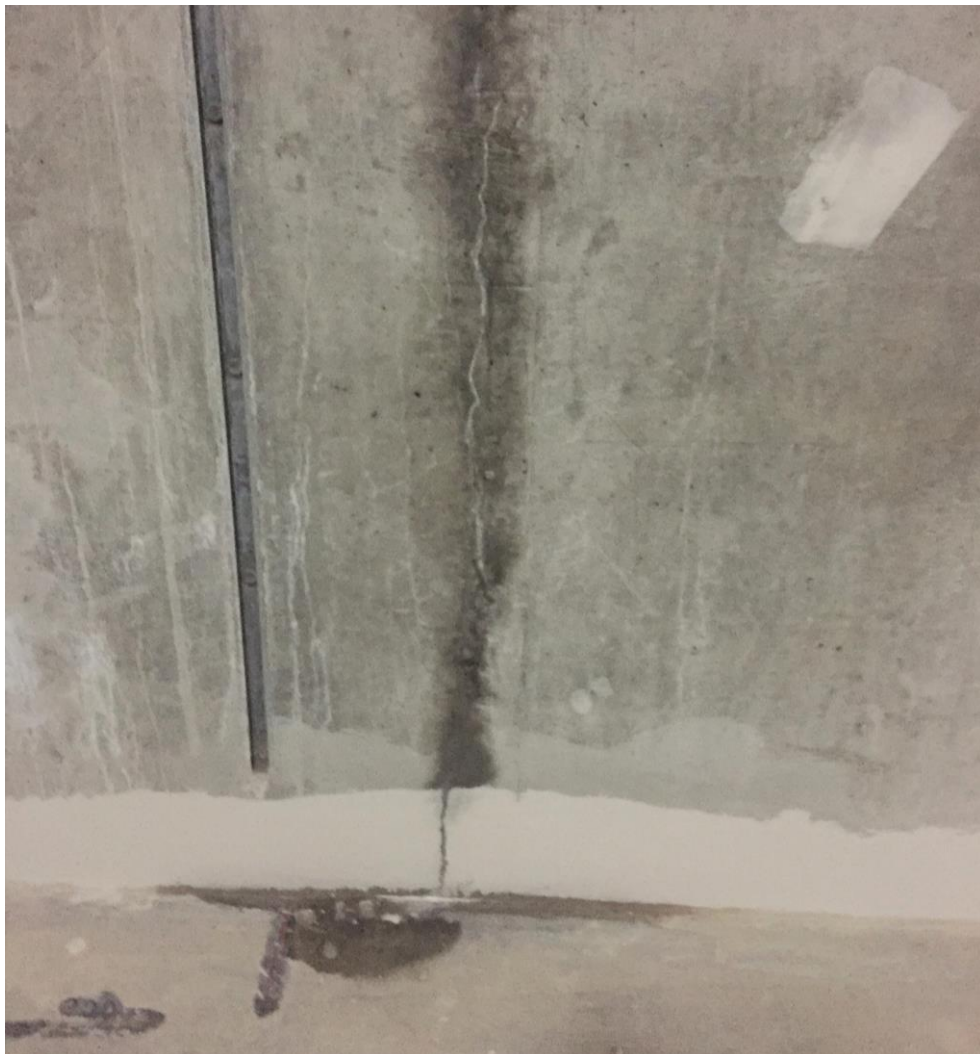


UNDVIK VATTENLÄCKAGE I BETONGKONSTRUKTIONER GENOM TEMPERATUR- OCH HÄRDNINGSTYRNING



Henrik Wiberg och Hans Hedlund, Skanska Sverige AB
2019-05-15

Förord

Projekt 12524 ”Spruckna konstruktioner är sällan vattentäta konstruktioner” har genomförts av Skanska Sverige AB med stöd av referensgruppen och finansiärer som följer.

Referens – och styrgrupp:

Mats Emborg, Betongindustri och LTU
Hans Hedlund, Skanska Sverige AB (tillika projektledare)
Johan Karlsson, NCC Teknik
Christer Ljungkrantz, Cementa
Kjell Wallin, Projektengagemang

Ett speciellt och stort tack vill vi rikta till SBUF - Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond, för deras stöd, tålamod och finansiering. Utan deras bidrag hade det inte varit möjligt att genomföra och slutföra detta projekt.

Utöver SBUF vill vi i projektgruppen även tacka övriga finansiärer enligt nedan som medverkat till att genomföra detta projekt.

Cementa AB
Betongindustri AB
LTU
NCC Construction Sverige AB / Teknik
Peab
Projektengagemang
SBUF
Skanska Sverige AB / Teknik

Göteborg, 15:e maj 2019

Henrik Wiberg och Hans Hedlund
Skanska Sverige AB

Sammanfattning

Garage- och källarkonstruktioner är ofta utsatta för ensidigt vattentryck då de befinner sig under markytan. Konstruktioner som är utsatta för en fastlåsning från andra anslutande konstruktionsdelar (yttre tvång) har en tendens att generera temperaturrelaterade sprickor, vilka kan medföra vattenläckage. Med rätt åtgärder kan dock risken för dessa sprickor begränsas. Tidigare har det saknats relevanta materialparametrar för andra cement än Anläggningscement. Av denna så har det varit svårt att utföra en tillförlitlig analys av behovet av temperatursprickåtgärder för andra cementtyper än Anläggningscement

Med ovan nämnda förutsättningar kan entreprenören rådas/tvingas att välja en dyrare betong tillsammans med kostnader för härdningsstyrande åtgärder som exempelvis kylning. Med materialparametrar för billigare cement än Anläggningscement kan därför den totala kostnaden för temperatursprickåtgärder och betong jämföras med den totala kostnaden vid gjutning med betong innehållande Anläggningscement. Entreprenören kan alltså väga kostnaden för de två alternativen mot varandra.

Då branschen genom detta projekt fått tillgång till materialparametrar för betong innehållande Bascement kan entreprenören välja cementtyp och möjliga åtgärder vid härdningsstyrning av betongen. Entreprenören kan därmed undvika ökade kostnader för betong innehållande Anläggningscement, anpassa sina gjutningar och skraddarsy erforderlig härdning och även ge kunden en konstruktion av hög kvalitet.

I detta projekt har temperatursprickanalyser för konventionell betong och självkompakterande betong innehållande Bascement utförts och jämförts med existerande materialdata för betong innehållande Anläggningscement.

Utförda analyser visar att betong innehållande Bascement jämfört med betong innehållande Anläggningscement ger generellt högre spänningkvot vid lika förutsättningar. Åtgärder för att begränsa risken för temperatursprickor blir därmed också mer omfattande för betong innehållande Bascement.

Härdningstiderna är generellt kortare vid gjutning med betong innehållande Bascement än med betong innehållande Anläggningscement vid lika förutsättningar. Behovet av vinteråtgärder är också mindre än vid gjutning med betong innehållande Anläggningscement eftersom värmeutvecklingen i betong med Bascement är högre vid lika hållfasthetsklass.

Betong innehållande Bascement medför, på grund av bl.a. den högre värmeutvecklingen, ett större behov av temperatursprickåtgärder jämfört med betong innehållande Anläggningscement. Den ökade kostnaden pga. det större kylbehovet, vid gjutning med betong innehållande Bascement, bedöms att i många fall tas ut av den lägre kostnaden för betong med Bascement. Det bör således i många fall finnas ekonomi i att välja en betong med Bascement istället för en betong med Anläggningscement, där regelverket för den aktuella konstruktionen så tillåter.

INNEHÅLL

1	INLEDNING	4
1.1	BAKGRUND	4
1.2	SYFTE	5
1.3	METODIK	5
2	MATERIALPROVNING	6
3	TVÅNGS- OCH TEMPERATURSPRICKANALYSER	7
3.1	STUDERADE TYPFALL	7
3.2	BETONG	7
3.2.1	<i>Betong innehållande Bascement</i>	7
3.2.2	<i>Betong innehållande Anläggningscement</i>	7
3.3	TVÅNGS- OCH TEMPERATURSPRICKANALYSER	8
4	JÄMFÖRANDE ANALYSER: BAS- / ANLÄGGNINGSCEMENT	9
4.1	TYPFALL 1: VÄGGKONSTRUKTION GJUTEN PÅ PLATTA	9
4.1.1	<i>Förutsättningar</i>	10
4.1.2	<i>Tvångsanalyser</i>	11
4.1.3	<i>Jämförelse av betong med Bascement och Anläggningscement</i>	13
4.1.3.1	Spänningskvot	13
4.1.3.2	Temperatursprickåtgärder - Kylbehov	14
4.1.3.3	Härddningstid	18
4.1.4	<i>Kostnadsuppskattning av temperatursprickåtgärder</i>	19
4.2	TYPFALL 2: BOTTENPLATTA PÅ MARK	21
4.2.1	<i>Förutsättningar</i>	21
4.2.2	<i>Temperaturanalyser</i>	22
4.2.3	<i>Härddningstider för Bascement</i>	22
4.2.4	<i>Jämförande analys – Härddningstid</i>	24
5	SLUTSATS	25

BILAGOR

- A Materialdata för beräkning av temperatur, hållfasthet och spänningar för betonger med BAS-cement**
- B Beräknad spänningskvot vid olika tvång för betong innehållande Bascement resp. Anläggningscement**
- C Beräknat kylbehov vid olika max tillåtna spänningskvoter för betong innehållande Bascement resp. Anläggningscement**

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Många betongkonstruktioner befinner sig under markytan eller med en bakomliggande fyllning. Exempel på sådana konstruktioner är garage- och källarkonstruktioner. Dessa konstruktioner är ofta utsatta för ensidigt vattentryck och har därmed en risk för vattenläckage vid sprickbildning. Konstruktioner som är utsatta för en fastlåsning från andra anslutande konstruktionsdelar (yttre tvång) är extra hårt utsatta då de har en tendens att generera temperaturrelaterade sprickor, vilka kan medföra vattenläckage. Med rätt åtgärder i ett tidigt skede kan dock risken för dessa sprickor begränsas.

Beroende på exponeringsklass ställs differentierad säkerhet för begränsning av temperaturrelaterad sprickbildning beroende på risken för olika typer av skademekanismer i armerad betong. Tidigare återfanns dessa säkerhetsfaktorer i de gamla bronormerna, men återfinns numer i AMA Anläggning (EBE.111). Sprickbildning är synnerligen allvarligt då detta ofta leder till vattenläckage och korrosionsproblem.

Säkerhetsfaktorerna i AMA Anläggning är ursprungligen framtagna för anläggningskonstruktioner men kan även appliceras på konstruktionsdelar vid bostadsbyggande eller i konstruktioner där annat cement än Anläggningscement accepteras. Då detta projekt startade var entreprenören ofta tvungen att välja en dyrare betongprodukt med Anläggningscement eftersom betong med annat tillgängligt cement inte funnits provad i samma utsträckning och på sådant sätt att spänningsanalyser av den hårdnade betongen kan ske, dvs. sprickriskanalyser. Enligt den svenska standarden SS-EN 206:2013 och nationella tillägget SS 137003:2015 tillåts även andra – billigare – cementtyper att användas i de olika exponeringsklasserna. Denna möjlighet har dock tidigare saknats till följd av att materialparametrar saknats för att genomföra spänningsberäkningar. Betong med olika cementtyper har olika egenskaper som exempelvis långsamhårdnande cement respektive snabbhårdnande cement.

Materialprovning och parametrar för den unga betongens egenskapsutveckling har sedan länge funnits för anläggningsbetong i form av ”brobetong” eftersom Trafikverket (TRV) kräver att risken för temperatursprickor begränsas i konstruktionen för att ge god beständighet och klara avsedd teknisk livslängd.

Då det tidigare saknats relevanta materialparametrar för andra cement än Anläggningscement så har det varit svårt att utföra en tillförlitlig analys av behovet av åtgärder för att begränsa risken för temperatursprickor. Beräkningsexperiment för huskonstruktioner har genomförts där mekaniska egenskaper har tagits från anläggningsbetong med samma vatten-cement tal (vct). Detta har uteslutande visat på resultat som antyder att konstruktionen spricker varvid temperatur- och härdningsstyrande åtgärder sätts in. I andra projekt har gjutningar utförts med liknande förutsättningar utan åtgärder. Fram tills relativt nyligen har möjligheterna varit begränsande för entreprenörerna, som i många fall lagt ner kostnader för t.ex. kylning med ingjutna kylrör i kombination med en dyrare betong.

Utan härdningsstyrning medför fastlåsningen av exempelvis en vägg från en bottenplatta att gjutetappslängder överstigande ca 4 – 5 meter inte är möjligt utan att risk för sprickbildning under härdningsfasen uppstår. Genom att anpassa erforderliga

åtgärder kan entreprenören själv påverka och styra utförandet av sina gjutningar. Exempelvis kan kostnaden för kylning för en normal- till tungt armerad betongkonstruktion gjuten med anläggningsbetong ligga på ca 100 – 300 kr per kubikmeter betong. Med dåliga förutsättningar kan entreprenören rådas/tvingas att välja en dyrare anläggningsbetong samt kostnader för härdningsstyrande åtgärder som exempelvis kylning. Med materialparametrar för billigare cement än Anläggningscement kan därför den totala kostnaden för temperatursprickåtgärder och betong minskas.

Genom att tillgängliggöra data - för andra cement än Anläggningscement - för beräkningsprogram som t.ex. Hett och ConTeSt Pro eller liknande program kan korrekta beräkningar och rekommendationer för härdningsstyrande åtgärder tas fram. På detta sätt ökas potentialen för täta och beständiga betongkonstruktioner med billigare cement som finns tillgängliga på den svenska marknaden.

1.2 Syfte

Genom att branschen nu fått tillgång till materialparametrar för Bascement kan entreprenören välja cementtyp och möjliga åtgärder vid härdningsstyrning av betongen. Entreprenören kan därmed undvika ökade kostnader för betong innehållande Anläggningscement, anpassa sina gjutningar och skräddarsy erforderlig härdning och även ge kunden en hög kvalitet på sin konstruktion.

Inför detta projekt fanns ingen materialdata tillgänglig för spänningsberäkningar av en hårdnande betong innehållande Bascement. Viss äldre provning av värme- och hållfasthets-utveckling fanns för betongrecept med Byggcement. Projektets syfte var att ta fram generella materialparametrar som byggbranschen kan använda vid temperatur- och sprickanalyser av betong med Bascement.

För att ge en bild av hur valet av Bascement jämfört med Anläggningscement påverkar temperatursprickåtgärderna har ett par typfall studerats. Ett vanligt typfall som studerats i projektet är en platta-vägg konstruktion (stödmur, källarvägg eller likande mot tidigare gjuten bottenplatta). För detta typfall utförs temperatursprickanalyser för att bedöma skillnader i temperatursprickåtgärder för betong med Anläggningscement resp. Bascement. Utöver nämnda typfall så utförs även jämförande analyser för typfallet bottenplatta på mark med syfte att studera skillnader i behov av härdningstid för att uppfylla en viss härdningsklass.

1.3 Metodik

Projektet har utförts i tre steg som följer nedan;

- Materialprovning (Bascement)
- Tvångs- och sprickriskanalyser
- Jämförande beräkningar (Bas- och Anläggningscement)

Ovanstående tre steg redovisas i kapitel 2-4 som följer.

2 Materialprovning

Materialprovningen för bestämning av materialparametrar för Bascementet har utförts vid Luleå Tekniska Universitet (LTU) och redovisas i sin helhet i Bilaga A ”Materialdata för beräkning av temperatur, hållfasthet och spänningar för betonger med BAS-cement”. Genom att provning har skett i en matris ges möjlighet till utvidgning av betongrecepten till flera generella betongmixer. Framtagna materialparametrar för respektive provat betongrecept har använts vid temperatursprickanalyser i detta projekt.

Varje betong med en viss sammansättning har provats och analyserats inom fem områden som följer nedan:

- Temperaturkänslighet och hållfasthetsutveckling
- Hydratationsvärme
- Krypning
- Frirörelser
- Spänning vid fullständigt tvång

I projektet har sex betongrecept provats vilka framgår av Tabell 1 och Tabell 2 nedan. Det är tre konventionella betonger och tre självkompakterande betonger. Recepten är framtagna av Betongindustri AB, Stockholm. Flyttillsatsmedlet är Sikament 5650 från Svenska Sika AB. I LTU:s rapport betecknas recepten som BAS 1, BAS 2, ..., BAS 6.

Delmaterial	BAS 1 vct = 0,38	BAS 2 vct = 0,55	BAS 3 vct = 0,70
BAS-cement, kg/m ³	470	360	285
Grus, 0/8, kg/m ³	975	1067	1153
Sten, 8/16, kg/m ³	790	733	697
Vatten, effektivt, kg/m ³	179	198	200
Vatten, totalt, kg/m ³	186	205	208
Luftvolym, %	0,5	1,0	1,5

Tabell 1: Sammansättning för tre traditionella betonger (BAS 1-BAS 3), konsistensklass S4.

Delmaterial	BAS 4 vct = 0,38	BAS 5 vct = 0,55	BAS 6 vct = 0,60
BAS-cement, kg/m ³	480	370	320
Kalkstensfiller Limus 40, kg/m ³	60	120	140
Grus, 0/8, kg/m ³	1045	1058	1112
Sten, 8/16, kg/m ³	633	588	592
Vatten, effektivt, kg/m ³	182	204	192
Vatten, totalt, kg/m ³	188	210	198
Luftvolym, %	1,0	1,5	1,5

Tabell 2: Sammansättning för tre självkompakterande betonger (BAS 4-BAS 6), konsistensklass SF2.

3 Tvångs- och temperatursprickanalyser

Tvångs- och temperatursprickrisikanalyser har utförts för två typfall i syfte att studera hur valet av betong innehållande Bascement påverkar behovet av temperatursprickåtgärder. De två typfallen redovisas nedan i avsnitt 3.1.

3.1 Studerade typfall

I projektet har två typfall studerats, enligt nedan, för att bedöma skillnader mellan konventionell betong och självkompakterande betong innehållande Anläggningscement resp. Bascement.

Typfall 1: Platta-vägg konstruktioner (vägg gjuten på bottenplatta)

För detta typfall studeras:

- Spänningskvotens variation med avseende på motgjutningslängd (fastlåsning)
- Behov av kylning med avseende på motgjutningslängd (fastlåsning)
- Härdningstid för vägg utan kylning

Typfall 2: Bottenplatta på mark

För detta typfall studeras skillnader i härdningstid för att uppfylla en viss härdningsklass.

De ovanstående två typfallen med resultat redovisas i kapitel 4.

3.2 Betong

De två typfallen ovan studeras genom jämförande analyser mellan konventionell betong och självkompakterande betong innehållande Bascement resp. Anläggningscement. Jämförelsen utförs för hållfasthetsklasserna C25/30, C30/37 och C40/50.

Val av materialparametrar framgår nedan.

3.2.1 Betong innehållande Bascement

Vid analyser med betong innehållande Bascement har materialparametrar för betongrecepten BAS 1 – BAS 6 använts, se kapitel 2 (materialprovningen utförd av LTU).

3.2.2 Betong innehållande Anläggningscement

Analyser har även utförts för betong innehållande Anläggningscement för jämförelse med resultaten med betong innehållande Bascement.

Vid de flesta analyserna med betong innehållande Anläggningscement har betong med fullständigt provade materialparametrar använts. Dessa betongtyper är konventionell betong (C40/50) och självkompakterande betong (C40/50, C30/37 och C25/30)

I de fall fullständigt provad betong saknas har s.k. ”standardbetong” använts. Med ”standardbetong” avses de betongtyper som bifogas beräkningsprogrammet ConTeSt. Dessa betongtyper är konventionell betong (C30/37 och C25/30).

3.3 Tvångs- och temperatursprickanalyser

3.3.1 Tvångsanalys

Tvångsanalys utförs i de fall konstruktionen bedöms vara utsatt för ett icke försumbart yttre tvång. Relevanta fastlåsningsgrader (yttre tvång) för aktuell konstruktion bedöms genom 3D FEM beräkningar i beräkningsverktyget Lusas.

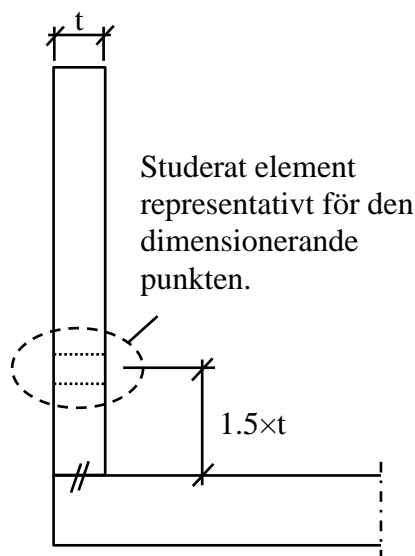
I tvångsanalysen utsätts nygjuten betongen för en fiktiv temperatursänkning med 10°C , som belastning, och tidigare gjutna konstruktionsdelar skapar då tvångsspänningar.

Av erfarenhet har den dimensionerande punkten i väggkonstruktionen antagits vara 1,5 konstruktionstjocklekar ovan bottenplattan, där försumbar avkylning sker mot bottenplattan och ett 1-dimensionellt värmefflöde genom nygjuten konstruktion är dominerande. Spänningarna som skulle uppkomma vid 100% tvång jämförs med skapade tvångsspänningar i den dimensionerande punkten och ger en bedömning av tvångssituationen för den aktuella konstruktionen.

3.3.2 Temperatursprickanalys

Baserat på beräknade dimensionerande tvångsfaktorer utförs därefter temperatur- och spänningsanalyser med hjälp av beräkningsverktyget ConTeSt R&D (ver. 5.1).

Spänningsanalyserna i detta projekt utförs för ett element representativt för den dimensionerande punkten i väggen enligt principskissen i Figur 1 nedan.



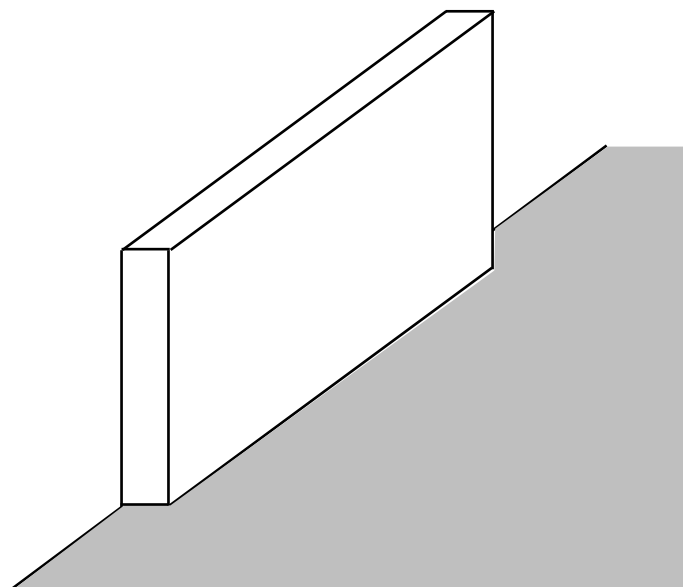
Figur 1: Principskiss för analyserat element representativt för den dimensionerande punkten i väggen. Vanligtvis 1-2 väggjocklekar ovanför bottenplattan.

