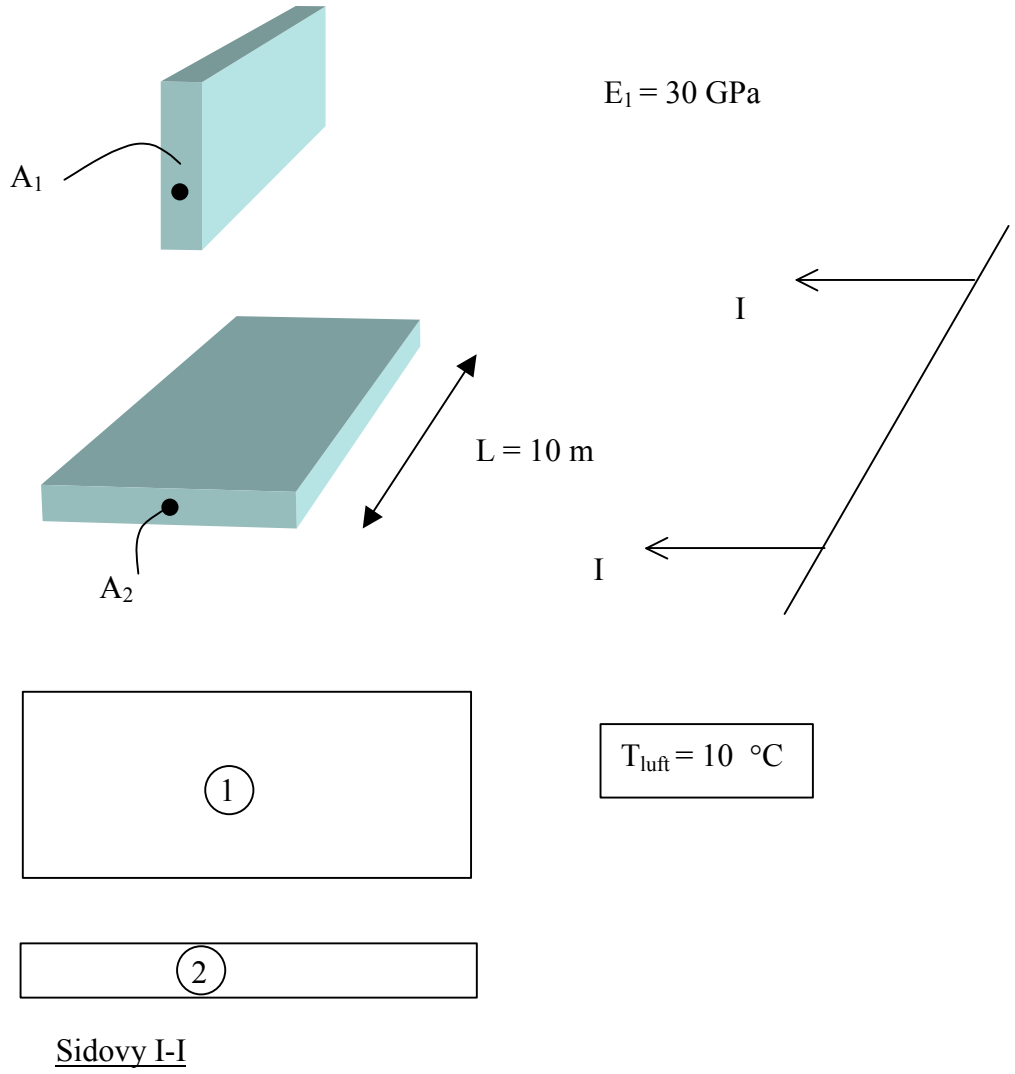
Fall	Tvång	T_1 °C	T_2 °C	σ_1 MPa	$\eta = \frac{\sigma_1}{f_{ct}}$
A	R = 0	30	10	0	0
B	R = 1	30	10	6	2
C	R = 0.5	30	10	3	1
D	R = 0.5	20[1]	10	1.5	0.5
E	R = 0.5	30	20[2]	1.5	0.5

1) Kylning av unga betongen
2) Värmning av motgjuten konstruktion

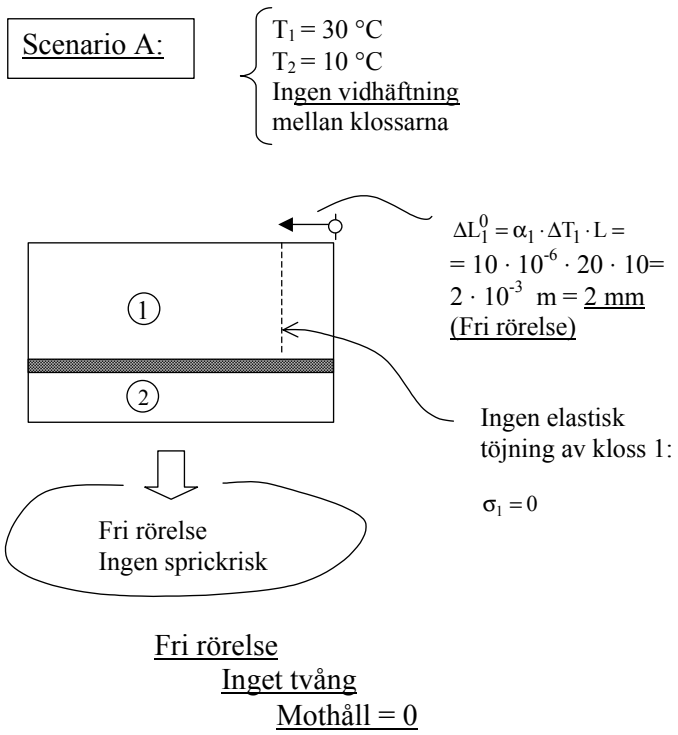
Sagan om klossarna kan också sammanfattas med att som sprickreducerande åtgärder har man följande parametrar att spela med:

* Tvånget (A,B,C)
* Kylning (D)
* Värmning (E)

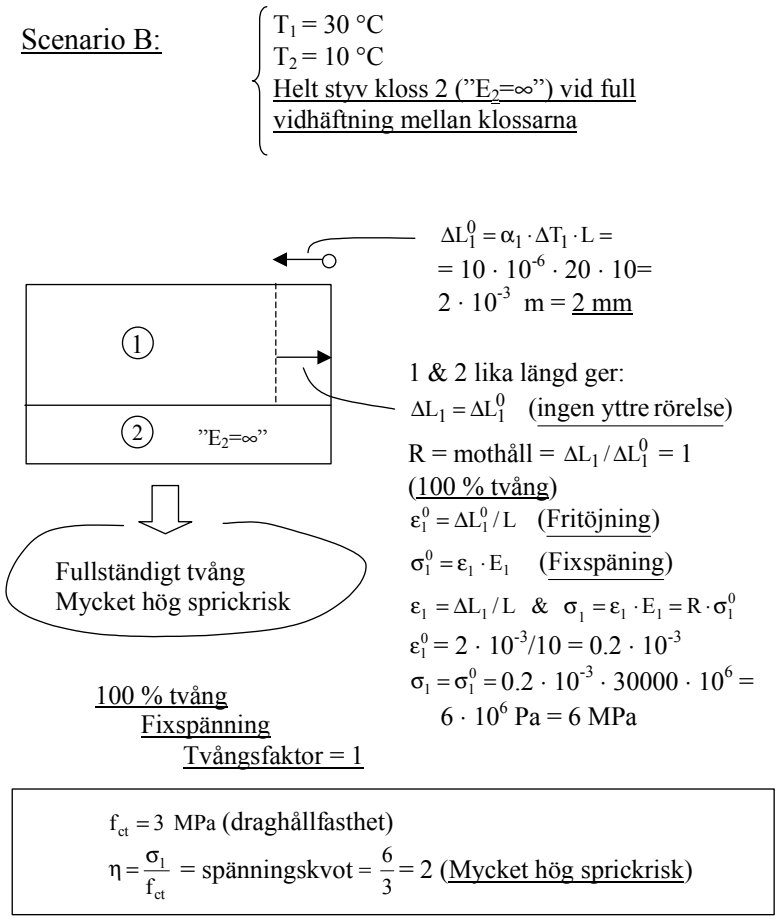
Mer detaljerad information om scenarierna A – E framgår av figurerna 7.2 - 7.7.



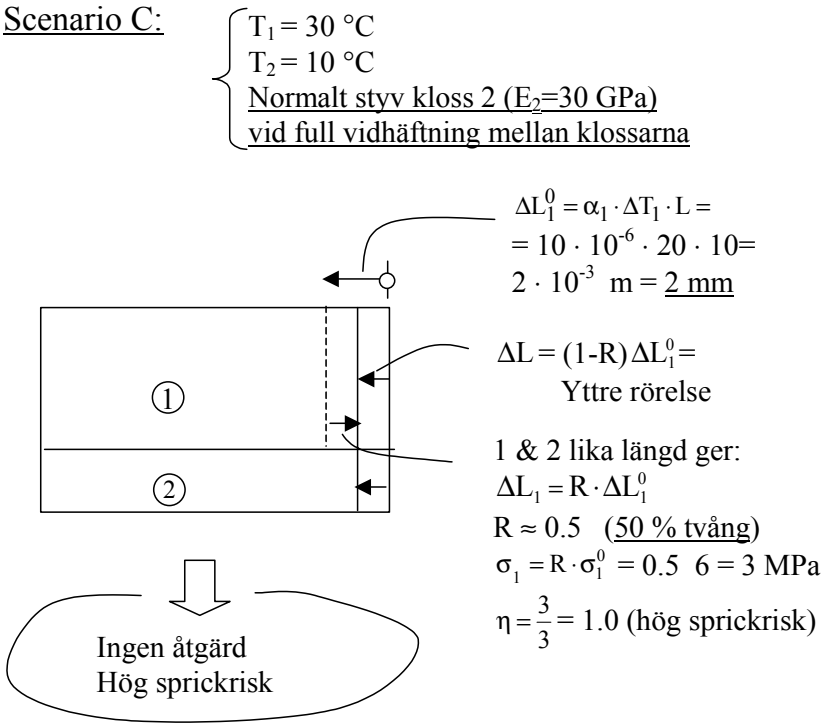
Figur 7.2 Definition av parameter för beskrivning av sagan om betongklossarna



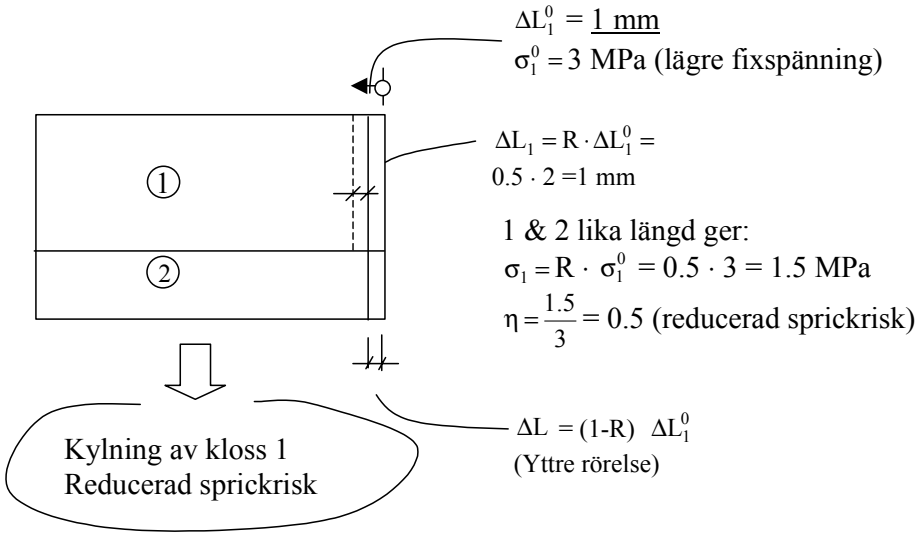
Figur 7.3 Scenario A: Ingen vidhäftning mellan klossarna



Figur 7.4 Scenario B: Fullständigt tvång

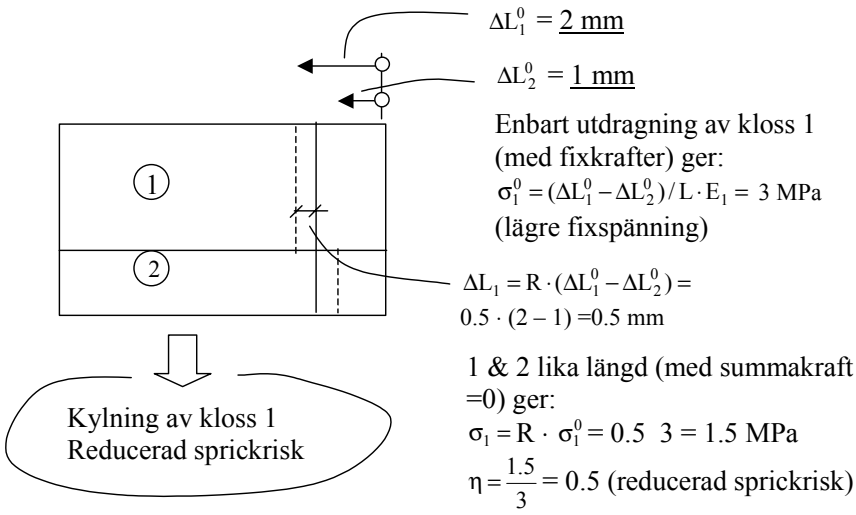


Figur 7.5 Scenario C: "Naturligt elastiskt mothåll från anslutande konstruktion.



