

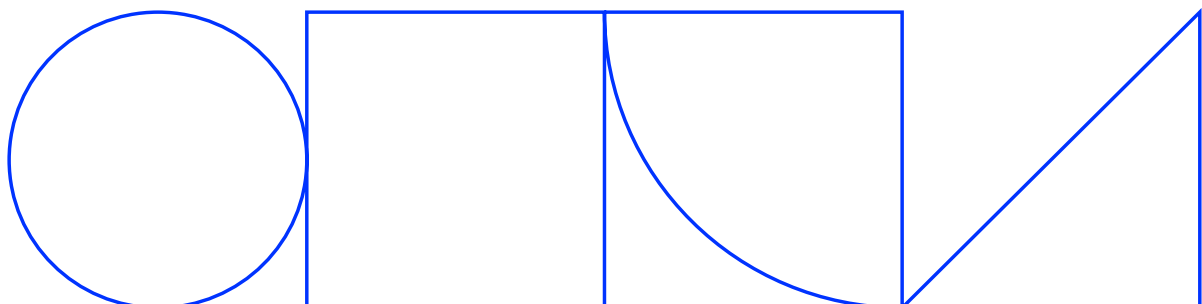
PROJEKTNR. 13872

Grönare anläggningsbetong – data för temperatur- och härdningsstyrning

Slutrapport

Hans Hedlund och Henrik Wiberg, Skanska Sverige AB
Martin Nilsson och Mats Persson, Luleå tekniska universitet

2023-10-06

SKANSKA

Grönare anläggningsbetong – data för temperatur- och härdningsstyrning



Förord

Projekt 13872 ” Grönare anläggningsbetong – data för temperatur- och härdningsstyrning” har genomförts av arbetsgruppen, bestående av representanter från Skanska Sverige AB och LTU, med stöd av referensgruppen och finansiärer.

Arbetsgruppen vill uttrycka ett explicit tack till projektets finansiärer och särskilt Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond (SBUF), som gett arbetsgruppen möjligt att ta sig an projektets uppgift.

Därutöver vill arbetsgruppen tacka projektets referensgrupp för värdefull input och goda diskussioner inom projektgruppen.

Projektets arbetsgrupp:

Projektledare Hans Hedlund, Skanska Teknik
Henrik Wiberg, Skanska Teknik
Martin Nilsson, LTU
Mats Persson, Testlab/Tysell laboratoriet LTU

Projektets referensgrupp (utöver arbetsgruppen):

Iad Saleh, NCC Sverige AB / Teknik
Ingemar Löfgren, Thomas Concrete Group AB
Staffan Carlström, Swerock AB
Johan Hedman, Skanska Industrial Solutions AB

Finansiärer:

SBUF
Skanska Sverige AB / Teknik
Skanska Sverige AB / Stora Projekt / Betong
NCC Sverige AB / Teknik
Swerock AB

Göteborg, 6:e oktober 2023

Hans Hedlund¹

Henrik Wiberg¹

Martin Nilsson²

Mats Persson³

1 Skanska Sverige AB

2 LTU

3 Testlab/Tysell laboratoriet LTU

Sammanfattning

Dagens klimatförbättrade betong och framtida bindemedelskombinationer kommer innebära utmaningar och förändringar för branschen. Tidigare produktionsmetoder för traditionell anläggningsbetong utan slagg kommer behöva anpassas. I många fall kan det innebära mindre justeringar av befintliga metoder och i andra fall kan det innebära mer eller mindre nya arbetsmetoder.

Av ovanstående anledning rekommenderas att entreprenören, betongleverantören och konstruktör, i god tid och i samråd, studerar och utvärderar de möjligheter som klimatförbättrad betong kan innebära för projektens framdrift. Framför allt gäller detta vid högre tillsatser av alternativa bindemedel (> 25 %) och särskilt vid gjutningar under vinterhalvåret då extra åtgärder utöver normala kan erfordras. Klimatförbättrad betong med högre andel slagg har också en betydande hållfasthetstillväxt efter dagens krav vid 28 dygns mognadsålder jämfört med betong utan slaggtillsats, varför konstruktören behöver beakta ökat behov av sprickarmering.

I uppstarten av anläggningsprojektet Hamnbanan (Eriksberg - Pölsebo) i Göteborg beslutades att klimatförbättrad betong skulle användas för de permanenta tunnelkonstruktionerna. I samverkan med Trafikverket genomförde entreprenören Skanska Sverige AB ett gediget provningsprogram, vilket inkluderade utveckling av betong, provningar och provgjutningar. I detta arbete beslutades att genomföra en fullständig provning av den unga hårdnande betongens egenskaper för att erhålla receptspecifika materialparametrar. Då tillgången till materialparametrar för klimatförbättrad betong är begränsad beslutades att de receptspecifika materialparametrarna skall bli tillgängliga för branschen och tillhandahålls således genom detta utvecklingsprojekt.

Den klimatförbättrade betongen och dess receptspecifika materialparametrar har i detta projekt utvärderats jämförts med gjutningar i ett verkligt projekt. Den nyvunna kunskapen och det viktigaste erfarenheterna kan summeras i följande slutsatser:

- Temperatursprickåtgärder för klimatförbättrad anläggningsbetong med lägre andel slagg (< 25 %) kan ofta utformas på liknande vis och i ungefär samma omfattning som vid gjutning med traditionell anläggningsbetong utan slagg.
- Klimatförbättrad anläggningsbetong med högre andel slagg (25-50 %) erfordrar under vinterperioden temperatursprickåtgärder som är mer omfattande och mer komplicerade än vid gjutning med traditionell anläggningsbetong utan slagg. Exempelvis erfordras ofta betydligt längre form- och täckningstider än entreprenörerna är vana vid.
- Under sommarhalvåret fungerar vanligtvis normala temperatursprickåtgärder, som vid gjutning med anläggningsbetong utan slagg, även för klimatförbättrad betong med högre slagginblandning. Beroende på rådande förutsättningar kan dock något längre avformnings- och avtäckningstider erfordras.
- Kylning av klimatförbättrad betong med högre inblandning av slagg kan behöva kombineras med värmning och/eller isolering, vilket kan resultera i komplicerade lösningar.

Receptspecifika materialparametrar som tillhandahålls i detta projekt är:

- C320/40, $v_{ct_{ekv}}$ 0.50, Anläggningscement Brevik (CEM I) och 10% slagg (GGBS)
- C320/40, $v_{ct_{ekv}}$ 0.50, Anläggningscement Brevik (CEM I) och 25% slagg (GGBS)
- C320/40, $v_{ct_{ekv}}$ 0.50, Anläggningscement Brevik (CEM I) och 50% slagg (GGBS)

Innehåll

Förord	I
Sammanfattning	II
1 Inledning	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte och mål	3
1.3 Projektbeskrivning	3
1.4 Avgränsningar	4
2 Provning av den unga betongens egenskaper	5
2.1 Betongsammansättningar	5
2.2 Receptspecifika materialparametrar	6
3 Erforderliga temperatursprickåtgärder	7
3.1 Tunnelkonstruktionens geometri	7
3.2 Beräkningsprogram och -metodik	8
3.3 Analys av tvångssituation	8
3.3.1 Bottenplattor och väggar.....	8
3.3.2 Valv	9
3.4 Temperatursprickåtgärder - Klimatförbättrad anläggningsbetong med 10 % slagg....	9
3.4.1 Bottenplattor och väggar med tjocklek 650 resp. 800 mm	10
3.4.2 Valv med tjocklek 650 resp. 800 mm.....	10
3.4.3 Erfarenheter	11
3.5 Temperatursprickåtgärder - Klimatförbättrad anläggningsbetong med 50 % slagg...	11
3.5.1 Bottenplattor med tjocklek 650 resp. 800 mm	11
3.5.2 Väggar med tjocklek 650 mm	12
3.5.3 Väggar med tjocklek 800 mm	12
3.5.4 Valv med tjocklek 650 resp. 800 mm.....	13
3.5.5 Erfarenheter	13
4 Fullskalegjutning (Mock-up)	14
4.1 Mock-upens geometri	14
4.2 Temperaturmätning	15
4.3 Temperaturutveckling	16
4.4 Hållfasthetsutveckling.....	16
5 Permanent tunnelkonstruktion	18
5.1 Temperaturmätning	18
5.2 Uppföljning av temperaturutveckling	18

6	Erfarenheter	20
6.1	Temperaturutveckling	20
6.1.1	Klimatförbättrad anläggningsbetong med lägre andel slagg	20
6.1.2	Klimatförbättrad anläggningsbetong med hög andel slagg	20
6.2	Hållfasthetsutveckling	21
6.2.1	Klimatförbättrad anläggningsbetong med lägre andel slagg	21
6.2.2	Klimatförbättrad anläggningsbetong med hög andel slagg	22
6.3	Temperatursprickrisk	23
6.4	Temperatursprickåtgärder	24
6.5	Gjutning och härdning	25
6.6	Sprickor	26
7	Diskussioner	27
7.1	Klimatförbättrad anläggningsbetong	27
7.1.1	Vintergjutningar	27
7.1.2	Val av temperatursprickåtgärder	27
7.2	Sprickor	28
8	Rekommendationer	28
8.1	Utformning av temperatursprickåtgärder	28
8.1.1	Klimatförbättrad anläggningsbetong med lägre andel slagg	28
8.1.2	Klimatförbättrad anläggningsbetong med hög andel slagg	28
8.2	Utförande vid gjutning och härdning	29
8.3	Sammanfattande rekommendation	30

Bilaga A: Receptspecifika materialparametrar

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Cement och betong har till sin natur och omfattande användning som byggnadsmaterial ett stort koldioxidavtryck. Materialleverantörerna av cement och fabriksbetong försöker minska koldioxidavtrycket genom att ersätta cementklinker med väsentligt lägre klimatpåverkan. För att minska sina koldioxidutsläpp ser cementtillverkarna över hela sin tillverkningsprocess med bränslen till ugnar, kvarnar och cementsammansättningar (flygaska, slagg, kalkstensfiller eller annat restmaterial). Betongtillverkarna minskar cementhalten i sina betonger och tillsätter olika tillsatsmaterial för att ytterligare sänka betongens klimatavtryck.

Byggbranschens aktörer har fokus inställd på klimatneutralitet 2045 och Trafikverket med flera aktörer premierar utvecklingen av ett klimatneutralt byggande. Problemställningen för entreprenörerna är att anläggningsprojekt ofta är relativt långa, med projekttider på 4-5 år. Stora projekt föregås även av en lång projekteringstid, där förutsättningarna, vilka fastslås i inledningen av projekteringen, baseras på det då gällande regelverket.

Regelverk och standarder utvecklas ständigt för att möjliggöra användning av betong med lägre koldioxidbelastning. Nya utgåvor av dessa normer, med möjligheter till en grönare betong, är svåra att introducera under pågående projektering och produktion. De regelverk som är gällande för ett projekt är inte sällan ”omodernt” redan när projektet startar. Utvecklingen mot ett klimatneutralt byggande tar med andra ord ”en paus” efter att produktionsmetoder och betong valts i projektets inledande fas. Värdefull tid, för att nå klimatneutralitet 2045, rinner därmed i väg, på grund av att en betong enligt modernare regelverk och med lägre klimatbelastning inte kunnat användas i projektet. Låsningseffekten för en hållbar förändring av det klimatneutrala byggandet beror till stor del på att regelverk, standarder och myndighetsbeslut inte håller jämn takt med varandra.

Vid nybyggnad av broar, tunnlar eller andra anläggningskonstruktioner kräver den svenska byggpraxisen för utförande, material och kontroll (AMA Anläggning), att risken för temperaturrelaterad sprickbildning under gjutning och efterföljande härdningsfas begränsas. Denna begränsning kan ske genom olika typer av åtgärder, som kylning av den nygjutna konstruktionsdelen eller uppvärmning av en tidigare gjuten konstruktionsdel som man gjuter mot. Hantering av temperatursprickåtgärder regleras i AMA Anläggning EBE.11 och ger entreprenören möjlighet att använda olika säkerhetsnivåer (*spricksäkerhetsfaktorer*) beroende på betongens sammansättning och hur väl provad och undersökt den unga hårdnande betongens egenskaper är.

I AMA Anläggning EBE 11 skiljer man på generella respektive receptspecifika materialparametrar. Vid fullt provade egenskaper (*receptspecifika materialparametrar*), och därmed god kännedom om den aktuella betongens egenskaper, tillåts en lägre spricksäkerhetsfaktor tillämpas, vilket minskar på åtgärdernas omfattning och därmed kostnader för åtgärdernas utförande. Generella materialparametrar gör det möjligt för entreprenörer att utforma temperatursprickåtgärder för en betongkonstruktion även om tillgång till en specifikt provad betongsammansättning för den aktuella betong-

sammansättningen. Dock erfordras att en högre spricksäkerhetsfaktor används vid temperatursprickanalyser, vilket innebär ökade kostnader för projekten.

Genom receiptspecifika materialparametrar har entreprenören en möjlighet att nyttja en lägre spricksäkerhetsfaktor vid temperaturanalys. Denna typ av materialparametrar erhålls genom att utföra en provning av den unga betongens egenskaper. Denna provning ger god kännedom om den aktuella betongens egenskaper, vilket är anledningen till att en lägre spricksäkerhetsfaktor kan tillämpas. En lägre spricksäkerhetsfaktor minskar på åtgärdernas omfattning och därmed kostnader för åtgärdernas utförande.

De materialparametrar som har varit tillgängliga för branschen sedan 1990-talet är framtagna för betong baserad på rent Portlandcement (Anläggningscement, CEM I) och på senare år även ett Portland-flygaskecement (Anläggningscement FA, CEM II/A-V). Under de senaste åren har betongleverantörerna börjat ersätta cement med alternativa bindemedel, såsom slagg eller flygaska, för att minska betongens klimatbelastning. Ersättning av cement med alternativa bindemedel påverkar dock utvecklingen av den unga betongens egenskaper. Betong med stor andel klinkersättning ger en långsammare hållfasthetstillväxt, vilket påverkar exempelvis säkerhet vid formrivning, formrivningstider och projekttidplaner. På samma sätt kan temperaturrelaterade, etappindelningar (fastlåsningseffekter från yttre tvång) och utvecklingen av mekaniska egenskaper vara förändrade jämfört med betong med bindemedel bestående av enbart cement (CEM I eller CEM II/A-V).

Av ovanstående anledning har AMA Anläggning 23 EBE.11 anpassats för användning av klimatförbättrad betong. Beräkningsmetoderna 1 och beräkningsmetod 2 (Teknisk rapport 1997:02, LTU) samt ”handboksmetoden CraX1” (Teknisk rapport 2001:14, LTU) tillåts användas vid temperatursprickanalyser under förutsättning att aktuell betong är sammansatt genom att minst 80 % av bindemedlet består av portlandcementklinker. Vid högre andel alternativa tillsatsmaterial än 20 % krävs alltså att temperatursprickanalyser utförs genom FEM-analys (beräkningsmetod 3).

De tidigare nämnda materialparametrarna, avseende betong med bindemedel bestående av enbart cement, är enligt AMA Anläggning 23 EBE.11 inte representativa för klimatförbättrad betong med högre tillsats än 20 % alternativa bindemedel. Idag efterfrågas och används anläggningsbetong med upp till 50 % ersättning med alternativa bindemedel, varför branschen är i behov av materialparametrar representativa för betong med högre inblandning av alternativa bindemedel.

1.2 Syfte och mål

Projektets syfte är att genom provning tillhandahålla materialparametrar som byggbranschen kan använda vid temperatur- och sprickriskanalyser för klimatförbättrad anläggningsbetong med upp till 50 % reducerad klimatbelastning (ca 186 kg CO₂-eq / m³ betong).

Projektets mål är att ge entreprenörerna och branschens övriga aktörer tillgång till materialparametrar för betongsammansättningar med lågt klimatavtryck. Genom detta kan entreprenören redan i tidiga skeden välja cementtyp, möjliga åtgärder vid härdningsstyrning av en klimatförbättrad betong och vara förberedd på Trafikverkets klimatreduktionsresa.

Entreprenören kan därmed undvika ökade kostnader för betong, anpassa sina gjutningar och skräddarsy erforderlig härdning och även ge kunden en hög kvalitet på sin konstruktion. Vidare ger projektets resultat möjlighet för entreprenörer att vara förberedda i projekt med grön anläggningsbetong i projekt där Trafikverkets regelverk tillämpas.

1.3 Projektbeskrivning

Detta projekt genomfördes i samband med ett större anläggningsprojekt (Hamnbanan) i Göteborg. Inför detta anläggningsprojekt utvecklades ett antal klimatförbättrade anläggningsbetonger med olika andel tillsatt slagg (GGBS).

Utgångspunkten var att den klimatförbättrade betongen till tunnelkonstruktionerna skall uppfylla följande krav:

- Hållfasthetsklass C32/40
- Exponeringsklass XC4 / XF3
- Max $v_{ct_{ekv}}$ 0,50

Projektet genomfördes i ett antal steg enligt nedan.

1. Utveckling av betongsammansättning (redovisas ej i denna rapport).
2. Provning av betongens unga egenskaper (receptspecifika materialparametrar), LTU.
3. Dimensionering av erforderliga temperatursprickåtgärder utifrån receptspecifika materialparametrar enligt steg 2.
4. Fullskalegjutning (Mock-up) för att verifiera betongens egenskaper och valda produktionsmetoder. Vid denna gjutning applicerades de temperatursprickåtgärder, vilka dimensionerats i föregående steg 3. Betongens temperaturutveckling kontrollerades för jämförelse med beräknad temperaturutveckling med receptspecifika materialparametrar enligt steg 2.
5. Gjutning av permanenta tunnelkonstruktioner, där uppföljande temperaturmätningar utförts för jämförelse med beräknad temperaturutveckling med receptspecifika materialparametrar enligt steg 2.

Efter gjutningar (steg 4 och 5 ovan) har avsyning av betongkonstruktionerna utförts för att kontrollera eventuell temperatursprickbildning.