I beräkningsverktyget ConTeSt väljs materialdata för den aktuella betongen. Vidare anges randvillkor som gäller för det studerade elementet, såsom formmaterial, lufttemperatur mm..

4 Jämförande analyser: Bas- / Anläggningscement

4.1 Typfall 1: Väggkonstruktion gjuten på platta

Ett vanligt förekommande fall i husbyggnadssammanhang är källarväggar gjutna på en bottenplatta enligt Figur 2 nedan.



Figur 2: Principskiss av vägg gjuten på bottenplatta

För att få en bild av hur temperatursprickrisken och temperatursprickåtgärderna påverkas av gjutning med betong innehållande Bascement har analyser utförts av väggar med olika motgjutningslängder, vilka framgår av avsnitt 4.1.1 (Tabell 3). Utöver analyser av betong innehållande Bascement utförs analyser med betong innehållande Anläggningscement som jämförelse.

Tvångsanalyser och temperatursprickanalyser utförs enligt den princip som redovisas i avsnitt 3.3. Analyserna sker genom att beräkna den s.k. spänningskvoten utifrån antagna förutsättningar och begränsningar angivna i avsnitt 4.1.1.

Jämförande analyser mellan konventionell betong resp. självkompakterande betong innehållande Anläggningscement resp. Bascement har utförts för tre hållfasthetsklasser enligt nedan;

- C25/30
- C30/37
- C40/50

För respektive kombination enligt ovan har förutom spänningskvot även kylbehovet och härdningstiden bedömts genom analyser. Kylbehovet beräknas för att uppfylla olika kravnivåer på maximalt tillåten spänningskvot enligt AMA Anläggning. Härdningstiden beräknas genom att beräkna tiden för att uppnå tillräcklig tryckhållfasthet motsvarande härdningsklass 2, 3 respektive 4. Kraven för resp. härdningsklass framgår av SS-EN 13670:2009 och SS 137006:2015.

4.1.1 Förutsättningar

För analyserna av typfall 1 antas nedanstående förutsättningar och begränsningar.

Vägg	Höjd 3m Väggängder (11st): 3, 4, 6, 8, 10, 12, 15, 18, 21, 25, 30m Tjocklek 0.4m Placerad längs kant på bottenplatta Endast motgjutet mot bottenplatta
Bottenplatta	Tjocklek 0.5m Grundlagd på packad fyllning (ej pålad)
Kylning	Beräkningsfall Kallt: januari Varmt: juli T _{kyl} (medel) +6 °C +20 °C Kyltid: 2 dygn Värmeövergångstal: 900 W/K·m ² (stålrör) Diameter: 28mm (stålrör)
Väderförhållanden	Medeltemperatur Stockholm Beräkningsfall Kallt: januari Varmt: juli T _{luft} -3 °C +18 °C T _{gjut} +12 °C +24 °C Vindhastighet: 5 m/s (medel)
Form	Formrivningstid: 4 dygn Formtyp: 2cm träform (oisolerad)
Betong	C25/30 Anl vct=0.55 c=360kg/m ³ C25/30 Anl SKB vct=0.55 c=325kg/m ³ C25/30 BAS vct=0.70 c=285kg/m ³ (BAS 3)* C25/30 BAS SKB vct=0.60 c=320kg/m ³ (BAS 6)* C30/37 Anl vct=0.50 c=390kg/m ³ C30/37 Anl SKB vct=0.50 c=355kg/m ³ C30/37 BAS vct=0.55 c=360kg/m ³ (BAS 2)* C30/37 BAS SKB vct=0.55 c=370kg/m ³ (BAS 5)* C40/50 Anl vct=0.38 c=435kg/m ³ C40/50 Anl SKB vct=0.39 c=385kg/m ³ C40/50 BAS vct=0.38 c=470kg/m ³ (BAS 1)* C40/50 BAS SKB vct=0.38 c=480kg/m ³ (BAS 4)*

Tabell 3: Sammansättning för tre traditionella betonger (BAS 1-BAS 3), konsistensklass S4.

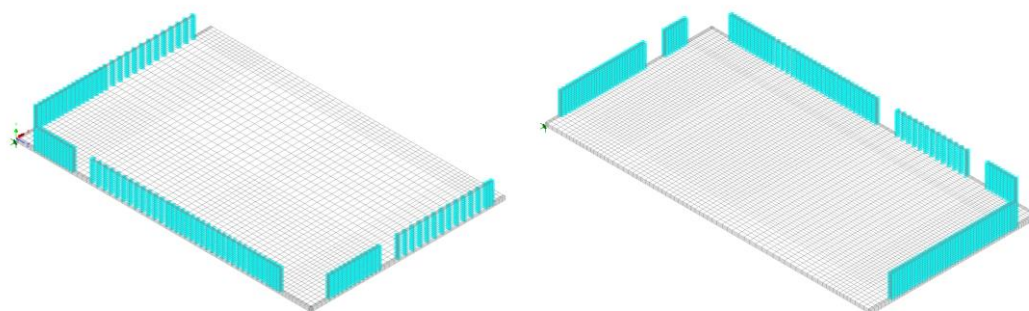
* BAS 1 – BAS 6 är receptbeteckningen i LTU:s rapport från materialprovningen, se Bilaga A.

4.1.2 Tvångsanalyser

Vid temperatursprickanalyser utförda i 1D eller 2D måste en uppskattning utföras av tvångssituationen orsakad av motgjutna konstruktionsdelar och vilken inverkan detta tvång har på den nygjutna betongkonstruktionen. För att bedöma en eventuell risk för temperaturrelaterad sprickbildning i nygjuten betong utförs därför en analys för att uppskatta tvångssituationen för aktuellt typfall.

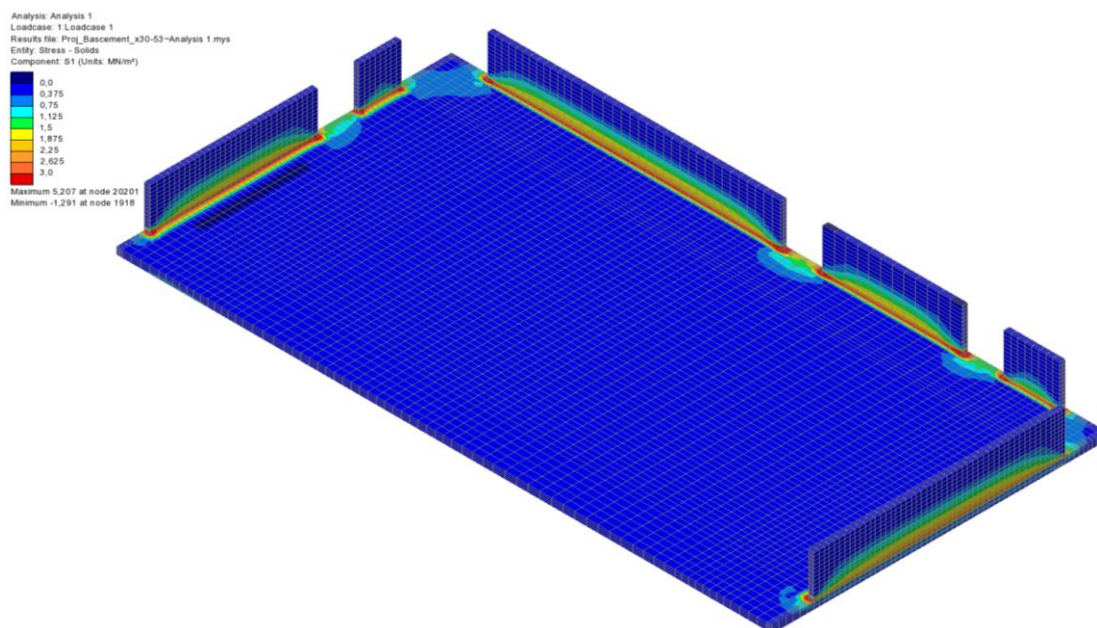
Tvångets storlek bestäms bland annat av motgjutningslängd samt i övrigt de geometriska förhållandena mellan nygjuten och gammal betong.

Det yttre tvånget för väggarna i det aktuella typfallet har analyserats genom en 3D FEM-beräkning i beräkningsverktyget Lusas (version 15.1). Tvånget för väggar med 11 olika längder från 3m till 30m har analyserats i en modell enligt Figur 3 nedan.



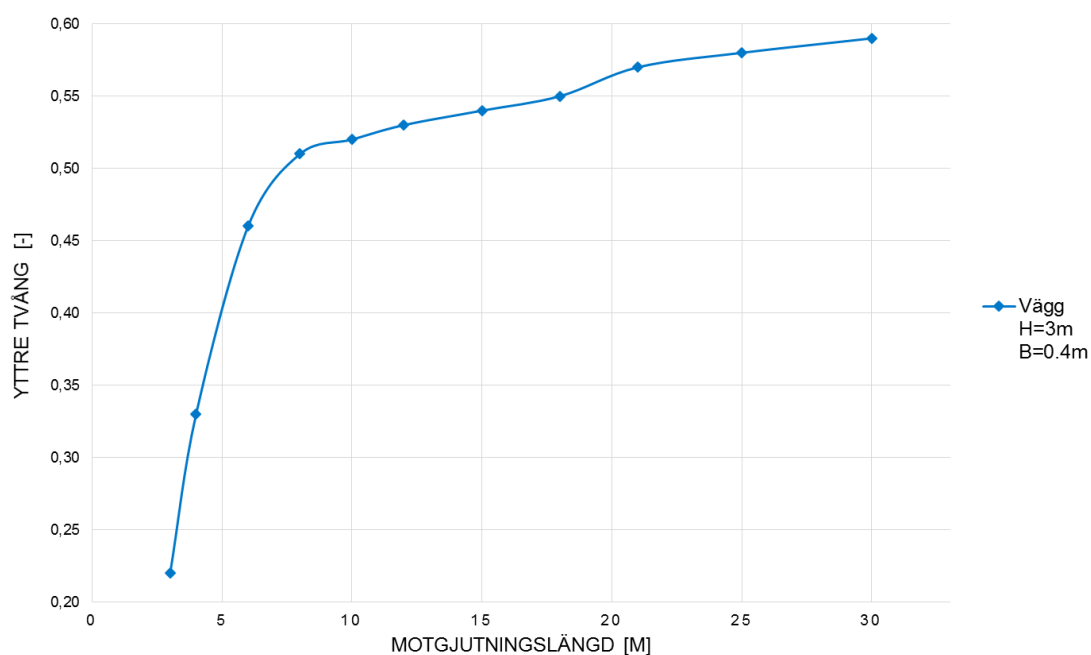
Figur 3: Modeller för analys av tvång i väggar ($T=0.4\text{m}$ och $H=3\text{m}$) gjutna på en icke pålad bottenplatta med tjockleken 500mm.

De beräknade spänningarna, uppkomna av rådande fastlåsnings effekter, visualiseras för en av modellerna i Figur 4 nedan.



Figur 4: Spänningar uppkomna av rådande fastlåsnings effekter för väggar gjutna på bottenplatta.

I Figur 5 nedan ses det beräknade yttre tvångets variation med avseende på motgjutningslängd.



Figur 5: Yttre tvångets variation i förhållande till motgjutningslängd.

Som ses i Figur 5 ovan är tvånget relativt lågt vid väglängden 3 m för att därefter öka relativt brant upp till motgjutningslängden 8 m. Därefter ökar tvånget relativt lite med ökande motgjutningslängd.

De beräknade tvången i Figur 5 ovan används sedan vid temperatursprickanalyserna som redovisas i avsnitt 4.1.3.

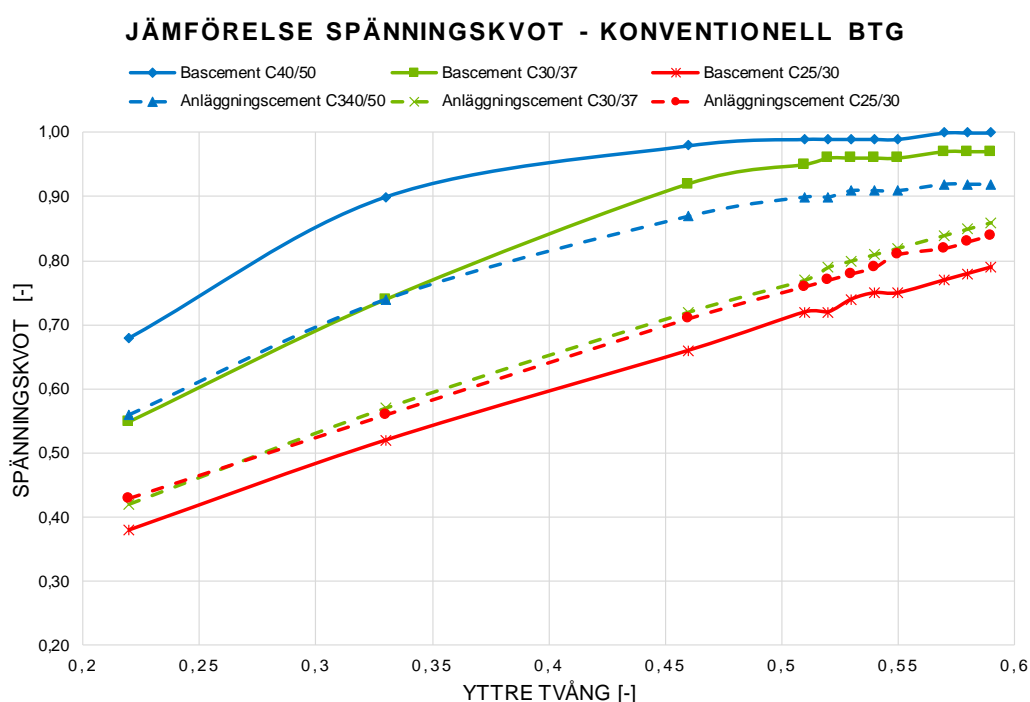
4.1.3 Jämförelse av betong med Bascement och Anläggningscement

4.1.3.1 Spänningskvot

Temperatursprickanalyser för konventionell betong och självkompakterande betong innehållande Bascement har utförts och jämförts med resultat utifrån analyser med existerande materialdata för betong med Anläggningscement.

Jämförande temperatursprickanalyser har utförts för betong med olika hållfasthetsklasser, dvs. C25/30, C30/37 och C40/50.

I följande två diagram redovisas beräknad spänningskvot för konventionell betong respektive självkompakterande betong, se Figur 6 och Figur 7 nedan. De redovisade spänningskvoterna nedan avser det dimensionerande fallet (vinterfallet). Jämförelse av beräknade spänningskvoter för analyserat sommarfall kan studeras vidare i Bilaga B.

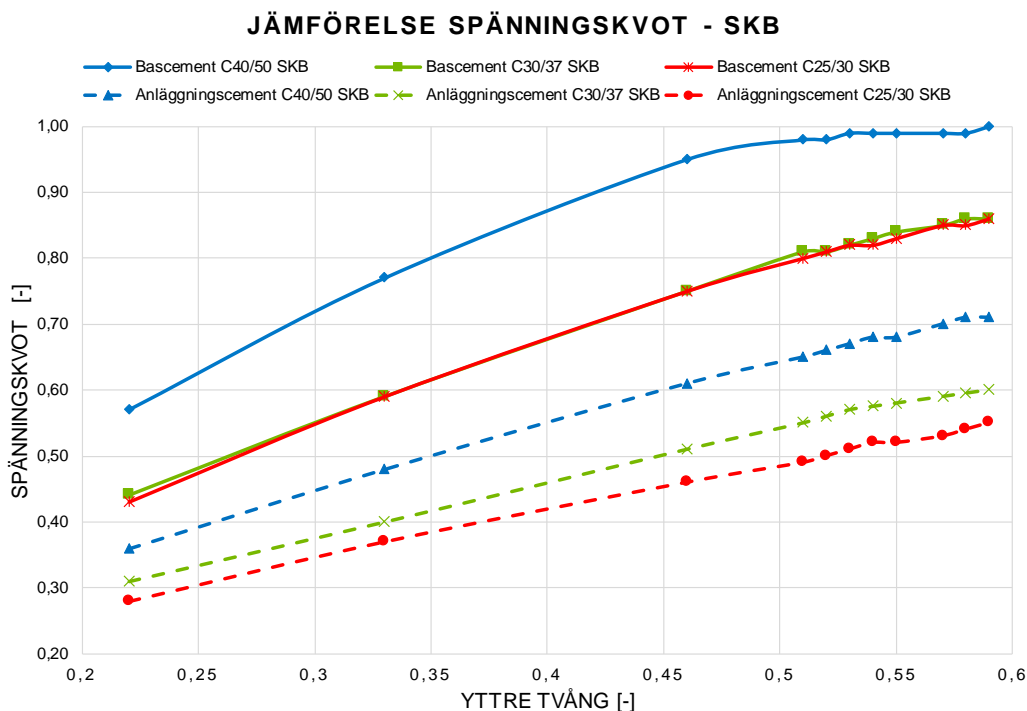


Figur 6: Beräknad spänningskvot för ett vinterfall för väggar gjutna med konventionell betong (C25/30, C30/37 och C40/50) i förhållande till yttre tvång beroende av motgjutningslängd. Heldragna kurvor avser betong med Bascement och streckade kurvor avser Anläggningscement.

Som ses i Figur 6 ovan så fås högre spänningskvoter med Bascement jämfört med Anläggningscement vid analyser utförda med konventionell betong med hållfasthetsklasserna C30/37 och C40/50.

För hållfasthetsklassen C25/30 visar analyserna på att betong med Bascement ger en något lägre spänningskvot. Att spänningskvoten är lägre med Bascement för betong för denna hållfasthetsklass kan bero på att materialparametrarna för konventionell betong (C25/30) med Bascement resulterar i lite för låga spänningar. Men det kan också bero på att materialparametrarna för den aktuella betongen med Anläggningscement ger lite för höga spänningar.

För den självkompakterande betongen fås generellt högre spänningskvoter med betong innehållande Bascement jämfört med Anläggningscement som ses i Figur 7 nedan.



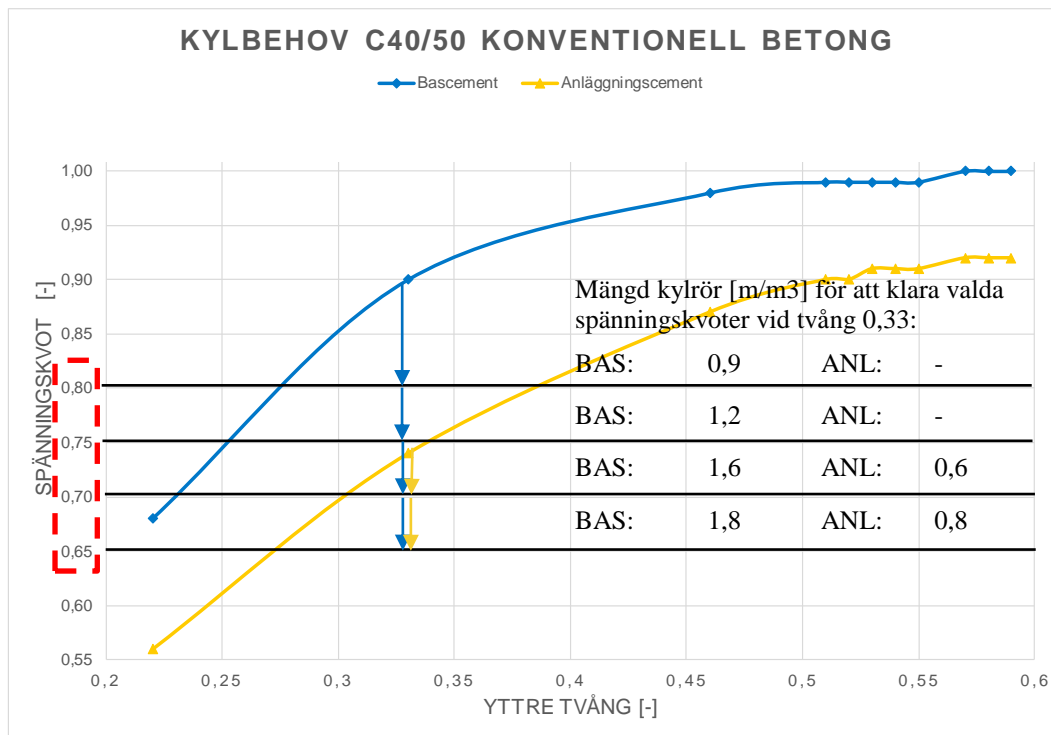
Figur 7: Beräknad spänningskvot för väggar gjutna med självkompakterande betong (C25/30, C30/37 och C40/50) i förhållande till yttre tvång beroende av motgjutningslängd. Heldragna kurvor avser betong med Bascement och streckade kurvor avser Anläggningscement.

Om spänningskvoterna i Figur 6 och Figur 7 för konventionell och självkompakterande betong innehållande Bascement jämförs med varandra ses att för hållfasthetsklass C40/50 och C30/37 är spänningskvoterna högre med konventionell betong. För den lägre hållfasthetsklassen C25/30 ses att spänningskvoterna är högre med självkompakterande betong än med konventionell betong. Det kan bero på att den konventionella betongen C25/30 med Bascement resulterar i lite för låga spänningar och/eller att den självkompakterande betongen C25/30 med Bascement resulterar i lite för höga spänningar.

4.1.3.2 Temperatursprickåtgärder - Kylbehov

För att bedöma skillnader i behov av temperatursprickåtgärder mellan betong med Bascement och betong med Anläggningscement har kylbehovet (mängd kylning) för att uppfylla olika krav på maximalt tillåten spänningskvot studerats. Vid denna jämförelse har endast kylbehovet för det dimensionerande fallet (vinterfallet) studerats.