Figur 7.6 Scenario D: Kylning av kloss 1.

Scenario E: $T_1 = 30$ °C
$T_2 = 20$ °C (Uppvärmning av kloss 2)
(Samverkan 1 & 2 ger: R=0.5)



Figur 7.7 Scenario E: Värmning (förstoring) av plattan

7.3 Olika delar som ingår i uppbyggandet av spänning

De olika delar som ingår i uppbyggandet av spänning i ung betong kan beskrivas med

1 = Ingångsdifferens $= T_{gjut} - T_{mot}$

2 = Hydratationsvärme $= T_{max} - T_{gjut}$

3 = Kylinsats $= T_{max} - T_{kyl}$ $\left(= T_{max}^{ref} - T_{kyl}^{ref} \right)$

4 = Värmd motgjutning $= T_{värne} - T_{mot}$

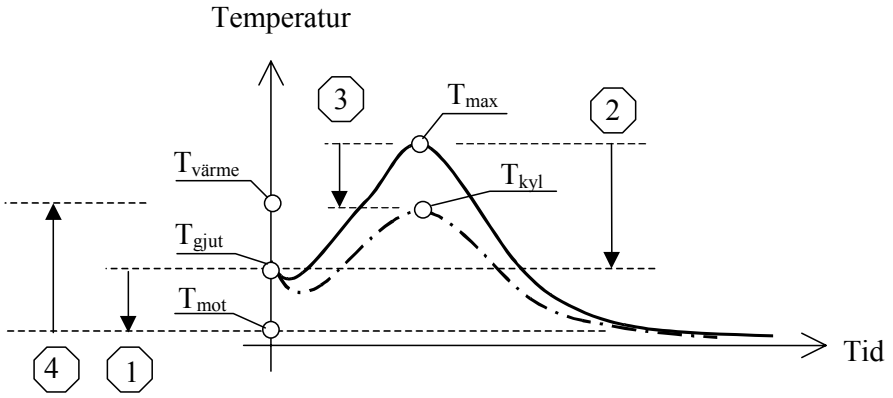
Dessa fyra delar illustreras i figur 7.8 och kan beskrivas som belastande töjningskvot η med följande formel

$$\eta = [\ \underbrace{\alpha_c (T_{gjut} - T_{mot})}_{1} + k_2\, \underbrace{\alpha_c (T_{max} - T_{gjut})}_{2} + \Delta\varepsilon_{sh}$$

$$- \underbrace{\alpha_c (T_{max} - T_{kyl})}_{3} - \underbrace{\alpha_c (T_{värme} - T_{mot})}_{4}\ ] \cdot \frac{f_{bel}}{\varepsilon_{brott}} \cdot \gamma_R$$

där α_c = betongen temperaturrörelsekoefficient, 1/°C
k_2 = betongens nollspänningsfaktor
$\Delta\varepsilon_{sh}$ = betongen autogena krympning

f_{bel} = belastningsfaktor
ε_{brott} = betongen dragtöjningskapacitet
γ_R = tvångsfaktor i dimensionerande punkt



Figur 7.8 Illustration av olika delar som bygger upp spänning i ung betong.

7.4 Bestämning av tvång för fallet vägg-på-platta

Tvångets fördelning över vägghöjden bestäms med en metod som benämnes ”kompenserad balkböjning”, där man genomför jämviktsanalysen för en homogent krympande (t ex orsakat av en temperatursänkning) vägg med hjälp av teknisk balkteori. Här redovisas enbart övesiktligt hur beräkningarna går till. Den som är intresserad av mer detaljer hänvisas till Nilssom (2000 och 2003).

Effekten av icke-linjära deformationer för höga balkar (δ_{res}, se figur 7.11) och justering för korta konstruktioner inklusive inverkan av glidning i gjutfogar (δ_{slip}, se figur 7.12) beaktas genom att justera väggens krympning enligt:

$$\varepsilon_{ref}(y) = \Delta\varepsilon^0 \cdot \delta_{slip} \cdot \delta_{res}(y) \qquad (7.1)$$

där $\varepsilon_{ref}(y)$ = väggens justerade kontraktion med hänsyn till faktorerna δ_{res} och δ_{slip}
$\Delta\varepsilon^0$ = väggens homogena kontraktion.

Effekten av höga balkar beskrivs av

$$\delta_{res}(y) = a_0 + a_1 \cdot \left(\frac{y}{H_y}\right) + a_2 \cdot \left(\frac{y}{H_y}\right)^2 + a_3 \cdot \left(\frac{y}{H_y}\right)^3 \qquad (7.2)$$

där .a_i = koefficienter vid beskrivning av δ_{res}
H_y är väggens höjd.

Beräkningen enligt kompenserad balkböjning illustreras i figur 7.9, och beräkningen beskrivs med följande sekvens:

a) $\varepsilon_{fix} = 0$: $\sigma_{fix}(y) = (-\varepsilon_{ref}(y)) \cdot E_y$ (7.3)

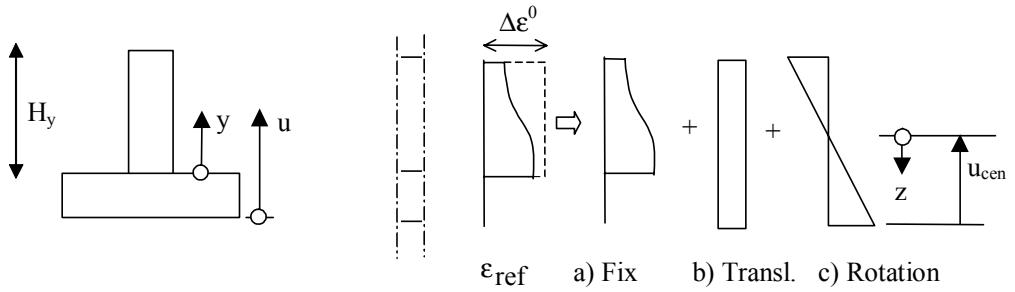
b) $\varepsilon_T = \dfrac{N - N_0}{(EA)_{tr}}$: $\sigma_T = \varepsilon_T \cdot E_y \; (N = \gamma_{RT} \cdot N_0)$ (7.4)

c) $\varphi = \dfrac{M - M_0}{(EI)_{tr}}$: $\sigma_\varphi(y) = \varphi \cdot z \cdot E_y \qquad (M = \gamma_{RR} \cdot M_0)$ (7.5)

a)+b)+c): $\sigma(y) = \sigma_{fix}(y) + \sigma_T + \sigma_\varphi(y)$ (7.6)

Den efterfrågade tvångsfördelningen kan nu beräknas som spänningsfördelningen (summan från delarna a, b och c i figur 7.9) över vägghöjden dividerad med fixspänningen av den homogena krympningen enligt:

$$\gamma_R = \frac{\sigma(y)}{(-\Delta\varepsilon^0) \cdot E_y} = f_{fix}(y) + f_T + f_\varphi(y) \tag{7.7}$$



Figur 7.9 Bestämning av tvångsfördelning över balkhöjden.

Translationstvång

Translationstvånget (γ_{RT}) för den konstruktion som behandlas här, typfallet vägg-på-platta och grundläggning på packad fyllning, är enligt Bernander (1993) helt försumbar, dvs beräkningar med Excel-arket använder:

> För fallet vägg-på-platta grundlagd på packad fyllning gäller att translationstvånget är försumbart litet ($\gamma_{RT} = 0$).

Rotationstvång

För konstruktionstypen balk på elastiskt underlag har Nilsson (2000) presenterat ett samband mellan rotationstvång (γ_{RR}) och kvoten längd/elastisk längd, se figur 7.10. Beteckningen längd avser här gjutetappens fria längd (L), och elastisk längd (L_e) beräknas enligt:

$$L_e = \sqrt[4]{\frac{2\,EI\,\alpha}{K_j}} \tag{7.8}$$

där EI = konstruktionens böjstyvhet, N m^2

K_j = är markens kompressionsmodul, N/m^2, se vidare tabell 7.2.

α = en faktor beroende på förhållandet mellan bredd och längd av konstruktionen, se vidare tabell 7.3.

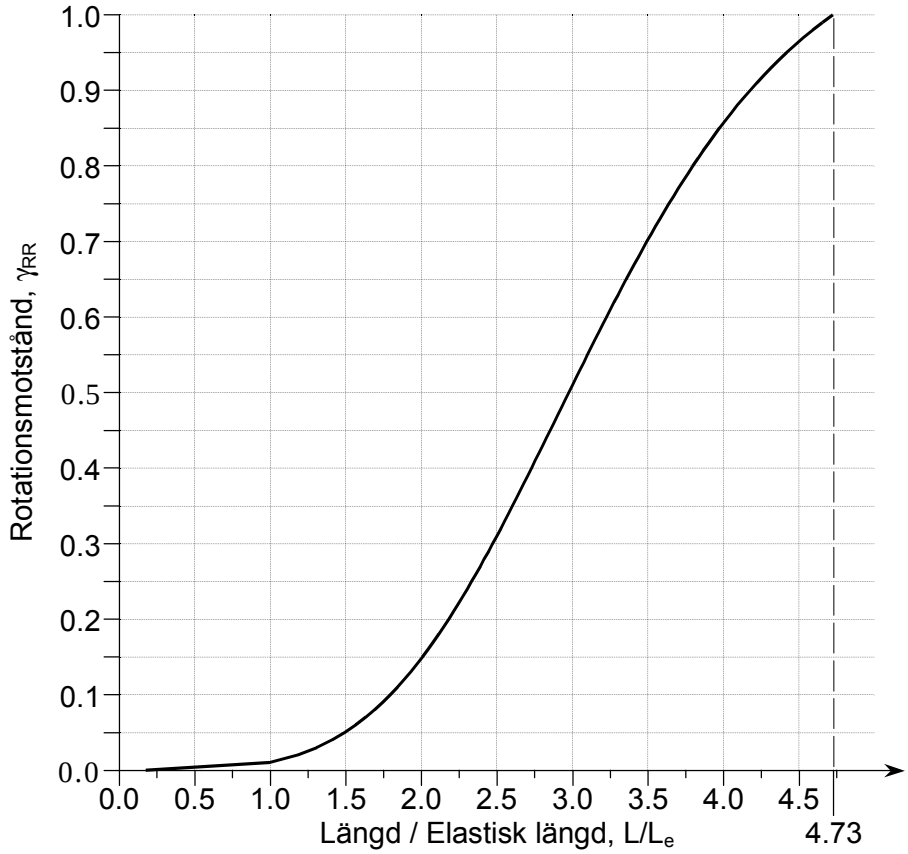
Tabell 7.2. Kompressionsmodul för några vanliga jordarter. Enligt Nilsson (2000).