1.4 Avgränsningar

Projektet har begränsats till tre betongsammansättningar där bindemedels-sammansättningarna utgår från ett Portlandcement (CEM I) med reduktionsnivåer enligt nedan:

Mix 1	10% klinkerersättning*, $v_{ct_{ekv}}$ 0.50, ca 350 kg bindemedel.
Mix 2	25% klinkerersättning*, $v_{ct_{ekv}}$ 0.50, ca 400 kg bindemedel.
Mix 3	50% klinkerersättning*, $v_{ct_{ekv}}$ 0.50, ca 400 kg bindemedel.

***Obs.** Ovanstående klinkerersättning avser den i projektet eftersträvade ersättningsgraden för respektive betongsammansättning. De verkliga andelarna slagg (EcoCem, GGBS) är 9 % (Mix 1), 21 % (Mix 2) och 47 % (Mix 3). I rapporten används dock 10, 25 respektive 50 % i benämningen av respektive betongsammansättning.

Övriga kommentarer avseende betongsammansättningarna (Mix 1-3):

- Anledningen till att Portlandcement (CEM I) har använts är att det var detta cement som fanns att tillgå för aktuell betongleverantör i Göteborg.
- Klinkerersättning har åstadkommit genom inblandning av slagg (EcoCem GGBS).
- EPCC-konceptet är tillämpat med k-värde 0,6 i projektet.
- Luftporbildande tillsatsmedel har inte använts i någon av betongsammansättningarna (Mix 1-3). Enligt SS 137003 kan betongens frostresistens i exponeringsklasserna XF2 och XF3 påvisas genom antingen lägsta lufthalt (SS 137003, tabell 9) eller genom provning av frostresistens. I detta projekt har betongens frostresistens (XF3) påvisats genom provning enligt SS 137244 (metod B).

För det aktuella anläggningsprojektet Hamnbanan (etapp Eriksberg - Pölsebo) gäller AMA Anläggning 17. Detta projekt behandlar dock i vissa avseenden även de förändringar som skett i och med att AMA Anläggning 23 introducerats för branschen.

2 Provning av den unga betongens egenskaper

I AMA Anläggning EBE 11 skiljer man på generella respektive receptspecifika materialparametrar. Generella materialparametrar gör det möjligt för entreprenörer att utforma temperatursprickåtgärder för en betongkonstruktion även om tillgång till receptspecifika materialparametrar saknas för den aktuella betongsammansättningen. Dock erfordras att en högre spricksäkerhetsfaktor används vid temperatursprickanalyser.

Enligt AMA Anläggning, EBE.11 har entreprenören en möjlighet att nyttja en lägre spricksäkerhetsfaktor vid temperaturanalys om receptspecifika materialparametrar finns att tillgå. Denna typ av materialparametrar erhålls genom att utföra en provning av den unga betongens egenskaper. Denna provning ger god kännedom om den aktuella betongens egenskaper, vilket är anledningen till att en lägre spricksäkerhetsfaktor kan tillämpas. En lägre spricksäkerhetsfaktor minskar på åtgärdernas omfattning och därmed kostnader för åtgärdernas utförande.

I normalstora projekt med lite längre stödmurar eller några få rambroar erfordras ofta hundratals till tusentals meter kylrör. Erfarenheter från anläggningsprojekt visar på att om erforderlig mängd kylrör, dimensionerad med generella materialparametrar, överstiger ca 2000 löpmeter kylrör skulle en kostnadsbesparing vara möjlig för entreprenören om receptspecifika materialparametrar funnits att tillgå vid projekteringen. Vid större kylrörmängder överstiger skillnaden i kostnad för kylning (material och montage) mellan de två alternativen (generella och receptspecifika materialparametrar) den kostnad som en fullständig provning av den unga hårdnande betongens egenskaper innebär.

Vid uppstarten av det aktuella anläggningsprojektet (Hamnbanan), som behandlas i denna rapport, saknades såväl generella som receptspecifika materialparametrar för klimatförbättrad anläggningsbetong. Av denna anledning beslutades att genomföra en fullständig provning av den unga hårdnande betongens egenskaper. Provade betongsammansättningar och receptspecifika materialparametrar framgår av avsnitt 2.1 respektive 2.2 nedan.

2.1 Betongsammansättningar

För att fastställa receptspecifika materialparametrar för de aktuella klimatförbättrade anläggningsbetongerna i detta projekt har den unga betongens egenskaper provats.

De provade betongsammansättningarna följer nedan:

- Klimatförbättrad anläggningsbetong med 10 % slagg (EcoCem GGBS)
- Klimatförbättrad anläggningsbetong med 25 % slagg (EcoCem GGBS)
- Klimatförbättrad anläggningsbetong med 50 % slagg (EcoCem GGBS)

Betongrecepturen för de olika betongsammansättningarna framgår av Bilaga A.

I anläggningsprojektet Hamnbanan användes betongsammansättningarna med 10 % respektive 50 % slagginblandning. Betongsammansättningen med 25 % slagg provades för att erhålla materialparametrar för en slaggtillsats mellan nivåerna 10 % och 50 %.

2.2 Receptspecifika materialparametrar

De aktuella betongsammansättningarnas unga egenskaper (hårdnande) har provats av LTU och materialparametrarna redovisas i sin helhet i Bilaga A. Provingen omfattade fullständiga materialdata (receptspecifika materialparametrar) enligt AMA Anläggning EBE.11.

Proving för att fastställa receptspecifika materialparametrar innefattar:

- Betongens värmeutveckling
 - Semi-adiabatisk provning
- Betongens hållfasthetsutveckling vid olika temperaturer (mognad)
 - Beräknad temperaturutveckling (tid-temperaturstyrning för viss provningsutrustning)
- Frirörelse
 - Autogen krympning (konstant temperatur)
 - Temperaturrörelse (tid-temperaturstyrning)
- Krypning
 - Belastningsålder (1, 5, 14 alt 28 dygn)
- Temperaturspänning (TSTM)
 - Spänningsutveckling i betongen vid tid-temperaturstyrning
 - Brottdraghållfasthet vid långsam belastning
- Kalibreringsberäkning
 - Baserat på materialparametrar från de enskilda provningarna av den unga betongens egenskaper jämförs beräknad temperaturspänningsutvecklingen med uppmätt spänningsutveckling för TSTM.

De receptspecifika materialparametrar som presenteras i denna rapport (Bilaga A) kan användas i de nedanstående två versionerna av beräkningsprogrammet ConTeSt eller i den kommande uppdateringen av Produktionsplanering Betong (PPB).

- ConTeSt 5.0 (beaktar ej hållfasthetsförlust vid förhöjd härdningstemperatur)
- ConTeSt 5.1 (beaktar hållfasthetsförlust vid förhöjd härdningstemperatur)

3 Erforderliga temperatursprickåtgärder

De fastställda receptspecifika materialparametrarna har använts för att på ett adekvat sätt analysera och begränsa risken för temperaturrelaterad sprickbildning i samband med gjutning och efterföljande härdning. Utifrån dessa receptspecifika materialparametrar, för de klimatförbättrade anläggningsbetongerna, har erforderliga temperatursprickåtgärder utformats för den permanenta tunnelkonstruktionen.

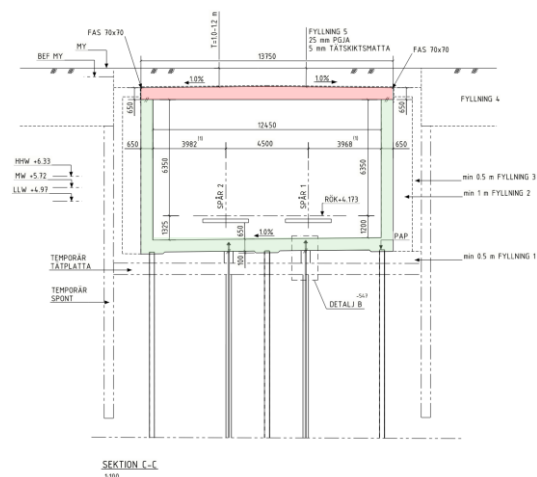
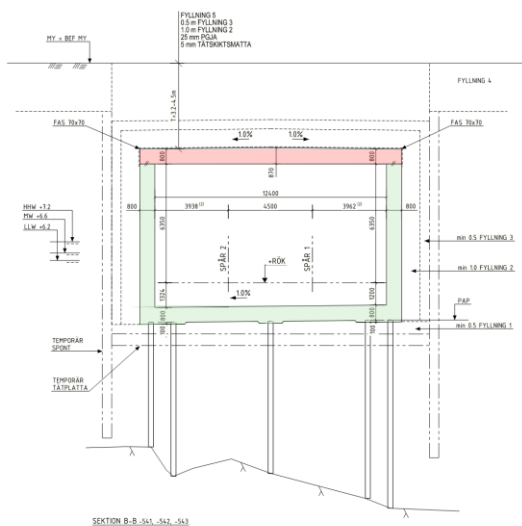
Temperatursprickåtgärder har, i det aktuella anläggningsprojektet, utformats för nedanstående två betongsammansättningar.

- Klimatförbättrad anläggningsbetong med 10 % slagg (GGBS)
- Klimatförbättrad anläggningsbetong med 50 % slagg (GGBS)

Utöver ovanstående förutsättningar gäller att den aktuella tunnelkonstruktionen gjuts i Göteborg, varför temperatursprickåtgärder utformas med antagande av statistiska dygnsmedeltemperaturer för luft samt betongens gjuttemperaturer enligt statistik från betongfabriker i denna region. Vid behov justeras dock betongens gjuttemperatur för att undvika risk för tidig frysning eller för att uppnå önskad formrivningstid.

3.1 Tunnelkonstruktionens geometri

Tunneln är uppdelad i monoliter med längden 11 – 22 m och är åtskilda av dilatationsfogar. Varje monolit gjuts i två etapper, där bottenplattan i ett första steg gjuts tillsammans med väggar i en etapp (grön-markerat) och valvet därefter i en etapp (röd-markerat). Generellt sett är konstruktionsdelarnas tjocklek antingen 650 mm eller 800 mm med 100 mm förstyvning längs pålraderna. Konstruktionsdelarnas dimensioner och geometri framgår av Figur 1 och Figur 2 nedan.



Figur 1: Tunnelkonstruktionens geometri (t = 800 mm). Figur 2: Tunnelkonstruktionens geometri (t = 650 mm).

3.2 Beräkningsprogram och -metodik

Åtgärder för att begränsa risken för temperaturrelaterad sprickbildning har i detta projekt dimensionerats genom att först bedöma eller analysera den rådande tvångssituationen för aktuella konstruktionsdelar och därefter analysera temperatur-sprickrisken genom att simulera temperaturutveckling och töjningar i de aktuella betongkonstruktionerna.

Den aktuella konstruktionsdelens tvångssituation bestäms antingen genom bedömning eller genom en analys. Tvångsanalyser har i förekommande fall utförts med hjälp av beräkningsverktyget *LUSAS Modeller v19.1*. I detta program modelleras tunnelkonstruktionen med relevanta randvillkor för analys av rådande tvångssituation. I Bedömd tvångssituation eller analyserad tvångsfaktor används därefter vid analys av temperatursprickrisken.

Analys av temperatursprickrisk har utförts med hjälp av beräkningsverktyget *ConTeSt R&D 5.1*. ConTeSt (Concrete Temperature Stresses) är ett beräkningsprogram som simulerar betongtemperaturer och töjningar i betongkonstruktioner. Programmet används för att dimensionera och utvärdera olika åtgärder för att begränsa risken för temperatursprickor, vid antagna produktionsförhållanden.

I beräkningsprogrammet ConTeSt beskrivs olika betongsammansättningar antingen genom generella eller receptspecifika materialparametrar. Dessa två typer av materialparametrar beskriver den unga betongens värmeutveckling samt utvecklingen av mekaniska egenskaper under hårdnandet. I detta projekt används de receptspecifika materialparametrarna enligt avsnitt 2.2 och Bilaga A.

Materialmodellsamband för såväl termiska som mekaniska egenskaper samt spänningsberäkningsmetodik i ConTeSt 5.1 redovisas i Bilaga A.

3.3 Analys av tvångssituation

Den rådande tvångssituationen för tunnelkonstruktionens olika konstruktionsdelar har bedömts/analyserats, vilket framgår av avsnitt 3.3.1 och 3.3.2.

3.3.1 Bottenplattor och väggar

Bottenplatta och väggar gjuts vid samma gjuttillfälle och är grundlagda på packad fyllning eller pålar. Aktuell grundläggning och gjutmetoden antas medföra ett litet yttre tvång och därmed försumbar risk för genomgående temperatursprickor.

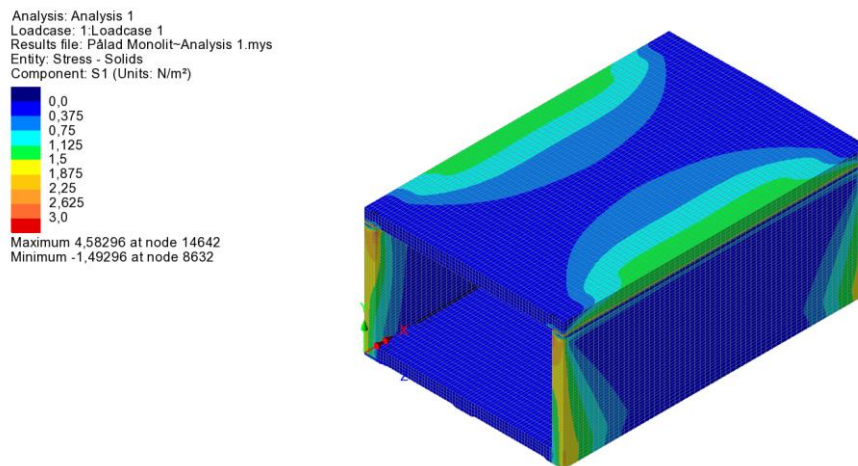
Konstruktionsdelens erforderliga temperatursprickåtgärder för begränsning av risken för temperatursprickor dimensioneras genom kontroll av risken för ytsprickor.

3.3.2 Valv

Tunnelmonolitens valv gjuts mot tidigare gjutna väggar med längd från ca 11 till 22 m, vilket medför ett yttre tvång. Det yttre tvånget har analyserats med hjälp av beräkningsverktyget LUSAS Modeller v19.1.

Analysen sker genom en temperaturbelastning ($\Delta T = -10^\circ\text{C}$) av den nygjutna konstruktionsdelen samt genom att applicera relevanta randvillkor i modellen. Tidigare gjutna konstruktionsdelar (gammal betong) har i analysen konstant temperatur = 0°C .

I Figur 3 nedan ses exempel på tvångsspänningar (huvudspänning S1) efter temperaturbelastning för den nygjutna konstruktionsdelen. Den beräknade dimensionerande tvångsfaktorn varierar från 0.20 till 0.38 beroende på valvets motgjutningslängd mot underliggande väggar.



Figur 3: Tvångsspänningar (huvudspänning S1) efter temperaturbelastning för den nygjutna konstruktionsdelen.

Beräknad dimensionerande tvångsfaktor har använts vid analys av temperatursprickrisk och utformning av erforderliga temperatursprickåtgärder.

Konstruktionsdelens erforderliga temperatursprickåtgärder för begränsning av risken för temperatursprickor dimensioneras genom kontroll av risken för genomgående sprickor och ytsprickor.

3.4 Temperatursprickåtgärder - Klimatförbättrad anläggningsbetong med 10 % slagg

Erforderliga temperatursprickåtgärder redovisas nedan för klimatförbättrad anläggningsbetong med 10 % slagg, se avsnitt 3.3.1 och 3.3.2.

För det aktuella anläggningsprojektet gällde AMA Anläggning 17, vilken inte ställde krav på max tillåten tillsats av alternativa bindemedel. I det aktuella projektet antogs att en mindre mängd tillsatt slagg (10 %) har marginell inverkan på betongens temperaturutveckling och temperatursprickrisk. Av denna anledning gjordes bedömningen att beräkningsmetod 1 kunde tillämpas för konstruktionsdelar som inte är utsatta för yttre tvång eller risk för tidig frysning.

I AMA Anläggning 23, vilken ej var utgiven under tiden för projektets genomförande, anges att alternativa bindemedel maximalt får uppgå till 20 % för att beräkningsmetod 1 (AMA Anläggning, EBE.11¹) skall vara tillåten. De dimensionerade erforderliga temperatursprickåtgärderna kan därmed även anses uppfylla den senare AMA Anläggning 23.

3.4.1 Bottenplattor och väggar med tjocklek 650 resp. 800 mm

Eftersom det yttre tvånget har bedömts vara litet och risken för genomgående sprickor därmed är försumbart har konstruktionsdelen endast dimensionerats för risken för ytsprickor. Under period under året då ingen risk för tidig frysning råder utförs kontrollen enligt beräkningsmetod 1 (AMA Anläggning, EBE.11). Eftersom beräkningsmetod 1 inte är tillämplig då risk för tidig frysning råder och vinteråtgärder erfordras utförs analys under övriga delar av året enligt beräkningsmetod 3 (AMA Anläggning, EBE.11).

3.4.1.1 Period utan risk för tidig frysning

Under den period under året då ingen risk för tidig frysning föreligger utförs temperatursprickåtgärder enligt beräkningsmetod 1. Utöver de krav som framgår av EBE.11 avseende bindemedelshalt, lufttemperatur, gjuttemperatur etc. utförs åtgärder enligt nedan.

- Konstruktionen gjuts i oisolerad form.
- Betongens överytor täcks efter gjutning med plastfolie / presenning.
- Avformning / avtäckning tidigast 4 dygn efter gjutning.

3.4.1.2 Period med risk för tidig frysning

Under den period på året då risk för tidig frysning föreligger analyseras temperatursprickåtgärder enligt beräkningsmetod 3. Utöver krav som framgår av EBE.11 utförs åtgärder enligt nedan.

- Konstruktionen gjuts i oisolerad form.
- Betongens överytor täcks efter gjutning med plastfolie / presenning.
- Tillfällig täckning² med 1 cm isolermatta tillåts direkt efter gjutning. Eventuell täckning avlägsnas då betongtemperaturen nått den ursprungliga gjuttemperaturen.
- Avformning / avtäckning tidigast 4 dygn efter gjutning.