Nedan i Figur 8 följer ett exempel på jämförelse av kylbehov (m kylrör / m³ betong) för konventionell betong med hållfasthetsklass C40/50. De beräknade värdena gäller för tvång 0,33 och skall ses som en teoretisk miniminivå och kan därför behöva justeras uppåt beroende på väggens längd. Tvång 0,33 motsvarar i detta beräkningsfall en motgjutningslängd på 4 m.

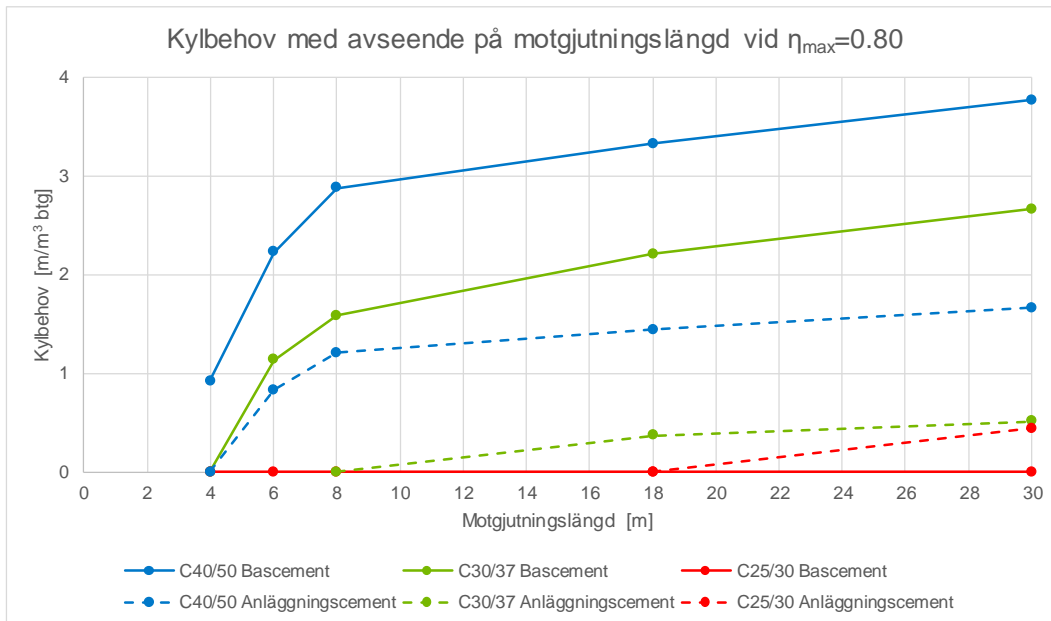


Figur 8: Exempel för konventionell betong C40/50 med bascement och Anläggningscement. Tabellen i diagrammet visar kylbehovet för att sänka spänningkvoten till resp. markerad kravnivå (0.65-0.80) vid tvång 0.33.

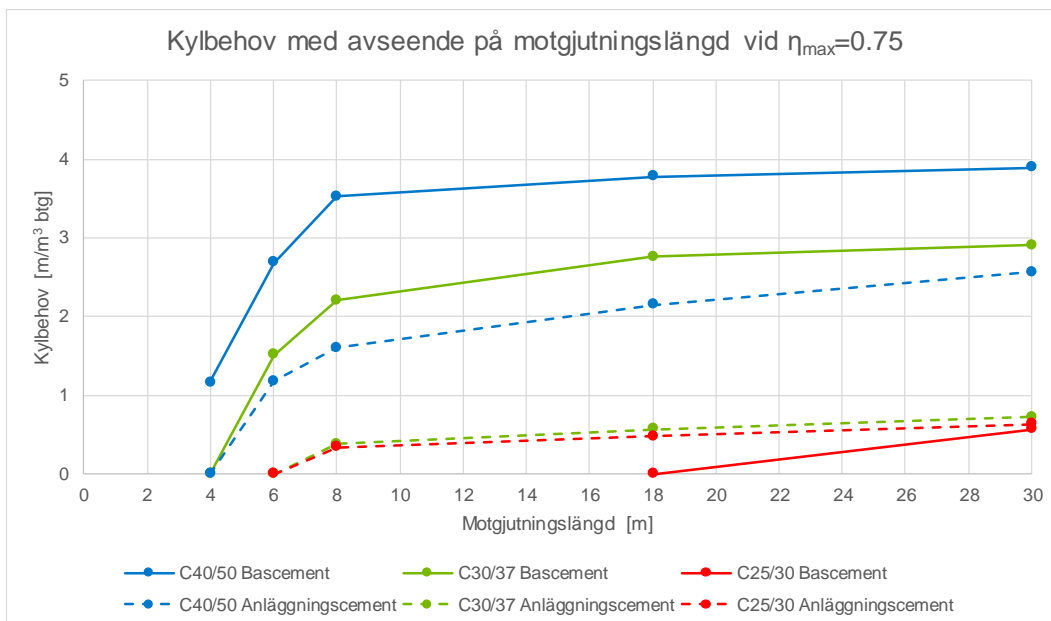
I Figur 8 ovan kan ses att kylbehovet för konventionell betong (C40/50) med Bascement kräver en större mängd kylrör jämfört med en konventionell betong (C40/50) med Anläggningscement. Vid analyser av betong med Bascement ses också att det krävs kylning för att uppfylla maximalt tillåten spänningkvot 0.75 resp. 0.80 vilket inte erfordras vid användning av betong innehållande Anläggningscement.

I nedanstående diagram (Figur 9 - Figur 12) visas kylbehovet för konventionell betong (C25/30, C30/37 och C40/50) vid max tillåten spänningkvot 0.65, 0.70, 0.75 och 0.80.

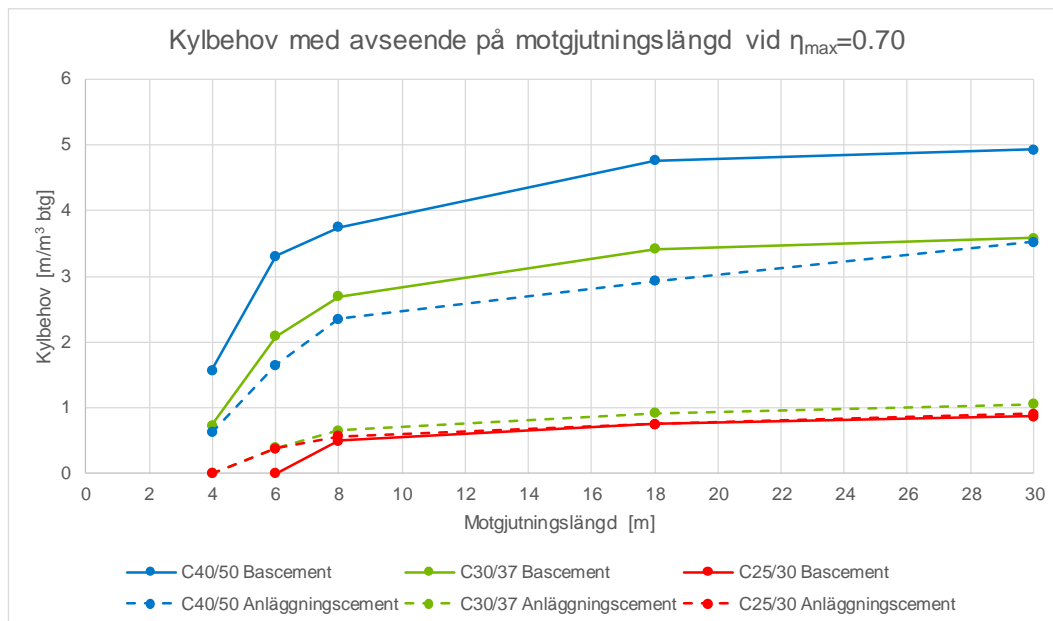
Generellt ses att konventionell betong med Bascement ger högre kylbehov än konventionell betong med Anläggningscement utom vid hållfasthetsklass C25/30 där kylbehovet är lägre eller ungefär lika som för betong med anläggningscement.



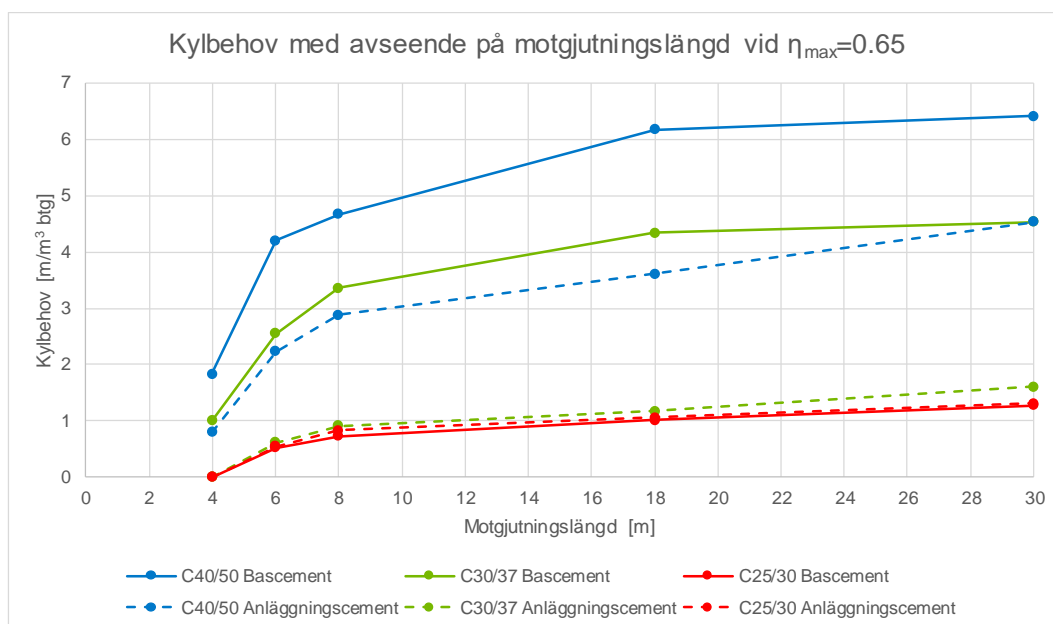
Figur 9: Kylbehov för att uppfylla max tillåten spänningskvot 0.80 med konventionell betong med basement resp. Anläggningscement för olika hållfasthetsklasser med avseende på motgjutningslängd.



Figur 10: Kylbehov för att uppfylla max tillåten spänningskvot 0.75 med konventionell betong med basement resp. Anläggningscement för olika hållfasthetsklasser med avseende på motgjutningslängd.



Figur 11: Kylbehov för att uppfylla max tillåten spänningskvot 0.70 med konventionell betong med bascement resp. Anläggningscement för olika hållfasthetsklasser med avseende på motgjutningslängd.



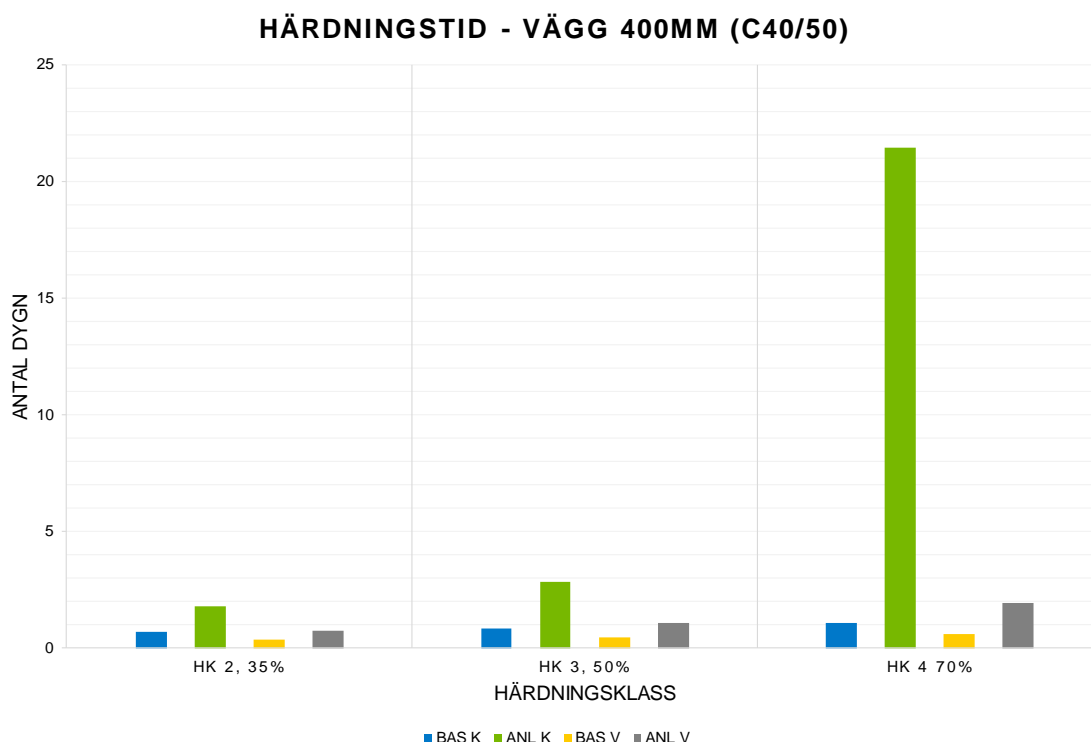
Figur 12: Kylbehov för att uppfylla max tillåten spänningskvot 0.65 med konventionell betong med bascement resp. Anläggningscement för olika hållfasthetsklasser med avseende på motgjutningslängd.

När det gäller den självkompakterande betongen, som inte redovisas ovan, är kylbehovet betydligt högre med Bascement än för Anläggningscement för de studerade betongmixarna. Samtliga beräknade kylmängder för både konventionell och självkompakterande betong redovisas i Bilaga C.

4.1.3.3 Härdningstid

Vid jämförelse av härdningstid för studerad väggkonstruktion har endast ett beräkningsfall utan kylning använts. Detta för att kylmängden varierar beroende på vilken cementtyp som används i analyserna. Att jämföra härdningstider för väggar med olika kylmängd ger resultat som är svåra att jämföra eftersom betongens hållfasthetsutveckling styrs av betongens temperaturutveckling.

I Figur 13 nedan ses hur härdningstiden påverkas vid val av Bascement resp. Anläggningscement. Härdningstid för både sommar- och vinterfall har analyserats. Jämförelsen är utförd för det aktuella typfallet, dvs. en 400 mm tjock vägg som gjuts i oisolerad form på en bottenplatta. Endast betong med hållfasthetsklass C40/50 studeras.



Figur 13: Härdningstid för att uppfylla Härdningsklass 2-4 vid gjutning av vägg (t=400mm) utan kylning med konventionell betong med Bascement resp. Anläggningscement för hållfasthetsklass C40/50.

Härdningstiden för att uppfylla Härdningsklass 2 och 3 är relativt kort för både sommar- och vinterfall, oavsett analys med betong innehållande Bascement eller Anläggningscement. Betong med Bascement ger dock ungefär halverad härdningstid jämfört med betong med Anläggningscement.

Härdningstiden för att uppfylla Härdningsklass 4 med betong innehållande Bascement är enligt analyserna också relativt kort (ca 1 dygn) för både sommar- och vinterfall. Motsvarande härdningstid för betong innehållande Anläggningscement är relativt kort (ca 2 dygn) för sommarfallet men mycket lång (ca 3 veckor) för vinterfallet. Betong med Anläggningscement kräver alltså någon typ av vinteråtgärd för att nå en kortare härdningstid, vilket inte krävs med betong innehållande Bascement för det aktuella beräkningsexemplet.

4.1.4 Kostnadsuppskattning av temperatursprickåtgärder

Som nämnts i avsnitt 4.1.3.2 så ökar kylbehovet vid användning av betong med Bascement jämfört med motsvarande betong med Anläggningscement, vilket innebär en kostnadsökning. Av denna anledning har en jämförelse av totalkostnaden för temperatursprickåtgärder och betong utförts för betong innehållande Bascement resp. Anläggningscement.

Kostnaden för kylning för en normalt armerad betongkonstruktion bedöms utifrån uppgifter från ett antal byggprojekt vara ungefär 70-100 kr/m kylrör beroende på konstruktionstyp. Kostnaden är lika oavsett cementtyp.

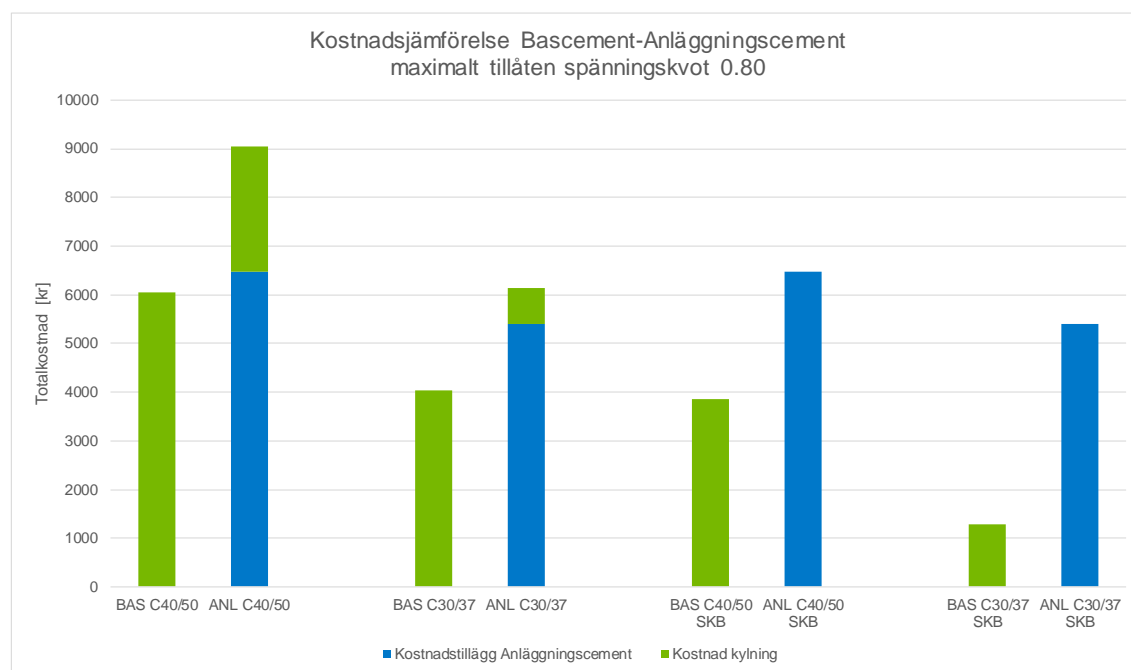
Kostnaden för betong med Bascement är lägre än motsvarande betong med Anläggningscement. Utifrån uppgifter från ett antal betongfabriker är skillnaden i pris ungefär 200-300 kr/m³ betong beroende på hållfasthetsklass och ökar med ökande hållfasthetsklass.

Utifrån ovanstående antas följande kostnader för både konventionell och självkompakterande betong:

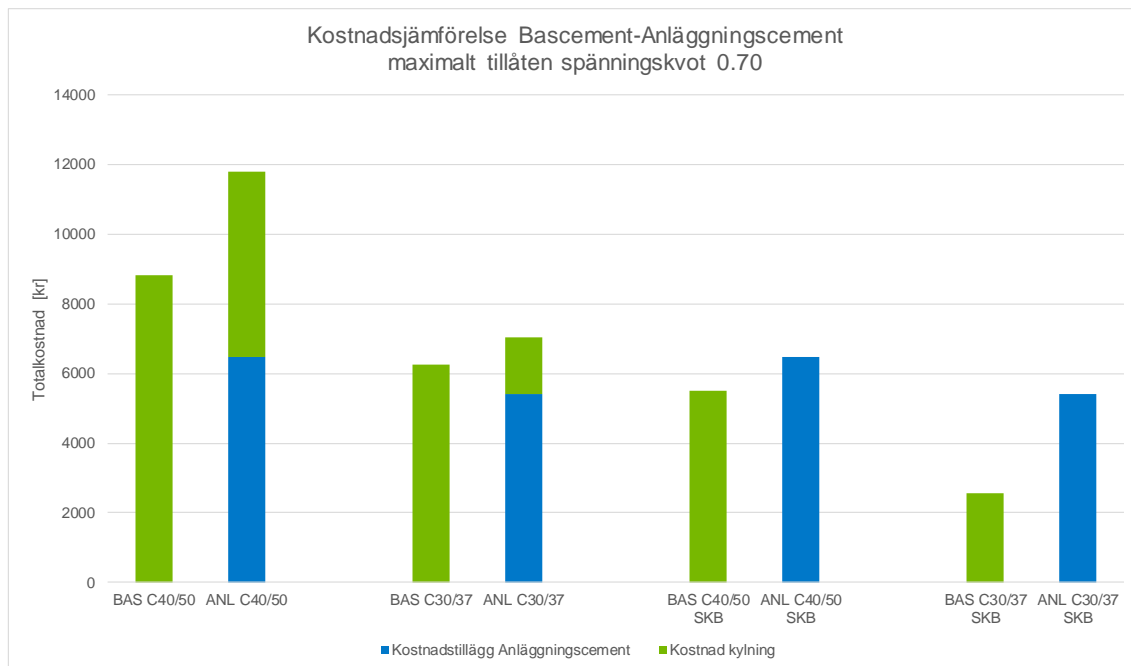
- Kylning: 85 kr/m kylrör
- Betong C30/37: 250 kr/m³ betong i tillägg vid betong med Anläggningscement
- Betong C40/50: 300 kr/m³ betong i tillägg vid betong med Anläggningscement

Som beräkningsexempel väljs den aktuella väggkonstruktion som analyserats i avsnitt 4.1. Jämförelsen begränsas till att utföras endast för en vägg med längden 18m.

Utifrån det beräknade kylbehovet för en vägg med längden 18m gjuten på bottenplatta, vilka återfinns i Bilaga C, erhålls följande kostnadsbild enligt Figur 14 och Figur 15. Den beräknade totalkostnaden inkluderar kostnad för kylning och tilläggskostnad för Anläggningscement.



Figur 14: Kostnadsjämförelse mellan betong innehållande Bascement resp. Anläggningscement vid maximalt tillåten spänningkvot 0.80.



Figur 15: Kostnadsjämförelse mellan betong innehållande Bascement resp. Anläggningscement vid maximalt tillåten spänningkvot 0.70.

Som ses ovan visar beräkningsexemplet för den 18 m långa väggkonstruktionen att betong med Anläggningscement medför en kostnadsökning med ungefär 1000 - 4000 kr trots lägre kylmängder. Andra väglängder eller andra typer av konstruktioner kan dock resultera i ett annat resultat. Men kostnadsjämförelsen för det aktuella fallet indikerar att det för många konstruktioner bör finnas ekonomi i att välja en betong med Bascement istället för en betong med Anläggningscement, där så är möjligt enligt regelverket.