Material	K_j, 10^6 **N/m²**
Lös lera	0.5 – 2.0
Medelfast lera*	1.0 – 3.0
Sandig siltig lera*	2.0 – 5.0
Löst lagrad lera	3.0 – 10
Medelfast till fast sand	10 – 60
Medelfast till fast grus	10 - 60

*) Normalkonsoliderad

Tabell 7.3 Formfaktor (α i ekv 7.8) beroende på förhållandet mellan konstruktionens bredd (B) och längd (L). Enligt Nilsson (2000).

B / L	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
α i ekv 7.8	0.94	0.83	0.75	0.69	0.65



Figur 7.10. Samband mellan rotationstvång (γ_{RR}) och L/L_e enligt Nilsson (2000).

För många praktiska fall vid grundläggning på friktionsmaterial och lera leder ekv 7.8 till att L/L_e < ca 2.5, vilket motsvarar γ_{RR} < ca 0.3, se vidare Bernander (1993) och Nilsson (2000). Beräkningar för $0 < \gamma_{RR} < 0.3$ har för studier av maximal spänningskvot visat sig ge resultat som är approximativt likvärdiga med $\gamma_{RR} = 0$, varför man i de flesta fall approximativt kan räkna med $\gamma_{RR} = 0$ vid grundläggning på friktionsmaterial och lera. Felet består främst i att området i konstruktionen med stora spänningar varierar med värdet på γ_{RR}, vilket kan påverka omfattningen av eventuella sprickbegränsande åtgärder. Som tillämpare måste man göra en bedömning från fall till fall.

I Nilsson (2000) likväl som i Bernander (1993) har för en typkonstruktion (vägg 3·1 m på platta 5·1.5 m) beräknats följande längder för ett rotationstvång på högst 5 % ($\gamma_{RR} < 0.05$):

Sandig siltig lera:	L < 45 m
Medelfast sand:	L < 30 m
Fast sand / fast grus:	L < 24 m

Dessa resultat innebär att man vid grundläggning på friktionsmaterial i flertalet praktiska fall kan försumma rotationstvånget, dvs räkna med $\gamma_{RR} = 0$. Följande slutsats kan dras:

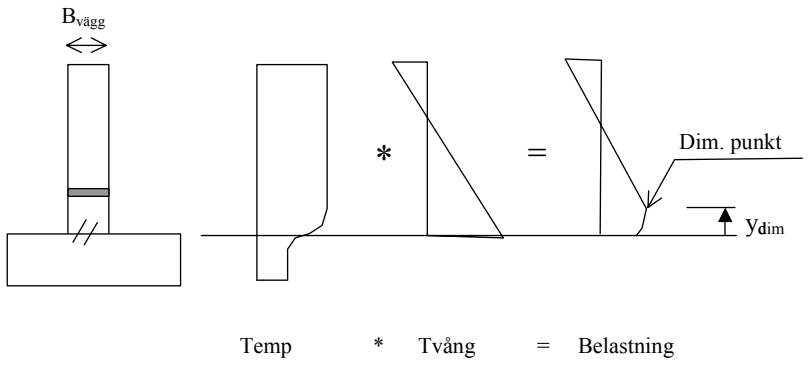
> För flertalet praktiska fall av typkonstruktionen vägg-på-platta gäller att rotationstvånget är försumbart litet ($\gamma_{RR} = 0$).

Dimensionerande punkt

Den mest ansträngda fibern i väggens höjdled benämnes bestämmande punkt (y_{dim} i figur 7.11), och en preliminär ansats är

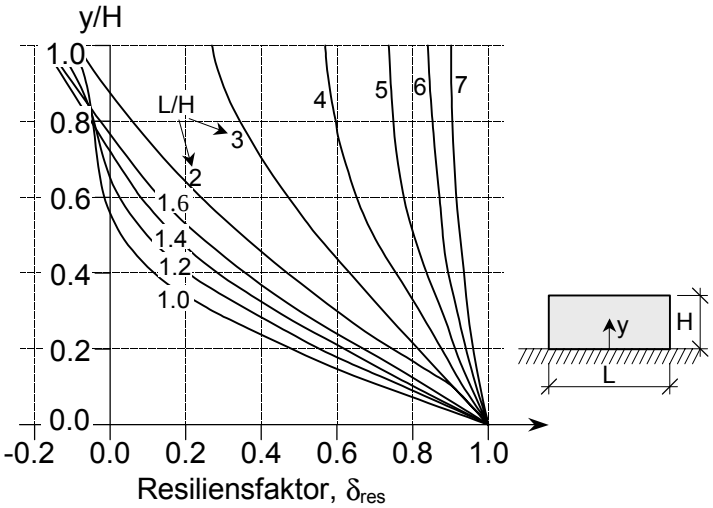
$$y_{dim}/B_{vägg} = 1 \qquad (7.9)$$

Det har dock visat sig vid jämförande beräkningar att för det studerade fallet måste bestämmande punkt beräknas från fall till fall, men att för långa konstruktioner (L/H > ca 3) kan formel 7.9 i många fall vara en nöjaktig approximation.



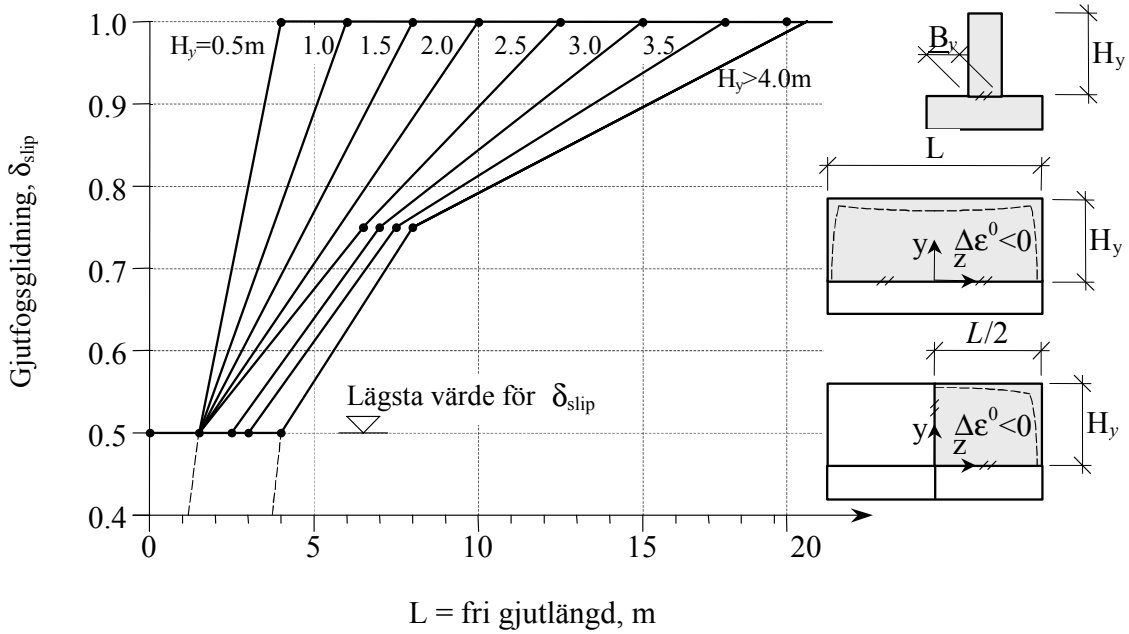
Figur 7.11 Illustration av dimensionerande punkt

Effekt av höga balkar, δ_{res} i ekv 7.1



Figur 7.12 Effekt av höga balkar uttryck som resiliensfaktor, δ_{res}

Effekt av korta konstruktioner inklusive glidning i gjutfogar, δ_{slip} i ekv 7.1



Figur 7.13 Effekt av korta konstruktioner inkusive glidning i gjutfogar uttryckt som korrigeringsfaktorn δ_{slip}

7.5 Materialegenskaper för studerade betonger

Allmänt

De materialparametrar som redovisas här är de betonger som finns att välja bland i Excel-arket CraX1. Cementet är enbart av typen anläggningscement (Degerhamn Std P) för följande betonger:

- Betong C25/30, C28/35 alt. C30/37, vct = 0.50-0.55
- Betong C30/37 alt. C32/40, vct = 0.45
- Betong C32/40 alt. C35/45, vct = 0.40

Dessa betonger är de i Sverige vanligast förekommande vid gjutningar av anläggningskonstruktioner. De parametrar och andra beskrivningar som här ges för dessa betonger utgör en möjlig beskrivning enligt gjorda laboratorieförsök. Man ska komma ihåg att de flesta egenskaper kan skilja något beroende på variationer vid betongblandningen.

Alla temperaturberäkningar och resultatjämförelser har gjorts med hjälp av datorprogrammet ConTeSt Pro (1999), se vidare kapitel 8, varför materialegenskaperna är samma i Excel-arket CraX1 som i ConTeST Pro. De redovisas här i sin helhet för att få en sammanhållen egenskapsredovisning i aktuell rapport.. En mer utförlig materialbeskrivning ges i Jonasson (1994) och Hedlund (2000).

Värmetekniska egenskaper

För bestämning av temperaturer (T) som funktion av tid (t) tillämpas värmeledningsekvationen som kan uttryckas enligt

$$\rho \cdot c_c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \mathrm{div}(k(\mathrm{grad}(T)) + \frac{\partial W}{\partial t} \tag{7.10}$$

där $\frac{\partial W}{\partial t}$ är utvecklad hydratationsvärme , W/m^3

Ekvivalent mognadstid beräknas enligt

$$t_e = \beta_\Delta \int_t \beta_T \cdot dt + t_{e,0} \tag{7.11}$$

där temperaturkänsligheten, β_T, uttrycks av

$$\beta_T = \begin{cases} e^{(\theta \cdot (\frac{1}{293} - \frac{1}{T+273})} & \text{för } T > -10\ ^\circ C \\ 0 & \text{för } T \leq -10\ ^\circ C \end{cases} \tag{7.12}$$

och

$$\theta = \theta_{ref} \cdot (\frac{30}{T+10})^{\kappa_3} \quad \text{för } T > -10\ ^\circ C \tag{7.13}$$

Betongens värmeutveckling beskrivs av

$$W = C \cdot W_c \cdot e^{\left(\lambda_1 \cdot \left[\ln(1+\frac{t_e}{t_1})\right]^{-\kappa_1}\right)} \qquad (7.14)$$

För samtliga här aktuella betonger gäller:

ρ = densitet = 2350 kg/m^3

c_c = specifik värme = 1000 J/kg°C

k = värmekonduktivitet = 2.1 W/m°C

β_Δ = hastighetsfaktor för eventuell justering= 1

$t_{e,0}$ = formell ekvivalent tid vid blandning av betongen= 0 h

Övriga värmetekniska parametrar framgår av tabell 7.4

Tabell 7.4 Cementhalt och parametrar för värmeutveckling för valda betonger

Betong	C, kg/m^3	W_c, kJ/kg	λ_1	t_1, h	κ_1	θ_{ref}, K	κ_3
C25/30 alt. C28/35, vct = 0.55	360[1]	360	3.08	4.35	1.77	4200	0.5
C28/35 alt. C30/37, vct=0.50	380[1]	360	3.08	4.35	1.77	4200	0.5
C30/37 alt. C32/40, vct=0.45	400[1]	345	2.64	4.5	1.71	4200	0.5
C32/40 alt. C35/45, vct=0.40	420[1]	325	2.2	4.75	1.65	4200	0.5

1) Cementhalten är angiven för användning av vattenreducerare, sättmått ca 100 mm och lufthalt ca 4 á 5 % och maximal stenstorlek = 27 mm. Notera att cementhalten kan variera för olika fabriker.