3.4.2 Valv med tjocklek 650 resp. 800 mm

Vilket framgår av avsnitt 3.3.2 verkar ett yttre tvång på den nygjutna konstruktionen på grund av motgjutning mot de tidigare gjutna väggarna. Av denna anledning utförs analysen av temperatursprickrisken genom beräkningsmetod 3.

¹ Text i AMA Anläggning 23, EBE.11: Bindemedlet (cement och eventuella tillsatsmaterial typ II) ska till minst 80 procent bestå av portlandcementklinker och uppfylla kravet på värmeutveckling enligt SS 134202. Om bindemedlet består av cement och ett tillsatsmaterial typ II ska denna bindemedelskombination påvisas ha likvärdig prestanda med avseende på värmeutveckling som ett cement som uppfyller SS 134202 enligt bilaga AMA EB/1

² Med tillfällig täckning avses täckning vid behov under det första dygnet efter gjutning vid risk för tidig frysning.

3.4.2.1 Perioden januari - december

Erforderliga temperatursprickåtgärder utformas genom analys enligt beräkningsmetod 3 i AMA Anläggning, EBE.11, vilka framgår nedan.

- Konstruktionen gjuts i oisolerad form.
- Betongens överytor täcks efter gjutning med plastfolie / presenning.
- Avformning/avtäckning får ske tidigast 4 dygn.

3.4.3 Erfarenheter

Den klimatförbättrade anläggningsbetongen med 10 % slagg skiljer sig inte nämnvärt från en anläggningsbetong utan inblandning av slagg vad gäller temperaturutveckling och temperatursprickrisk. Erfarenheten från utförda temperatursprickanalyser med givna förutsättningar är att en mindre inblandning av slagg på 10 % resulterar i lika temperatursprickåtgärder som vid användning av traditionell anläggningsbetong utan inblandning av slagg. Påverkan på betongens temperaturutveckling är liten och inga extra åtgärder utöver vad som kan anses vara normala erfordras under vinterhalvåret.

Den marginella påverkan på betongens temperaturutveckling och i praktiken försumbara skillnaden i erforderliga temperatursprickåtgärder indikerar att det är rimligt att tillåta beräkningsmetod 1 och 2 samt ”handboksmetoden (CraX1)” för betong med upp till 20 % alternativa bindemedel i enlighet med AMA Anläggning 23.

3.5 Temperatursprickåtgärder - Klimatförbättrad anläggningsbetong med 50 % slagg

Erforderliga temperatursprickåtgärder redovisas nedan för klimatförbättrad anläggningsbetong med 50 % slagg, se avsnitt 3.5.1- 3.5.4.

Av den, för det aktuella anläggningsprojektet, gällande AMA Anläggning 17 framgår inte hur tillsats av alternativa bindemedel skall hanteras avseende begränsning av temperatursprickrisk. Av denna anledning beslutades att genom provning fastställa receptspecifika materialparametrar och att analysera risken för temperatursprickor enligt beräkningsmetod 3 oavsett om konstruktionsdelarna är utsatta för yttre tvång respektive risk för tidig frysning eller ej.

3.5.1 Bottenplattor med tjocklek 650 resp. 800 mm

3.5.1.1 Perioden maj - oktober

Erforderliga temperatursprickåtgärder utformas genom analys enligt beräkningsmetod 3 i AMA Anläggning, EBE.11, vilka framgår nedan.

- Konstruktionen gjuts i oisolerad form.
- Betongens överytor täcks efter gjutning med plastfolie / presenning.
- Avformning/avtäckning får ske tidigast 4 dygn.

3.5.1.2 Perioden november – april

Erforderliga temperatursprickåtgärder utformas genom analys enligt beräkningsmetod 3 i AMA Anläggning, EBE.11, vilka framgår nedan.

- Konstruktionen gjuts i oisolerad form.
- Betongens överytor täcks efter gjutning med plastfolie / presenning.
- Bottenplattans överyta och formens utsida täcks med 1 cm isolering.
- Avformning av bottenplatta får ske tidigast 4 dygn efter gjutning under förutsättning att formen ersätts med 1 cm isolering. Alternativt sker avformning 7 dygn efter gjutning (utan ersättningstäckning).
- Avtäckning av isolering på bottenplattans överyta samt formens utsida får ske tidigast 7 dygn efter gjutning.

3.5.2 Väggar med tjocklek 650 mm

3.5.2.1 Perioden maj - oktober

Erforderliga temperatursprickåtgärder utformas genom analys enligt beräkningsmetod 3 i AMA Anläggning, EBE.11, vilka framgår nedan.

- Konstruktionen gjuts i oisolerad form.
- Betongens överytor täcks efter gjutning med plastfolie / presenning.
- Avformning/avtäckning får ske tidigast 4 dygn.

3.5.2.2 Perioden november – april

Erforderliga temperatursprickåtgärder utformas genom analys enligt beräkningsmetod 3 i AMA Anläggning, EBE.11, vilka framgår nedan.

- Konstruktionen gjuts i oisolerad form.
- Betongens överytor täcks efter gjutning med plastfolie / presenning.
- Väggens överyta och formens utsida täcks med 1 cm isolering.
- Avformning/avtäckning av väggen får ske tidigast 4 dygn efter gjutning.

3.5.3 Väggar med tjocklek 800 mm

3.5.3.1 Perioden maj - oktober

Erforderliga temperatursprickåtgärder utformas genom analys enligt beräkningsmetod 3 i AMA Anläggning, EBE.11, vilka framgår nedan.

- Konstruktionen gjuts i oisolerad form.
- Betongens överytor täcks efter gjutning med plastfolie / presenning.
- Avformning/avtäckning får ske tidigast 4 dygn.

3.5.3.2 Perioden november – april

Erforderliga temperatursprickåtgärder utformas genom analys enligt beräkningsmetod 3 i AMA Anläggning, EBE.11, vilka framgår nedan.

- Konstruktionen gjuts i oisolerad form.
- Betongens överytor täcks efter gjutning med plastfolie / presenning.
- Väggens överyta och formens utsida täcks med ett lager presenning.
- Avformning/avtäckning av väggen får ske tidigast 4 dygn efter gjutning.

3.5.4 Valv med tjocklek 650 resp. 800 mm

3.5.4.1 Perioden december - mars

Erforderliga temperatursprickåtgärder utformas genom analys enligt beräkningsmetod 3 i AMA Anläggning, EBE.11, vilka framgår nedan.

- Konstruktionen gjuts i oisolerad form.
- Den färska betongens temperatur ska vara +16° till +20°C.
- Betongens överytor täcks efter gjutning med plastfolie / presenning.
- Nygjuten betongs överyta täcks med 2 cm isolering.
- Avformning av valvet får ske tidigast 7 dygn efter gjutning.
- Avtäckning av isolering på valvets överyta sker tidigast 10 dygn efter gjutning.

3.5.4.2 Perioden april och oktober-november

Erforderliga temperatursprickåtgärder utformas genom analys enligt beräkningsmetod 3 i AMA Anläggning, EBE.11, vilka framgår nedan.

- Konstruktionen gjuts i oisolerad form.
- Betongens överytor täcks efter gjutning med plastfolie / presenning.
- Nygjuten betongs överyta täcks med 2 cm isolering.
- Avformning / avtäckning av valvet får ske tidigast 5 dygn efter gjutning.

3.5.4.3 Perioden maj - september

Erforderliga temperatursprickåtgärder utformas genom analys enligt beräkningsmetod 3 i AMA Anläggning, EBE.11, vilka framgår nedan.

- Konstruktionen gjuts i oisolerad form.
- Betongens överytor täcks efter gjutning med plastfolie / presenning.
- Nygjuten betongs överyta täcks med 1 cm isolering.
- Avformning / avtäckning av valvet får ske tidigast 4 dygn efter gjutning.

3.5.5 Erfarenheter

Under vinterhalvåret skiljer sig den klimatförbättrade betongen med 50 % slagg markant från en anläggningsbetong utan inblandning av slagg, vad gäller betongens temperaturutveckling. Värmeutvecklingen blir betydligt lägre jämfört med traditionell anläggningsbetong utan inblandning av slagg. Utan extra åtgärder riskerar betongen tidig frysning och/eller orimligt långa formrivningstider. För att kompensera för den lägre värmeutvecklingen erfordras extra åtgärder utöver normala vinteråtgärder för traditionell anläggningsbetong. De extra vinteråtgärderna som erfordras i de aktuella fallen är extra täckning / isolering samt högre gjuttemperatur. Detta resulterar i sin tur även i längre avtäckning- och formrivningstider för att begränsa risken för temperatursprickor.

Även under sommarhalvåret kan extra åtgärder erfordras jämfört med traditionell anläggningsbetong. Exempelvis erfordras isolering på det aktuella valvets ovansida för att uppfylla den av entreprenören önskade formrivningstiden 4 dygn efter gjutning.

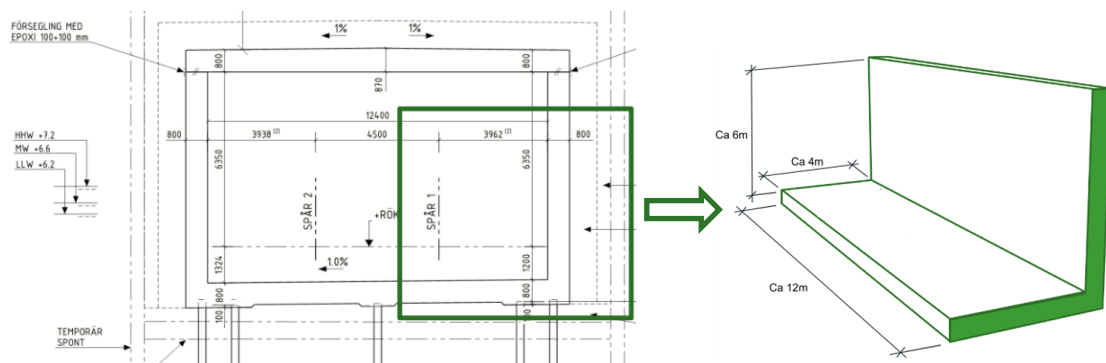
4 Fullskalegjutning (Mock-up)

Inför gjutning av den permanenta tunnelkonstruktionen utfördes en fullskalegjutning (mock-up) av en typsektion med likvärdiga dimensioner som de permanenta tunnelmonoliterna. Gjutningarna utfördes under sista halvan av november 2020. Provgjutningen utfördes för att verifiera betongmassans färska, hårdnande och hårdnade egenskaper samt valda produktionsmetoder.

Vid gjutningen applicerades de dimensionerade erforderliga temperatursprickåtgärderna enligt kapitel 3. Registrering av betongens temperaturutveckling utfördes därför under gjutning och härdning för att kontrollera överensstämmelse med beräknad temperaturutveckling erhållen med de receptspecifika materialparametrarna. Denna kontroll ger även en bekräftelse på att dimensionerade temperatursprickåtgärder fungerar som tänkt.

4.1 Mock-upens geometri

Mock-upens geometri framgår av sektionen för en av tunnelmonoliterna enligt Figur 4 nedan. Längden på gjutningen var ca. 12 m.



Figur 4: Mock-upens geometri (bottenplatta och vägg).

För att efterlikna den tvångssituation som råder för valvet, på grund av motgjutning mot underliggande väggar, utfördes en gjutning av en vägg på utsidan av mock-upens bottenplatta enligt Figur 5 nedan av arbetsmiljö- och säkerhetsskäl.

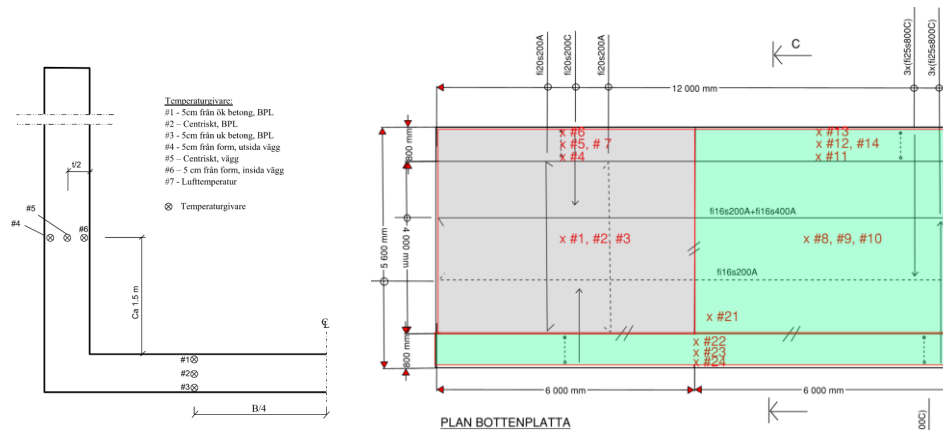


Figur 5: Mock-upens geometri (valv)

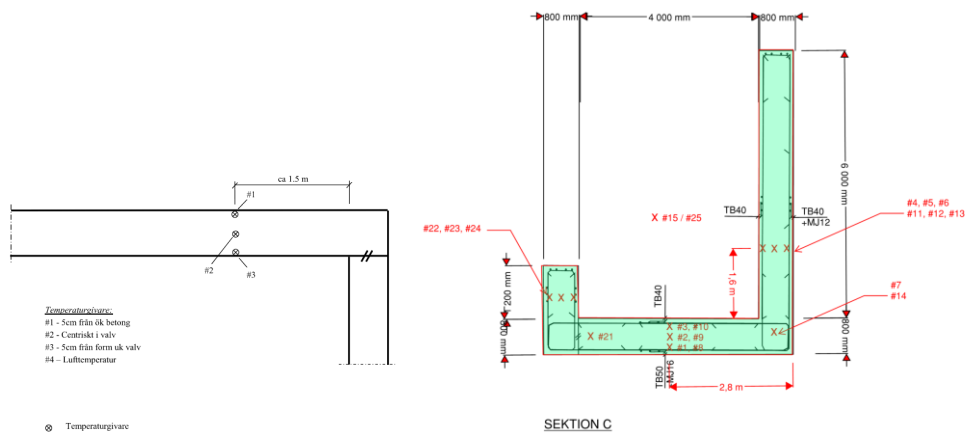
4.2 Temperaturmätning

Inför gjutningen av mock-upen har erforderliga temperatursprickåtgärder utformats utifrån de receptspecifika materialparametrarna för den klimatförbättrade betongen, se avsnitt 3.5. Dessa dimensionerade temperatursprickåtgärder utfördes vid gjutning och härdning av mock-upen. Betongens temperaturutveckling kontrollerades för att verifiera överensstämmelse med beräknad temperaturutveckling utifrån de receptspecifika materialparametrarna för den aktuella klimatförbättrade betongen.

Temperaturgivare monterades i bottenplatta, vägg och valv enligt nedanstående Figur 6 – Figur 8 nedan.



Figur 6: Temperaturgivare i bottenplatta och vägg (mock-up).



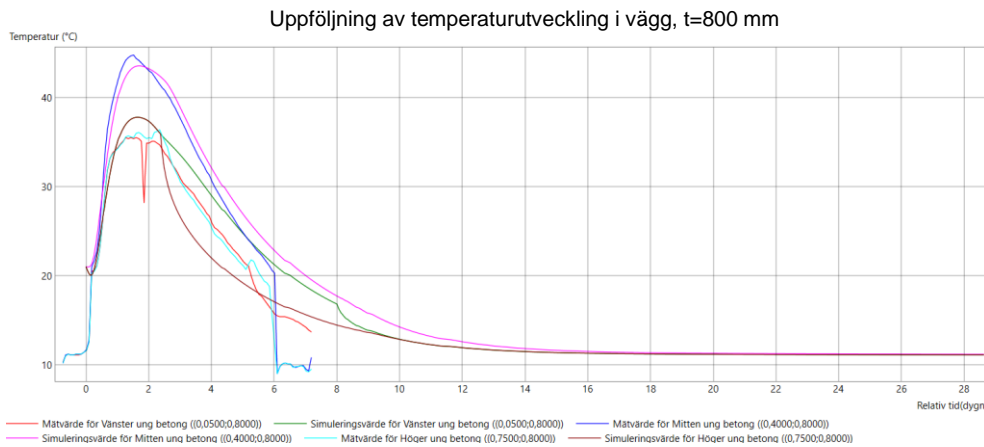
Figur 7: Temperaturgivare i valv, bottenplatta och vägg (mock-up).



Figur 8: Gjutning av valvkonstruktion (mock-up).

4.3 Temperaturutveckling

Uppmätt temperaturutveckling vid provgjutningen (mock-up) har jämförts med beräknad temperaturutveckling för aktuell betong utifrån de receptspecifika materialparametrarna för klimatförbättrad anläggningsbetong med 50 % slagg. I nedanstående Figur 9 redovisas den uppmätta och beräknade temperaturutvecklingen i väggen som gjuts tillsammans med bottenplattan.

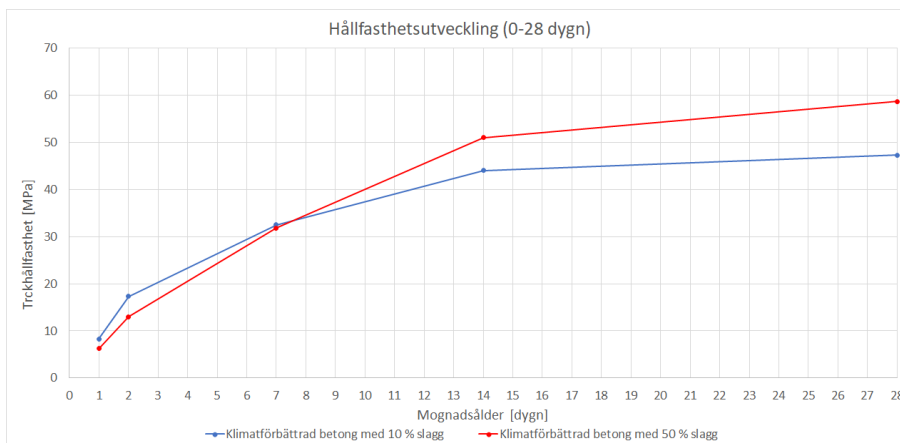


Figur 9: Uppföljning av temperaturutveckling i mock-up (Vägg t=800 mm). Temperaturgivarnas placering framgår av Figur 6.