Man skall också vara medveten om att betong med Anläggningscement kan kräva vinteråtgärder i form av isolering eller uppvärmning i en större utsträckning än betong med Bascement. Detta talar också till Bascementets fördel när det gäller kostnadsbilden.

4.2 Typfall 2: Bottenplatta på mark

Detta typfall studeras i syfte att bedöma skillnader i behov av härdningstid för att uppfylla Härdningsklass 2, 3 och 4.

4.2.1 Förutsättningar

Detta typfall avser bottenplattor gjutna på antingen packad fyllning eller avjämningsbetong. För analyserna av denna typ av konstruktion antas nedanstående förutsättningar och begränsningar.

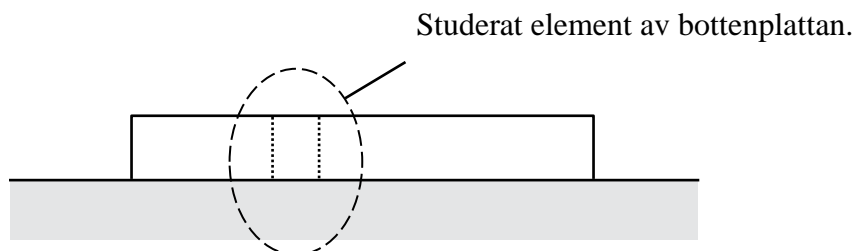
Bottenplatta	Tjocklek 0.55m Grundlagd på avjämningsbetong alt. packad fyllning
Väderförhållanden	Medeltemperatur Stockholm Beräkningsfall Kallt: januari Varmt: juli T _{luft} -3 °C +18 °C T _{gjut} +12 °C +24 °C Vindhastighet: 5 m/s (medel)
Form/täckning	Formrivningstid/Avtäckningstid: 4 dygn Formtyp: 2cm träform (oisolerad) Täckning: Presenning
Betong	C25/30 Anl vct=0.55 c=360kg/m ³ C25/30 Anl SKB vct=0.55 c=325kg/m ³ C25/30 BAS vct=0.70 c=285kg/m ³ (BAS 3)* C25/30 BAS SKB vct=0.60 c=320kg/m ³ (BAS 6)* C30/37 Anl vct=0.50 c=390kg/m ³ C30/37 Anl SKB vct=0.50 c=355kg/m ³ C30/37 BAS vct=0.55 c=360kg/m ³ (BAS 2)* C30/37 BAS SKB vct=0.55 c=370kg/m ³ (BAS 5)* C40/50 Anl vct=0.38 c=435kg/m ³ C40/50 Anl SKB vct=0.39 c=385kg/m ³ C40/50 BAS vct=0.38 c=470kg/m ³ (BAS 1)* C40/50 BAS SKB vct=0.38 c=480kg/m ³ (BAS 4)*

Tabell 4: Sammansättning för tre traditionella betonger (BAS 1-BAS 3), konsistensklass S4.

* BAS 1 – BAS 6 är receptbeteckningen i LTU:s rapport från materialprovningen, se Bilaga A.

4.2.2 Temperaturanalyser

Temperaturanalyser har utförts i beräkningsverktyget ConTeSt R&D version 5.1.1. I analyserna studeras endast ett mindre element av bottenplattan vilket framgår av Figur 16 nedan.



Figur 16: Principskiss för typfallet med bottenplatta på mark.

Utifrån beräkning av betongens temperaturutveckling erhålls hållfasthetsutvecklingen i betongen. Med hjälp av den beräknade hållfasthetsutvecklingen kan då härdningstiden beräknas för att uppnå tillräcklig tryckhållfasthet för att uppfylla härdningsklass 2, 3 respektive 4. Kraven för resp. härdningsklass framgår av SS-EN 13670:2009 och SS 137006:2015.

Jämförande analys mellan konventionell betong resp. självkompakterande betong innehållande Anläggningcement resp. Bascement har utförts för hållfasthetsklass C30/37.

4.2.3 Härdningstider för Bascement

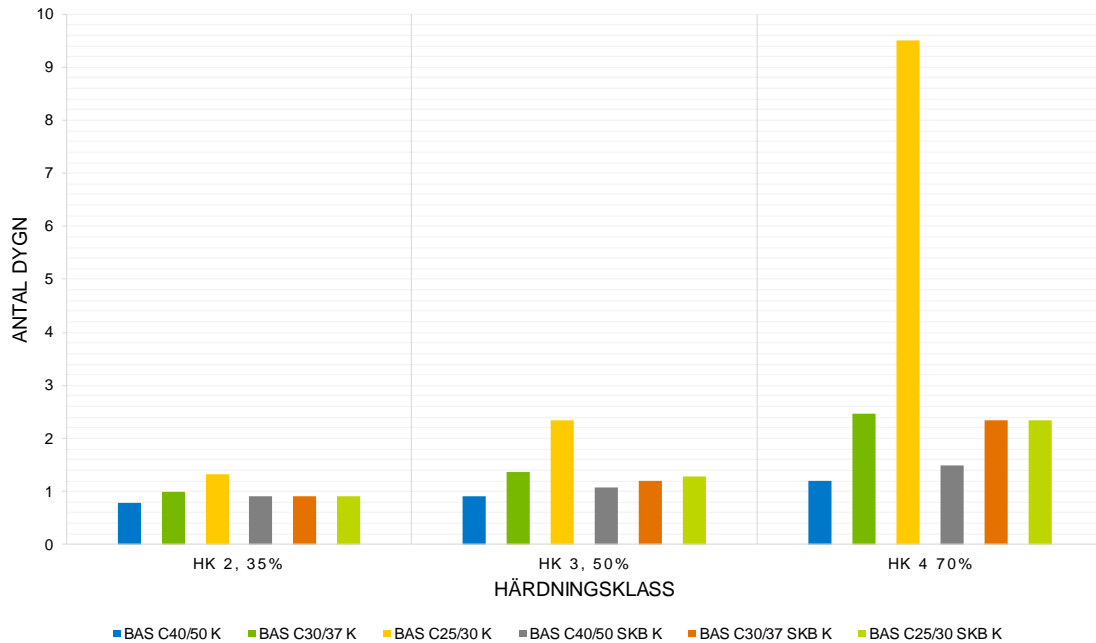
Härdningstider har beräknats för en bottenplatta enligt förutsättningar i avsnitt 4.2.1.

Beräknade härdningstider för att uppnå Härdningsklass 2-4 har utförts för både sommar- och vinterfall och redovisas i Figur 17 och Figur 18 nedan.

Som sig bör ökar härdningstiden både vid sänkning av hållfasthetsklass resp. ökande härdningsklass. Härdningstiden för att uppfylla Härdningsklass 2 och 3 är relativt kort för både sommar- och vinterfall. Vintertid är beräknad härdningstid ca 1-2 dygn och sommartid är härdningstiden kortare än 1 dygn.

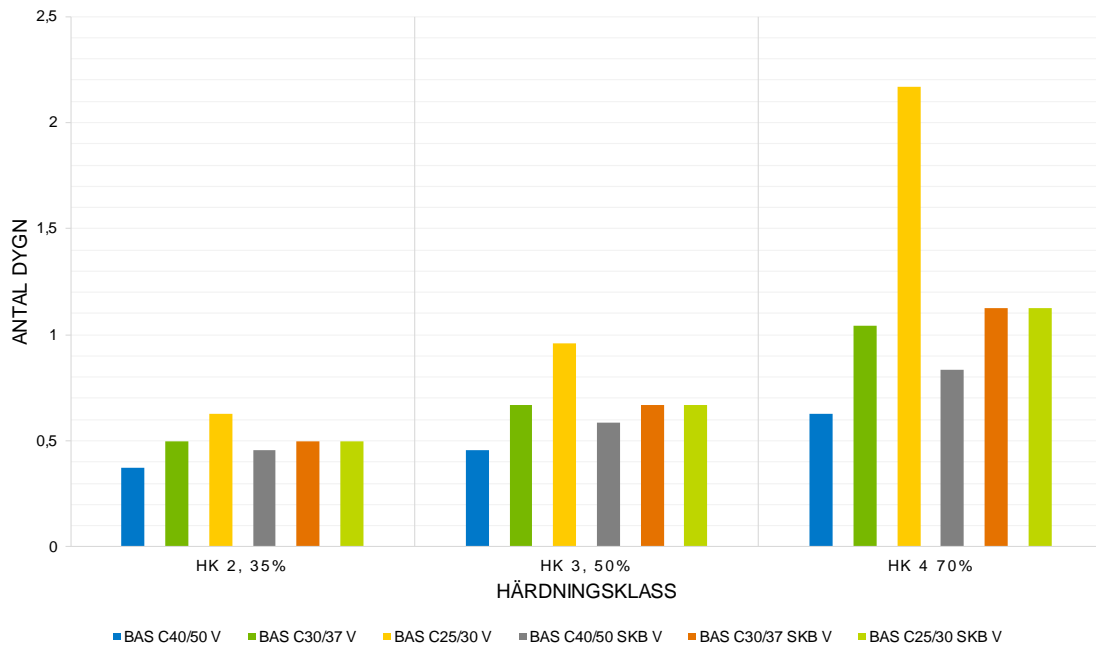
För att uppfylla Härdningsklass 4 krävs enligt analyser härdningstider omkring 2 dygn för vinterfallet och ca 1 dygn för sommarfallet utom vid analysen med konventionell betong med hållfasthetsklass C25/30. För denna betong (BAS C25/30 K resp. V) är den beräknade härdningstiden ca 9 dygn för vinterfallet och ca 2 dygn för sommarfallet, se Figur 17 och Figur 18 nedan. Vintertid krävs utifrån analysen någon typ av vinteråtgärd för att nå en kortare härdningstid.

HÄRDNINGSTID - BOTTENPLATTA 550 MM (BASCEMENT - VINTERFALL)



Figur 17: Härdningstid (vinterfall) för att uppfylla Härdningsklass 2-4 vid gjutning av bottenplatta (t=550mm) med Bascement och hållfasthetsklass C25/30, C30/37 och C40/50.

HÄRDNINGSTID - BOTTENPLATTA 550 MM (BASCEMENT - SOMMARFALL)



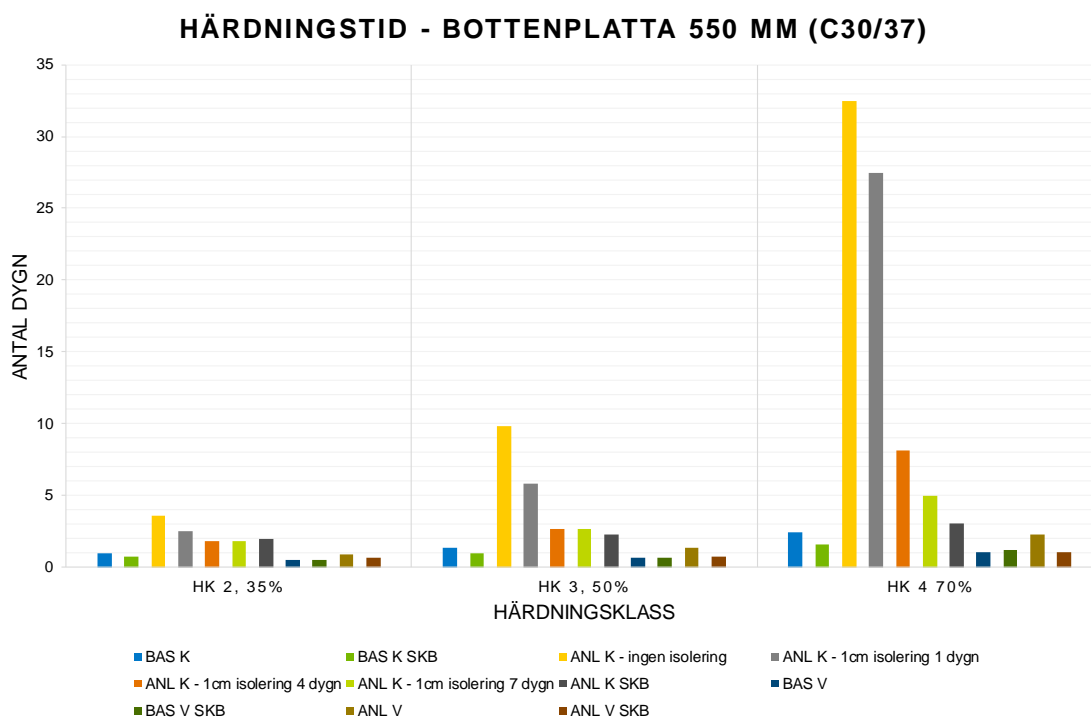
Figur 18: Härdningstid (sommarfall) för att uppfylla Härdningsklass 2-4 vid gjutning av bottenplatta (t=550mm) med Bascement och hållfasthetsklass C25/30, C30/37 och C40/50.

4.2.4 Jämförande analys – Härdningstid

Ett antal analyser har utförts för att jämföra härdningstider för konventionell och självkompakterande betong innehållande Bascement resp. Anläggningscement. I detta fall har endast hållfasthetsklass C30/37 studerats.

Betong (C30/37) med Bascement ger i detta beräkningsfall generellt korta härdningstider oavsett härdningsklass, vilket kan ses i nedanstående Figur 19. Härdningstiderna är också betydligt kortare för konventionell betong innehållande Bascementet jämfört med motsvarande betong med Anläggningscement. Skillnaden i härdningstid mellan konventionell betong med Anläggningscement och Bascement ökar också med ökande härdningsklass. Härdningstiden för självkompakterande betong är ungefär lika oavsett om det gäller betong med Bascement eller Anläggningscement.

I den jämförande analysen studerades även vilken grad av vinteråtgärd som behövs för att konventionell betong med Anläggningscement skall komma ner i härdningstider motsvarande konventionell betong med Bascement utan vinteråtgärder. Som ses i Figur 19 nedan så krävs som exempel att bottenplattans överyta täcks med en 1 cm tjock isolermatta i minst 7 dygn för att härdningstiden för Anläggningscement och Bascement skall bli ungefär lika.



Figur 19: Härdningstid för att uppfylla Härdningsklass 2-4 vid gjutning av bottenplatta (t=550mm) med konventionell och självkompakterande betong C30/37 med Bascement resp. Anläggningscement.

5 Slutsats

Temperatursprickanalyser för konventionell betong och självkompakterande betong innehållande Bascement har utförts och jämförts med resultat utifrån analyser utförda med existerande materialdata för betong med Anläggningscement.

Jämfört med betong innehållande Anläggningscement ger betong innehållande Bascement generellt högre spänningskvot vid lika förutsättningar, bortsett från konventionell betong med hållfasthetsklass C25/30. Den högre spänningskvoten medför att åtgärder för att begränsa risken för temperatursprickor blir mer omfattande för betong innehållande Bascement. Detta gäller både konventionell och självkompakterande betong.

Genom en enkel kostnadsanalys har den ökade kostnaden för det större kylbehovet, vid gjutning med betong innehållande Bascement, bedömts att minst kompenseras av den lägre kostnaden för betong med Bascement. Det bör således i många fall finnas ekonomi i att välja en betong med Bascement istället för en betong med Anläggningscement, där regelverket så tillåter. Då materialparametrar nu finns tillgängliga för betong med Bascement är det alltså möjligt att göra en mer tillförlitlig kostnadsjämförelse med betong innehållande Anläggningscement.

Härdningstiderna är generellt kortare vid gjutning med betong innehållande Bascement än med betong innehållande Anläggningscement. Behovet av vinteråtgärder, såsom värmning och isolering, är också lägre än vid gjutning med betong innehållande Anläggningscement. Detta talar också för att betong innehållande Bascement bör vara ett mer ekonomiskt alternativ.

Utifrån genomförda analyser kan de i projektet använda materialparametrarna för betong innehållande Bascement rekommenderas för bedömning av temperatursprickåtgärder. Dock skall man vara medveten om att analyser med materialdata för hållfasthetsklass C25/30 resulterat i något avvikande resultat jämfört med övriga analyserade hållfasthetsklasser, dvs. C30/37 och C40/50.

Levererade materialdata-filer (ConTeSt) med denna rapport:

Filnamn:	Anmärkning
BAS-cement enligt LTU-försök	Provade materialparametrar
Traditional Concrete with BasCement 2014	Trendade materialparametrar
Self Compacting Concrete with BasCement 2014	Trendade materialparametrar

Bilaga A

Materialdata för beräkning av temperatur, hållfasthet och spänningar för betonger med BAS-cement

Jan-Erik Jonasson

Luleå tekniska universitet

Innehåll	sid
Förord	2
Betongsammansättning	3
Temperaturkänslighet och referenshållfasthet	3
Hållfasthetstapp vid förhöjd härdningstemperatur	5
Hydratationsvärme	6
Krypning	9
Frirörelse	11
Spänning vid fullständigt tvång	12
Erhållna modellparametrar	14
Använda modellsamband	16
Tendenskurva vid 20°C	16
Hållfasthetstapp på grund av förhöjd härdningstemperatur	17
Betongens värmeutveckling	18
Frirörelser	18
Krypning	19
Spänning vid fullständigt tvång	20
Referenser	22

Förord

Denna utredning, som omfattar mätning av materialegenskaper för hårdnande betong och utvärdering av resultaten, anpassade för att användas i datorprogrammet ConTeSt 5.1, är ett uppdrag från Hans Hedlund vid Skanska Sverige AB till Luleå tekniska universitet.

Varje betong med en viss sammansättning provas och analyseras inom fem områden:

- Temperaturkänslighet och hållfasthetsutveckling
- Hydratationsvärme
- Krypning
- Frirörelser
- Spänning vid fullständigt tvång

De framtagna parametrarna ger underlag för att studera följande egenskaper i härdande betong:

- Temperaturutveckling i ung betong
- Mognadsgraden i relation till erhållen betongtemperatur
- Hållfasthetstillväxten i relation till erhållen betongtemperatur
- Spänningsutvecklingen orsakad av temperaturrelörelser och fuktrörelser på grund av den självtorkning som sker i betongen

Temperaturutvecklingen styrs framför allt av tre omständigheter:

- Betongens inneboende egenskap att producera värmeenergi exotermiskt under hydratationsprocessen
- Omgivningens, luftens och anslutande konstruktioners temperaturförlopp
- Vilka arbetsplatsåtgärder som vidtas som t ex täckning, kylning och/eller värmning

En temperaturberäkning leder till att man inom den unga betongen bestämmer den unga betongens tillståndsp parametrar temperatur och porfuktighet för godtycklig punkt inom den unga betongen. Spänningsutvecklingen är beroende av både variation av tillståndet inom den nygjutna betongen likväl som av temperaturens och fuktens relation till anslutande konstruktioners tillstånd. Förutom dessa belastningsrelaterade omständigheter är spänningstillståndet i den unga betongen starkt beroende av till vilken grad anslutande konstruktioner förhindrar de rörelser som uppkommer i den nygjutna betongen, och detta brukar betecknas som inverkan av tvång från omgivningen.

Spänningsberäkningar innebär alltid en total jämviktsbetraktelse, som med aktuella materialdata kan studeras med datorprogrammet ConTeSt 5.1. Detta resulterar i beräknad spänning i relation till draghållfastheten och bedömning av risk för sprickor under härdningsförloppet. Sådana sprickriskberäkningar krävs enligt Anläggnings-AMA vid planering av materialval och eventuella utförandeåtgärder för anläggningskonstruktioner.

Betongens egenskaper är utvärderade på sådant sätt att interpoleringar och försiktiga extrapoleringar för andra närliggande betonger än de provade bedöms vara möjlig att utföra.

Luleå i oktober 2014

Jan-Erik Jonasson

Betongsammansättning

Sex blandningsrecept har provats, tre traditionella betonger och tre självkompakterande betonger, se Tabell 1 - 2. Recepten är framtagna av Betongindustri AB, Stockholm. Flyttillsatsmedlet är Sikament 5650 från Svenska Sika AB. I aktuell rapport betecknas recepten som BAS 1, BAS 2, ..., BAS 6.

Tabell 1. Sammansättning för tre traditionella betonger, konsistensklass S4

Delmaterial	BAS 1 vct = 0,38	BAS 2 vct = 0,55	BAS 3 vct = 0,70
BAS-cement, kg/m ³	470	360	285
Grus, 0/8, kg/m ³	975	1067	1153
Sten, 8/16, kg/m ³	790	733	697
Vatten, effektivt, kg/m ³	179	198	200
Vatten, totalt, kg/m ³	186	205	208
Luftvolym, %	0,5	1,0	1,5

Tabell 2. Sammansättning för tre självkompakterande betonger (SKB), konsistensklass SF2

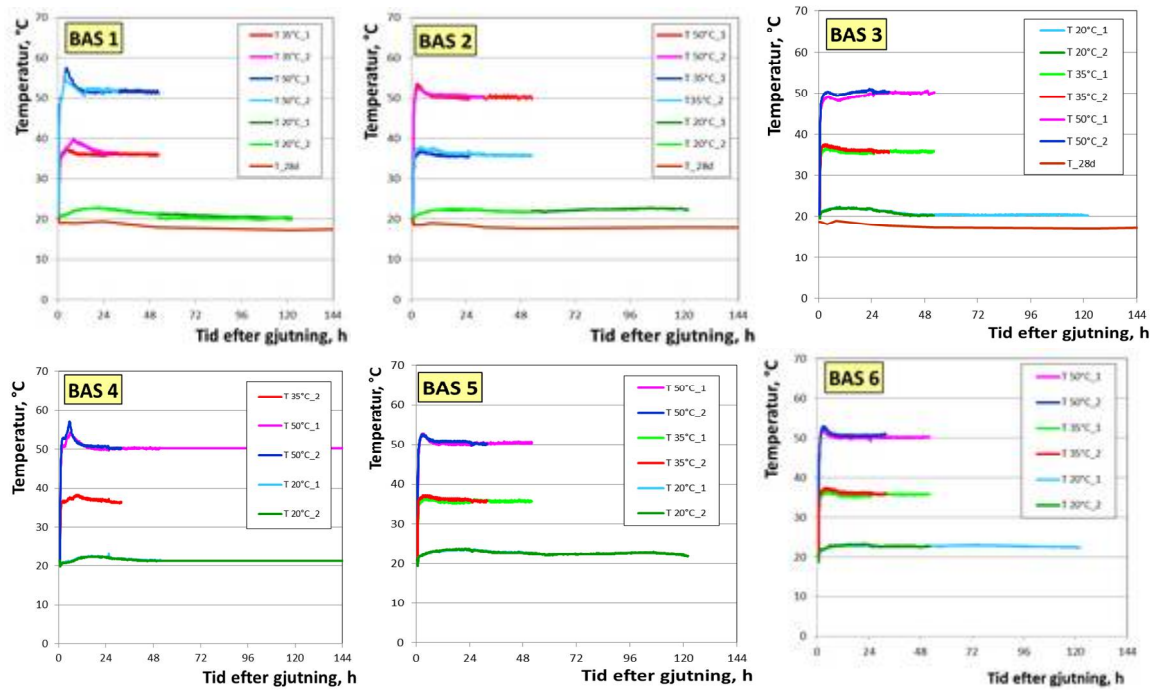
Delmaterial	BAS 4 vct = 0,38	BAS 5 vct = 0,55	BAS 6 vct = 0,60
BAS-cement, kg/m ³	480	370	320
Kalkstensfiller Limus 40, kg/m ³	60	120	140
Grus, 0/8, kg/m ³	1045	1058	1112
Sten, 8/16, kg/m ³	633	588	592
Vatten, effektivt, kg/m ³	182	204	192
Vatten, totalt, kg/m ³	188	210	198
Luftvolym, %	1,0	1,5	1,5

Allmänna kommentarer om receptens sammansättning:

- Ballastens vattenabsorption är avdragen från totala mängden vatten, vilket ger mängden effektivt vatten.
- Luftvolymen i tabell 2 och 3 är den naturliga lufthalten i betongen som erhålls utan användning av luftporbildande medel.