Mekaniska egenskaper och frirörelser

Tryckhållfasthetsutvecklingen bestäms som tendensvärden för en serie valda ekvivalenta tider enligt:

$$f_{cc}(t_e(i)) = \frac{\eta_i}{1000} \cdot f_{cc,28d} \qquad (7.15)$$

Hållfastheten anges i följande tidpunkter:

$t_e(i) = [4, 6, 8, 12, 18, 24, 72, 168, 672\ h]^{-1}$

Formellt startar hållfasthetsutvecklingen alltid för t_e = 4 h och relateras alltid till t_e = 28d, vilket ger

$\eta_1 = 0$

$\eta_9 = 1000$

Övriga värden för beskrivning av tryckhållfasthetens tendenskurva (η_2 till η_8) framgår av tabell 7.5.

Tabell 7.5 Tendenskurvor för hållfasthetsutveckling

Betong	$f_{cc,28d}$, MPa	η_2	η_3	η_4	η_5	η_6	η_7	η_8
C25/30 alt. C28/35, vct=0.55	43[1]	2	11	41	106	174	466	702
C28/35 alt. C30/37, vct=0.50	48[1]	2	11	41	106	174	466	702
C30/37 alt. C32/40, vct=0.45	48[1]	2	11	41	106	174	466	702
C32/40 alt. C35/45, vct=0.40	53[1]	3	13	48	120	195	485	715

1) Förmodat medelvärde för hållfasthetsklassen.

Draghållfastheten relateras till tryckhållfastheten enligt:

$$f_{ct} = f_{ct}^{ref} \cdot \left(\frac{f_{cc}}{f_{cc}^{ref}}\right)^{\beta_1} \tag{7.16}$$

Betongens frirörelse vid variabel temperatur beskrivs av

$$\frac{\partial \varepsilon_T^o}{\partial t} = \alpha_T \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \tag{7.17}$$

$$\text{där } \alpha_T = \begin{cases} \alpha_E & \text{för } \frac{\partial T}{\partial t} \geq 0 \\ \alpha_C & \text{för } \frac{\partial T}{\partial t} < 0 \end{cases} \tag{7.18}$$

Betongen autogena krympning beskrivs av

$$\varepsilon_{SH}^o = e^{\left(-\left[\frac{t_{s0}}{t_e - t_{start}}\right]^{\eta_{SH}}\right)} \cdot \varepsilon_{SH}^{ref} \quad \text{för } t_e \geq 24 \text{ h} \tag{7.19}$$

Erforderliga parametrar för beskrivning av draghållfasthet och frirörelser redovisas i tabell 7.6.

Tabell 7.6 Parametrar för draghållfasthet och frirörelser.

Betong	f_{cc}^{ref}, **MPa**	f_{ct}^{ref}, **MPa**	β_1	α_E, 10^{-6}/°C	α_C, 10^{-6}/°C	t_{start}, **h**	t_{s0}, **h**	η_{SH}	ε_{SH}^{ref}, 10^{-6}
C25/30 alt. C28/35, vct=0.55	43	3.20	0.667	11	9	24	120	0.3	0
C28/35 alt. C30/37, vct=0.50	48	3.45	0.667	11	9	24	120	0.3	0
C30/37 alt. C32/40, vct=0.45	48	3.45	0.667	11	9	24	120	0.3	-68.4
C32/40 alt. C35/45, vct=0.40	53	3.68	0.667	11	9	24	120	0.3	-136.8

Betongens materialsamband för en ändlig ändring av spänningen beskrivs av

$$\Delta\sigma = E_{tot} \cdot (\Delta\varepsilon - \Delta\varepsilon_{tot}^{o}) \tag{7.20}$$

där

$$E_{tot} = E_c \cdot (1 + \gamma_d) \tag{7.21}$$

Vid monoton lastökning längs jungfrukurvan för $\sigma / f_{ct} > \alpha_{ct}$ gäller:

$$\gamma_d = e^{\left(-(\frac{\bar{\varepsilon}_m}{\varepsilon_o} - \alpha_{ct})/(1-\alpha_{ct})\right)} - 1 \tag{7.22}$$

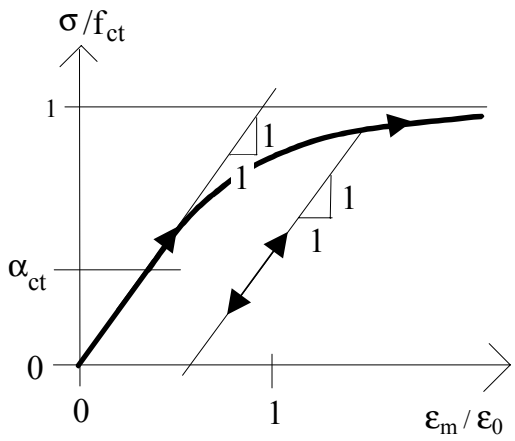
där $\bar{\varepsilon}_m / \varepsilon_o$ = medelvärde av betongens materialtöjning under aktuellt tidssteg

$\varepsilon_o = f_{ct} / E_c$

I övriga fall gäller

$$\gamma_d = 0 \tag{7.23}$$

Detta beteende illustreras i figur 7.14.



Figur 7.14 Betongens icke-linjära arbetskurva

Den sista termen i ekv (7.20) beskrivs med

$$\Delta\varepsilon_{tot}^{o} = \Delta\varepsilon_{rel} + \Delta\varepsilon_T + \Delta\varepsilon_{SH} \tag{7.24}$$

med

$$\Delta\varepsilon_T = \Delta\varepsilon_T^{o} \cdot (1 + \rho_T \cdot \frac{\sigma}{f_{ct}} \cdot \mathrm{sign}(\Delta T)) \tag{7.25}$$

och

$$\Delta\varepsilon_{SH} = \Delta\varepsilon_{SH}^{o} \cdot (1 + \rho_{\varphi} \cdot \frac{\sigma}{f_{ct}} \cdot \text{sign}(\Delta T)) \tag{7.26}$$

Den tidsberoende delen (krypning, relaxation) av betongens beteende beräknas med hjälp av en s k Maxwell-kedja, se figur 7.15. Varje basenhet består av en fjäder (E_{μ}) och en viskös kolv (η_{μ}). Respektive viskös kolv kan alternativt betecknas med sin retardationstid, τ_{μ}, enligt:

$$\tau_{\mu} = \frac{\eta_{\mu}}{E_{\mu}} \tag{7.27}$$

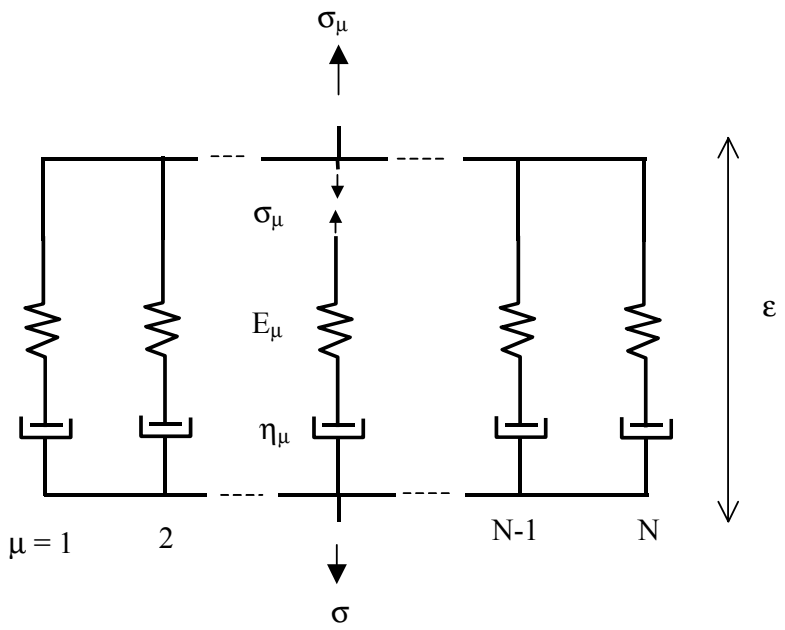
Temperaturens direkta inverkan på retardationstiderna beskrivs av

$$\tau_{\mu T} = \tau_{\mu} \cdot e^{\left(\theta_T \cdot (\frac{1}{293} - \frac{1}{T+273}\right)} \tag{7.28}$$

Parametrarna för att beskriva betongens arbetskurva och kopplingarna enligt ekv 7.25 och 7.26 redovisas i tabell 7.7.

Tabell 7.7 Parametrar för att beskriva betongens arbetskurva samt temperaturens inverkan på retardationstiderna

Betong	α_{ct}	ρ_T	ρ_{φ}	θ_T, K
C25/30 alt. C28/35, vct=0.55	0.85	0	0.9	5000
C28/35 alt. C30/37, vct=0.50	0.85	0	0.9	5000
C30/37 alt. C32/40, vct=0.45	0.85	0	0.9	5000
C32/40 alt. C35/45, vct=0.40	0.9	0	0.9	5000



Figur 7.15 Illustration av en Maxwell-kedja med N st basenheter

Vid tillämpning av en Maxwell-kedja väljer man en lämplig uppsättning retardationstider för referenstemperaturen T = 20 °C, och för beräkningarna här har valts:

$$\begin{cases} N = 8 & \\ \tau_1 = 0.005 \text{ d} & (= 0.12 \text{ h} = 7.2 \text{ min}) \\ \tau_i = \tau_{i-1} \cdot 10 & \text{för } i = 2, 3, \ldots, 7 \\ \tau_8 = \infty & (= \text{sista basenheten beskriver enbart en elastisk fjäder}) \end{cases} \tag{7.29}$$

Spänningarna i varje basenhet uppdateras efter varje tidssteg, $\Delta t = t_2 - t_1$, enligt

$$\sigma_\mu(t_2) = \sigma_\mu(t_1) \cdot e^{\left(-\frac{\Delta t}{\tau_{\mu T}}\right)} + E_\mu \cdot \tau_{\mu T} \cdot \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta t} \cdot (1 - e^{\left(-\frac{\Delta t}{\tau_{\mu T}}\right)}) \tag{7.30}$$

Totala spänningsändringen för samtliga basenheter beräknas enligt

$$\Delta\sigma_{rel} = \sum_{\mu=1}^{\mu=N} (\sigma_\mu(t_2) - \sigma_\mu(t_1)) \tag{7.31}$$

Elasticitetsmodulen för en viss ålder, t_e, och ett visst tidssteg , Δt , beräknas enligt:

$$E_c = \sum_{\mu=1}^{\mu=N} (E_\mu(t_e) \cdot \frac{1 - e^{\left(-\frac{\Delta t}{\tau_{\mu T}}\right)}}{\frac{\Delta t}{\tau_{\mu T}}}) \tag{7.32}$$

Den med spänningsändringen enligt ekv 7.31 associerade töjningsändringen kan nu beräknas enligt:

$$\Delta\varepsilon_{rel} = \frac{\Delta\sigma_{rel}}{E_c} \tag{7.33}$$

Elasticitetsmodulerna för respektive basenhet beskrivs för ett antal ekvivalenta belastningsåldrar som för samtliga här aktuella betonger valts till:

t_e(E-moduler)=[0.249, 0.5, 1.077, 2.321, 5, 10.772, 23.208, 50, 107.722, 232.079 d]$^{-1}$

För dessa tio (10) belastningsåldrar anges respektive basenhets elasticitetsmodul enligt tabell 7.8. Denna beskrivning kan också benämnas betongens relaxationsspektra.