Vid uppföljningen har beräkningen anpassats efter de rådande temperaturförhållandena vid gjuttillfället. Som ses är överensstämmelsen mellan den uppmätta och beräknade temperaturutveckling god.

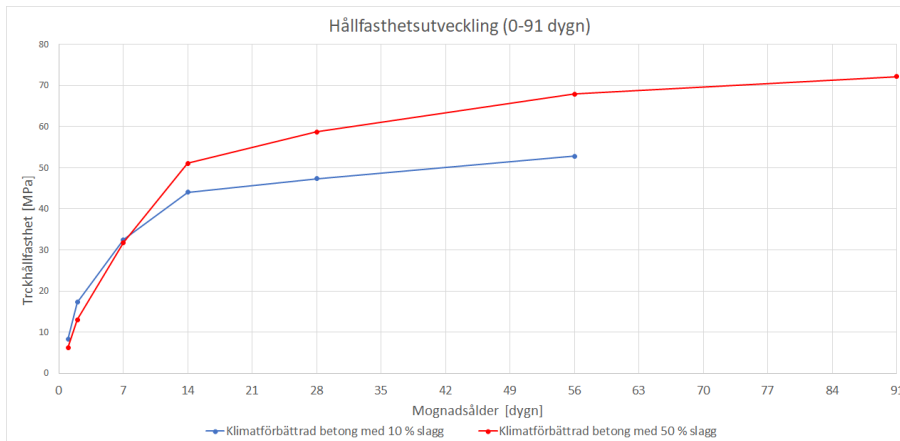
4.4 Hållfasthetsutveckling

Vid provgjutningen (mock-up) utvärderades hållfasthetsutveckling för de två klimatförbättrade anläggningsbetongerna, med 10 % respektive 50 % slagg, genom provning av kuber. Betongens uppmätta hållfasthetsutveckling till och med 28 dygns mognadsålder framgår av Figur 10 nedan. Som ses skiljer sig hållfasthetsutvecklingen beroende på hur stor andel slagg som tillsats. Hållfasthetsutvecklingen är inledningsvis långsammare för anläggningsbetongen med 50 % slagg än den med 10 % slagg. Efter 7-8 dygn har den klimatförbättrade anläggningsbetongen med 50 % slagg kommit i kapp.



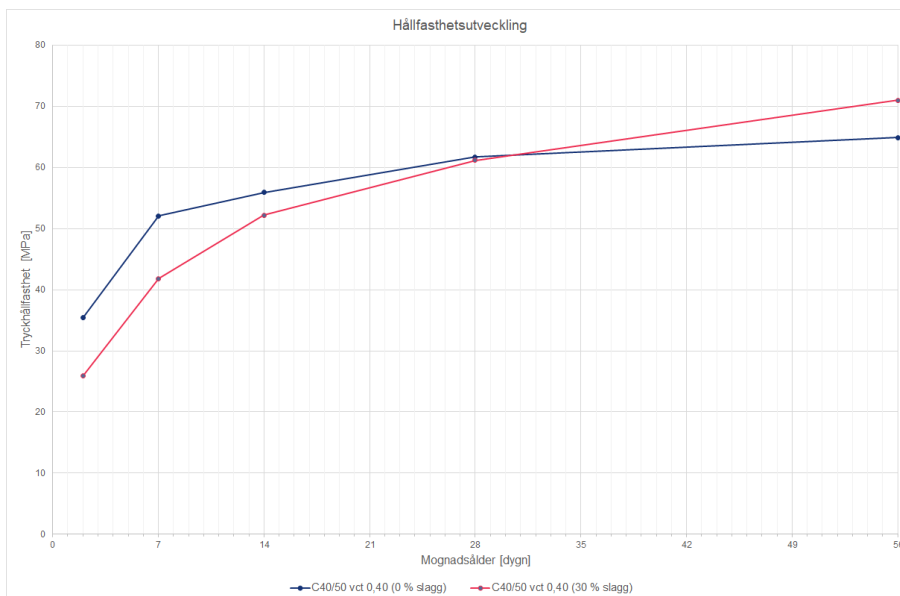
Figur 10: Hållfasthetsutveckling 0-28 dygn för klimatförbättrad anläggningsbetong med 10 % respektive 50 % slagg.

I nedanstående Figur 11 ses hållfasthetsutvecklingen även efter 28 dygns mognadsålder, dvs. till och med 56 respektive 91 dygns mognadsålder. Resultaten indikerar att tryckhållfasthetstillväxten för den klimatförbättrade anläggningsbetongen med 50 % slagg är högre efter 28 dygns mognadsålder än för den klimatförbättrade anläggningsbetongen med 10 % slagg.



Figur 11: Hållfasthetsutveckling 0-91 dygn för klimatförbättrad anläggningsbetong med 10 % respektive 50 % slagg.

I projekt Hamnbanan provades ingen betong helt utan slagg. För att visa på en jämförelse mellan anläggningsbetong utan slaggtillsats och en klimatförbättrad anläggningsbetong med slagg visas ett exempel från ett annat anläggningsprojekt där den klimatförbättrade anläggningsbetongen har en slaggtillsats på ca. 30 %, se Figur 12 nedan.



Figur 12: Jämförelse mellan anläggningsbetong utan slagg och klimatförbättrad anläggningsbetong med 30 % slaggtillsats. (Ej Hamnbanan)

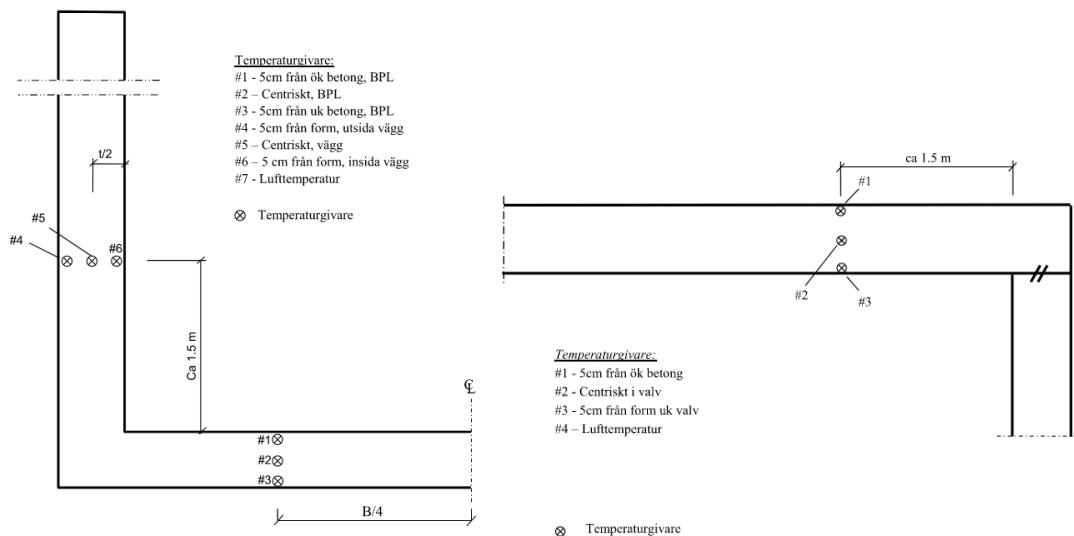
Som ses i Figur 12 ovan fås en betydande hållfasthetstillväxt efter 28 dygns mognadsålder, vilket inte ses lika tydligt för anläggningsbetongen utan slagg där hållfasthetsutvecklingen planar ut efter 28 dygn.

5 Permanent tunnelkonstruktion

Tunnelkonstruktionens geometri och erforderliga temperatursprickåtgärder för klimatförbättrad anläggningsbetong med 10 % resp. 50 % slagg (GGBS) framgår av kapitel 3.

5.1 Temperaturmätning

Vid gjutningar av den permanenta tunnelkonstruktionen har temperaturmätningar utförts i bottenplattor, väggar och valv med ingjutna temperaturgivare placerade enligt nedanstående principskisser i Figur 13.

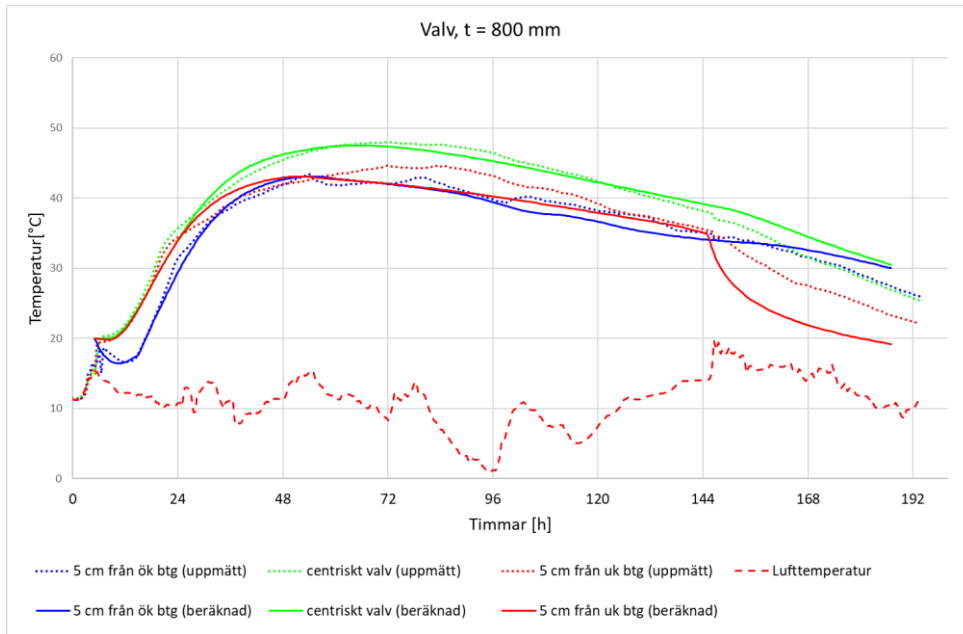


Figur 13: Temperaturgivarnas placering i tunnelmonoliternas gjutdelar, dvs. bottenplatta, vägg och valv.

5.2 Uppföljning av temperaturutveckling

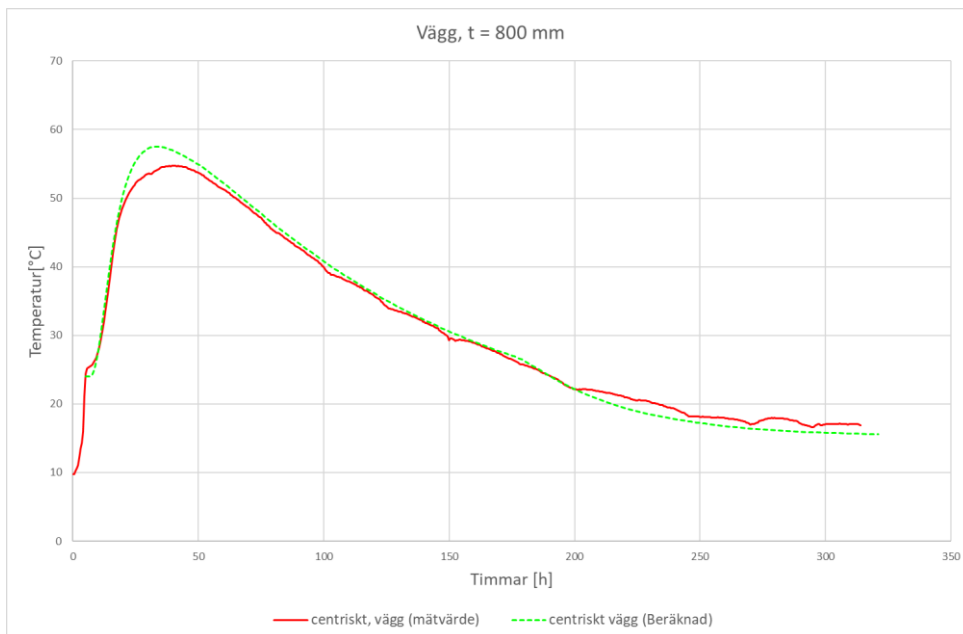
Uppföljning av betongens temperaturutveckling har i aktuellt anläggningsprojekt utförts genom jämförelse mellan beräknad temperaturutveckling för betong baserad på de receptspecifika materialparametrarna och registrerad (uppmätt) betongtemperatur i konstruktionsdelar gjuten med aktuell betongsammansättning. Uppföljningar i detta projekt har utförts vid olika temperaturförutsättningar.

I Figur 14 nedan ses ett exempel på uppföljning av temperaturutveckling i ett valv gjutet under hösten 2021 med klimatförbättrad anläggningsbetong sammansatt av Anläggningscement (CEM I) och ca 50 % slagg (GGBS, EcoCem).



Figur 14: Uppföljning av temperaturutveckling i valv (t = 800 mm).
Klimatförbättrad anläggningsbetong med ca. 50 % slagg (GGBS).

I Figur 15 nedan ses ett exempel från en uppföljning av temperaturutvecklingen i en vägg gjuten under hösten 2021 med klimatförbättrad anläggningsbetong sammansatt av Anläggningscement (CEM I) och ca 10 % slagg (GGBS, EcoCem).



Figur 15: Uppföljning av temperaturutveckling i vägg (t = 800 mm).
Klimatförbättrad anläggningsbetong med ca. 10 % slagg (GGBS).

Överensstämmelsen mellan uppmätt och beräknad temperaturutveckling har i det aktuella anläggningsprojektet (Hamnbanan) varit mycket god.

Efter gjutning och genomförda temperatursprickåtgärder har sprickinventering utförts av aktuella konstruktionsdelar. De temperatursprickåtgärder som utformats för det aktuella anläggningsprojektet har visat på gott resultat avseende ”sprickfrihet”.

6 Erfarenheter

I detta kapitel sammanställs erfarenheter från temperatursprickanalyser och gjutningar vid projekt Hamnbanan. Eftersom den klimatförbättrade betongen med 50 % slagg även använts i andra anläggningsprojekt har vissa erfarenheter från dessa inkluderats.

6.1 Temperaturutveckling

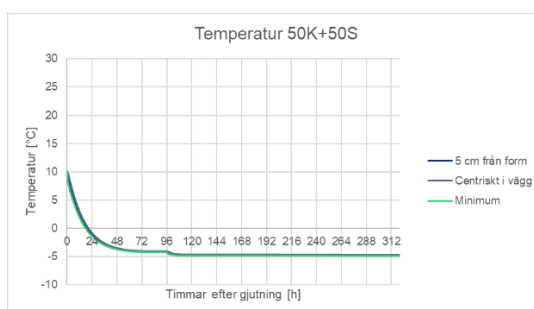
6.1.1 Klimatförbättrad anläggningsbetong med lägre andel slagg

Vid gjutning med klimatförbättrad anläggningsbetong med relativt låg andel slagg (< 25 %) är erfarenheten från analyser och temperaturmätningar att betongens temperaturutveckling inte skiljer sig påtagligt annorlunda jämfört med icke klimatförbättrad betong. En något lägre maxtemperatur och ett lite mer utdraget temperaturförlopp kan dock konstateras. Skillnaden i värmeutveckling och därmed temperaturutveckling är dock inte större än att gjutningar normalt kan hanteras genom lika temperatursprickåtgärder som för traditionell anläggningsbetong utan slagg.

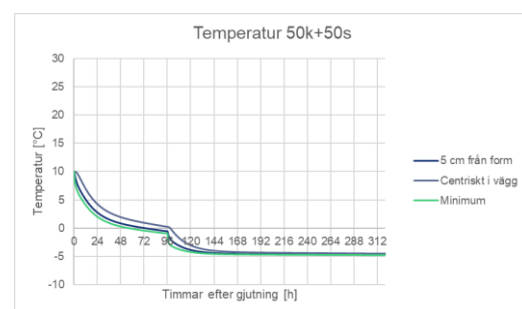
6.1.2 Klimatförbättrad anläggningsbetong med hög andel slagg

Vid gjutning med klimatförbättrad anläggningsbetong med hög andel slagg (> 25 %) erhålls lägre värmeutveckling och en tydligt lägre maxtemperatur än vid gjutning med betong utan eller med lägre andel slagg vid i övrigt lika förutsättningar.

Analyser av vintergjutningar har visat att tunnare konstruktioner gjutna med klimatförbättrad betong med en högre andel slagg omkring 40-50 % kan vara problematiska redan vid några minusgrader om inte extra vinteråtgärder sätts in. Värmeutvecklingen i betongen är i dessa fall otillräcklig för att få en temperaturökning i konstruktionen efter gjutning. I extrema fall sjunker betongtemperaturen tämligen omedelbart efter gjutning och riskerar tidig frysning utan extra värmningsåtgärder. Nedan ses två exempel på vintergjutning av väggar med tjocklek 250 mm respektive 500 mm där inga vinteråtgärder utförs. I båda exemplen är omgivande lufttemperatur $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ och betongens gjuttemperatur $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Figur 16: Temperaturutveckling i vägg med tjocklek 250 mm, vilken är gjuten med klimatförbättrad betong med 50 % slagg. Vintergjutning ($-5\text{ }^{\circ}\text{C}$) utan värmningsåtgärder.