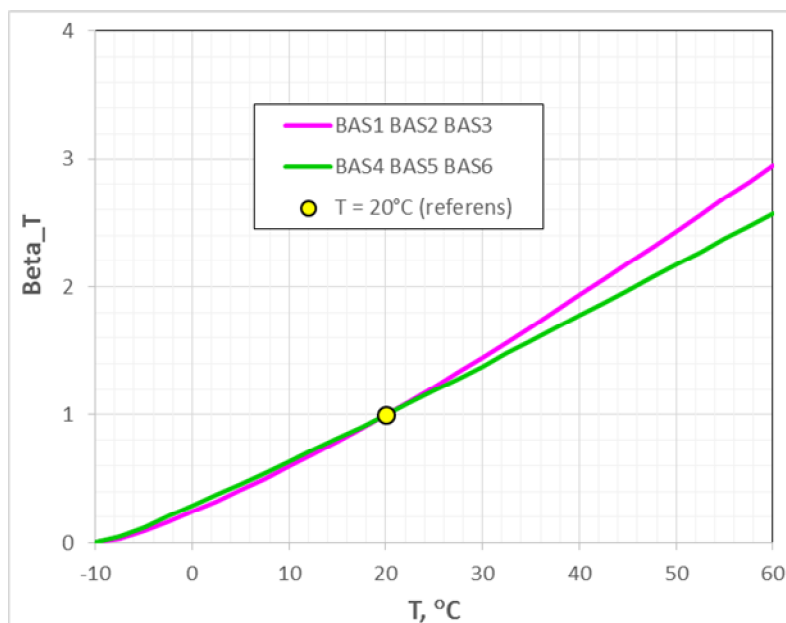
Temperaturkänslighet och referenshållfasthet

Provkropparna är 100 mm kuber. Provkropparna lagras i tempererade vattenbad. Samtliga provkroppar är tillverkade i samma blandningsomgång för att inte få in onödiga blandningsvariationer i mätresultaten. De temperaturnivåer som använts är 20°C, 35°C och 50°C. Mätning av de lagrade kubernas tryckhållfasthet utförs vid varje enskilt tillfälle på tre provkroppar i vått tillstånd, varvid 20°C-lagringen tryckprovas vid fem tillfällen och 35°C-respektive 50°C-lagringen tryckprovas vid fyra tillfällen. Temperaturen i betongen registreras kontinuerligt, och utvärderingen baseras på den uppmätta temperaturvariationen för respektive vattenbad. Registrerade temperaturer för de lagrade kuberna presenteras i Figur 1.

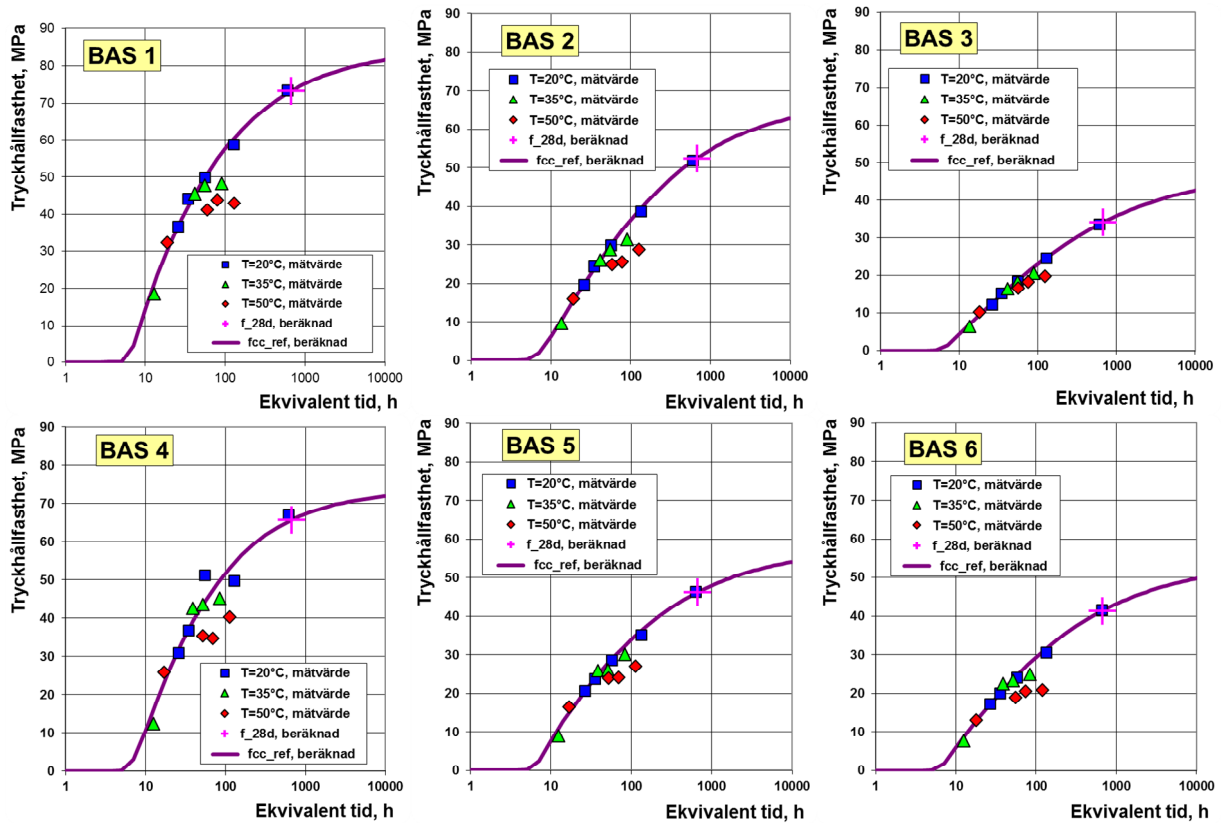


Figur 1. Betongtemperaturer för lagrade betongkuber med betong enligt recepten i tabell 1 och 2.

Med hjälp av framtagna temperaturfaktorer, se Figur 2, kan reell tid omräknas till temperaturekvivalent tid (t_{eT} , se ekvation 2). Temperaturfaktorn beskriver hastighetsfaktorn för cementreaktionen i relation till den valda referenstemperaturen 20°C. Temperaturfaktorn benämns även ”mognadsfunktion” (eng. maturity function). Uppmätta hållfastheter som funktion av ekvivalent tid redovisas i Figur 3, där varje enskild punkt utgör ett medelvärde av tre provade kuber.



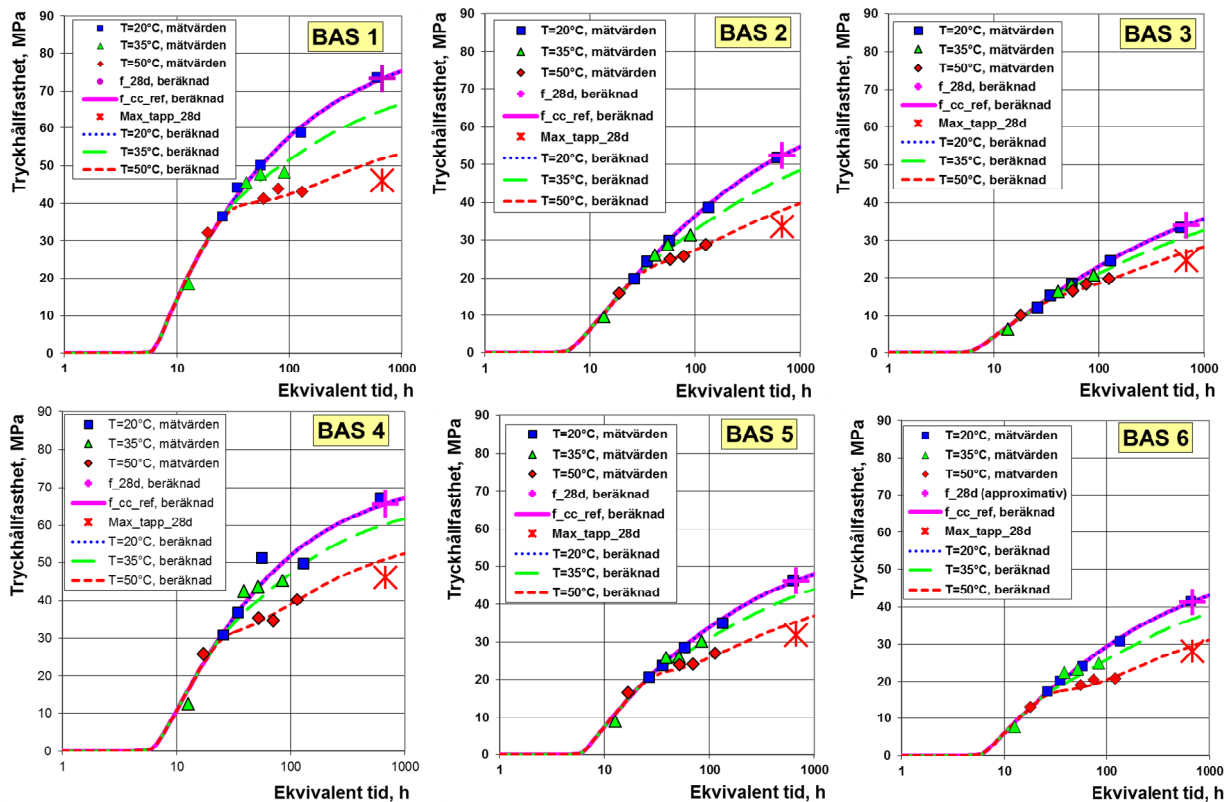
Figur 2. Utvärderad temperaturfaktor för alla betonger.



Figur 3. Referenshållfasthet för kuberna lagrade i de tempererade vattenbaden. Enskilda punkter i figurerna visar medelvärdet av mätta hållfastheten för tre kuber.

Hållfasthetstapp vid förhöjd härdningstemperatur

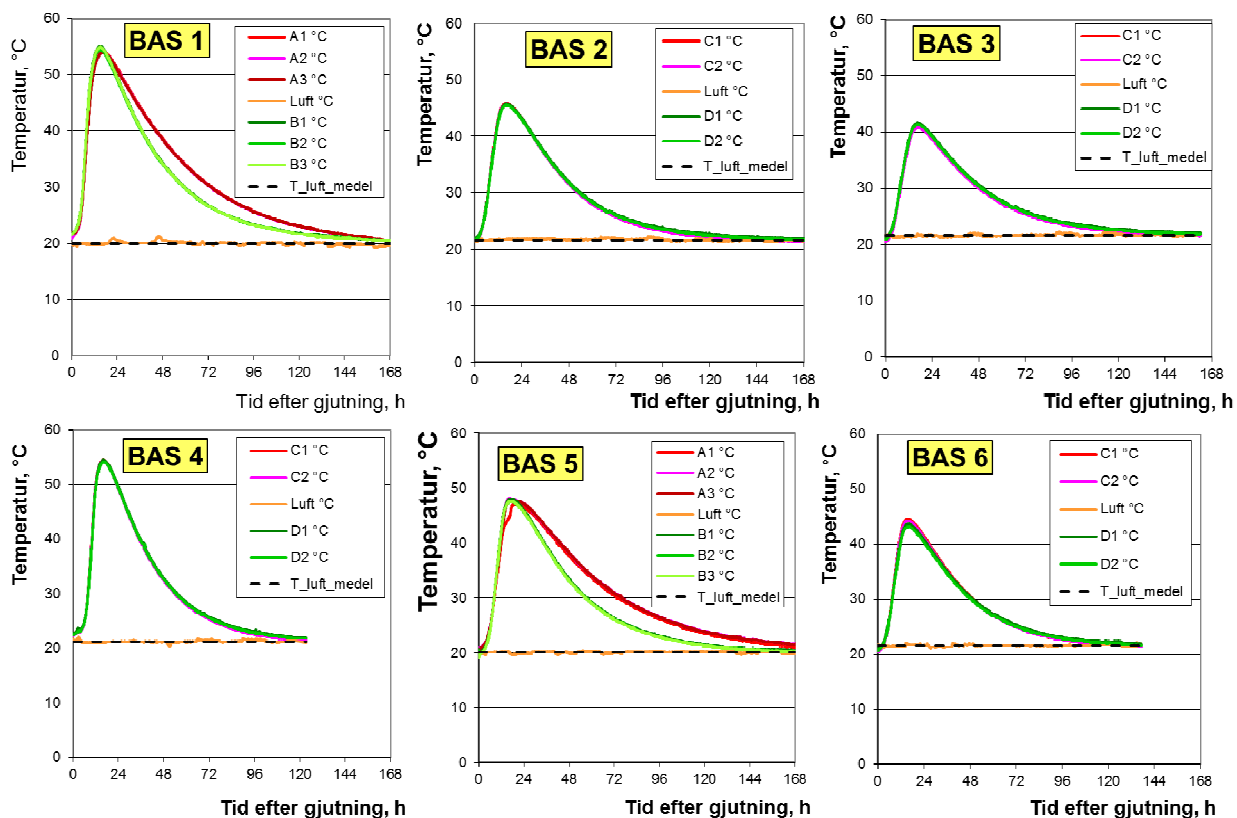
Vissa av de mätta värdena i Figur 3, se $T=35^{\circ}\text{C}$ - och framför allt de rödmarkerade $T=50^{\circ}\text{C}$ -värdena, ligger under den beräknade referenshållfastheten. Det innebär att man har s.k. hållfasthetstapp vid förhöjd härdningstemperatur. Detta fenomen är relativt vanligt, och en utvärdering och anpassning till framtagna modell redovisas i Figur 4.



Figur 4. Modellanpassning för beskrivning av hållfasthetstapp vid förhöjd härdningstemperatur.

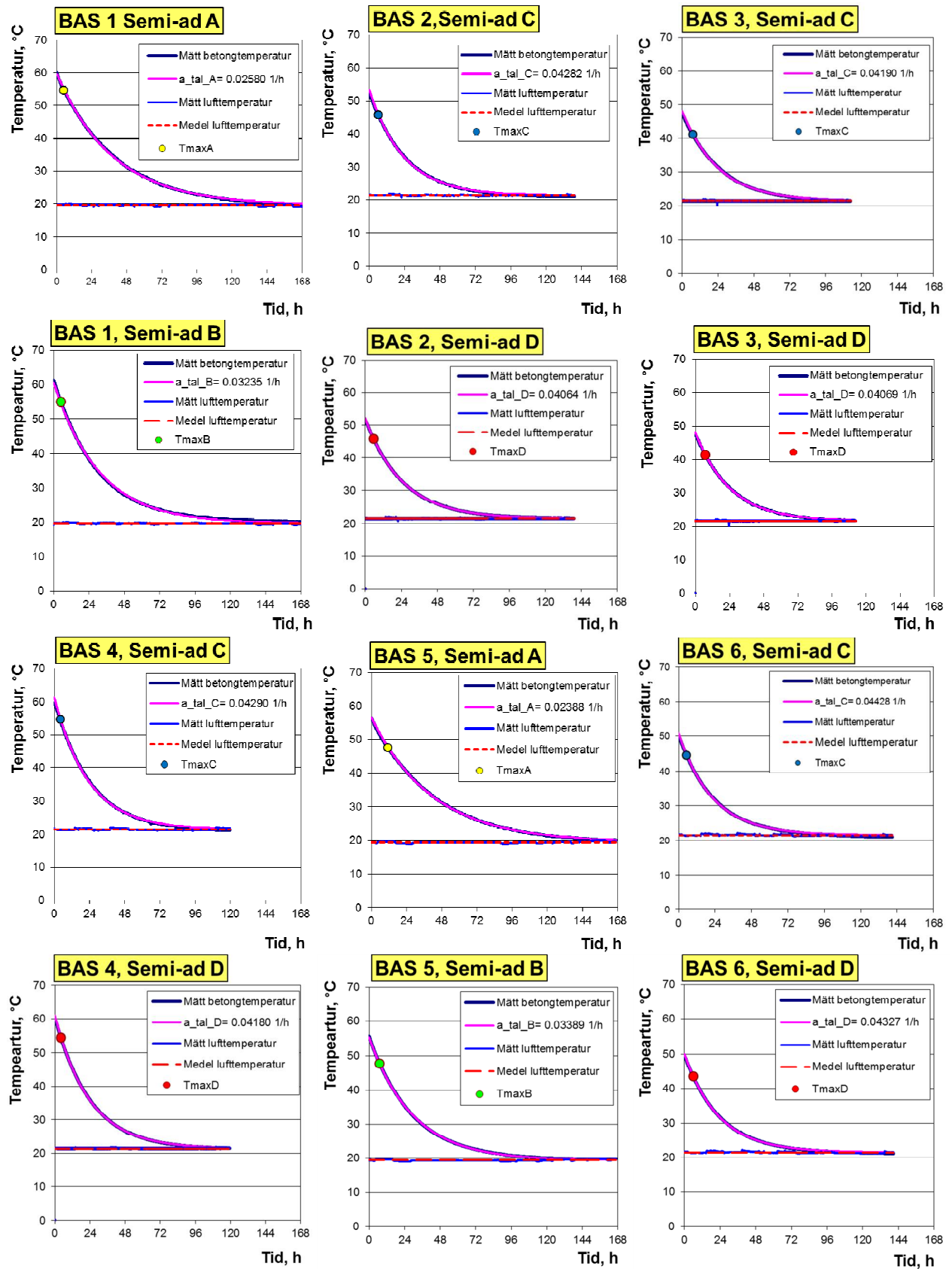
Hydratationsvärme

Betongens härdning är en exotermisk process vilket genererar s k hydratationsvärme. Mätningarna startar med registrering av lufttemperaturen samt betongtemperaturerna i två s k semi-adiabater per recept , se figur 5.



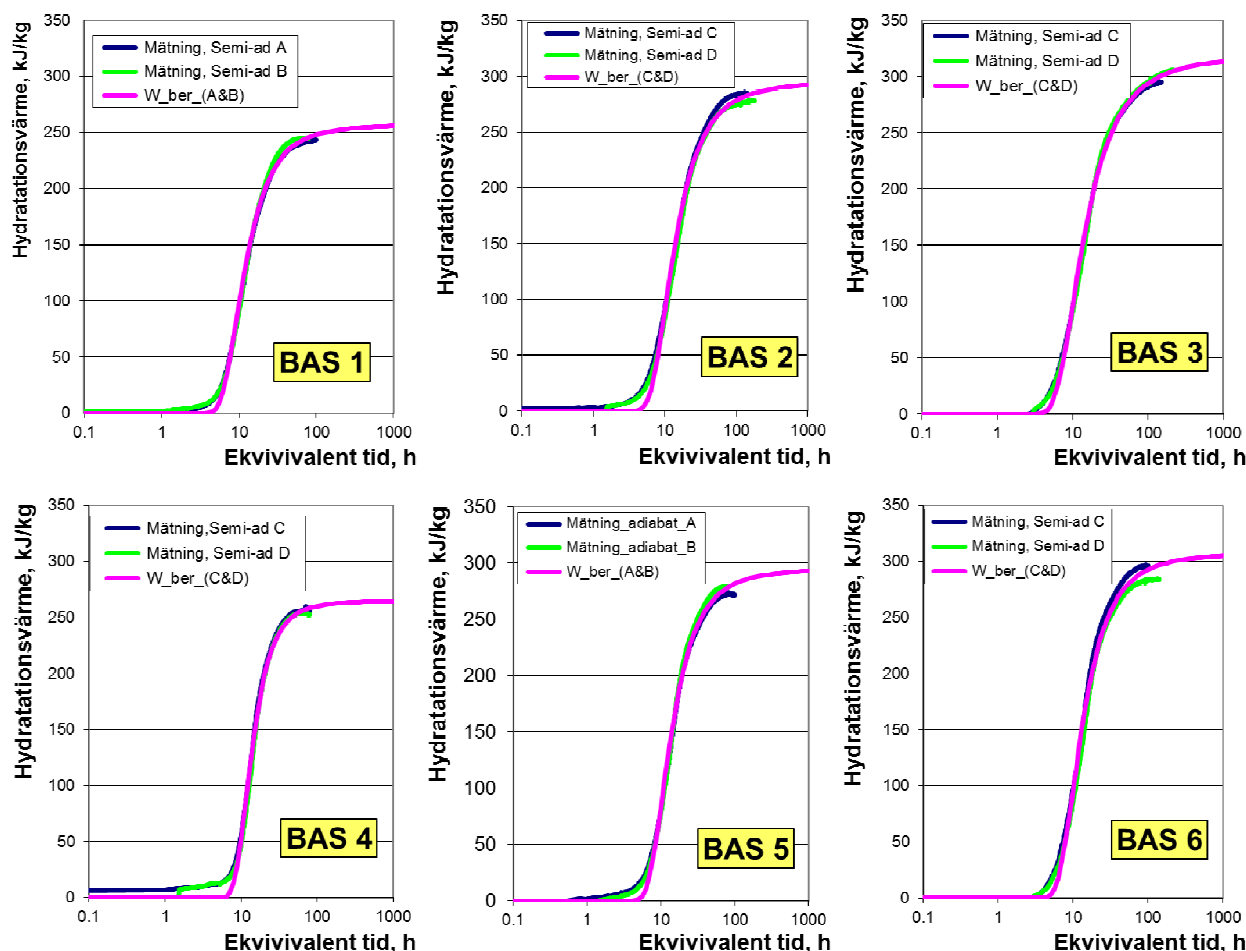
Figur 5. Mätning av betongtemperaturer i två s k semi-adiabater per recept. Adiabaterna grupperas två och två. Antingen A & B eller C & D.