Den första belastningsåldern har satts till t_S – 0.01 d, där t_S = 0.25 d (= 6 h) = betongens praktiska sättningstid för här aktuella betonger. Före den praktiska sättningstiden betraktas betongen formellt som en vätska, där spänningarna = 0. Notera att E_μ = 0.01 GPa för τ_1 = 0.249 d är ett praktiskt sätt att ange E_μ = 0.

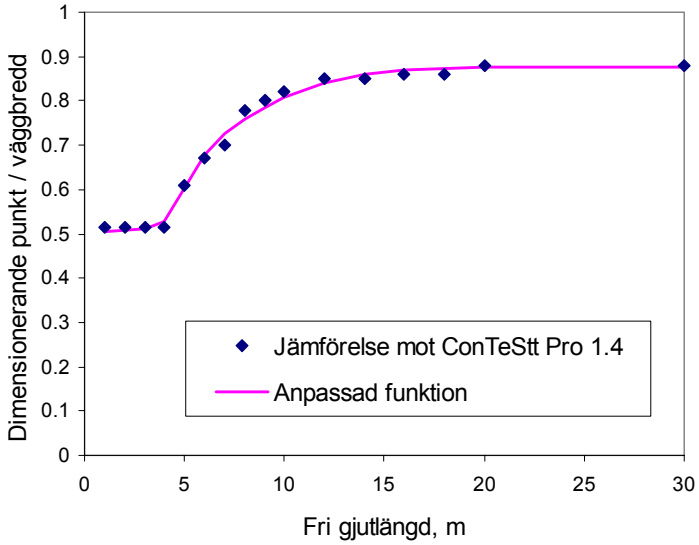
Tabell 7.8 Relaxationsspektra för aktuella betonger

Betong	Belast-nings-ålder, d	E_μ (GPa) för följande retardationstider:							
		τ_1 = 0.005 d	τ_2 = 0.05 d	τ_3 = 0.5 d	τ_4 = 5 d	τ_5 = 50 d	τ_6 = 500 d	τ_7 = 5 000 d	τ_8 = ∞
C 25/30	0.249	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
alt.	0.5	0.368713	0.210247	1.3453	0.48307	0.791189	0.554265	0.455137	0.179662
C28/35	1.077	2.52137	3.06978	4.38487	1.43684	2.91139	2.12001	1.74799	0.751883
alt.	2.321	3.61769	4.39082	5.36314	3.59405	4.89319	3.86569	3.04413	1.09127
C30/37,	5	2.45118	3.26724	4.51983	5.23071	5.67788	4.68698	3.59449	2.33414
vct =	10.772	1.63485	2.3269	3.56614	4.61692	5.1748	4.31825	3.31432	7.92748
0.5-0.55	23.208	1.1334	1.67752	2.71637	3.88274	4.70122	4.02709	3.09951	12.2754
	50	0.843744	1.27578	2.13023	3.22694	4.30578	3.90397	3.02366	15.1551
	107.722	0.682148	1.04035	1.77524	2.75116	3.98901	3.95454	3.12465	16.7416
	232.079	0.593139	0.907714	1.57025	2.45566	3.7352	4.11427	3.4128	17.3751
	0.249	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
C30/37	0.5	0.368713	0.210247	1.3453	0.48307	0.791189	0.554265	0.455137	0.179662
	1.077	2.52137	3.06978	4.38487	1.43684	2.91139	2.12001	1.74799	0.751883
alt.	2.321	3.61769	4.39082	5.36314	3.59405	4.89319	3.86569	3.04413	1.09127
	5	2.45118	3.26724	4.51983	5.23071	5.67788	4.68698	3.59449	2.33414
C32/40,	10.772	1.63485	2.3269	3.56614	4.61692	5.1748	4.31825	3.31432	7.92748
	23.208	1.1334	1.67752	2.71637	3.88274	4.70122	4.02709	3.09951	12.2754
	50	0.843744	1.27578	2.13023	3.22694	4.30578	3.90397	3.02366	15.1551
vct=0.45	107.722	0.682148	1.04035	1.77524	2.75116	3.98901	3.95454	3.12465	16.7416
	232.079	0.593139	0.907714	1.57025	2.45566	3.7352	4.11427	3.4128	17.3751
	0.249	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
C32/40	0.5	0.862623	0.258021	3.5272	1.17121	0.791485	0.441945	0.12333	0.102347
	1.077	2.68988	4.83843	9.09469	3.8158	4.04331	2.21349	0.710002	0.759045
alt.	2.321	2.1292	4.2769	8.2614	7.27718	6.38905	3.53071	1.10772	0.688362
	5	1.27489	2.77093	5.99226	8.37924	7.31946	3.99308	1.26295	3.16347
C35/45,	10.772	0.80702	1.80001	4.21169	7.48107	7.55015	4.15576	1.32674	7.09911
	23.208	0.542543	1.25879	2.96124	6.25982	7.70568	4.46692	1.41863	9.96642
	50	0.401539	0.947271	2.24097	5.11711	7.76141	5.04514	1.57924	11.569
vct=0.40	107.722	0.329486	0.763572	1.86552	4.26591	7.6943	5.90488	1.87515	12.0083
	232.079	0.291844	0.659477	1.66747	3.73728	7.50072	6.92826	2.38811	11.559
	232.079	0.291844	0.659477	1.66747	3.73728	7.50072	6.92826	2.38811	11.559

8 KALIBRERING MOT KÄNDA RESULTAT

Beräkningar med Excel-arket CraX1 har kalibrerats i ca 2500 enskilda beräkningar genom jämförelser mot resultat framtagna med datorprogrammet ConTeSt Pro 1.4. Samtliga parametervariationer för dessa beräkningar redovisas i tabell 8.1. EV2 avser beräkningsomgång nr 2, EV3 nr 3 etc. Att beräkningsomgång EV1 saknas beror på att detta omfattade ett fåtal pilotberäkningar gjorda med avsikt att testa valda beräkningssekvenser.

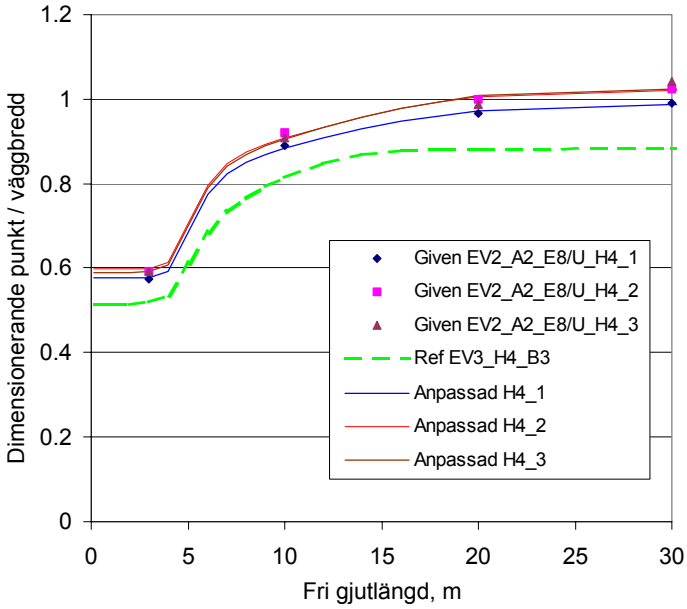
Det huvudsakliga resultatet av kalibreringen är att läget av dimensionerande punkt, se figur 7.10, inte kunde bibehållas konstant. Detta ledde till att regressionen inriktats enbart mot att betrakta dimensionerande punkt som justerande variabel, och ett exempel på detta framgår av figur 8.1.



Figur 8.1

Regressionsanalys för läget av dimensionerande punkt för beräkningen benämnd EV3_H4_B3_U (B3 = plattbredd 3m, U = utan åtgärder).

Med resultat av typen redovisad i figur 8.1 känd kan man bibehålla den principiella kurvformen i stort för närliggande resultat (i detta fall för vägghöjden = 4 m) och därmed skapa ett mer komplett samband vid anpassningen till mer glesa beräkningar, se figur 8.2.

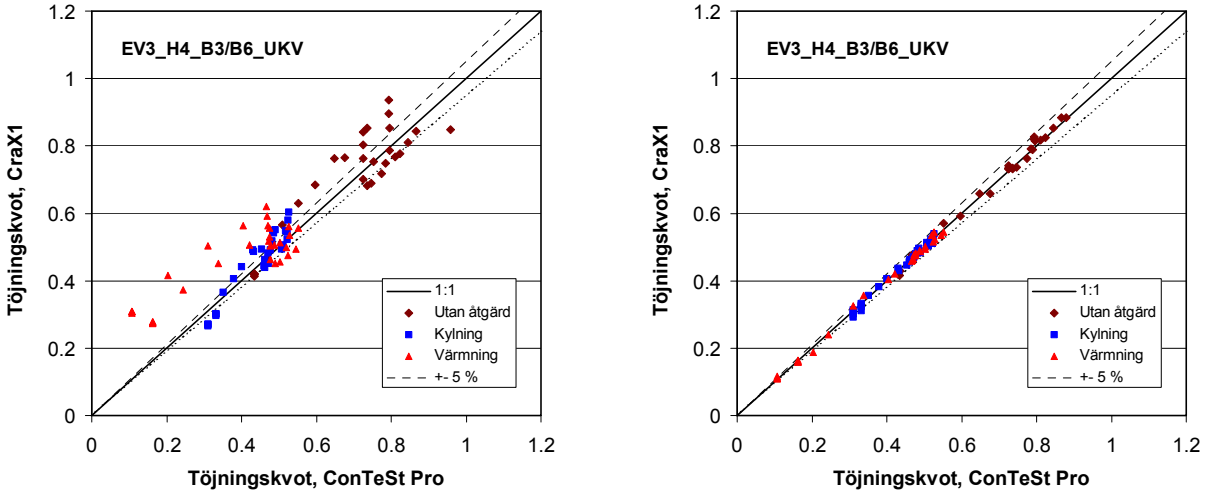


Figur 8.2

Regressionsanalys för läget av dimensionerande punkt för beräkningen benämnd EV2_A2_E8_U_H4 (U = utan åtgärder, H4 = vägghöjd 4 m). Den streckade linjen är samma som den heldragna i figur 8.1. Delresultaten H4_1 – H4_3 gäller för lufttemperaturerna 0, 10 respektive 20 °C.

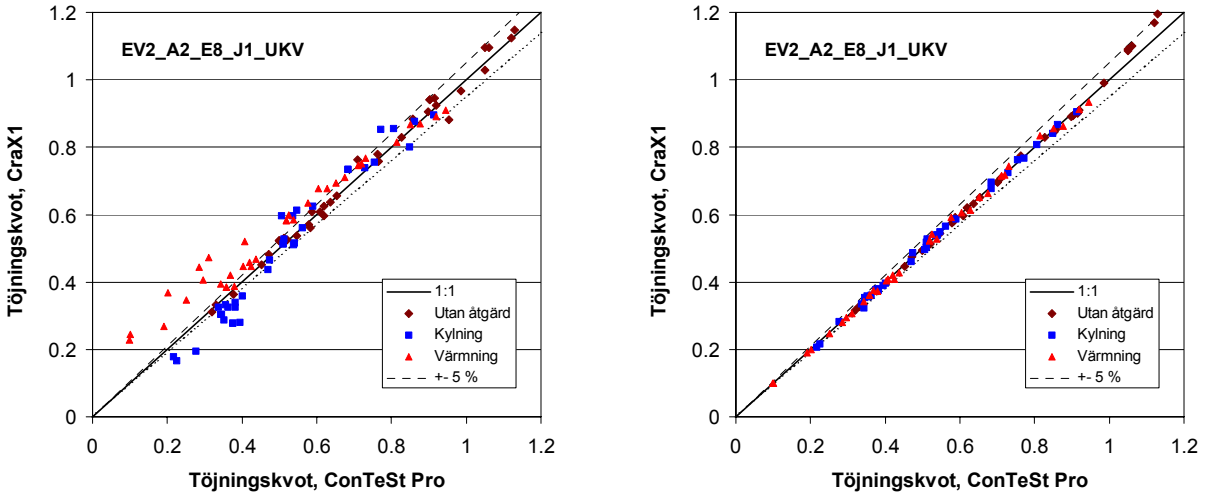
Metodiken att ta fram en kurvform för omfattande beräkningar vad gäller fri gjutlängd samt bibehålla kurvformen för närliggande resultat har genomförts för samtliga fall enligt tabell 8.1. Därefter har de erhållna resultaten kopplats samman med hjälp av strukturmekaniska parametrar såsom variation i tröghetsmoment och tvärsnittsareor.