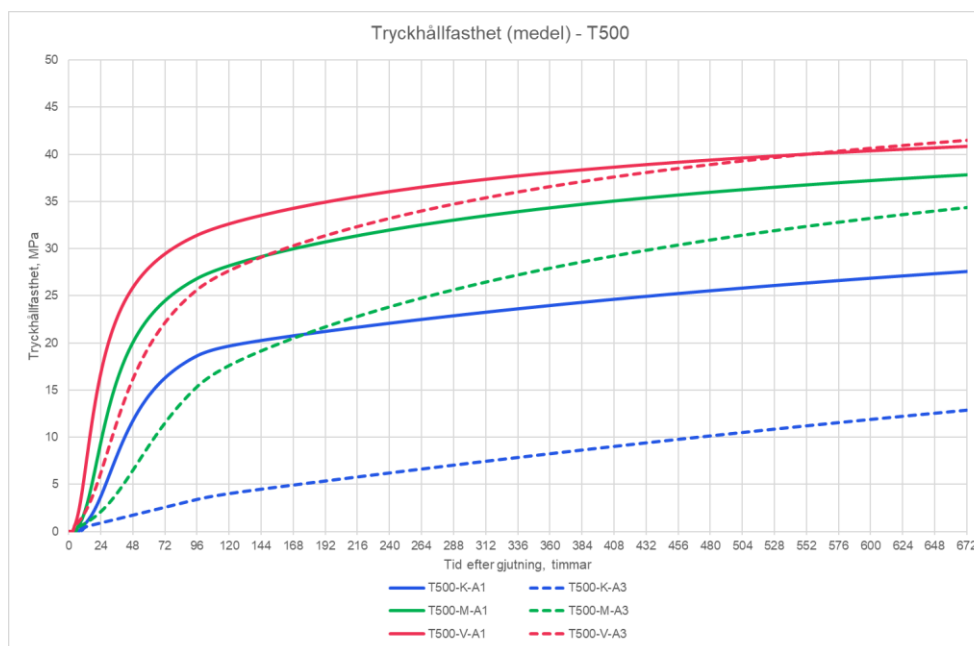
Figur 17: Temperaturutveckling i vägg med tjocklek 500 mm, vilken är gjuten med klimatförbättrad betong med 50 % slagg. Vintergjutning ($-5\text{ }^{\circ}\text{C}$) utan värmningsåtgärder.

För att, i exemplen ovan, erhålla en temperaturökning efter gjutning som innebär att gjuttemperaturen överskrider erfordras täckning av form med isolering och vid behov i kombination med högre gjuttemperatur.

6.2 Hållfasthetsutveckling

Den klimatförbättrade anläggningsbetongens hållfasthetsutveckling är inledningsvis långsammare än motsvarande traditionell anläggningsbetong. Hållfasthetsutvecklingens hastighet går inledningsvis långsammare med ökad mängd slagg på grund av att betongens värmeutveckling minskar av samma anledning. Beroende på konstruktionens tjocklek, temperaturförhållanden och slagginblandningens storlek kommer den klimatförbättrade betongens tryckhållfasthet att komma i kapp och förbi en motsvarande traditionell betong (utan slagg) vid någon tidpunkt efter gjutning. Vid gjutning av tunna konstruktioner under kallare förhållanden kan detta dock ta mycket lång tid om inte tillräckliga temperaturstyrande åtgärder sätts in.

I nedanstående Figur 18 ges exempel på beräknad hållfasthetsutveckling i en vägg med tjocklek 500 mm och gjuten med klimatförbättrad betong med slagginblandning 10 % respektive 50 % vid olika temperaturförhållanden. I detta exempel ses att den klimatförbättrade anläggningsbetongen med 50 % slagg inledningsvis går långsammare än betongen med 10 % slagg i samtliga analyserade beräkningsfall. I det varmare beräkningsfallet ses att betongen med 50 % slagg hinner i kapp och förbi betongen med 10 % slagg före 28 dygn. Vid kallare gjutförhållanden ses att det tar betydligt längre tid.



Figur 18: Jämförelse av hållfasthetsutveckling i en vägg med tjocklek 500 mm (T500) för klimatförbättrad anläggningsbetong med 10 resp. 50 % slagg (A1 resp. A3). Analyserade temperaturfall är vinter (K), vår/höst (M) och sommar (V).

6.2.1 Klimatförbättrad anläggningsbetong med lägre andel slagg

Hållfasthetsutvecklingen påverkas precis som temperaturutvecklingen av inblandning av slagg (GGBS). Vid lägre inblandning av slagg (< 25 %) är dock erfarenheten att påverkan är relativt begränsad jämfört med en traditionell anläggningsbetong utan slagg. Vid slagginblandningar närmare 25 % och där exempelvis en viss härdningsklass skall uppnås innan avtäckning eller formrivning kan den klimatförbättrade anläggningsbetongen dock behöva viss hjälp i form av täckning eller lite högre gjuttemperatur.

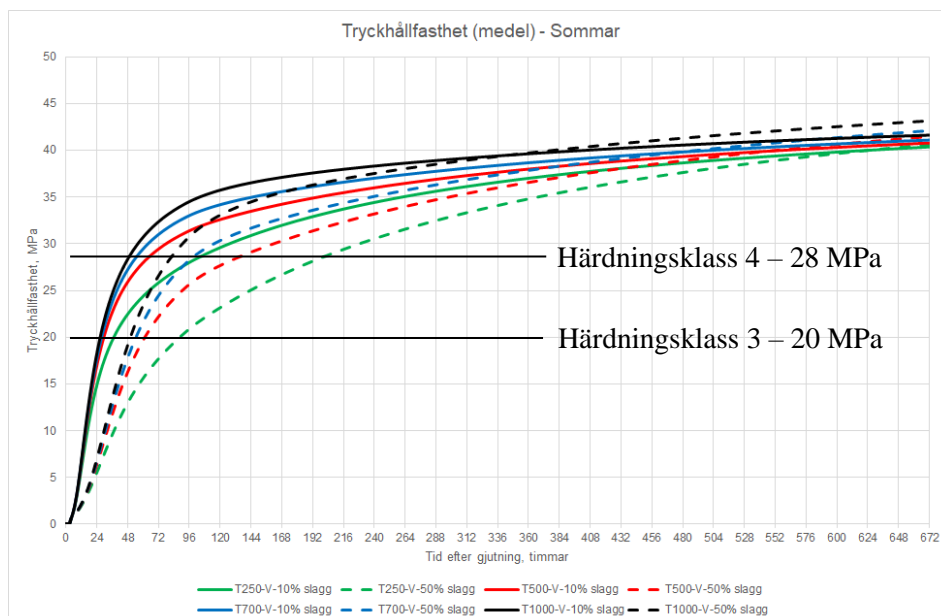
6.2.2 Klimatförbättrad anläggningsbetong med hög andel slagg

Erfarenheten från analyser och temperaturmätningar i detta projekt är att det framför allt är vid gjutningar under vinterhalvåret och med klimatförbättrad anläggningsbetong, med högre andel slagg (> 25 %), som problem med långsam hållfasthetsutveckling uppstår.

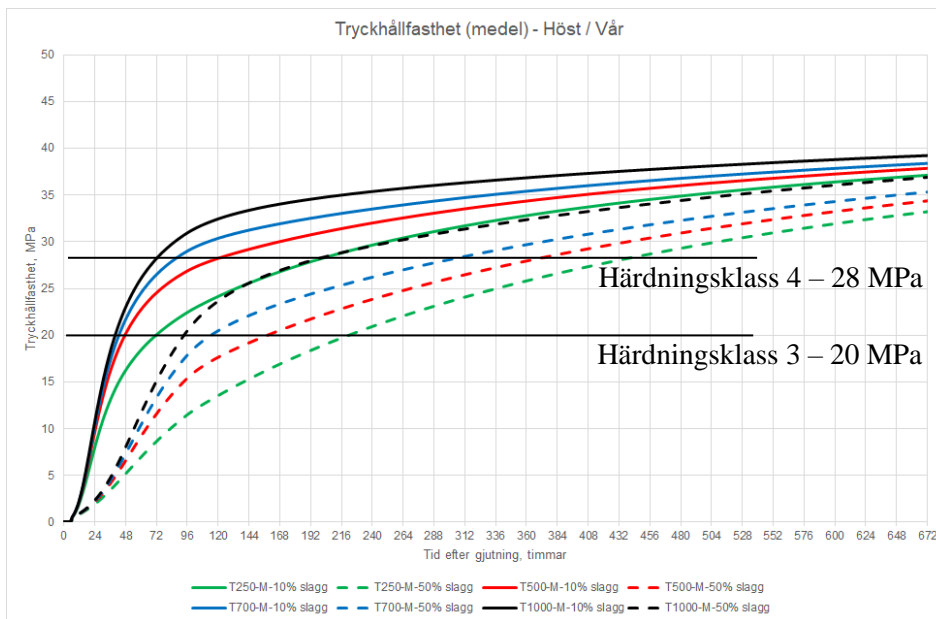
Vid slagginblandning närmare 50 % och utan värmningsåtgärder finns risk att betongens tryckhållfasthet inte hinner uppnå 5 MPa innan betongmassan fryser. Vintertid erfordrar klimatförbättrad betong med hög andel slagg (> 25 %) temperaturstyrande åtgärder i form av värmning, isolering och/eller högre gjuttemperatur. Detta på grund av risk för tidig frysning men även för att uppnå kravställd formrivningshållfasthet och härdningsklass inom rimlig tid efter gjutning.

Under sommarhalvåret är risken för tidig frysning obefintlig men den långsammare hållfasthetsutvecklingen kan ändå ha påverkan på ett projekts framdrift. Detta eftersom höga slagginblandningar innebär att tiden tills kravställd härdningsklass eller formrivningstid blir längre.

I det aktuella anläggningsprojektet (Hamnbanan) är hållfasthetsklassen C32/40, vilket innebär att härdningsklass 3 motsvarar 20 MPa och härdningsklass 4 motsvarar 28 MPa. I Figur 19 och Figur 20 ses beräknad hållfasthetsutveckling för väggar med olika tjocklekar och gjutna med betong innehållande 10 respektive 50 % slagg. I figurerna ses att tiden för att uppnå respektive härdningsklass blir omkring 2-3 gånger så lång under sommarhalvåret med klimatförbättrad betong med 50 % slagg jämfört med 10 % slagg om inga temperaturstyrande åtgärder utförs.



Figur 19: Beräknad hållfasthetsutveckling vid sommarjutning av väggar med olika tjocklekar (250-1000 mm). Helledrade linjer avser 10 % slagg och streckade linjer 50 % slagg.



Figur 20: Beräknad hållfasthetsutveckling vid höst/vår-gjutning av väggar med olika tjocklekar (250-1000 mm). Helderagna linjer avser 10 % slagg och streckade linjer 50 % slagg.

Beroende på hur snabbt kravställd härtningsklass eller formrivningshållfasthet önskas uppfyllas kan alltså extra åtgärder i form av täckning eller högre gjuttemperatur erfordras även under sommarhalvåret.

6.3 Temperatursprickrisk

Risken för temperatursprickor beror av flera faktorer, som exempelvis temperaturförhållanden, formrivningstid och motgjutningar. Vid simuleringar av tunna och medelgrova väggkonstruktioner ($t < \text{ca } 0,7 \text{ m}$) visar analyser att temperatursprickrisken minskar med ökad mängd slagg, vid i övrigt lika förutsättningar. Den lägre temperatursprickrisken beror på den minskade värmeutvecklingen genom inblandning av slagg. Det skall dock nämnas att vid vintergjutningar och höga slagginblandningar kan tunnare konstruktioner med tjocklek omkring 0,2-0,5 m erfordra temperaturstyrande åtgärder för att exempelvis undvika tidig frysning. Dessa åtgärder kan i sin tur resultera i en högre risk för temperatursprickor jämfört med en betong utan eller med låg inblandning av slagg och som inte erfordrar temperaturstyrande åtgärder.

Vid simulering av grövre konstruktioner ($t \geq \text{ca } 0,7 \text{ m}$) har resultaten inte varit lika entydiga. Under vinterhalvåret ses en tendens till att temperatursprickrisken minskar med ökad slagginblandning, som vid tunnare konstruktioner. Under den varmare perioden av året ses tendens till att temperatursprickrisken för betong med hög andel slagg kan vara lika eller något högre än för betong med lägre andel slagg, vid i övrigt lika förutsättningar.

Sammanfattningsvis beror risken för temperatursprickor av många olika faktorer. Vid lika förutsättningar vid gjutning ses att temperatursprickrisken minskar med ökad slagginblandning. Den minskade risken för temperatursprickor med ökande andel slagg är tydligare för tunnare konstruktioner än grövre. I praktiken kommer dock olika inblandning av slagg erfordra olika temperatursprickåtgärder med olika omfattning, varför temperatursprickrisken i slutändan kan bli högre med en hög andel slagg i betongen jämfört med en låg andel slagg.

6.4 Temperatursprickåtgärder

6.4.1.1 Temperaturstyrning

Under vinterperioden erhålls en relativt låg värmeutveckling vid gjutning med klimatförbättrad anläggningsbetong med en högre andel slagg. Av denna anledning erfordras ofta extra åtgärder för att höja betongtemperaturen. Dessa åtgärder har som syfte att undvika risk för tidig frysning samt möjliggöra formrivning och uppnå aktuell härdningsklass inom rimlig tid efter gjutning. Utifrån erfarenheterna i detta projekt ses att dessa extra åtgärder ofta resulterar i att risken för temperatursprickor blir högre jämfört med om gjutning utförts med en betong utan eller med lägre andel slagg och utan extra åtgärder.

Av de erforderliga temperatursprickåtgärder som utformats enligt avsnitt 3.3 ses att framför allt att den klimatförbättrade anläggningsbetongen med 50 % slagg under vinterperioden erfordrar mer omfattande och mer tidspåverkande åtgärder för produktionen än vad betong utan eller med lägre andel slagg medför. Sådana åtgärder kan t.ex. vara täckning med isolermattor och under betydligt längre tid innan avformning och avtäckning kan ske. Som tidigare nämnts är syftet med dessa åtgärder att höja temperaturen och tryckhållfastheten i konstruktionen för att undvika tidig frysning och uppfylla formrivningshållfasthet och härdningsklass inom rimlig tid efter gjutning. Dock innebär denna temperaturstyrande åtgärd att täckning måste ligga kvar under längre tid för risken för temperaturrelaterad sprickbildning skall vara acceptabel.

Vid gjutning under vinterperioden med klimatförbättrad anläggningsbetong med hög andel slagg bör alltså behovet av längre formrivnings- och avtäckningstider än normalt beaktas vid upprättande av produktionstidplaner.

6.4.1.2 Kylning

Vid gjutningarna vid det aktuella anläggningsprojektet (Hamnbanan) eller andra projekt där den klimatförbättrade anläggningsbetongen använts har inte kylning erfordrats för att begränsa temperatursprickrisken. Men vid gjutning med traditionell betong under vinterperioden kan kylning vara en tänkbar åtgärd för att möjliggöra kortare formrivningstider och samtidigt begränsa risken för temperatursprickor. Erfarenheten från analyser är att klimatförbättrad anläggningsbetong med låg andel slagg (10 %) kan kylas, genom ingjutna kylrör, med likartat resultat som vid kylning av traditionell anläggningsbetong utan slagg.

Vid kylning av klimatförbättrad anläggningsbetong med högre andel slagg (25 resp. 50 %) är erfarenheten från analyser att kylning förvisso sänker spänningskvoten, men samtidigt medför att den redan låga värmeutvecklingen och långsamma hållfasthetsutvecklingen sänks ytterligare. Detta resulterar i en högre risk för tidig frysning samt att erforderlig formrivningshållfasthet och härdningsklass inte uppnås vid normala formrivningstider (4-7 dygn). Ingjutna kylrör behöver i förekommande fall kombineras med extern uppvärmning och/eller att formen isoleras, vilket i sin tur får konsekvensen att formrivningstiden behöver förlängas för att inte överskrida tillåten nivå av temperatursprickrisk. Lösningarna blir i dessa fall relativt komplicerade.

6.5 Gjutning och härdning

I detta avsnitt redogörs för några erfarenheter från provgjutningen (mock-up) och gjutningar av permanenta konstruktioner i projekt Hamnbanan.

Enligt arbetsledningen vid det aktuella anläggningsprojektet (Hamnbanan) är erfarenheten att den klimatförbättrade betongens arbetbarhet är likvärdig eller bättre än motsvarande konventionell anläggningsbetong utan slagg. En iakttagelse var att den klimatförbättrade anläggningsbetongen med 50 % slagginblandning och konsistensklass S3 betedde sig ungefär som en motsvarande anläggningsbetong utan slagg med konsistensklass S4.

I samband med provgjutningen (mock-up), tidigare redovisa i avsnitt 4, utvärderades betongens gjutegenskaper. Vid gjutningen undersöktes betongens stabilitet vid kompaktering (vibrering). Vid kompaktering av den klimatförbättrade anläggningsbetongen med 10 % slagg kunde ingen större skillnad konstateras jämfört med en motsvarande anläggningsbetong utan slagginblandning. Ingen separationstendens kunde ses vid kompaktering av denna betong i upp till 90 sekunder. Vid kompaktering av den klimatförbättrade anläggningsbetongen med 50 % slagg kunde däremot separations-tendenser konstateras efter ca. 40 sekunder, varför rekommendationen i detta fall var att kompaktering begränsas till omkring 30 sekunder.

Vid provgjutningen (mock-up) utfördes också tester att pumpa betongen genom rör med total längd på lite drygt 100 m. Erfarenheten från dessa tester var att det var fullt möjligt att pumpa den klimatförbättrade betongen med 50 % slagg långa sträckor (> 100m). Dock kunde det konstateras att väl smorda rör med cementsluring var en förutsättning för ett lyckat resultat, då det annars uppstod stopp i rören.

Även formtryck studerades i samband med provgjutningen (mock-up). Stighastigheten under den aktuella gjutningen var 1-1,5 m/h och slutsatsen från undersökningen var att inblandning av slagg inte har någon nämnvärd påverkan på formtrycket under gjutning.

Slagginblandning i betongen medför en viss retardation av betongen, varför tidpunkten för när det är möjligt att täcka betongytan med plastfolie fördröjts. Erfarenheten från projekt Hamnbanan är att detta i praktiken har inneburit att man behövt spruta vattendimma över betongytan för att hålla dessa fuktiga fram till dess att täckning med plast varit möjlig. Detta eftersom täckning med plast inte varit möjlig att utföra lika tidigt som vid gjutning med anläggningsbetong utan slagg, på grund av risk för avtryck i betongytan. Maskinglättning har inte varit aktuellt i något av anläggningsprojekten, där den klimatförbättrade anläggningsbetongen använts, men den nämnda retardationen bör rimligtvis även fördröja tidpunkten då glättning kan påbörjas.