Förutom det naturliga temperaturförloppet enligt Figur 5, mäts avsvlningsförloppet efter konstgjord uppvärmning av betongen, och ett s.k. avsvlningstal bestäms för varje enskild semi-adiabatmätning, se Figur 6. Anpassningarna i Figur 6 startar vid den temperatur som är markerad som T_{maxA} , T_{maxB} , T_{maxC} respektive T_{maxD} , vilka är strax över motsvarande maximala temperaturer i figur 5.



Figur 6. Bestämning av avsvainingstal för semi-adiabat A, B, C och D för recept 1-6.

Utifrån informationen redovisad i Figurerna 5 – 6 har betongens hydratationsvärme beräknats som funktion av ekvivalent tid, se figur 7.

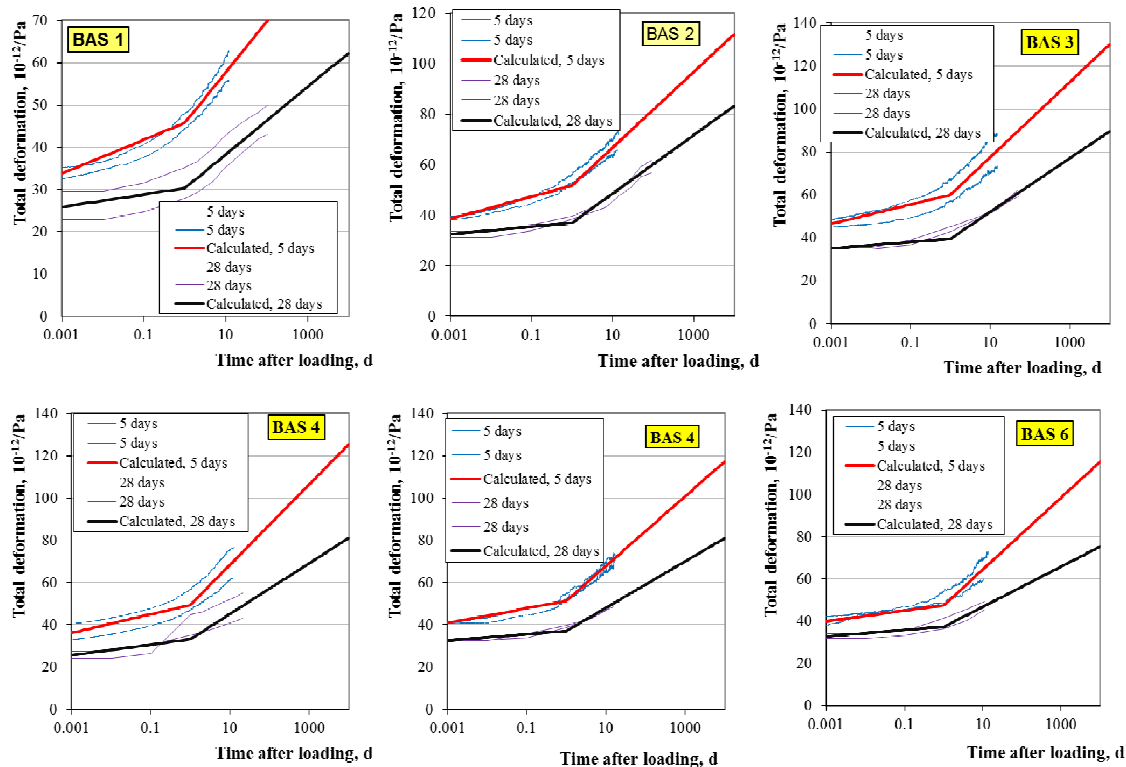


Figur 7. Bestämning av hydrationsvärme för recept 1-6.

Krypning

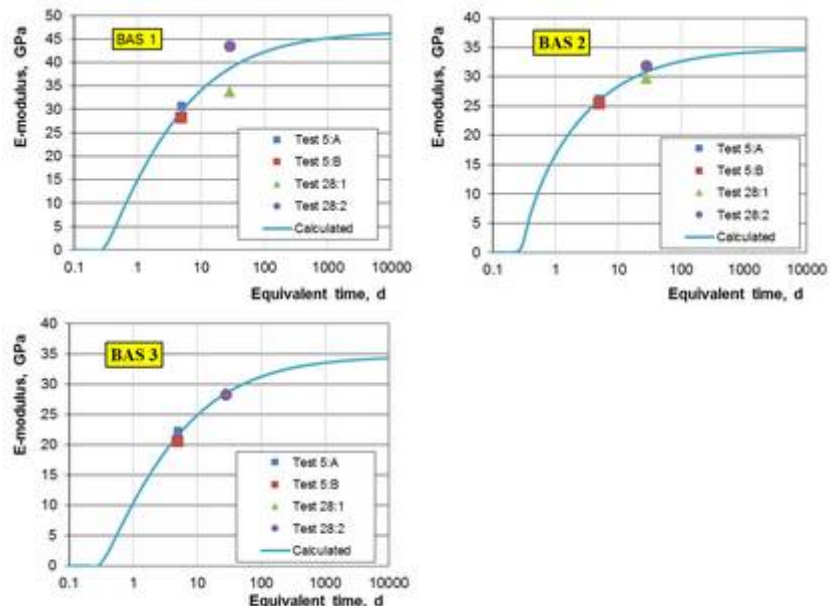
Krypförsök, dvs pålastning till viss last och därefter bibehållning av lasten, har utförts för belastningsåldrarna 5 d och 28 d för samtliga betonger. Belastningsåldern 5 d har genomförts i de sk ”hydraul”-riggarna genom att belasta ett hydraulsystem statiskt med pålagda stålplattor via en belastningsarm. Härigenom anses lasten på betongcylindrarna förbli konstant under försöksperioden. Försöken vid belastningsåldern 28 d har genomförts i de sk ”pinn”-riggarna, där lasten påförts genom att spänna fast provet med hjälp av låsningar till tre st gängade stålpinnar. Som mothåll används ett fjäderpaket, som anses bibehålla sin last trots att provkroppen deformeras. Vid behov kan lasten justeras under försökets gång genom kontroll av pålagd last mot en lastcell. Både för belastningsåldern 5 d och 28 d belastas en betongcylinder till en spänning som är ca 20 % av kubhållfastheten vid tiden för pålastning. Denna last anses tillräckligt låg för att studera sk linjär krypning, dvs att både den elastiska töjningen och den efterföljande kryptöjningen är proportionell mot pålagd spänning. Härigenom kan additionsprincipen tillämpas, vilket är en grund för de modeller som sedan kommer att tillämpas för spänningsberäkningarna.

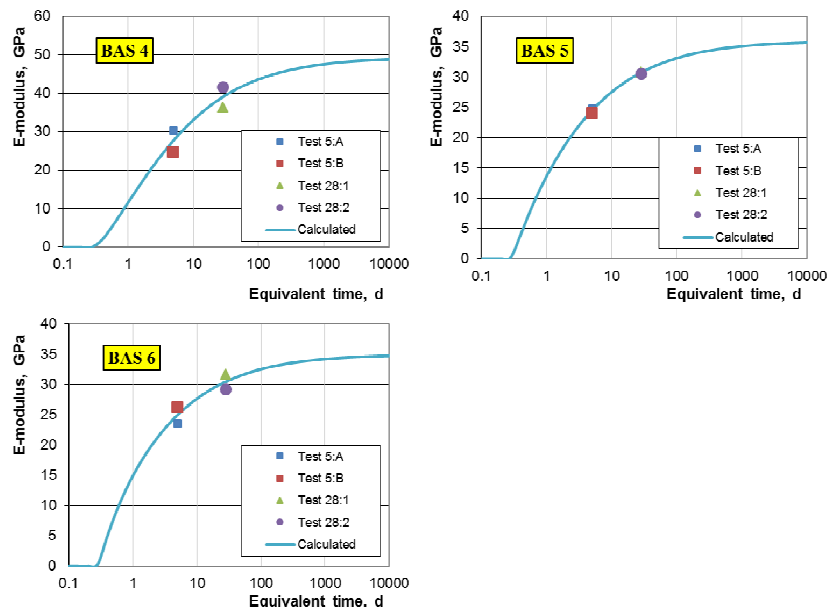
Uppmätta töjningar och anpassning mot resultaten med linjära krypkurvor i logaritmisk tidsskala visas i figur 8. Den ”elastiska” eller ”momentana” töjningen beskrivs med en effektiv elasticitetsmodul för belastningsvidden 0.001 d (ca 1 min 26 sek efter att erforderad last uppnåtts), och formellt betraktas töjningen efter denna tidpunkt som kryptöjning.



Figur 8. Anpassning av räta linjer i logaritmisk tidsskala till uppmätta kryptöjningar.

Den elastiska delen av töjningen beskrivs med en effektiv E-modul för belastningsvidden 0.001 d, och genomförda Anpassningar mot erhållna försöksresultat redovisas i figur 9.





Figur 9. Anpassning av E-modulutvecklingen för genomförda försök.

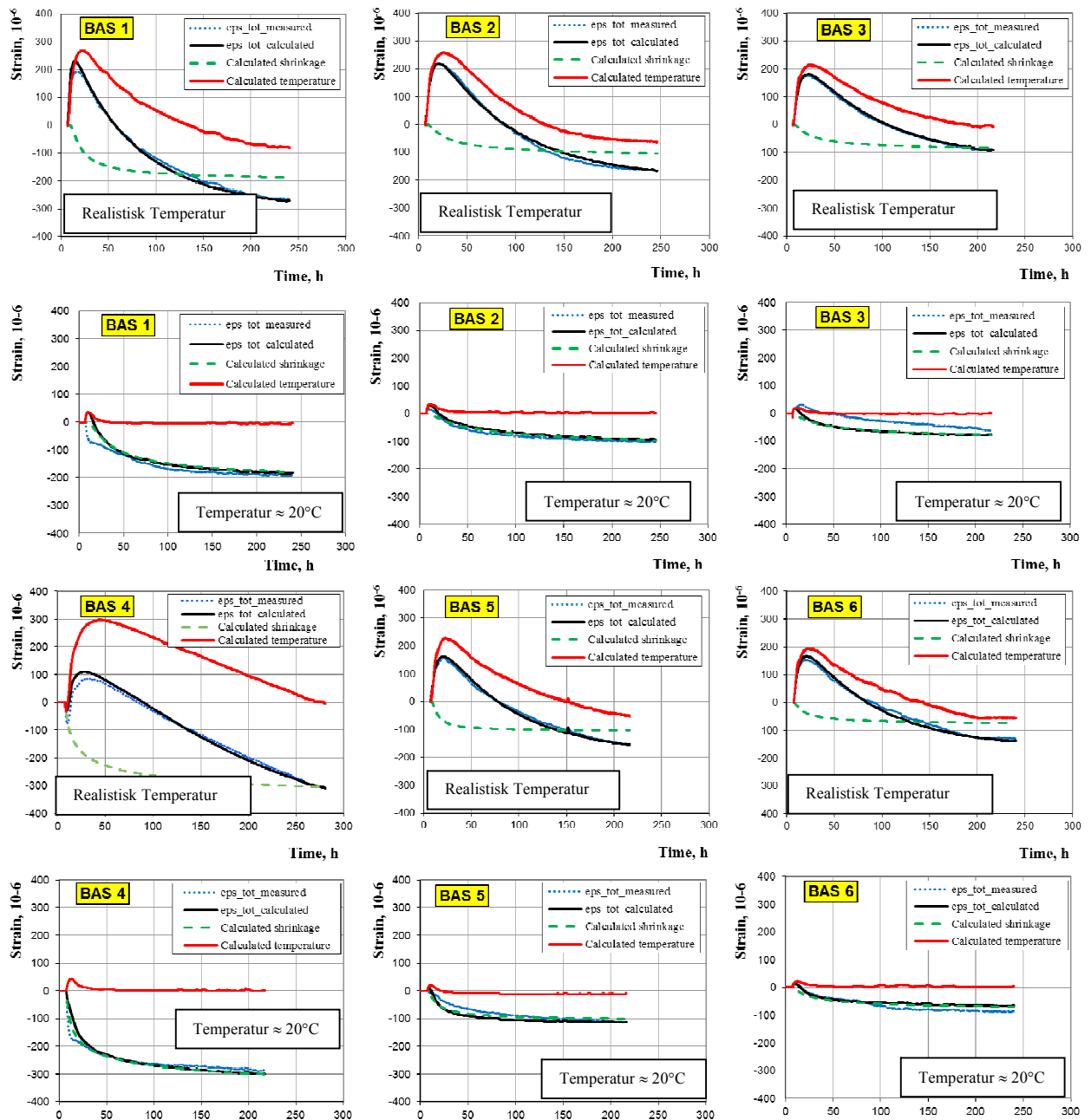
Utifrån anpassningarna enligt figur 8 och 9 kan generellt giltiga samband för totala töjningen konstrueras för godtycklig belastningsålder (t_0) och godtycklig belastningsvidd ($t-t_0$) med hjälp av metodiken i Larson (2003). Därefter beräknas ett s k relaxationsspektra med hjälp av datorprogrammet RELAX (Jonasson och Westman, 1999) för att skapa indata till programmet ConTeSt 5.1 för att beakta styvheten och krympningen vid beräkning av spänningar i härdande betong.

Frirörelse

Med frirörelse menas mätning en betongkroppens rörelse utan att någon yttre last anbringas på kroppen. Detta genomförs dels för en provkropp, som placeras fritt i laboratoriet (temperaturen blir ungefär konstant lika med lufttemperaturen i provrummet), dels för en provkropp som regleras till ett "realistiskt" temperaturförlopp. Det realistiska temperaturförloppet är ett beräknat temperaturförlopp som representerar medeltemperaturen för en 0,7 m vägg gjuten i en plywoodform och omgivande lufttemperatur lika med 20°C.

Vid utvärderingen av frirörelseförsöken görs en delning av uppmätt deformation i en temperaturberoende del (s k termisk dilatation) och en del som beskriver krympningen orsakad av betongens självtorkning. Den fuktberoende rörelsen kan benämnas autogen krympning eller baskrympning. Utvärderingstekniken finns detaljerat beskriven i Hedlund (2000).

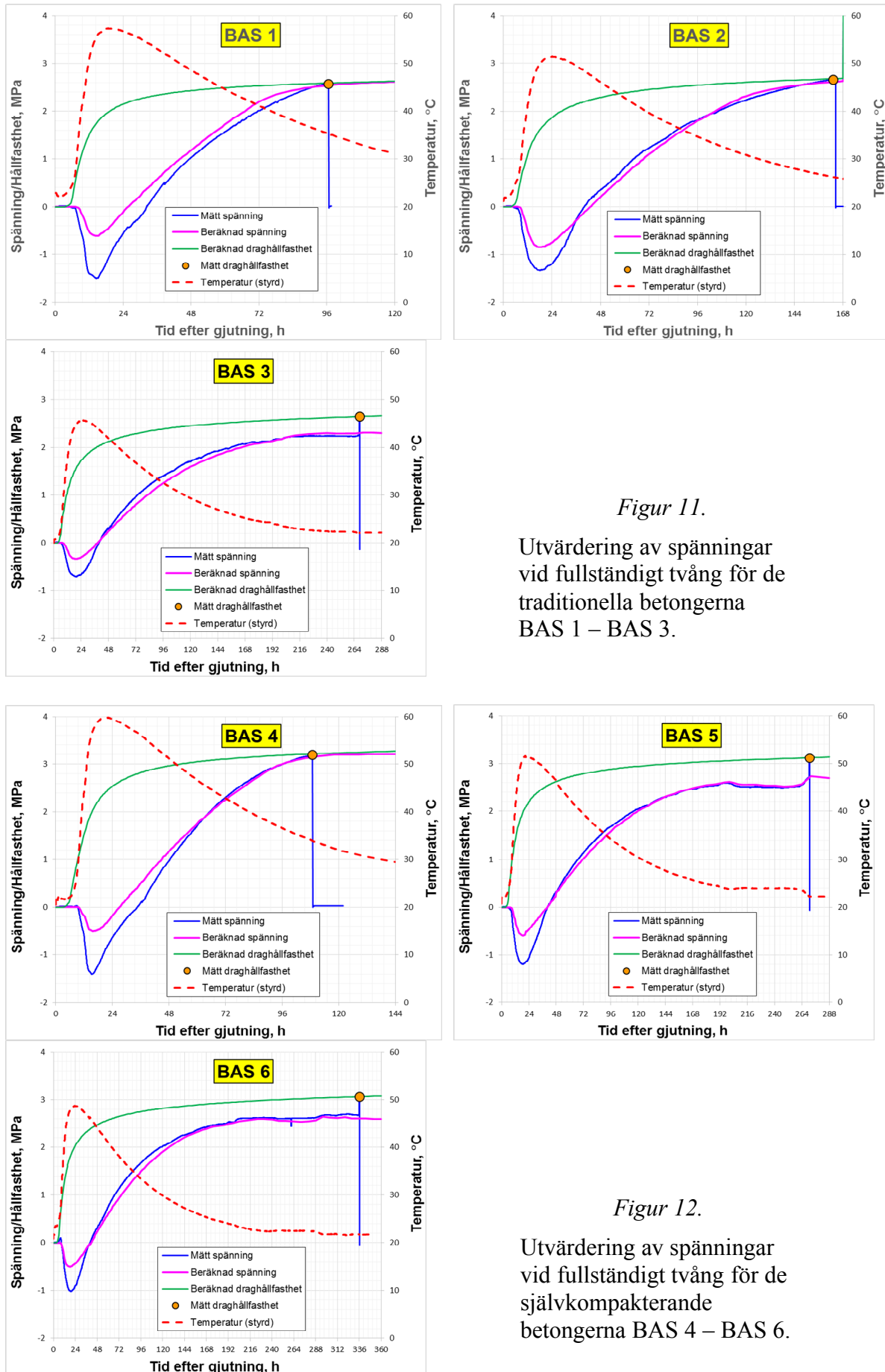
I figur 10 visas genomförda anpassningar till mätta frirörelser för samtliga betonger, och målsättningen med anpassningen är att den svarta kurvan ("eps_tot_calculated") ska "överensstämma" med den blå kurvan ("eps_tot_measured"). Kurvan betecknad "Calculated temperature" anger den anpassade termiska dilatationen, och kurva betecknad "Calculated shrinkage" anger den anpassade baskrympningen.



Figur 10. Anpassning av termisk töjning och baskrympning.

Spänning vid fullständigt tvång

Med en temperaturbelastning som motsvarar medeltemperaturen för en 0,7 m vägg mäts spänningen vid fullständigt tvång. Den svenska mätutrustningen utvecklades ursprungligen av Emborg (1989) och en senare version har modifierats av Westman (1999). Senare uppdateringar har omfattat moderniseringar av styr-, reglerings- och datainsamlingsystem med bibehållen provningsmetodik. Anpassningar av med ConTeSt 5.1 beräknade spänningsutvecklingar till registrerade förlopp för betongerna BAS 1 – BAS 6 visas i figur 11.



Figur 11.

Utvärdering av spänningar vid fullständigt tvång för de traditionella betongerna BAS 1 – BAS 3.

Figur 12.

Utvärdering av spänningar vid fullständigt tvång för de självkompakterande betongerna BAS 4 – BAS 6.

Av figur 11 och 12 framgår att de traditionella betongerna BAS 1 och BAS 2 samt den självkompakterande betongen BAS 4 gick till brott i spänningsriggen vid 100 % tvång. Övriga betonger, BAS 3, BAS 5 och BAS 6, drogs till brott efter att maximal spänning har passerats. Den i spänningsriggen registrerade dragbrotthållfastheten är i figurerna 11 och 12 markerad med en cirkelsymbol.

Vid anpassning mot de uppmätta spänningsförloppen har i några fall relaxationsspektrat justerats inom $\pm 10\%$. En liten justering av relaxationsspektrat motsvarar att elasticitetsmodulen ändras i motsvarande grad. Sådana ändringar i beräkningarna är motiverat av två skäl. Dels har de olika proverna, i detta fall två kryptester och mätningarna i spänningsriggen, genomförts efter separata blandningar av betongen, dels kan det ha förekommit en viss uttorkning av provkropparna som kryptestats. Det är välkänt att olika blandningar i de relativt små laboratorieblandningarna kan ge egenskapskillnader inom ca $\pm 10\%$, även om blandningsprocedurerna utförs med hög upprepbarhet. Om det har förekommit någon mindre uttorkning under krypprovningarna, innebär det att krypningen ökar något, vilket är liktydigt med att betongen får en skenbar lägre elasticitetsmodul. Provkroppen i spänningsriggen är totalförseglad mot utbyte av fukt med omgivningen. Dessa omständigheter kan innebära att betongen i spänningsriggen ibland kan ha en något annan styvhet än betongen som kryptestats.

Samtliga anpassningar i figurerna 11 och 12 har för låga tryckspänningar fram till ca 24 timmar efter gjutningen. Detta är inget ”okänt fel” utan en konsekvens av att de icke-elastiska deformationerna (temperaturrelaterade och baskrympning) inte beaktas fullt ut den allra första tiden efter gjutningen. Detta har införts i beräkningsmodellen för att undvika ”spikar” och beräkningskrascher i det tidiga skedet av analysen. Detta anses vara försumbart när det gäller anpassning mot brottet i spänningsriggen, som uppkommer ca fyra dagar eller senare efter gjutningen.

Erhållna modellparametrar

För beskrivning av egenskaperna redovisade i denna rapport redovisas ett antal parametrar för betongerna i Tabell 3 - 9. Bakomliggande ekvationer visas i kapitlet *Använda modellsamband* nedan.