För de beräkningsfall som redovisas i figurerna 8.1 och 8.2 visas resultatjämförelser för beräknade töjningskvoter dels för konstant läge av dimensionerande punkt ($y_d/B_v = 1$) dels för läget bestämt enligt tekniken med variabelt läge, se figur 8.3 respektive figur 8.4.



a) Konstant dimensionerande punkt b) Variabel dimensionerande punk

Figur 8.3 Jämförelser mellan beräknade töjningskvoter för fallet benämnt EV3_H4_B3/B6_UKV för olika sätt att beakta dimensionerande punkt i väggen.



a) Konstant dimensionerande punkt b) Variabel dimensionerande punkt

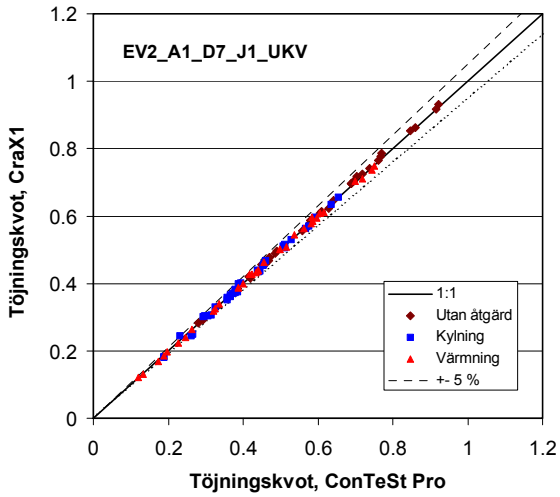
Figur 8.4 Jämförelser mellan beräknade töjningskvoter för fallet benämnt EV2_A2_E8_J1_UKV för olika sätt att beakta dimensionerande punkt i väggen.

För samtliga regressionspunkter redovisas resulterande töjningskvoter i figurerna 8.5 – 8.7.

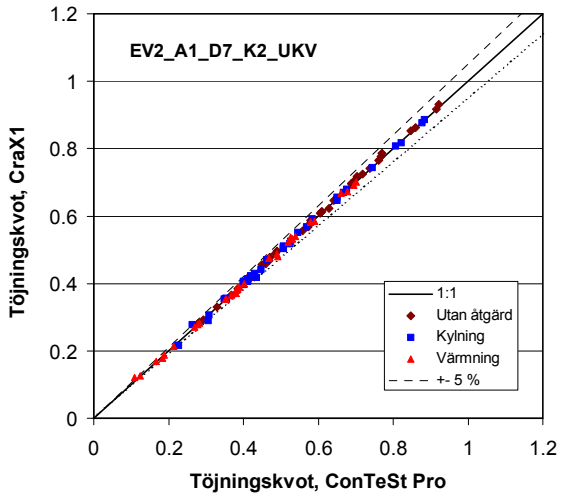
Tabell 8.1 Sammanställning av parametrar för beräkningar i CraX1 och ConTeSt Pro 1.4.

Beteckning	**Gjut-tem peratur, °C**	**Luft-temp., °C**	**Motgjut-nings-temp., °C**	**Vägg-bredd, m**	**Vägg-höjd, m**	**Platt-bredd, m**	**Platt-höjd, m**	**Kyl-temp., °C**	**Förvärm-nings-tid, d**	**Fri gjut-längd[1], m**
EV2_A1_D7_J1_UKV	10	0,10,20	$=T_{luft}$	0.4	2, 4, 6	4	0.4	5	2	A
EV2_A1_D7_K2_UKV	10	0,10,20	$=T_{luft}$	0.4	2, 4, 6	4	0.4	12	5	A
EV2_A1_E8_J1_UKV	10	0,10,20	$=T_{luft}$	1	2, 4, 6	4	0.8	5	2	A
EV2_A1_E8_K2_UKV	10	0,10,20	$=T_{luft}$	1	2, 4, 6	4	0.8	12	5	A
EV2_A1_F9_J1_UKV	10	0,10,20	$=T_{luft}$	1.8	2, 4, 6	4	1.4	5	2	A
EV2_A1_F9_K2_UKV	10	0,10,20	$=T_{luft}$	1.8	2, 4, 6	4	1.4	12	5	A
EV2_A2_D7_J1_UKV	15	0,10,20	$=T_{luft}$	0.4	2, 4, 6	4	0.4	5	2	A
EV2_A2_D7_K2_UKV	15	0,10,20	$=T_{luft}$	0.4	2, 4, 6	4	0.4	12	5	A
EV2_A2_E8_J1_UKV	15	0,10,20	$=T_{luft}$	1	2, 4, 6	4	0.8	5	2	A
EV2_A2_E8_K2_UKV	15	0,10,20	$=T_{luft}$	1	2, 4, 6	4	0.8	12	5	A
EV2_A2_F9_J1_UKV	15	0,10,20	$=T_{luft}$	1.8	2, 4, 6	4	1.4	5	2	A
EV2_A2_F9_K2_UKV	15	0,10,20	$=T_{luft}$	1.8	2, 4, 6	4	1.4	12	5	A
EV2_A3_D7_J1_UKV	20	0,10,20	$=T_{luft}$	0.4	2, 4, 6	4	0.4	5	2	A
EV2_A3_D7_K2_UKV	20	0,10,20	$=T_{luft}$	0.4	2, 4, 6	4	0.4	12	5	A
EV2_A3_E8_J1_UKV	20	0,10,20	$=T_{luft}$	1	2, 4, 6	4	0.8	5	2	A
EV2_A3_E8_K2_UKV	20	0,10,20	$=T_{luft}$	1	2, 4, 6	4	0.8	12	5	A
EV2_A3_F9_J1_UKV	20	0,10,20	$=T_{luft}$	1.8	2, 4, 6	4	1.4	5	2	A
EV2_A3_F9_K2_UKV	20	0,10,20	$=T_{luft}$	1.8	2, 4, 6	4	1.4	12	5	A
EV3_H2_B3/B6_UKV	15	10	$=T_{luft}$	1.2	2	3, 6	1	12	5	B
EV3_H4_B3/B6_UKV	15	10	$=T_{luft}$	1.2	4	3, 6	1	12	5	B
EV3_H6_B3/B6_UKV	15	10	$=T_{luft}$	1.2	6	3, 6	1	12	5	B
EV4_H4_Tgjut_UKV	10, 20	10	$=T_{luft}$	1.2	4	6	1	12	5	B
EV4_H4_Tluft_UKV	15	5, 10	0	1.2	4	6	1	12	5	B
EV4_H4_Tmot_UKV	15	0	5, 10	1.2	4	6	1	12	5	B
EV5_V4_V6_UKV	15	10	$=T_{luft}$	0.4, 0.6	4	6	1	12	5	B
EV5_V8_10_UKV	15	10	$=T_{luft}$	0.8, 1.0	4	6	1	12	5	B
EV5_V14_V18_UKV	15	10	$=T_{luft}$	1.4, 1.8	4	6	1	12	5	B

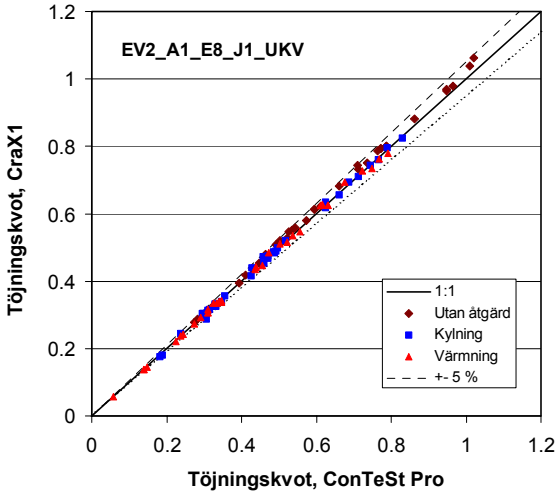
1) A = fri gjutlängd = 3, 10, 20 och 30 m (4 st)
B = fri gjutlängd = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 14, 16, 18, 20 och 30 m (16 st)



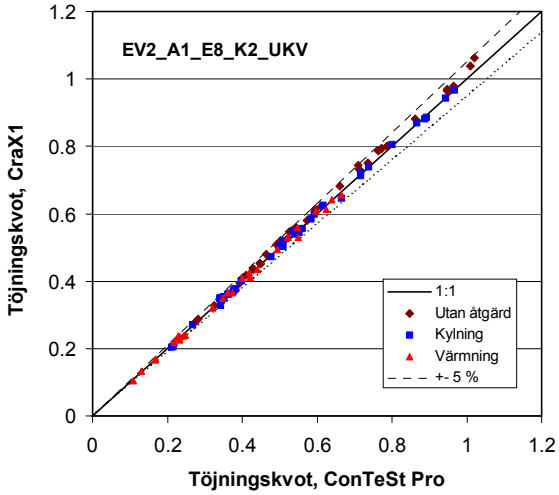
a)



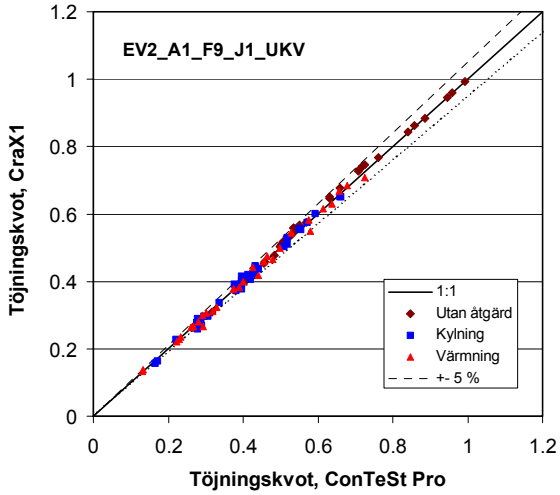
b)



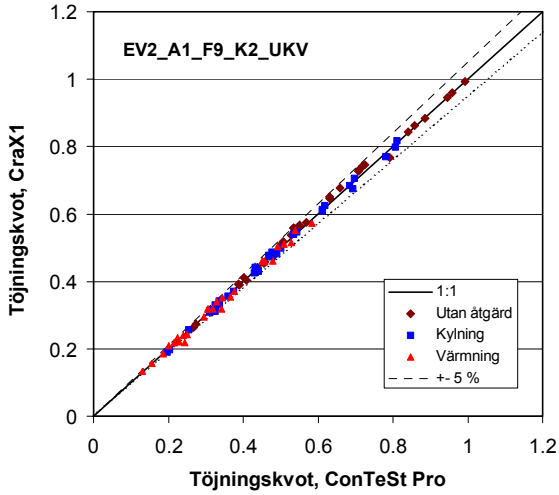
c)



d)