6.6 Sprickor

Varken i det aktuella anläggningsprojektet (Hamnbanan) eller andra anläggningsprojekt, där den aktuella klimatförbättrade anläggningsbetongen har använts, har någon temperaturrelaterad sprickbildning kunnat konstateras. De dimensionerade temperatursprickåtgärderna torde därmed fungerat väl i projekten.

Plastiska krympsprickor och sättsprickor har uppstått i ett par av projekten. Enligt Betonghandbok Material Del I kan doseringar av slagg över 30 % orsaka en retardation, vilken ökar risken för plastiska krympsprickor. Detta är sannolikt orsaken till sprickorna i de aktuella projekten, då betongens bindetid har senarelagts och därmed tidsfönstret då plastiska krympsprickor kan uppstå har förlängts.

I ett mindre anläggningsprojekt har även sprickor, som kan härledas till autogen krympning, konstaterats i tidigt skede. Enligt Betonghandbok Material Del I anges att betong med vct 0,50-0,55 uppvisar en autogen krympning som inte kan negligeras samt att den autogena krympningen ökar med minskande vct och ökande finmaterialhalt. Den aktuella klimatförbättrade anläggningsbetongen med 50 % slagg har ett vct_{ekv} på 0,50 och relativt hög finmaterialhalt genom den tillsatta slaggen, varför den autogena krympningen inte kan försummas.

7 Diskussioner

7.1 Klimatförbättrad anläggningsbetong

7.1.1 Vintergjutningar

Erforderliga temperatursprickåtgärder för den klimatförbättrade anläggningsbetongen med Anläggningscement (CEM I) och större andel slagg har i denna studie visats vara starkt temperaturberoende. Under vinterperioden visar resultaten att åtgärderna blir mer omfattande och ibland mer komplicerade med längre form- och täckningstider än normalt vid gjutning med traditionell anläggningsbetong. En tänkbar lösning på detta problem kan t.ex. vara att begränsa användningen av betong med högre inblandning av slagg till varmare årstider, och använda betonger med lägre andel slagg (< 25%) under vinterperioden.

Betongtillverkarna i branschen är väl medvetna om denna vinterproblematik och sannolikt pågår utveckling av betongrecepturen för att minska effekten av detta problem. En tänkbar lösning kan vara användande av accelererande tillsatsmedel i betongen, vilket kan hjälpa betongen att komma i gång i kallare klimat. Dock skall man vara medveten om att detta förändrar betongens beteende och att de materialparametrar som tillhandahålls i detta projekt avser betong utan accelererande tillsatsmedel. Eventuell justering av materialparametrar, för att komma runt detta, rekommenderas inte utan mycket god kunskap om hur de olika parametrarna påverkar betongens beteende. I ett sådant fall kan förnyad provning av receptspecifika materialparametrar vara nödvändig.

Framtida bindemedelskombinationer kommer att innebära förändringar och utmaningar för branschen. En tänkbar lösning på vinterproblematiken och den klimatförbättrade betongens låga värmeutveckling kan möjligen vara att kompensera detta genom att använda ett mer finmalt cement och på så sätt erhålla en högre värmeutveckling.

7.1.2 Val av temperatursprickåtgärder

Vid analyserna i detta projekt har kylning med ingjutna kylrör använts som temperatursprickåtgärd i de fall risken för temperatursprickor varit för hög. Kylning av klimatförbättrad betong med högre andel slagg (ca. 50 %) har genom denna studie visat sig resultera i komplicerade lösningar där kylning ofta behöver kombineras med värmningsåtgärder. Detta problem består i att samtidigt som kylningen minskar risken för temperatursprickor så minskar kylningen även den redan långsamma temperatur- och hållfasthetsutvecklingen. Detta medför att framför allt betongtemperaturen i konstruktionens yttre delar behöver höjas genom värmningsåtgärder för att undvika tidig frysning samt för att uppnå aktuell härdningsklass inom rimlig tid.

En alternativ åtgärd till kylning är att gjuta in värmekablar i motgjuten konstruktion, vilket det inte funnits utrymme för att studera i detta projekt. Men det är tänkbart att uppvärmning av en motgjuten konstruktion lättare kan kombineras med värmning och/eller isolering av nygjuten betong. Detta för att samtidigt uppfylla krav på härdningsklass, risk för tidig frysning och temperatursprickrisk. Ingjutna värmekablar är en metod som inte är tillämpbar i lika många situationer som kylning, men är en möjlig lösning som bör beaktas.

Ett annat alternativ, som inte heller studerats i detta projekt, kan vara att använda sig av injutna kylrör, men i stället för att använda sig av ”kallvatten” anpassas vattentemperaturen för att inte erhålla en lika kraftig kylning av betongkonstruktionen.

7.2 Sprickor

Plastiska krympsprickor har uppkommit i ett par av anläggningsprojekten där den klimatförbättrade anläggningsbetongen med 10 respektive 50 % slagg använts. Enligt Betonghandbok Material Del I finns en ökad risk för denna spricktyp vid doseringar av slagg över 30 % på grund av den retardation som slaggen orsakar. Enligt erfarenheter och lärdomar från aktuella anläggningsprojekt är det möjligt att undvika plastiska krympsprickor men det kräver att produktionsmetoder anpassas efter den klimatförbättrade betongens egenskaper. Det går med andra ord inte alltid att använda produktionsmetoder som tidigare fungerat väl vid gjutningar med konventionell anläggningsbetong utan slagg.

8 Rekommendationer

8.1 Utformning av temperatursprickåtgärder

8.1.1 Klimatförbättrad anläggningsbetong med lägre andel slagg

Vid analyser av anläggningsbetong med relativt låg andel slagg (< 25 %) ses att betongen inte beter sig påtagligt annorlunda än icke klimatförbättrad betong. En något lägre maxtemperatur och ett lite mer utdraget temperaturförlopp kan förväntas, men produktionsmetoder behöver som regel inte anpassas i någon betydande grad med avseende på betongens temperaturutveckling.

Rekommendationen är att utforma temperatursprickåtgärder som för icke klimatförbättrad anläggningsbetong. Vid en andel slagg närmare 25 % kan dock extra täckning av konstruktionens ytor erfordras vid kall väderlek. Detta för att uppnå föreskrivna krav avseende formrivningshållfasthet och härdningsklass inom rimlig tid efter gjutning. Omfattningen av extra täckning är givetvis även beroende av hur snabbt dessa kravställningar önskas uppfyllas.

8.1.2 Klimatförbättrad anläggningsbetong med hög andel slagg

Vid analyser av anläggningsbetong med högre andel slagg (25-50%) ses att den unga betongens beteende påverkas högst väsentligt vid gjutning i kall väderlek.

Vid grova till mycket grova konstruktioner ($t \geq$ ca 1 m) och vid gjutning under sommarmånaderna kan oftast traditionella produktionsmetoder användas eftersom värmeutvecklingen i betongen ändå blir tillräcklig för att uppnå tex. en ofta önskad formrivningstid på 4 dygn. Exempelvis kan gjutning med en konventionell betong innebära att krav avseende formrivningshållfasthet och härdningsklass uppfylls redan efter 1-3 dygn medan en motsvarande klimatförbättrad betong med högre andel slagg (25-50 %) uppnår kraven omkring 3-4 dygn.

Vid analys av slankare konstruktioner ses att produktionsmetoder behöver anpassas under framför allt vinterperioden. För södra delen av Sverige handlar det sannolikt om

perioder ungefär från och med november till och med april. I norra Sverige är sannolikt denna period längre. Vid analys av slanka till grövre konstruktioner (ca 0,1-1 m) under sen höst, vinter och tidig vår erfordras värmningsåtgärder i högre utsträckning än vad icke klimatförbättrad betong erfordrar. Värmningsåtgärderna i detta avseende erfordras för att förhindra tidig frysning samt snabba på hållfasthetstillväxten av olika skäl.

Även gjutningar under sommarhalvåret kan behöva temperaturstyrande åtgärder om exempelvis en viss härdningsklass eller ett hållfasthetskrav önskas uppnås inom relativt kort tid efter gjutning.

Åtgärder som kan bli aktuella vid gjutning och härdning är i sig inte några nya metoder, utan metoder som är väl bekanta för branschen, som exempelvis isolermattor, ingjutna värmekablar och värming med värmeaggregat. Skillnaden är att dessa åtgärder kan erfordras under tider på året då branschen inte är van vid att de behövs. Åtgärderna kan även vara mer omfattande, exempelvis tjockare isolering, varmare betong och längre täckningstider än vad som erfordras vid gjutning med traditionell anläggningsbetong utan slagg.

Rekommendationen är att i tidigt skede i samband med val av klimatförbättrad betong med hög andel slagg studera de konsekvenser som den aktuella betongen kan innebära för framdriften i projektet. Utifrån erfarenheterna från temperaturanalyser och gjutningar i detta projekt är rekommendationen att försöka bibehålla den värme som genereras av cementshydrationen genom att täcka in konstruktionen. Denna temperaturprickåtgärd innebär ofta längre form- och täckningstider än normalt, men är att föredra före kylning av betongkonstruktionen, vilket inte sällan medför ännu längre tider. Orsaken till att kylning ofta resulterar i längre tider är att det samtidigt erfordras värmningsåtgärder för att förhindra tidig frysning av betongytan samt undvika långsam hållfasthetstillväxt.

Klimatförbättrad betong med högre andel slagg har en betydande hållfasthetstillväxt efter normenliga 28 dygns mognadsålder. På grund av denna ”överhållfasthet” är rekommendationen att i tidigt skede bedöma om armeringsmängden (sprickarmering) behöver ökas för att uppfylla avsedda sprickbredder.

8.2 Utförande vid gjutning och härdning

Inblandning av slagg innebär en lägre värmeutveckling, varför traditionella produktionsmetoder för konventionell betong (utan slagg) i många fall behöver anpassas efter den klimatförbättrade betongens egenskaper. Exempelvis innebär detta att tidpunkter för när täckning och glättning är möjlig förskjuts framåt i tiden. Detta kan även innebära ett större behov av att betongytor hålls fuktiga genom vattendimma fram till dess att täckning med plastfolie är möjlig. Det kan också innebära att tillfällig isolering kan erfordras vid vintergjutningar för att förhindra tidig frysning av överytor som senare skall maskinglättas.

8.3 Sammanfattande rekommendation

De receptspecifika materiaparametrarna har vid analyser i detta projekt visat på god överensstämmelse med mätningar i det aktuella anläggningsprojektet (Hamnbanan) samt andra anläggningsbetong där den klimatförbättrade betongen använts.

Vid utformning av temperatursprickåtgärder för konstruktioner som skall gjutas med klimatförbättrad anläggningsbetong är rekommendationen följande:

- Temperatursprickåtgärder för klimatförbättrad anläggningsbetong med lägre andel slagg (< 25%) kan ofta utformas på liknande vis och i ungefär samma omfattning som vid gjutning med icke klimatförbättrad anläggningsbetong, baserad på rent Portlandcement (CEM I) och utan tillsatsmaterial. Denna slutsats gäller i de flesta fall under hela året.
- Vid användning av klimatförbättrad anläggningsbetong med högre andel slagg (25-50%) erfordras vintertid temperatursprickåtgärder som är mer omfattande och mer komplicerade än vid gjutning med icke klimatförbättrad betong. Exempelvis erfordras ofta betydligt längre form- och täckningstider än normalt.

Under sommarhalvåret fungerar vanligtvis normala temperatursprickåtgärder, dvs. som vid gjutning med traditionell anläggningsbetong (ej klimatförbättrad), under förutsättning att lite längre tider för avformning och avtäckning kan accepteras. Hur mycket längre denna tid blir är beroende av aktuella temperaturförhållanden och mängden slagg. Om motsvarande tider önskas, som vid gjutning med traditionell anläggningsbetong utan slagg, kan temperaturstyrande åtgärder erfordras.

Slutligen rekommenderas att, i god tid och i samråd med entreprenören, studera de konsekvenser som klimatförbättrad betong kan innebära för framdriften i projektet. Detta gäller framför allt klimatförbättrad betong med högre andel slagg (> 25 %) samt vid gjutningar under vinterhalvåret. Detta rekommenderas för att entreprenören skall ha möjlighet att förbereda sig och planera för åtgärder som kan erfordras.

Vidare är det viktigt att ha med sig att den klimatförbättrade betongen kommer att innebära förändringar av arbetsmetoder, varför tidigare produktionsmetoder för konventionell betong utan slagg sannolikt kommer behöva anpassas. I många fall kan det innebära mindre justeringar av befintliga metoder och i andra fall kan det innebära mer eller mindre nya arbetsmetoder.

Bilaga A: Receptspecifika materialparametrar

I denna bilaga presenteras receptspecifika materialparametrar för ConTeSt RnD v5.0 respektive ConTeSt RnD v5.1. Provingen har utförts av LTU.

Aktuella betongsammansättningar är:

Mix 1 (90C+10S) 10% klinkerersättning*, vct 0.50, ca 350 kg bindemedel.

Mix 2 (75C+25S) 25% klinkerersättning*, vct 0.50, ca 400 kg bindemedel.

Mix 3 (50C+50S) 50% klinkerersättning*, vct 0.50, ca 400 kg bindemedel.

***Obs.** Ovanstående klinkerersättning avser den i projektet eftersträvade ersättningsgraden för respektive betongsammansättning. De verkliga andelarna slagg (EcoCem, GGBS) enligt redovisade betongsammansättningar i denna bilaga är 9 % (Mix 1), 21 % (Mix 2) och 47 % (Mix 3). I Bilaga A används dock 10, 25 respektive 50 % slagg i benämningen av respektive betongsammansättning.

I Bilaga A skall vattencementtal (vct) ses som ekvivalent vattencementtal (vct_{ekv}) eftersom EPCC-konceptet tillämpats med k-värde 0,6.

Uppdrag 20033 Skanska

Materialdata för beräkning av temperatur, hållfasthet och spänningar

Martin Nilsson

Luleå tekniska universitet

Innehåll

1	Inledning	1
2	Betongsammansättning	2
3	Temperaturkänslighet och referenshållfasthet	3
4	Hållfasthetstapp vid förhöjd härdningstemperatur	7
5	Hydratationsvärme	9
6	Krypning	12
7	Frirörelse	15
8	Spänning vid fullständigt tvång	17
9	Erhållna modellparametrar	19
10	Använda modellsamband	21
	10.1 Tendenskurva vid 20°C	21
	10.2 Hållfasthetstapp på grund av förhöjd härdningstemperatur	22
	10.3 Betongens värmeutveckling	23
	10.4 Frirörelser	23
	10.5 Krypning	24
	10.6 Spänning vid fullständigt tvång	25
11	Referenser	28

1 Inledning

Följande utredning omfattar redovisning av mätning av materialegenskaper för hårdnande betong och utvärdering av resultaten. Utredningen är ett uppdrag från Skanska Sverige AB till Luleå tekniska universitet.

Varje betong med en viss sammansättning provas och analyseras vad gäller

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

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

- Temperaturutveckling
- Mognadsgrad i relation till erhållen betongtemperatur
- Hållfasthetstillväxt i relation till erhållen betongtemperatur
- Spänningsutveckling orsakad av temperaturrörelser och fuktrörelser på grund av självuttorkning i betongen

Temperaturutvecklingen styrs framför allt av tre omständigheter:

- Betongens inneboende egenskap att producera värmeenergi exotermiskt under hydratationsprocessen
- Omgivningens, luftens och anslutande konstruktioners temperaturförlopp
- Eventuella arbetsplatsåtgärder, exempelvis täckning, kylning och/eller värmning

En temperaturberäkning leder till att man inom den unga betongen bestämmer dess tillståndsp parametrar temperatur och porfuktighet för en godtycklig punkt.

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, vilket 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 AMA Anläggning, EBE.11, vid planering av materialval och eventuella utförandeåtgärder för anläggningskonstruktioner.

2 Betongsammansättning

Tre (3) blandningsrecept har provats där olika mängd cement ersatts med slagg. Alla recepten är i hållfasthetsklass C32/40 och konsistensklass S3 med vct = 0,50, se Tabell 1. Lufthalt $3,5 \pm 0,5$ % och sättmått 180 ± 30 mm. Recepten är framtagna av Skanska Sverige AB, Skanska Industrial Solution. Flyttillsatsmedlen är SX-A170 och SR-N. Ballastmaterialen är en 0-6 mm kross, en 0-8 mm natur och en 8-16 mm kross.