Tabell 3. Parametrar för beskrivning av referenshållfastheten

Recept	t_S , h	t_A , h	n_A -	f_A , MPa	f_{cc28} , MPa	s , -	n_{cc28} , -
BAS 1	3,0	6,0	3	0,5	73,3	0,1432	0,5044
BAS 2	3,05	6,1	3	0,5	52,4	0,2583	0,4503
BAS 3	3,2	6,2	3	0,5	34,1	0,3427	0,3915
BAS 4	3,0	6,0	3	0,5	65,7	0,1144	0,5759
BAS 5	3,1	6,1	3	0,5	46,2	0,2268	0,4395
BAS 6	3,3	6,2	3	0,5	41,4	0,2698	0,4204

Tabell 4. Parametrar för beskrivning av mognadsförloppet

Recept	Θ_{ref} , K	κ_3 , -	$\Delta_{t_e}^0$, h	β_{Δ} , -
BAS 1	3700	0,4	0	1
BAS 2	3700	0,4	0	1
BAS 3	3700	0,4	0	1
BAS 4	3230	0,4	0	1
BAS 5	3230	0,4	0	1
BAS 6	3230	0,4	0	1

Tabell 5. Parametrar för hållfasthetstappet

Recept	Δ_{drop28}^{max} , -	$Temp_D$, °C	κ_{Temp} , -	$time_D$, h	κ_{time} , -
BAS 1	0,37	36	4	34	3
BAS 2	0,36	36	4	34	3
BAS 3	0,28	36	4	34	3
BAS 4	0,30	30	3	37	4
BAS 5	0,31	30	4	37	4
BAS 6	0,32	35	6	28	4

Tabell 6. Parametrar för värmeutveckling

Recept	W_u , J/kg	t_1 , h	κ_1 , -
BAS 1	257350	5,77700	3,08460
BAS 2	295979	6,43173	2,70532
BAS 3	319979	6,51676	2,39723
BAS 4	264581	7,00520	4,05254
BAS 5	295313	6,59001	2,97751
BAS 6	307714	6,28810	2,87369

Tabell 7. Parametrar för frirörelser

Recept	α_E , $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	α_C , $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	ε_{SH}^{ref} , 10^{-6}	t_{s0} , h	t_{s1} , h	η_{SH} , -
BAS 1	8,5	10,5	-210	8	30	0,85
BAS 2	9,0	11,0	-140	8	50	0,6
BAS 3	8,0	10,0	-120	8	40	0,5
BAS 4	8,0	10,0	-400	8	10	0,4
BAS 5	8,0	10,0	-110	8	10	0,8
BAS 6	8,0	10,0	-90	8	20	0,55

Tabell 8. Parametrar för elasticitetsmodul och krypning

Recept	E_{c28} , GPa	s_E , -	t_{bryt} , d	$a_1(5d)$, $10^{-12}/(\text{Pa}$ $^{10}\log\text{-enhet})$	$a_2(5d)$, $10^{-12}/(\text{Pa}$ $^{10}\log\text{-enhet})$	$a_1(28d)$, $10^{-12}/(\text{Pa}$ $^{10}\log\text{-enhet})$	$a_2(28d)$, $10^{-12}/(\text{Pa}$ $^{10}\log\text{-enhet})$
BAS 1	38,7	0,372	1,0	4,0	12,0	1,5	8,0
BAS 2	30,8	0,241	1,0	4,4	15,0	1,5	11,6
BAS 3	28,5	0,393	1,0	4,5	17,5	1,5	12,5
BAS 4	39,0	0,478	1,0	4,4	19,0	2,5	12,0
BAS 5	30,7	0,319	1,0	3,5	16,5	1,5	11,0
BAS 6	30,4	0,279	1,0	2,5	17,0	1,5	9,5

Tabell 9. Parametrar för draghållfasthet och spänningsberäkning

Recept	f_{ct}^{ref} , MPa	f_{cc}^{ref} , MPa	β_1 , -	α_{ct} , -	ρ_T , -	ρ_ϕ , -
BAS 1	2,80	73,3	0,667	0,85	0	0,85
BAS 2	2,90	52,4	0,667	0,85	0	0,30
BAS 3	2,80	34,1	0,667	0,90	0	0
BAS 4	3,45	65,7	0,667	0,90	0	0,85
BAS 5	3,25	46,2	0,667	0,75	0	0,90
BAS 6	3,17	41,4	0,667	0,75	0	0

Använda modellsamband

Tendenskurva vid 20°C

Utan justering med hänsyn till effekterna av förhöjd härdningstemperatur, redovisas hållfasthetsförloppet vid 20°C, vilket kan benämnas referenshållfasthet, se Fjellström (2013), beskriven av

$$f_{cc}^{ref} = \begin{cases} 0 & \text{för } 0 \leq t_{eT} < t_S \\ f_A \cdot \left(\frac{t_{eT} - t_S}{t_A - t_S} \right)^{n_A} & \text{för } t_S \leq t_{eT} < t_A \\ f_{cc28} \cdot \exp \left(s \cdot \left[1 - \left(\frac{672 - t^*}{t_e - t^*} \right)^{n_{cc28}} \right] \right) & \text{för } t_{eT} \geq t_A \end{cases} \quad (1a)$$

där f_A , t_S , t_A och n_A är anpassningsparametrar för betong i mycket tidig ålder, om sådana mätningar genomförs. Principiellt omfattar detta tiden mellan initieff och slutlig tillstyvnad, som kan vara av intresse för studier av glättningstider, Sådana mätningar har inte genomförts här, varför dessa parametrar har satts till logiskt rimliga värden. Detta kan senare kompletteras, om tilläggstester genomförs,

och

där f_{cc28} , s , n_{cc28} och t^* är anpassningsparametrar inom det område för härdande betong, där det genomförts hållfasthetsmätningar i detta projekt.

Tidsparametern t^* har ingen fysisk betydelse och beräknas enligt:

$$\text{Beräkna } \delta_c = \left(1 - \ln \frac{f_A}{f_{cc28}} \cdot \frac{1}{s} \right)^{n_{cc28}} \quad (1b)$$

$$\text{vilket ger } t^* = \frac{672 - \delta_c \cdot t_A}{1 - \delta_c} \quad (1c)$$

Mognadsåldern eller ekvivalent tid, t_{eT} , beräknas enligt

$$t_{eT} = \beta_\Delta \int_0^t \beta_T \cdot dt + \Delta_{te}^0 \quad (2)$$

$$\text{där } \beta_T = \exp\left(\Theta \left[\frac{1}{293} - \frac{1}{T + 273} \right]\right) \quad (3)$$

$$\text{och } \Theta = \Theta_{ref} \left(\frac{30}{T + 10} \right)^{\kappa_3} \quad (4)$$

där Θ_{ref} och κ_3 är mognadsparametrar, som bestämts med hjälp av mätta hållfastheter vid olika temperaturnivåer; Faktorena

Ekvivalenta tiden enligt ekvation 2 betecknas här med index "eT", eftersom endast temperaturen beaktas explicit för betongens härdning via temperaturfaktorn β_T , och en tekniskt riktigare benämning på mognadsåldern enligt ekvation 2 skulle vara "temperaturrelaterad mognadsålder" eller "temperaturekvivalent tid", men för enkelhetsskull använd i resten av denna rapport enbart "mognadsålder" respektive "ekvivalent tid". Detta förhållningssätt (med β_T benämnd "maturity function") är vedertaget internationellt för temperaturrelaterad härdning.

Hållfasthetstapp på grund av förhöjd härdningstemperatur

Den reducerade hållfastheten orsakad av förhöjd härdningstemperatur beskrivs av

$$f_{cc} = f_{cc}^{ref} - \gamma_{drop} \cdot \Delta_{drop28}^{\max} \cdot f_{cc28} \quad \text{för alla } t_{eT} \geq 0 \quad (5)$$

där Δ_{drop28}^{\max} = maximalt hållfasthetstapp vid $t_e = 28d$, vilket motsvara mycket höga härdningstemperaturer, i relation till f_{28d} , en parameter som bestäms vid anpassning mot försök,

$\gamma_{drop} \{0,1\}$ = faktor som tar hänsyn till temperaturnivån under härdningen

Tekniken att beskriva hållfasthetstappet enligt ekvation 5 baseras på följande karakteristiska observationer

- 1) Hållfasthetstappet startar vid någon minsta temperatur, funktionen γ_{Temp} .
- 2) Höga temperaturer påverkar hållfasthetstappet först efter viss tid, funktionen γ_{time} .

Den tredje effekten bygger på antagandet att

- 3) Hållfasthetstappet beror på (skenbara) hydratationshastigheten ($d\alpha^*/dt_e$) vilket motsvarar bildad mängd hydratationsprodukter per tidsenhet, vilket är rimligt ur ett materialtekniskt synsätt.

Lämpliga funktioner att beakta dessa tre fenomen är

$$\gamma_{drop} = \frac{\delta_{drop}}{\delta_{ref}} \quad (6)$$

med

$$\delta_{drop} = \int_0^{t_e} \gamma_{Temp} \cdot \gamma_{time} \cdot \frac{d\alpha^*}{dt_{eT}} \cdot dt_{eT} \quad (7)$$

och

$$\delta_{ref} = \int_0^{672h} \gamma_{time} \cdot \frac{d\alpha^*}{dt_{eT}} \cdot dt_{eT} \quad (8)$$

Funktionen som beaktar temperaturnivån, γ_{Temp} , formuleras enligt

$$\gamma_{Temp} = \exp\left(-\left[\frac{T}{Temp_D}\right]^{-\kappa_{Temp}}\right) \quad (9)$$

och funktionen som beaktar tidsförloppet, γ_{time} , enligt

$$\gamma_{time} = \exp\left(-\left[\frac{t_e}{time_D}\right]^{-\kappa_{time}}\right) \quad (10)$$

Den beräknade skenbara hydratationshastigheten sker genom tidsderivering av hydratationsgraden formulerad enligt

$$\alpha^* = \exp\left(-\left[\ln\left(1 + \frac{t_{eT}}{t_1}\right)\right]^{-\kappa_1}\right) \quad \text{och} \quad \alpha = \alpha^* \cdot \alpha_u \quad (11)$$

och dess tidsderivata blir

$$\frac{d\alpha^*}{dt_{eT}} = \frac{\alpha^*}{t_1 + t_{eT}} \cdot \kappa_1 \cdot \left[\ln\left(1 + \frac{t_{eT}}{t_1}\right)\right]^{-(\kappa_1+1)} \quad (12)$$

där α^* = skenbar hydratationsgrad; α = hydratationsgrad; α_u = hydratationsgrad efter ”oändlig tid”.

Betongens värmeutveckling

Betongens värmeutveckling under hydratationen, se Jonasson (1984), beskrivs av

$$Q = W_u \cdot \alpha^* \cdot C \quad (13)$$

där Q = utvecklad värme i betongen per volymsenhet; W_u = utvecklad värme efter ”oändlig” tid per cementmängd; C = cementhalt; α^* = skenbar hydratationsgrad, se ekvation 11.

Frirörelser

För en temperaturbelastning som motsvarar en 0.7m vägg mäts deformationerna för provkroppen, och de rörelser man utvärderar är justerade med hänsyn till deformationsgivarnas egen rörelse vid variabel temperatur. Dessutom mäts rörelsen för en nära konstant temperatur. Med nära konstant temperatur avses att det aldrig går att undvika en mindre temperaturhöjning i en betongkropp av realistisk storlek på grund av den egenvärme som bildas. På detta sätt får man en uppfattning om rörelsen både vid nära konstant temperatur och för en temperaturvåg som liknar vad som sker i en verklig konstruktion.

Vid utvärderingen av frirörelseförsöken fås en bestämning av både den fria temperaturrörelsen och den autogena deformationen (sk baskrympning), dvs den krympning som sker inne i en konstruktion på grund av självtorkningen. Utvärderingstekniken finns detaljerat beskriven i Hedlund (2000).

Den icke-elastiska töjningen vid variabel temperatur (temperaturrörelsekoefficienter) beskrivs av

$$\frac{\partial \varepsilon_T^o}{\partial t} = \alpha_T \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (14)$$

$$\text{Med } \alpha_T = \begin{cases} \alpha_E & \text{för } \frac{\partial T}{\partial t} \geq 0 \\ \alpha_C & \text{för } \frac{\partial T}{\partial t} < 0 \end{cases} \quad (15)$$

där T = betongens temperatur; t = realtid; ε_T^o = betongens temperaturrörelse; α_E = betongens temperaturutvidgningskoefficient; α_C = betongens temperaturkontraktionskoefficient.

Den autogena krympningen, ε_{SH}^o , beskrivs av

$$\varepsilon_{SH}^o = \exp\left(-\left[\frac{t_{s1}}{t_e - t_{s0}}\right]^{\eta_{SH}}\right) \cdot \varepsilon_{SH}^{ref} \quad \text{för } t_e > t_{s0} \quad (16)$$

där ε_{SH}^{ref} , t_{s0} , t_{s1} och η_{SH} är anpassningsparametrar.

Krypning

Begreppet krypning definieras som den deformationsökning med tiden som sker för en belastad betongkropp. Krypning sker för både tryck-och dragbelastad betong. Utifrån ett tekniskt perspektiv är det vanligt att definiera elastisk och tidsberoende deformation för betong enligt ekvation 17:

$$\varepsilon_c(t, t_0) = \varepsilon_{c0}(t_0) + \varepsilon_{cc}(t, t_0) = \frac{\sigma_c(t_0)}{E_c(t_0)} \cdot (1 + \varphi(t, t_0)) \quad (17)$$

där t = tiden (betongåldern) då töjningen studeras; t_0 = tiden (betongåldern) då pålastningen sker; ε_c = betongens totala töjning; ε_{c0} = betongens elastiska ("momentana") töjning; ε_{cc} = betongens kryptöjning; σ_c = pålagd betongspänning; E_c = betongens elasticitetsmodul; $\varphi(t, t_0)$ = betongens kryptal.]

Ett alternativt sätt att beskriva totala töjningen är att ange töjning per pålagd spänningenshet, vilket definieras som kompliansen, J [Pa^{-1}], enligt ekvation 18:

$$J_c(t, t_0) = \varepsilon_c(t, t_0) / \sigma_c(t_0) = J_{c0}(t_0) + J_{cc}(t, t_0) \quad (18a)$$

med

$$J_{c0}(t_0) = 1 / E_c(t_0) \quad (18b)$$

Ekvation 2 är praktisk att använda då man har sk linjär krypning, vilket innebär att både elastiska töjningen och kryptöjningen är linjärt beroende av pålagd spänning. För studierna av ung betong används formellt kompliansen definierad enligt ekvation 18 genom att försöken

utvärderas med en effektiv E-modul för belastningsvidden = $t-t_0 = 0,001$ d med följande samband:

$$E_c(t_0) = \begin{cases} 0 & \text{för } t_{eT} \leq t_S \\ 1 / J(t_0 + 0,001, t_0) = E_{c28} \cdot \exp\left(s_E \cdot \left(1 - \sqrt{(28 - t_S) / (t_{eT} - t_S)}\right)\right) & \text{för } t_{eT} > t_S \end{cases} \quad (19)$$

där $t_0 = t_{eT}$, då tidsskalan för momentandeformation och krypning är relaterad till ekvivalent tid.

Med känd E-modul beräknas totala deformationen (kompliansen) som ”elastisk” deformation och en (för $t - t_0 \leq t_{bryt}$) eller två (för $t - t_0 > t_{bryt}$) räta linjer i logaritmisk tidsskala beroende av belastningsvidden $t - t_0$ (Larson, 2003) enligt:

$$J_c(t, t_0) = \begin{cases} 1 / E_c(t_0) + a_1 \cdot {}^{10} \log((t - t_0) / 0.001) & \text{för } 0,001 \text{ d} \leq t - t_0 \leq t_{bryt} \\ 1 / E_c(t_0) + a_1 \cdot {}^{10} \log(t_{bryt} / 0.001) + a_2 \cdot {}^{10} \log((t - t_0) / t_{bryt}) & \text{för } t - t_0 > t_{bryt} \end{cases} \quad (20)$$

Spänning vid fullständigt tvång

Beräkningarna vid anpassning mot resultaten från spänningsriggen kan formellt ske i en punkt, eftersom provkroppen anses ha ett homogent tillstånd över sin tvärsnittsytta. Spänningsberäkningen sker som stegräkning i tid, och för beräkning från tiden = t_i till tiden t_{i+1} kan spänningsändringen från σ_i till σ_{i+1} direkt uttryckas av den konstitutiva ekvationen enligt:

$$\sigma_{i+1} = \sigma_i + \Delta\sigma_{i+1} \quad (21a)$$

med

$$\Delta\sigma_{i+1} = E_{i+1}^{tot} \cdot (\Delta\varepsilon_{m,i+1} - \Delta\varepsilon_{i+1}^0) \quad (21b)$$

där E_{i+1}^{tot} = totalt fiktiv elasticitetsmodul inklusive krypning under tidssteget samt tillämpning av icke-linjär arbetskurva enligt figur 13,

$\Delta\varepsilon_{m,i+1}$ =ändring av spänningsrelaterad ”material”-töjning under tidssteget,

$\Delta\varepsilon_{i+1}^0$ = total icke-elastisk deformation under tidssteget, se ekvation 24.

Den fiktiva E-modulen beskrivs av

$$E_{i+1}^{tot} = E_{cc,i+1} \cdot (1 + \gamma_d) \quad (22)$$

där $E_{cc,i+1}$ = effektiva E-modulen inklusive krypeffekter beräknad ur det s k relaxationspektrat (Jonasson och Westman, 1999)

γ_d = korrektionsfaktor för icke-linjär tillämning av betongens arbetskurva, se figur 13.

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

$$\gamma_d = \exp\left(-\left(\frac{\varepsilon_{m,i+1}}{\varepsilon_0} - \alpha_{ct}\right) / (1 - \alpha_{ct})\right) - 1 \quad (23)$$

där $\varepsilon_{m,i+1}$ = medelvärde av spänningsrelaterad ”material”-töjningen under tidssteget,

$\varepsilon_0 = f_{ct} / E_{cc,i+1}$ = töjningen där en tänkt rak arbetskurva uppnår draghållfastheten,

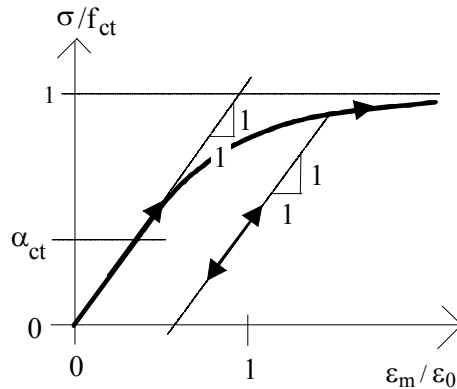
f_{ct} = betongens draghållfasthet,

α_{ct} = gränsen för den linjära arbetskurvan för betongen, se figur 13.

För alla andra fall av belastningsändringar gäller

$$\gamma_d = 0 \quad (24)$$

vilket är liktydigt med "lutningen = 1" i figur 13.



Figur 13. Antaget spännings-töjnings-samband (s k arbetskurva) för betong

Betongens draghållfasthet, f_{ct} , relateras till tryckhållfastheten enligt

$$f_{ct} = (f_{cc} / f_{cc}^{ref})^{\beta_1} \cdot f_{ct}^{ref} \quad (25)$$

där f_{cc} = aktuell tryckhållfasthet; f_{cc}^{ref} , f_{ct}^{ref} och β_1 är anpassningsparametrar.

Den totala icke-elastiska deformationen under tidssteget, se $\Delta\varepsilon_{i+1}^0$ i ekvation 24, uttrycks av

$$\Delta\varepsilon_{i+1}^0 = \Delta\varepsilon_{rel} + \Delta\varepsilon_T + \Delta\varepsilon_{SH} \quad (26)$$

där $\Delta\varepsilon_{rel}$ = formell icke-linjär töjningsändring beräknad ur betongens relaxation under tidssteget,

$\Delta\varepsilon_T$ = töjningsändring av temperaturändring under tidssteget, se ekvation 14 och 15

$\Delta\varepsilon_{SH}$ = krympningsändring under tidssteget, se ekvation 16

För att ha möjlighet att beakta s k "spänningsinducerade" deformationer (Bažant och Chern, 1985 och Jonasson, 1994) kan spänningsberoende temperatur- och fuktrelaterade fritöjningar behöva justeras enligt

$$\Delta\varepsilon_T = \Delta\varepsilon_T^0 \cdot (1 + \rho_T \cdot \frac{\sigma}{f_{ct}} \cdot \text{sign}(\Delta T)) \quad (27)$$

$$\Delta\varepsilon_{SH} = \Delta\varepsilon_{SH}^0 \cdot (1 + \rho_\varphi \cdot \frac{\sigma}{f_{ct}} \cdot \text{sign}(\Delta T)) \quad (28)$$

där ρ_T och ρ_φ är anpassningsparametrar. $\rho_T = 0$ och $\rho_\varphi = 0$ utan justering av spänningsberoende frirörelser.

Referenser

Bažant Z P and Chern J (1985) *Concrete Creep at Variable Humidity – Constitutive Law and Mechanisms*, Materials and Structures, Vol 18, pp 1-20.

Emborg M (1989) *Thermal Stresses in Concrete Structures at Early Ages*, Luleå University of Technology, Doctoral Thesis 1989:73D.

Fjellström P (2013) *Measurement and Modelling of Young Concrete Properties*, Luleå University of Technology, Licentiate Thesis.

Hedlund H (2000) *Hardening Concrete – Measurements and Evaluation of Non-Elastic Deformation and Associated Restraint Stresses*, Luleå University of Technology, Doctoral Thesis 2000:25.

Jonasson J-E (1984) *Slipform construction – calculations for assessing protection against early freezing*, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Fo/Research 4:84, Stockholm.

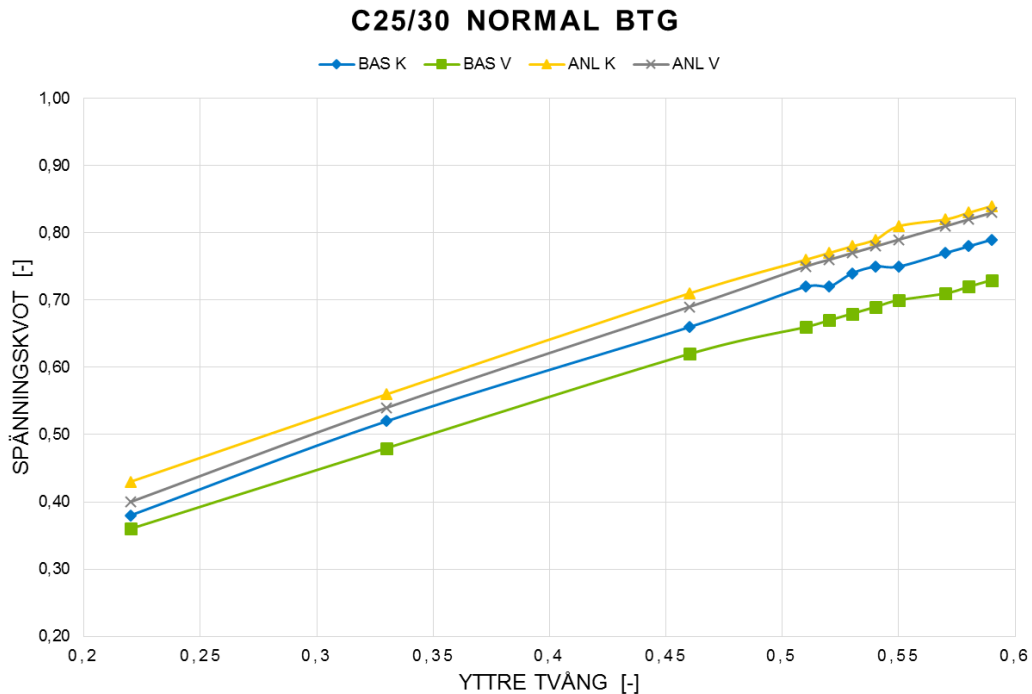
Jonasson J-E (1994) *Modelling of Temperature, Moisture and Stresses in Young Concrete*, Division of Structural Engineering, Luleå University of Technology, Doctoral Thesis 1994:153D.