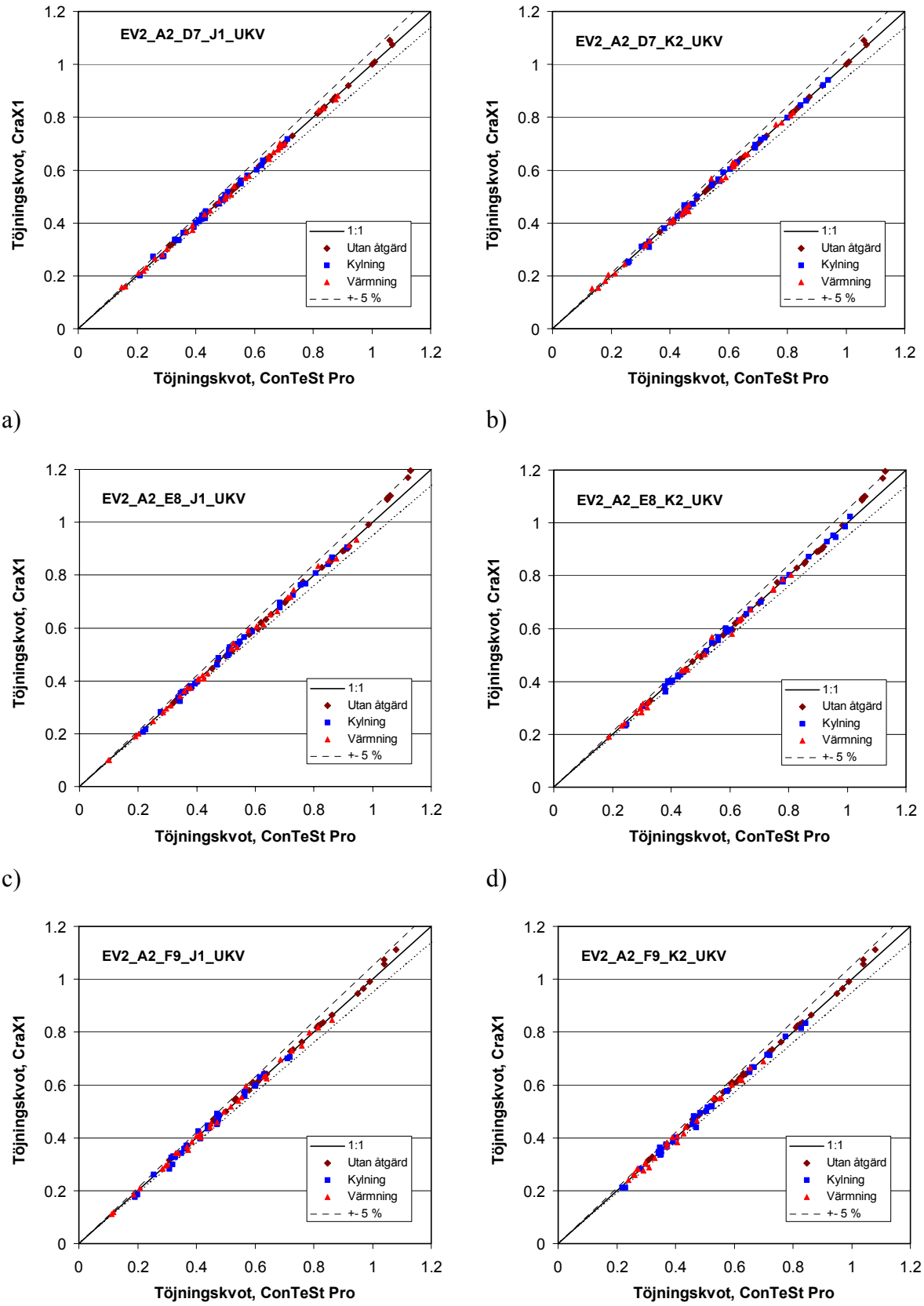


e)

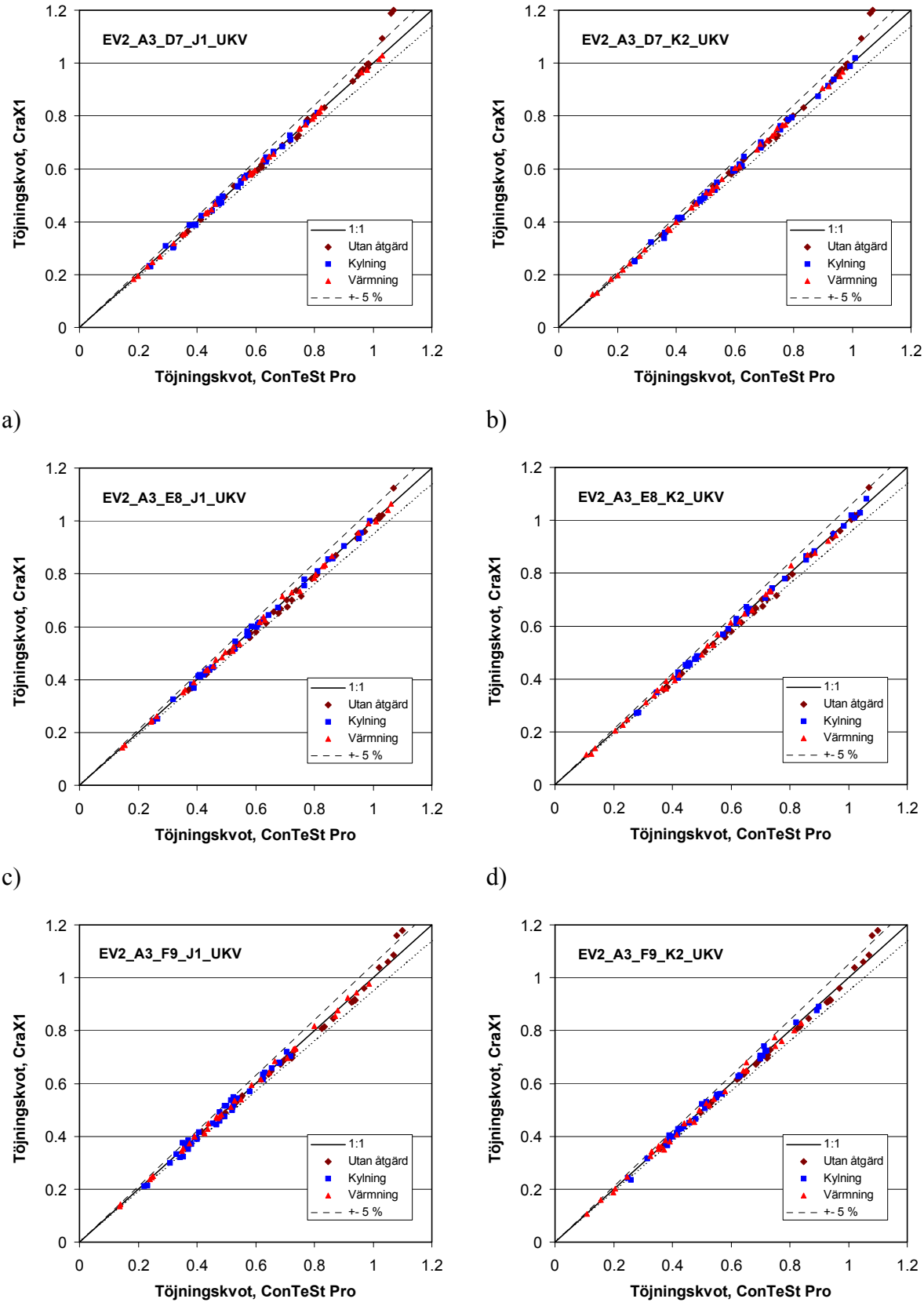


f)

Figur 8.5 Jämförelse mellan beräknade töjningskvoter enligt CraX1 – Handboksmetoden och ConTeSt Pro 1.4 för beräkningsomgång 2 (EV2) och gjuttemperaturen = 10 °C (A1).

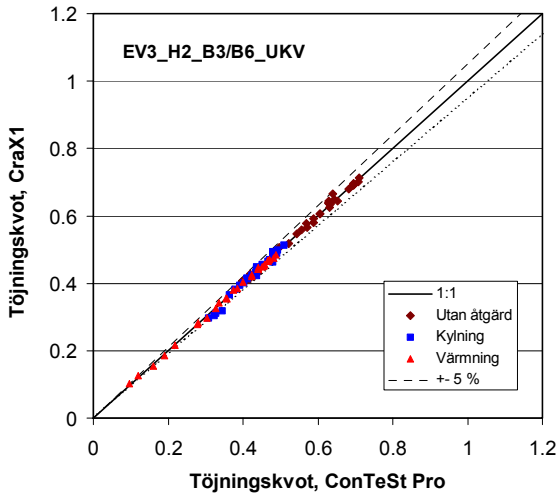


Figur 8.6 Jämförelse mellan beräknade töjningskvoter enligt CraX1 – Handboksmetoden och ConTeSt Pro 1.4 för beräkningsomgång 2 (EV2) och gjuttemperaturen = 15 °C (A2).

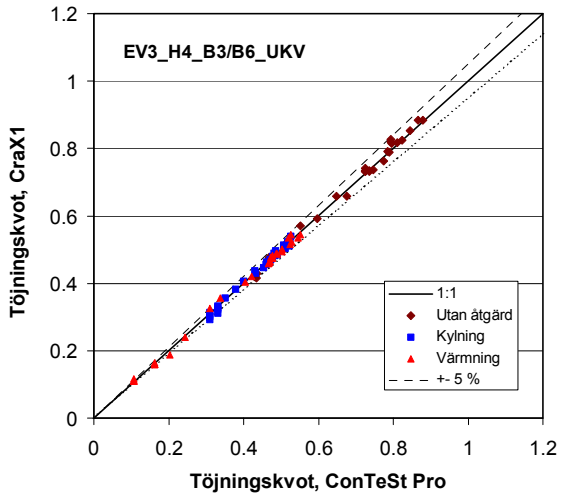


a) b) c) d) e) f)

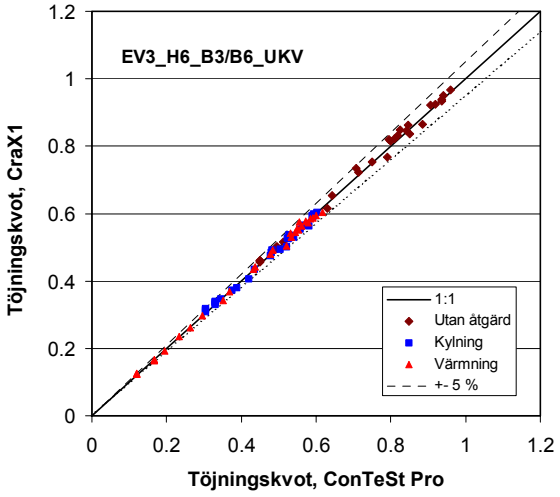
Figur 8.7 Jämförelse mellan beräknade töjningskvoter enligt CraX1 – Handboksmetoden och ConTeSt Pro 1.4 för beräkningsomgång 2 (EV2) och gjuttemperaturen = 20 °C (A3).



a)

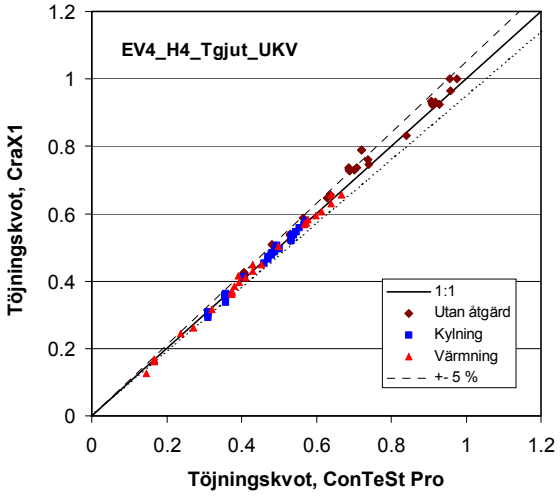


b)

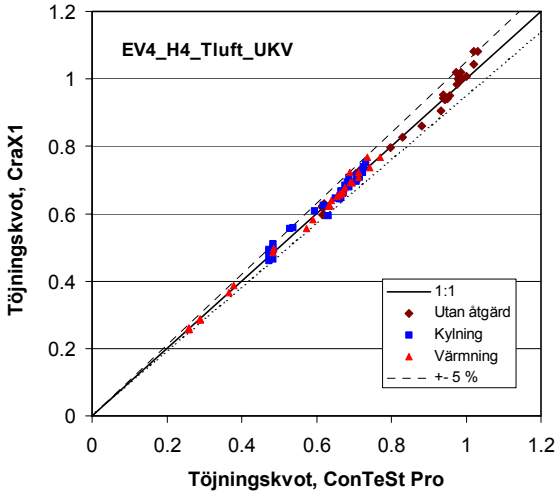


c)

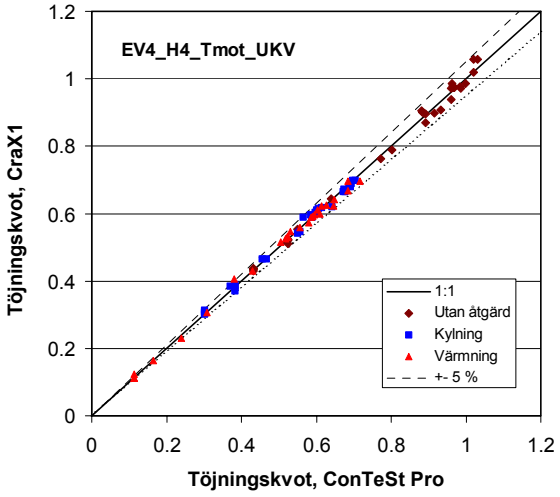
Figur 8.8 Jämförelse mellan beräknade töjningskvoter enligt CraX1 – Handboksmetoden och ConTeSt Pro 1.4 för beräkningsomgång 3 (EV3).