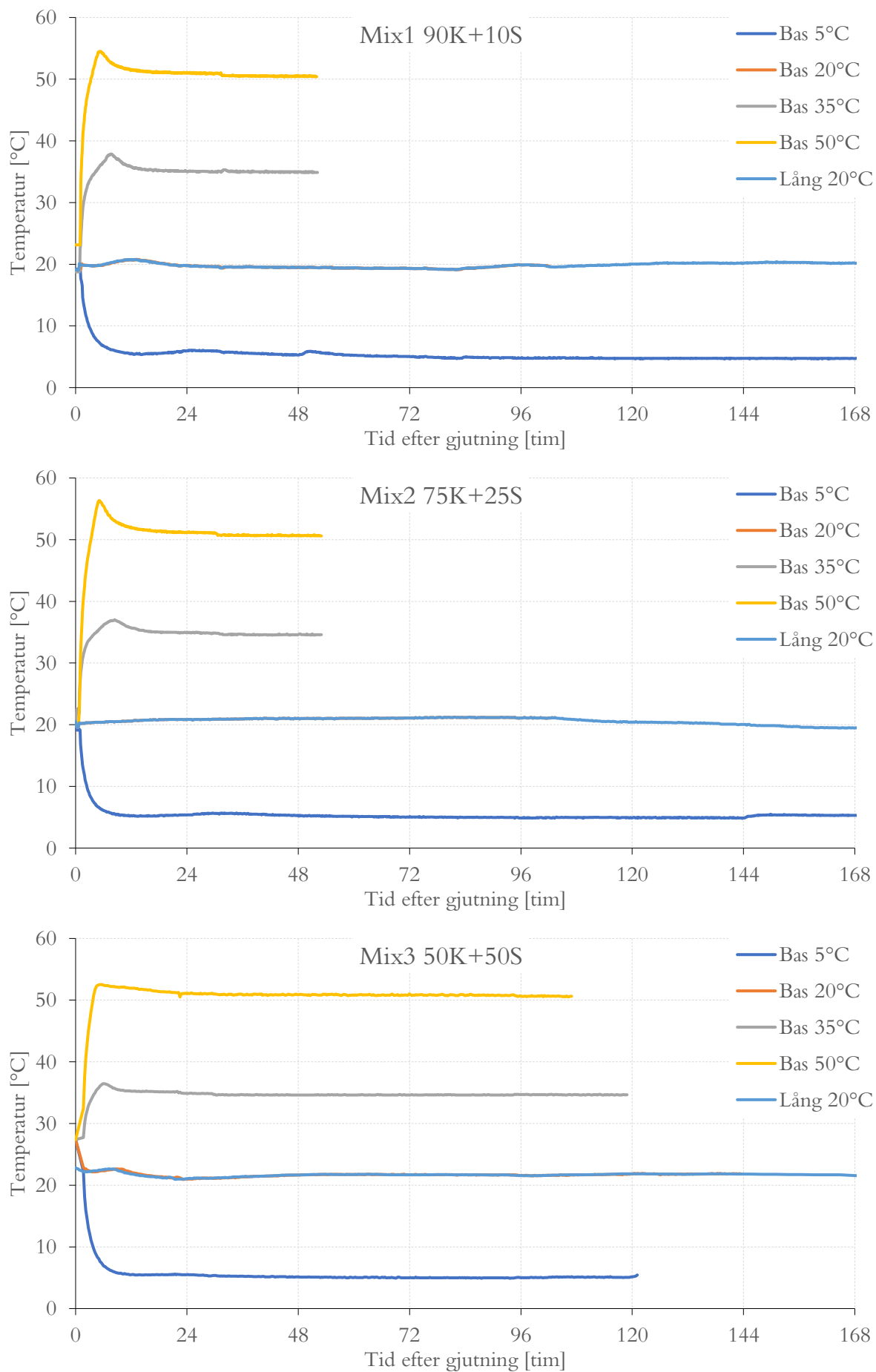
I aktuell rapport betecknas recepten som Mix1 90K+10S, Mix2 75K+25S och Mix3 50K+50S. K=andel cement,

Tabell 1 Betongsammansättning

Delmaterial	Mix1 90K+10S	Mix2 75K+25S	Mix3 50K+50S
Cement Anl. Brevik [kg/m ³]	320,0	316,0	211,0
Slagg [kg/m ³]	30,0	84,0	189,0
Vatten [kg/m ³]	169,0	183,2	162,2
0-6 natur [kg/m ³]	189,1	212,8	472,0
0-8 kross [kg/m ³]	805,1	780,3	622,0
8-16 kross [kg/m ³]	879,4	780,3	798,6
Flytmedel SX-A 170 [kg/m ³]	2,45	2,4	3,6
Flytmedel SR-N [kg/m ³]	0,7	0,8	0,0

3 Temperaturkänslighet och referenshållfasthet

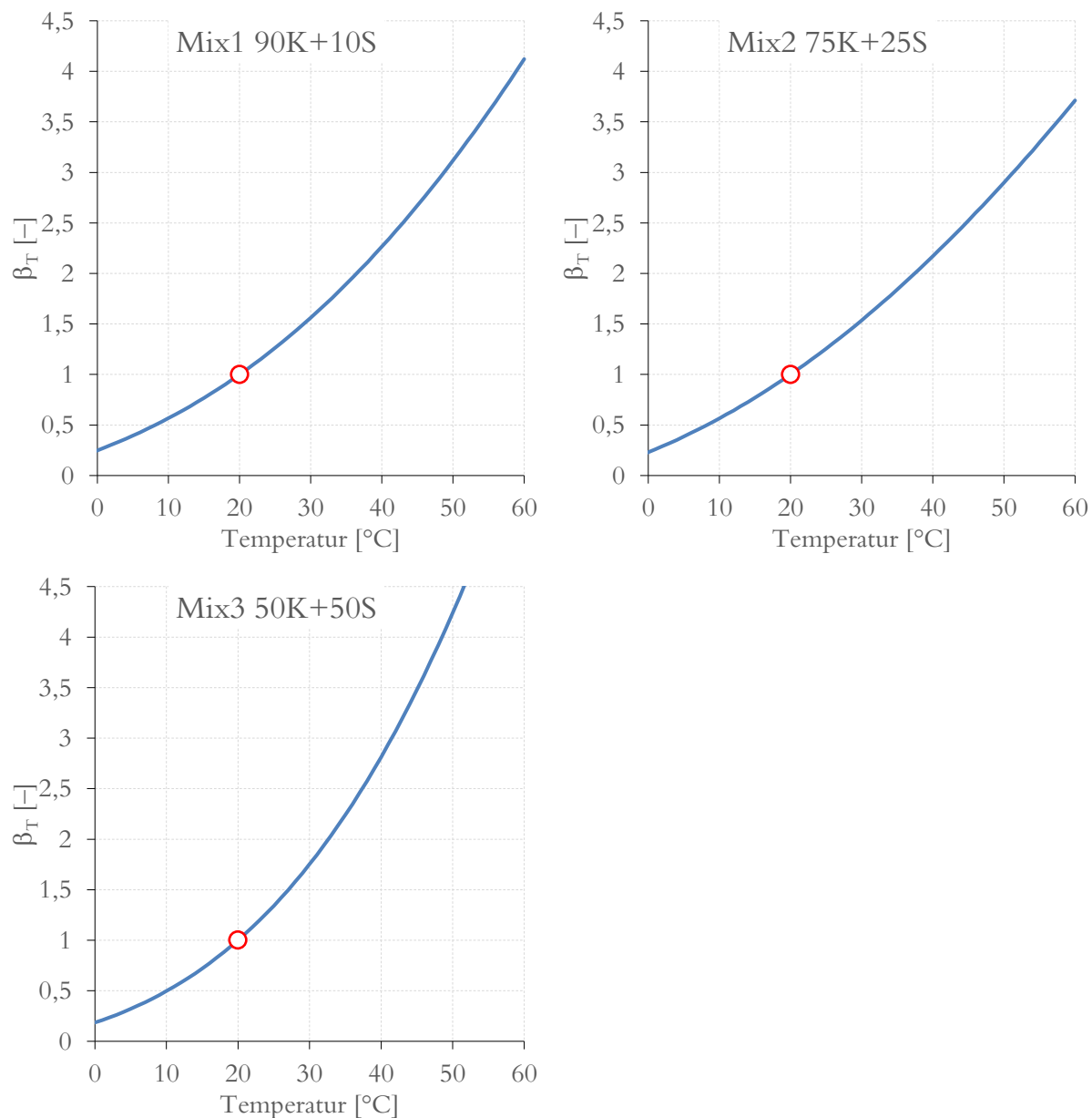
Provkropparna är 100 mm kuber. Provkropparna lagras i tempererade vattenbad. Samtliga provkroppar är tillverkade i samma blandningsomgång för att inte få in onödiga blandningsvariationer i mätresultaten. De temperaturnivåer som använts är 5°C, 20°C, 35°C och 50°C. Mätning av de lagrade kubernas tryckhållfasthet utförs vid varje enskilt tillfälle på tre provkroppar i vått tillstånd, varvid 20°C-lagringen tryckprovas vid fem tillfällen och 5°C-, 35°C- respektive 50°C-lagringarna 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.



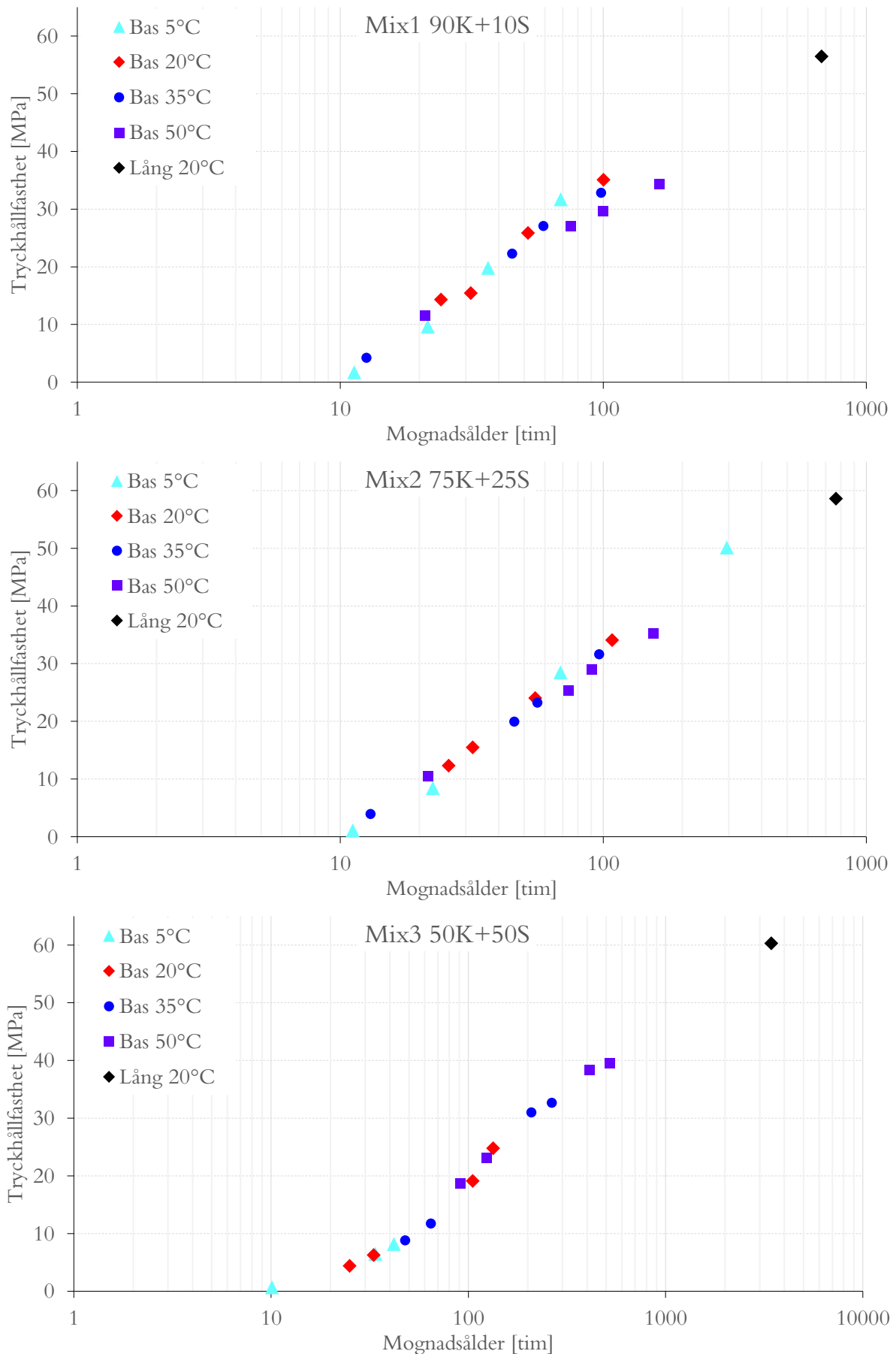
Figur 1 Betongtemperaturer för lagrade betongkuber.

Med hjälp av framtagen temperaturfaktor, se Figur 1, 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, Figur 2.

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. I figuren framgår det att vid förhöjd temperatur i förhållande till 20°C, dvs. 35°C och 50°C, fås en reduktion av hållfastheten. Detta måste det tas det hänsyn till, se kapitel 4 and Figur 4.



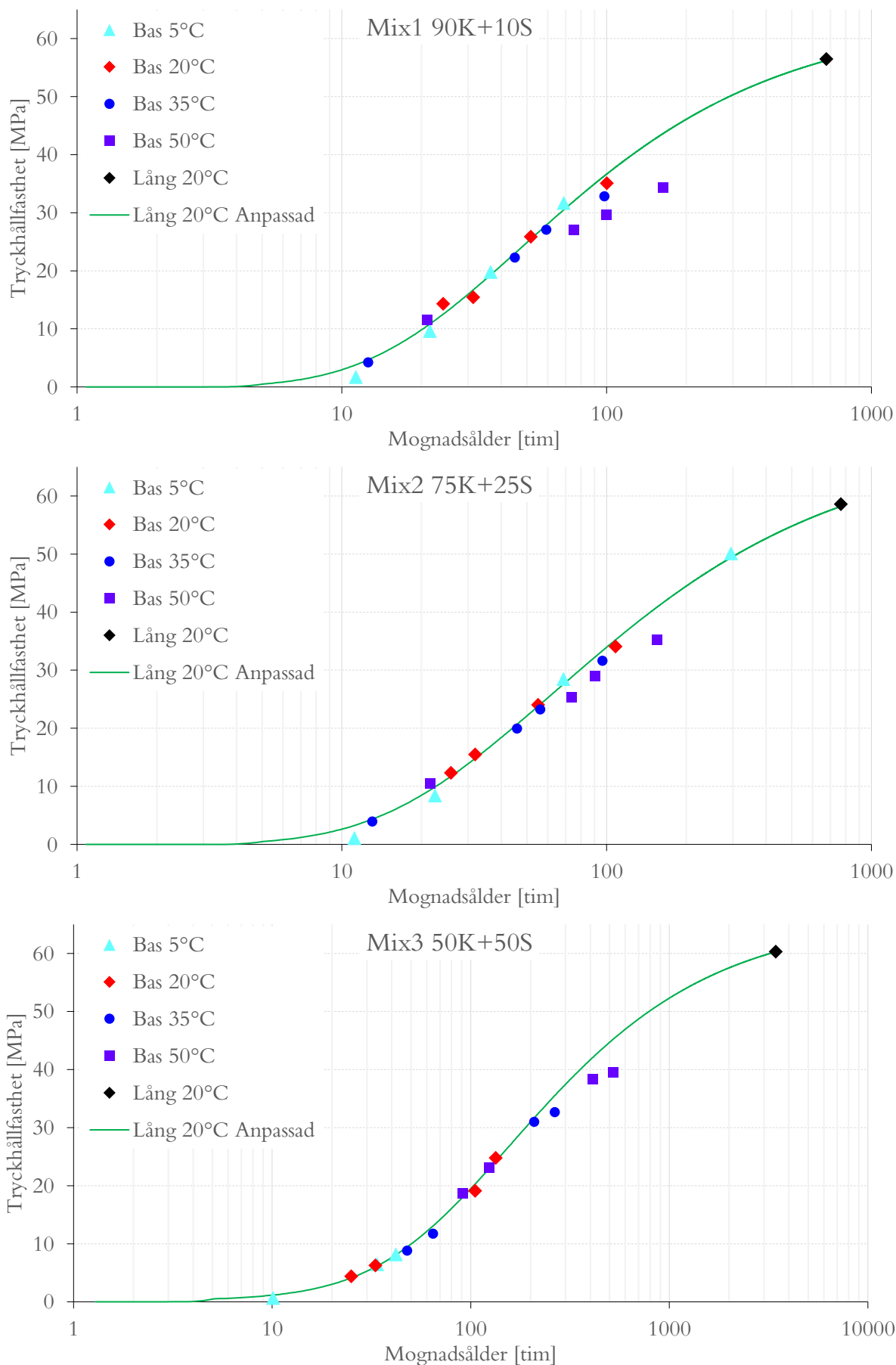
Figur 2 Utvärderad temperaturfaktor.



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

4 Hållfasthetstapp vid förhöjd härdningstemperatur

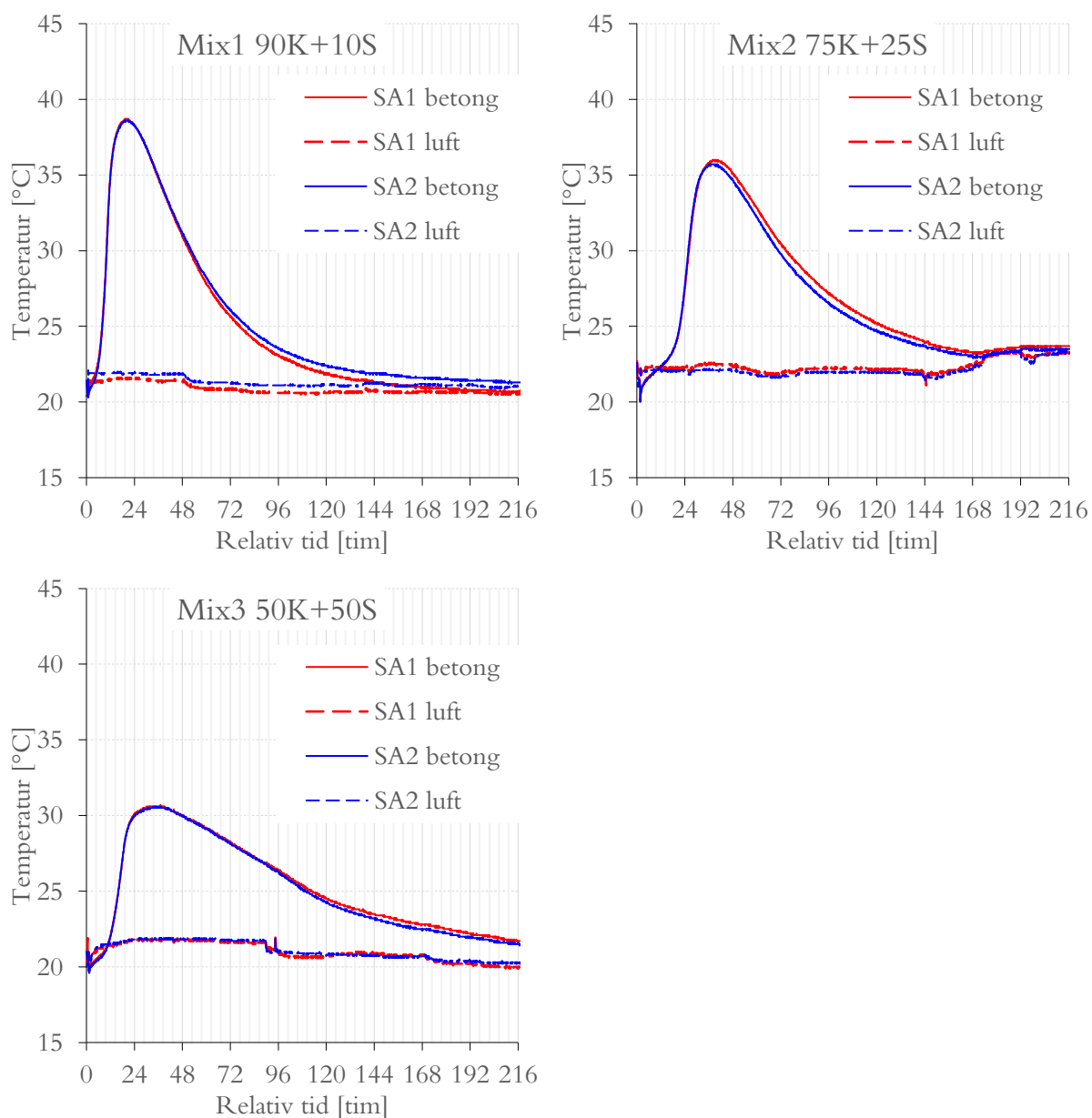
En del av de mätta värdena i Figur 3, se $T = 35^\circ\text{C}$ och framför allt $T = 50^\circ\text{C}$, ligger under den beräknade referenshållfastheten. Det innebär att man har s.k. hållfasthetstapp vid förhöjd härdningstemperatur. Detta fenomen är relativt vanligt, och en utvärdering och anpassning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



Figur 4 Modellanpassning för beskrivning av hållfasthetstapp vid förhöjd härdningstemperatur.