Jonasson J-E and Westman G (1999) *Conversion of Creep Data to Relaxation Data by the Program RELAX*, Luleå University of Technology, IPACS Document TG 3.2/1.

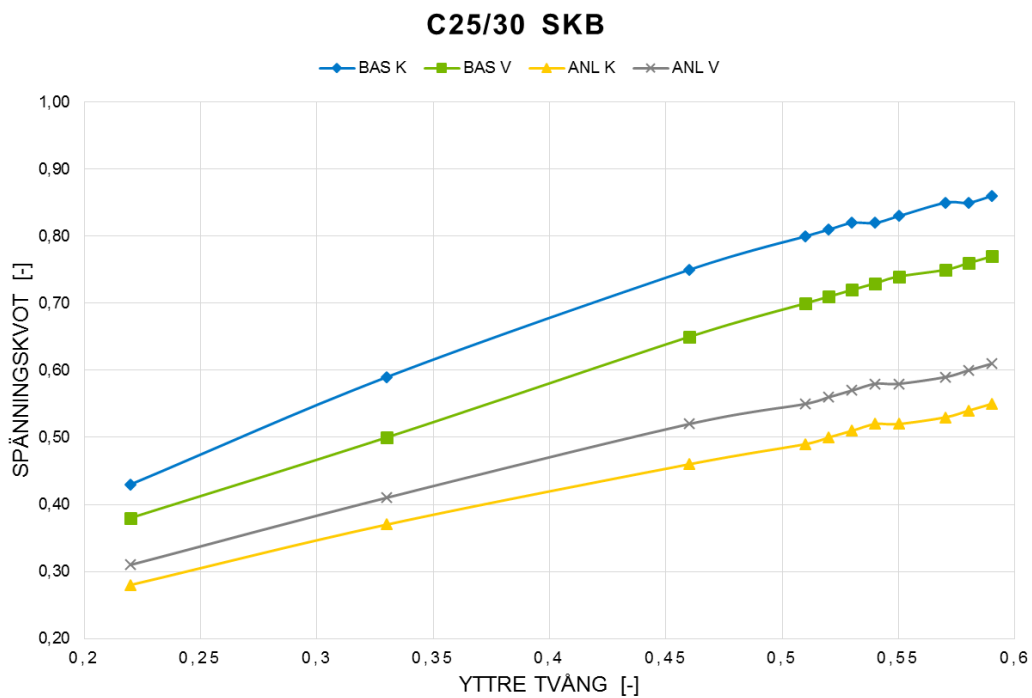
Larson M (2003) *Thermal Crack Estimation in Early Age Concrete – Models and Methods for Practical Application*, Division of Structural Engineering, Luleå University of Technology, Doctoral Thesis 2003:20.

Westman G (1999) *Concrete Creep and Thermal Stresses – New Creep Models and Their Effects on Stress Developments*, Luleå University of Technology, Doctoral Thesis 1999:10.

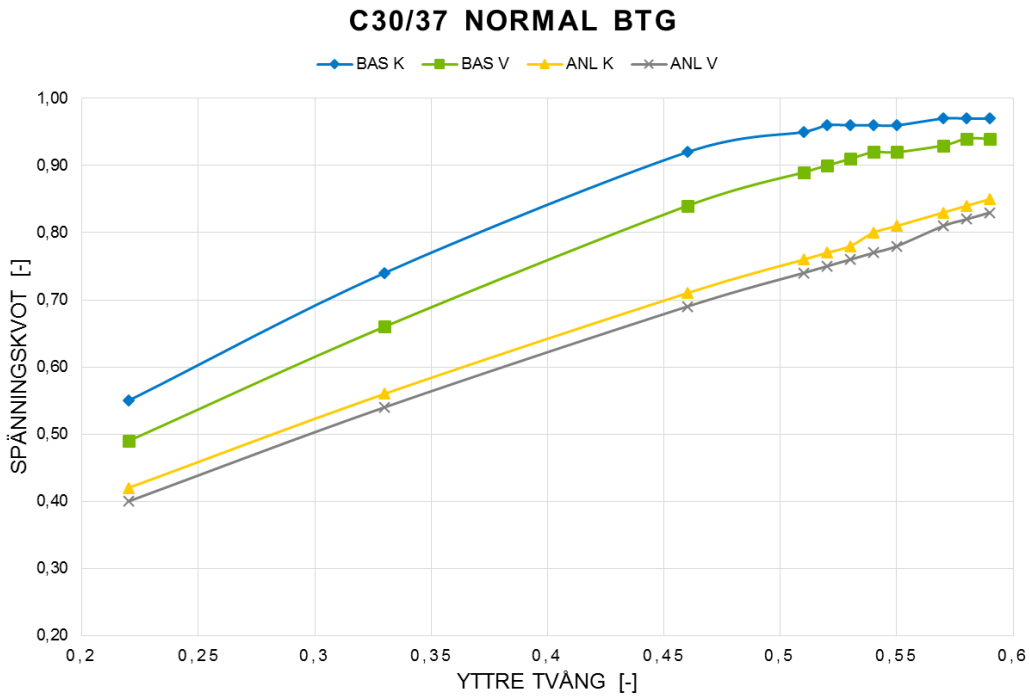
Bilaga B: Beräknad spänningskvot vid olika tvång för betong innehållande Bascement resp. Anläggningscement



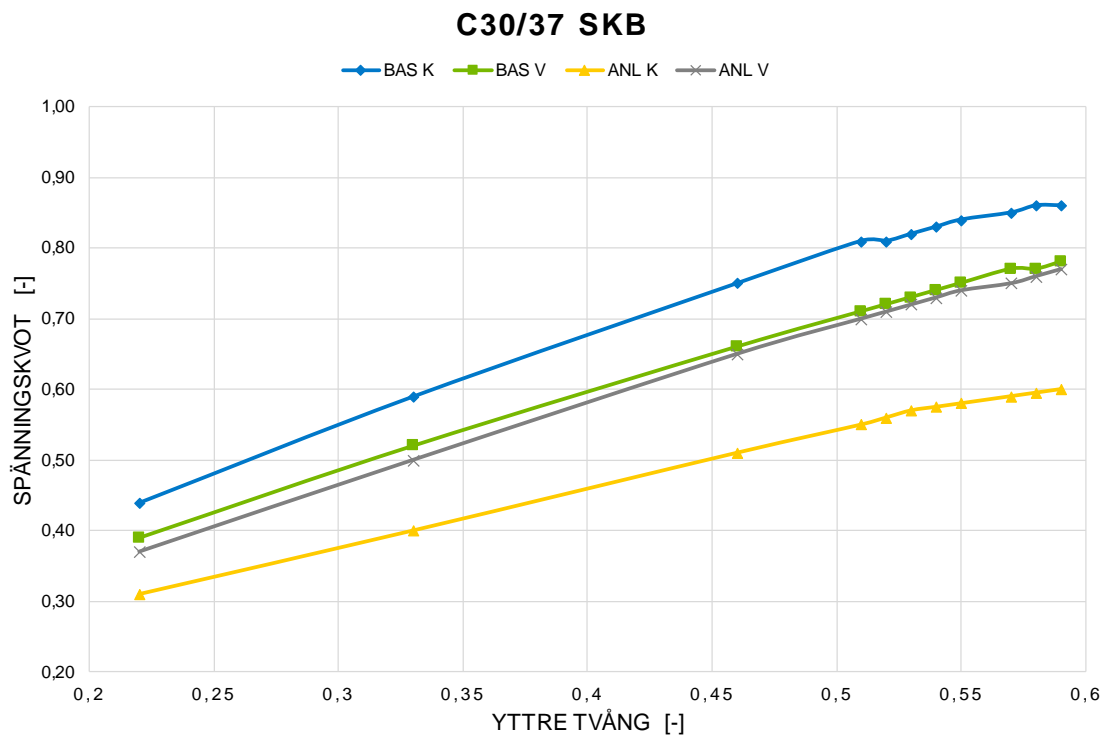
Figur B1: Beräknad spänningskvot för väggar gjutna med konventionell betong (C25/30) i förhållande till yttre tvång beroende av motgjutningslängd.



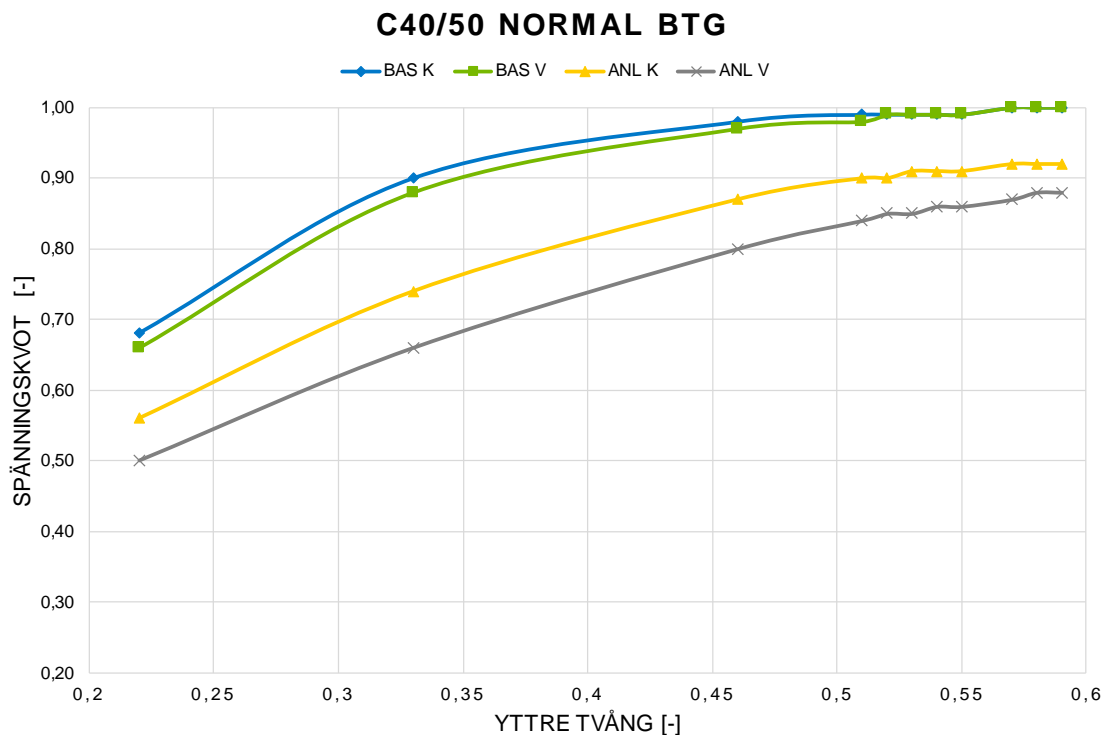
Figur B2: Beräknad spänningskvot för väggar gjutna med självkompakterande betong (C25/30) i förhållande till yttre tvång beroende av motgjutningslängd.



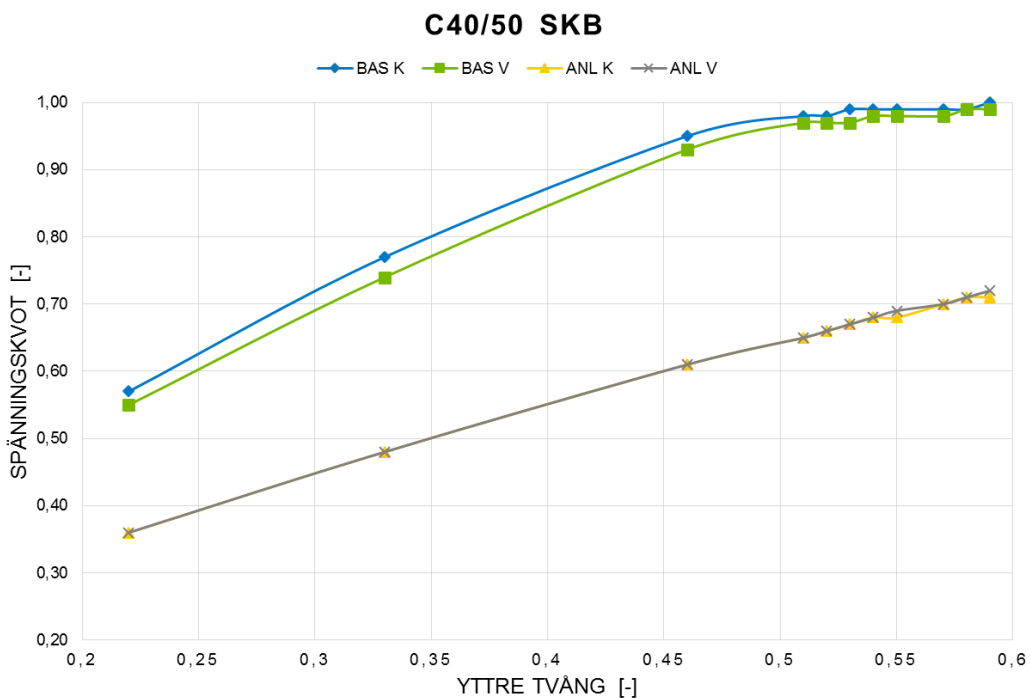
Figur B3: Beräknad spänningskvot för väggar gjutna med konventionell betong (C30/37) i förhållande till yttre tvång beroende av motgjutningslängd.



Figur B4: Beräknad spänningskvot för väggar gjutna med självkompakterande betong (C30/37) i förhållande till yttre tvång beroende av motgjutningslängd.



Figur B5: Beräknad spänningskvot för väggar gjutna med konventionell betong (C40/50) i förhållande till yttre tvång beroende av motgjutningslängd.



Figur B6: Beräknad spänningskvot för väggar gjutna med självkompakterande betong (C40/50) i förhållande till yttre tvång beroende av motgjutningslängd.

Bilaga C: Beräknat kylbehov vid olika max tillåtna spänningskvoter för betong innehållande Bascement resp. Anläggningscement

Kylbehovet i nedanstående tabeller avser ett vinterfall i Stockholm enligt förutsättningar i avsnitt 4.1. Kylbehovet anges som meter kylrör / kubikmeter betong [m rör/m³ btg].

Konventionell betong C40/50 med Bascement

Motgjutningslängd [m]	Tvång [-]	Kylbehov vid max tillåten spänningskvot			
		0,80	0,75	0,70	0,65
4	0,33	0,9	1,2	1,6	1,8
6	0,46	2,2	2,7	3,3	4,2
8	0,51	2,9	3,5	3,8	4,7
18	0,55	3,3	3,8	4,8	6,2
30	0,59	3,8	3,9	4,9	6,4

Tabell C1: Beräknat kylbehov för vägg gjuten med konventionell betong innehållande Bascement (C40/50) vid olika motgjutningslängder vid max tillåten spänningskvot 0.65-0.80.

Konventionell betong C40/50 med Anläggningscement

Motgjutningslängd [m]	Tvång [-]	Kylbehov vid max tillåten spänningskvot			
		0,80	0,75	0,70	0,65
4	0,33	-	-	0,6	0,8
6	0,46	0,8	1,2	1,7	2,2
8	0,51	1,2	1,6	2,4	2,9
18	0,55	1,4	2,1	2,9	3,6
30	0,59	1,7	2,6	3,5	4,5

Tabell C2: Beräknat kylbehov för vägg gjuten med konventionell betong innehållande Anläggningscement (C40/50) vid olika motgjutningslängder vid max tillåten spänningskvot 0.65-0.80.

Konventionell betong C30/37 med Bascement

Motgjutningslängd [m]	Tvång [-]	Kylbehov vid max tillåten spänningskvot			
		0,80	0,75	0,70	0,65
4	0,33	-	-	0,7	1,0
6	0,46	1,1	1,5	2,1	2,5
8	0,51	1,6	2,2	2,7	3,4
18	0,55	2,2	2,8	3,4	4,3
30	0,59	2,7	2,9	3,6	4,5

Tabell C3: Beräknat kylbehov för vägg gjuten med konventionell betong innehållande Bascement (C30/37) vid olika motgjutningslängder vid max tillåten spänningskvot 0.65-0.80.

Konventionell betong C30/37 med Anläggningscement

Motgjutningslängd [m]	Tvång [-]	Kylbehov vid max tillåten spänningskvot			
		0,80	0,75	0,70	0,65
4	0,33	-	-	-	-
6	0,46	-	-	0,4	0,6
8	0,51	-	0,4	0,7	0,9
18	0,55	0,4	0,6	0,9	1,2
30	0,59	0,5	0,7	1,1	1,6

Tabell C4: Beräknat kylbehov för vägg gjuten med konventionell betong innehållande Anläggningscement (C30/37) vid olika motgjutningslängder vid max tillåten spänningskvot 0.65-0.80.

Konventionell betong C25/30 med Bascement

Motgjutningslängd [m]	Tvång [-]	Kylbehov vid max tillåten spänningskvot			
		0,80	0,75	0,70	0,65
4	0,33	-	-	-	-
6	0,46	-	-	-	0,5
8	0,51	-	-	0,5	0,7
18	0,55	-	-	0,7	1,0
30	0,59	-	0,6	0,9	1,3

Tabell C5: Beräknat kylbehov för vägg gjuten med konventionell betong innehållande Bascement (C25/30) vid olika motgjutningslängder vid max tillåten spänningskvot 0.65-0.80.

Konventionell betong C25/30 med Anläggningscement

Motgjutningslängd [m]	Tvång [-]	Kylbehov vid max tillåten spänningskvot			
		0,80	0,75	0,70	0,65
4	0,33	-	-	-	-
6	0,46	-	-	0,4	0,5
8	0,51	-	0,3	0,6	0,8
18	0,55	-	0,5	0,7	1,1
30	0,59	0,4	0,6	0,9	1,3

Tabell C6: Beräknat kylbehov för vägg gjuten med konventionell betong innehållande Anläggningscement (C25/30) vid olika motgjutningslängder vid max tillåten spänningskvot 0.65-0.80.

Självkompakterande betong C40/50 med Bascement

Motgjutningslängd [m]	Tvång [-]	Kylbehov vid max tillåten spänningskvot			
		0,80	0,75	0,70	0,65
4	0,33	-	0,5	0,8	1,0
6	0,46	1,2	1,6	2,1	2,6
8	0,51	1,7	2,0	2,8	3,5
18	0,55	2,1	2,5	3,0	3,7
30	0,59	2,5	3,0	3,7	4,7

Tabell C7: Beräknat kylbehov för vägg gjuten med självkompakterande betong innehållande Bascement (C40/50) vid olika motgjutningslängder vid max tillåten spänningskvot 0.65-0.80.

Självkompakterande betong C40/50 med Anläggningscement

Motgjutningslängd [m]	Tvång [-]	Kylbehov vid max tillåten spänningskvot			
		0,80	0,75	0,70	0,65
4	0,33	-	-	-	-
6	0,46	-	-	-	-
8	0,51	-	-	-	-
18	0,55	-	-	-	0,5
30	0,59	-	-	0,4	0,7

Tabell C8: Beräknat kylbehov för vägg gjuten med självkompakterande betong innehållande Anläggningscement (C40/50) vid olika motgjutningslängder vid max tillåten spänningskvot 0.65-0.80.

Självkompakterande betong C30/37 med Bascement

Motgjutningslängd [m]	Tvång [-]	Kylbehov vid max tillåten spänningskvot			
		0,80	0,75	0,70	0,65
4	0,33	-	-	-	-
6	0,46	-	-	0,8	1,1
8	0,51	0,4	0,7	1,1	1,6
18	0,55	0,7	1,0	1,4	2,0
30	0,59	0,9	1,2	1,7	2,3

Tabell C7: Beräknat kylbehov för vägg gjuten med självkompakterande betong innehållande Bascement (C30/37) vid olika motgjutningslängder vid max tillåten spänningskvot 0.65-0.80.

Självkompakterande betong C30/37 med Anläggningscement

Motgjutningslängd [m]	Tvång [-]	Kylbehov vid max tillåten spänningskvot			
		0,80	0,75	0,70	0,65
4	0,33	-	-	-	-
6	0,46	-	-	-	-
8	0,51	-	-	-	-
18	0,55	-	-	-	-
30	0,59	-	-	-	-

Tabell C8: Beräknat kylbehov för vägg gjuten med självkompakterande betong innehållande Anläggningscement (C30/37) vid olika motgjutningslängder vid max tillåten spänningskvot 0.65-0.80.

Självkompakterande betong C25/30 med Bascement

Motgjutningslängd [m]	Tvång [-]	Kylbehov vid max tillåten spänningskvot			
		0,80	0,75	0,70	0,65
4	0,33	-	-	-	-
6	0,46	-	-	0,7	1,1
8	0,51	-	0,7	1,1	1,6
18	0,55	0,6	1,0	1,4	1,9
30	0,59	0,9	1,2	1,7	2,3

Tabell C9: Beräknat kylbehov för vägg gjuten med självkompakterande betong innehållande Bascement (C25/30) vid olika motgjutningslängder vid max tillåten spänningskvot 0.65-0.80.

Självkompakterande betong C25/30 med Anläggningscement

Motgjutningslängd [m]	Tvång [-]	Kylbehov vid max tillåten spänningskvot			
		0,80	0,75	0,70	0,65
4	0,33	-	-	-	-
6	0,46	-	-	-	-
8	0,51	-	-	-	-
18	0,55	-	-	-	-
30	0,59	-	-	-	-

Tabell C10: Beräknat kylbehov för vägg gjuten med självkompakterande betong innehållande Anläggningscement (C25/30) vid olika motgjutningslängder vid max tillåten spänningskvot 0.65-0.80.