Figur 8.9: a)

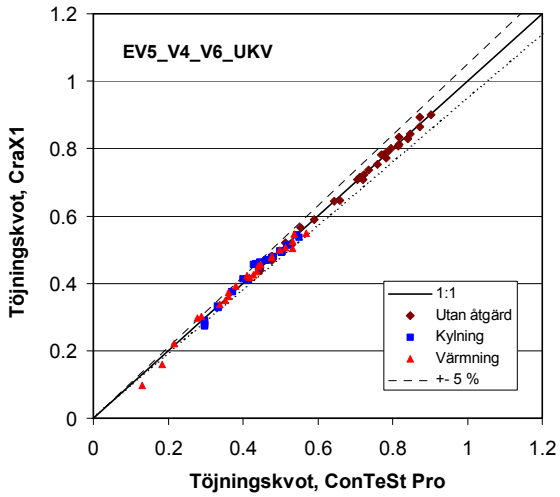


Figur 8.9: b)

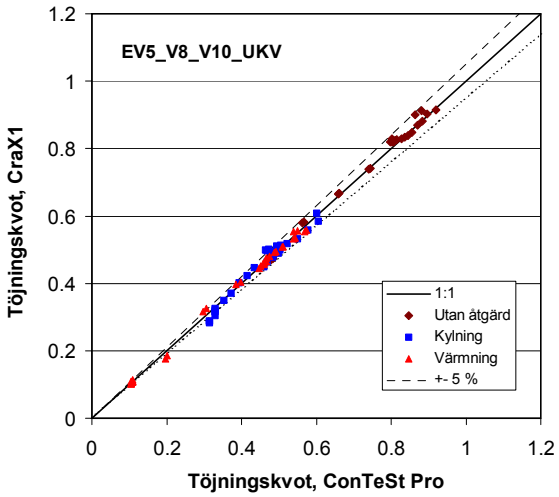


c)

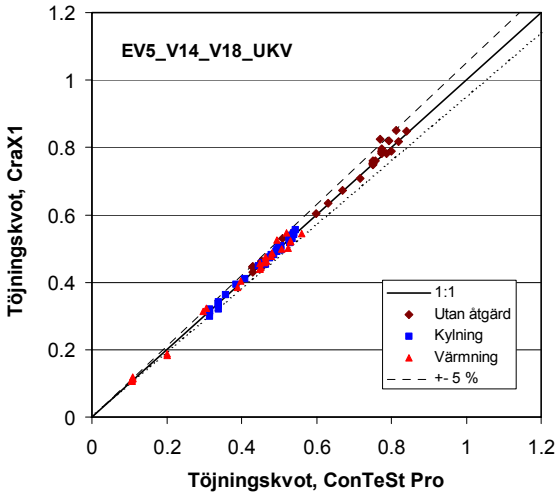
Figur 8.9 Jämförelse mellan beräknade töjningskvoter enligt CraX1 – Handboksmetoden och ConTeSt Pro 1.4 för beräkningsomgång 4 (EV4).



a)



b)



c)

Figur 8.10 Jämförelse mellan beräknade töjnings-kvoter enligt CraX1 – Handboksmetoden och ConTeSt Pro 1.4 för beräknings-omgång 5 (EV5).

REFERENSER

Bernander S (1973): Kylning av hårdnande betong med kylslingor. Nordisk Betong nr 2, Stockholm.

Bernander S (1982): Temperature stresses in early age concrete due to hydration. Proceedings from the ”International Conference on Concrete at Early Ages”, Paris 6 – 8 1982, Vol II, pp 218-221.

Bernander S (1993): Balk på elastiskt underlag åverkad av ändmoment M_1. Congeo AB, Göteborg.

Bernander S and Emborg M (1994): Risk of cracking in massive concrete structures – new developments and experiences. Proceedings of the International RILEM Symposium ”Thermal Cracking in Concrete at Early Ages”, October 10-12, Munich, pp 385-392.

Betongföreningen (2002): Självkompakterande betong –rekommendationer för användning. Svenska Betongföreningens rapportserie, rapport nr 10, utarbetad av Svenska Betongföreningens kommittéför självkompakterande betong. Arbetshandling version 020215.

ConTeSt Pro (1999): Användarhandbok –ConTeSt Pro. Utvecklat av JEJMS Concrete AB i samarbete med Luleå tekniska universitet, Cementa AB och Peab Öst AB. Cementa AB, Danderyd, 207 sid.

Ekerfors K (1995): Mognadsutveckling i ung betong. Temperaturkänslighet, hållfasthet och värmeutveckling. Luleå tekniska universitet, avdelningen för konstruktionsteknik, Licentiate thesis 1995:34L, 136 pp.

Emborg M (1989): Thermal stresses in concrete at early ages. Luleå University of Technology, Division of Structural Engineering, Doctoral Thesis 1989:73D, 285 pp.

Emborg M and Bernander S (1994a): Thermal stresses computed by a methos for manual calculations. Proceedings of the International RILEM Symposium ”Thermal Cracking in Concrete at Early Ages”, October 10-12, Munich, pp 321-328.

Emborg M and Bernander S (1994b): Avoidance of early thermal cracking in concrete structures – predesign, measures, follow up. Proceedings of the International RILEM Symposium ”Thermal Cracking in Concrete at Early Ages”, October 10-12, Munich, pp 409-416.

Emborg M, Bernander S, Ekerfors K, Groth P och Hedlund H (1997): Temperatursprickor i betongkonstruktioner – Beräkningsmetoder för hydratationsspänningar och diagram för några vanliga typfall, del A, B och C. Luleå tekniska universitet, avdelningen för konstruktionsteknik, teknisk rapport 1997:02, 100 sid.

Groth P (1996): Cracking in concrete – Crack prevention with air-cooling and crack distribution with steel fibre reinforcement. Luleå University of Technology, Division of Structural Engineering, Licentiate Thesis 1996:37L, 126 pp.

Groth P (2000): Fibre reinforced concrete. – Fracture mechanics methods applied on self-compacting concrete and energetically modified binders. Luleå University of Technology, Division of Structural Engineering, Doctoral Thesis 2000:04D, 214 pp.

Gustavsson M (1999): Utprovning av försöksmetod för skjuvtester av gjutfogar i betong och en studie av temperaturspänningar i betong. Luleå tekniska universitet, avdelningen för konstruktionsteknik, examensarbete 1999:218 CIV, 68 sid.

Hedlund H, Groth P and Jonasson J-E (1994): Reduction of thermal stresses in structures with air-cooling. Proceedings of the International RILEM Symposium ”Thermal Cracking in Concrete at Early Ages”, October 10-12, Munich, pp 433-440.

Hedlund H (1996): Stresses in high performance concrete due to temperature and moisture variations at early ages. Luleå University of Technology, Division of Structural Engineering, Licentiate Thesis 1996:38L, 240 pp.

Hedlund H (2000) : Hardening Concrete - Measurements and evaluation of non-elastic deformation and associated restraint stresses. Division of Structural Engineering, Luleå University of Technology, Doctoral Thesis 2000:25, Luleå 2000.

Hett2DL+TempStre (1997): Användarhandbok – Hett2DL+TempStre. Utvecklat av JEJMS Concrete AB i samarbete med Luleå tekniska universitet och Emborg Konsult AB. Luleå.

Johansson J och Simonsson P (2000): Självkompakterande betong – Utveckling och uppföljning av tunnellining i Stäket. Luleå tekniska universitet, avdelningen för konstruktionsteknik, examensarbete 2000:180 CIV, 68 sid.

Jonasson J-E (1994): Modelling of temperature, moisture and stresses in young concrete. Luleå University of Technology, Division of Structural Engineering, Doctoral Thesis 1994:153D, 226 pp.

Jonasson J-E. Groth P and Hedlund H (1994): Modelling of temperature and moisture field in concrete to study early age movements as a basis for stress analysis. Proceedings of the International RILEM Symposium ”Thermal Cracking in Concrete at Early Ages”, October 10-12, Munich, pp 45-52.

Jonasson J-E, Wallin K, Emborg M, Gram A, Saleh I, Nilsson M, Larson M och Hedlund H (2001a): Temperatursprickor I betongkonstruktioner – handbok med diagram för sprickriskbedömning för några vanliga typfall. Teknisk rapport 2001:14, avdelningen för konstruktionsteknik, Luleå tekniska universitet (under slutredigering april 2002).

Jonasson J-E, Wallin K, Emborg M, Gram A, Saleh I, Nilsson M, Larson M och Hedlund H (2001b): Handbok med sprickrisk – bedömning inklusive åtgärder för betongkonstruktioner. Artikel i Bygg&teknik, nr 7, oktober 2001, sid 16-20.

Larson M (2000): Estimation of crack risk in early age concrete – Simplified methods for practical use. Luleå University of Technology, Division of Structural Engineering, Licentiate Thesis 2000:10, 171 pp.

Larson M (2003): Thermal crack estimation in early age concrete – Models and methods for practical use. Luleå University of Technology, Division of Structural Engineering, Doctoral Thesis 2003:20.

Löfquist G (1946): Temperature effects of in hardening concrete (in Swedish). Dissertation, Kungliga Vattafallsstyrelsen, Tekn. Report No. 22, Stockholm, 195 pp.

Nilsson M (2000): Thermal cracking of young concrete – Partial coefficients, restraint effects and influence of casting joints. Luleå University of Technology, Division of Structural Engineering, Licentiate Thesis 2000:27, 267 pp.

Nilsson M (2003): Restraint factors and partial coefficients for crack risk analyses of early age concrete structures. Luleå University of Technology, Division of Structural Engineering, Doctoral Thesis 2003:19.

Wallin K, Emborg M och Jonasson J-E (1997): Värme – ett alternativ till kyla. Luleå tekniska universitet, avdelningen för konstruktionsteknik, Teknisk rapport 1997:15, 168 sid.

Westman G (1994): Basic creep and relaxation of young concrete. Proceedings of the International RILEM Symposium ”Thermal Cracking in Concrete at Early Ages”, October 10-12, Munich, pp 87-94.

Westman G (1995): Thermal cracking in high performance concrete – Viscoelastic models and laboratory tests. Luleå University of Technology, Division of Structural Engineering, Licentiate Thesis 1995:27L, 123 pp.

Westman G (1999): Concrete creep and thermal stresses – New creep models and their effects on stress developments. Luleå University of Technology, Division of Structural Engineering, Doctoral Thesis 1999:10, 301 pp.