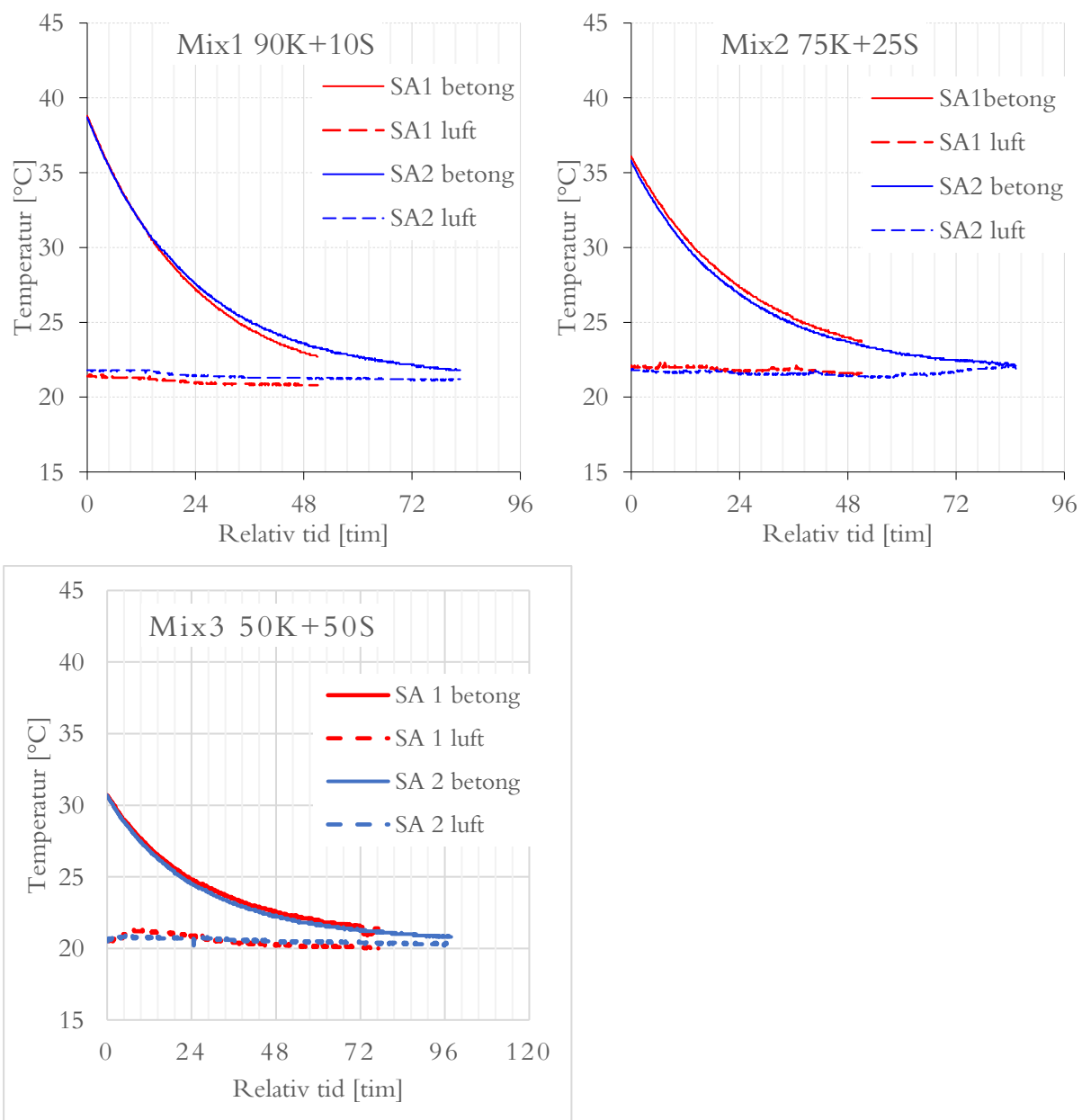
5 Hydratationsvärme

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.



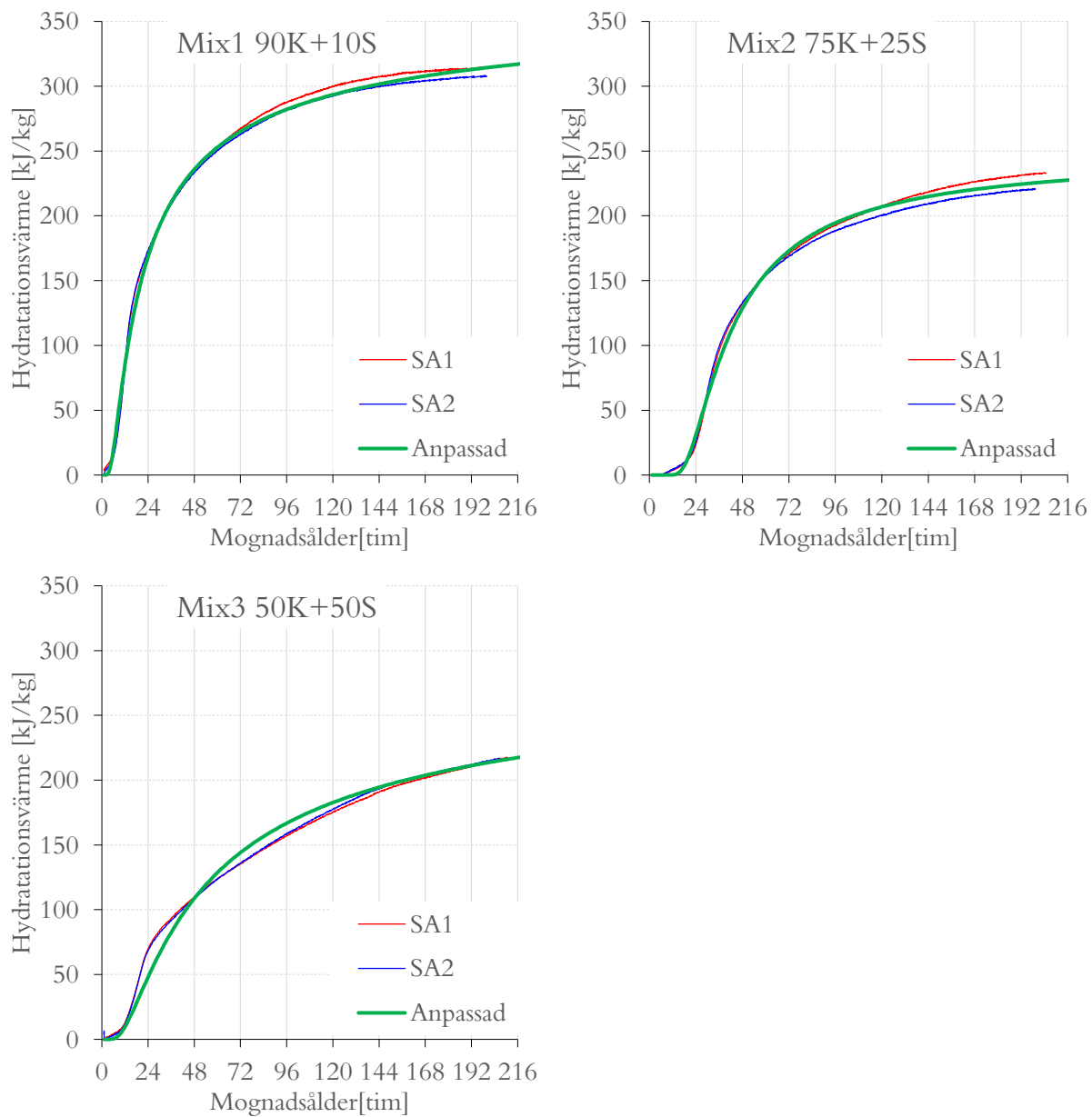
Figur 5 Mätning av betongtemperaturer i två s.k. semi-adiabater per recept.

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.



Figur 6 Bestämning av avsvälningstal för semi-adiabattest.

Utifrån informationen redovisad i Figur 5-Figur 6 har betongens hydratationsvärme beräknats som funktion av mognadsåldern, se Figur 7.

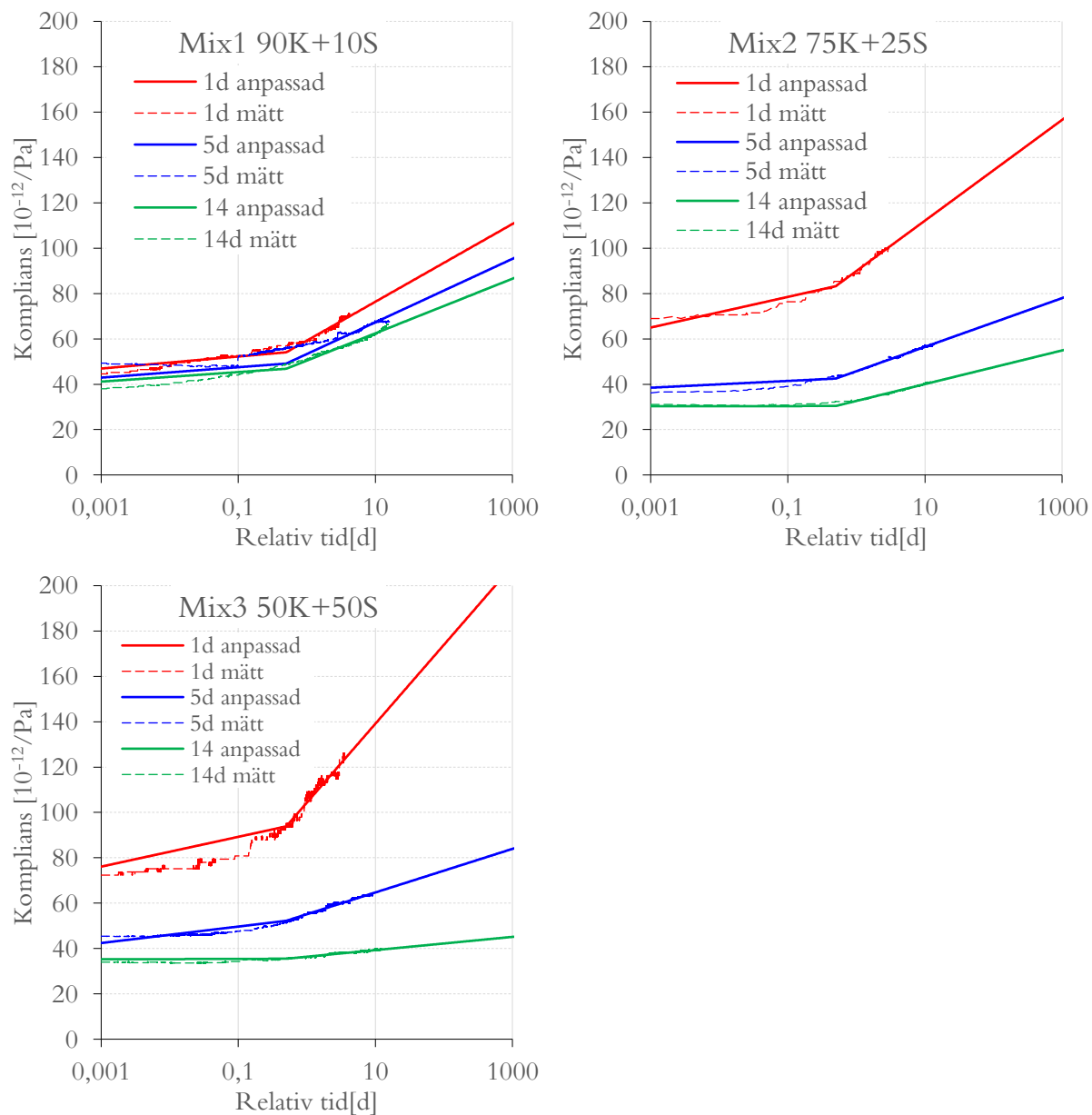


Figur 7 Bestämning av hydrationsvärme.

6 Krypning

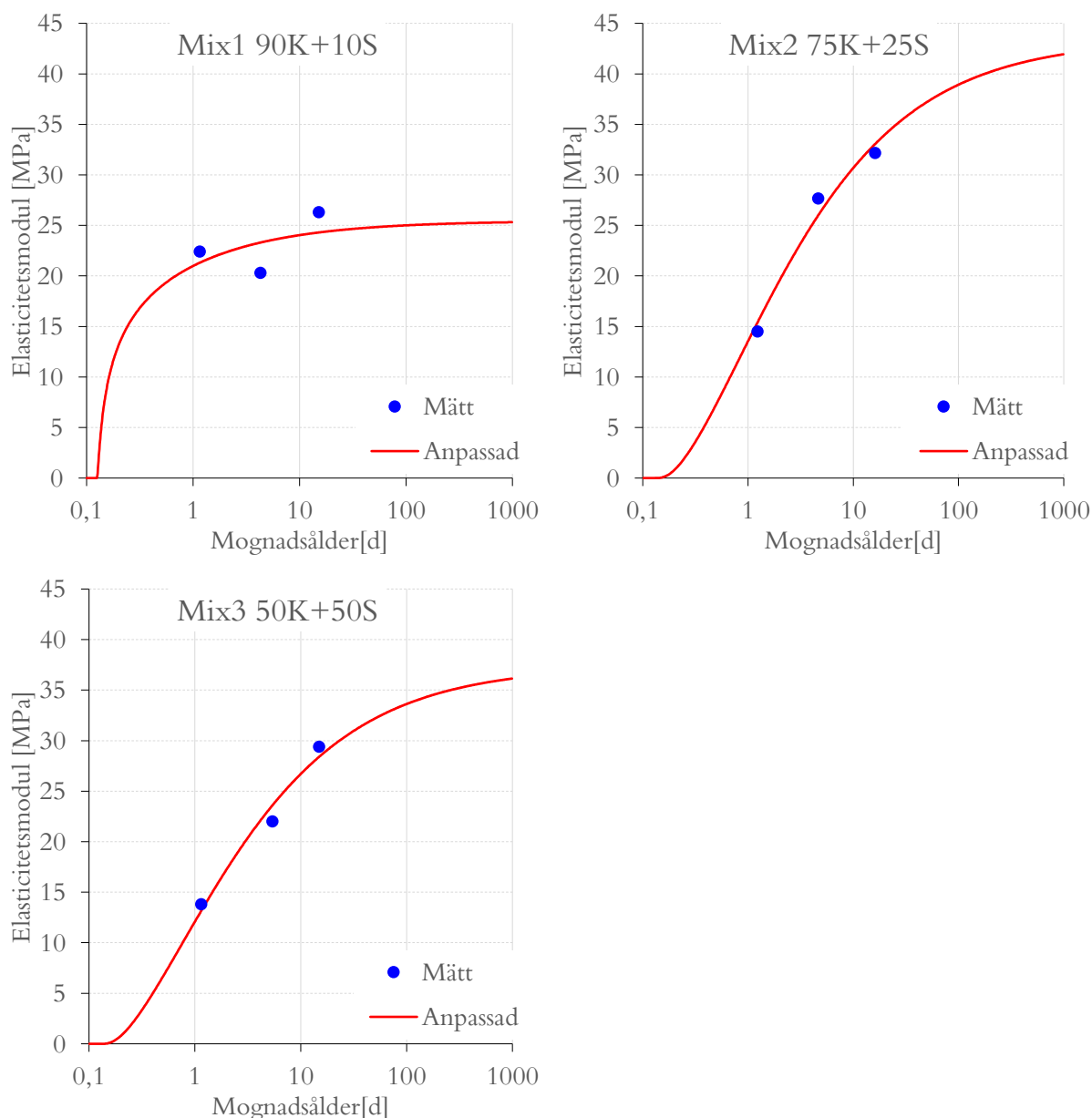
Krypförsök, dvs. pålastning till viss last och därefter bibehållning av lasten, har utförts för belastningsåldrarna 1 d, 5 d och 14 d för samtliga betonger. Belastningsåldern 1 d har genomförts i de s.k. "hydraul"-riggarna genom att belasta ett hydraulsystem statiskt med pålagda stålplattor via en belastningsarm. Härigenom anses lasten på betongcylindrarna förbli konstant under försöksperioden. Försöken vid belastningsåldern 5 och 14 d har genomförts i de s.k. "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. För alla belastningsåldrarna belastas en betongcylinder till en spänning som är ca 20 % av kubhållfastheten vid tiden för pålastning. Denna last anses tillräckligt låg för att studera s.k. 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 erfordrad 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.

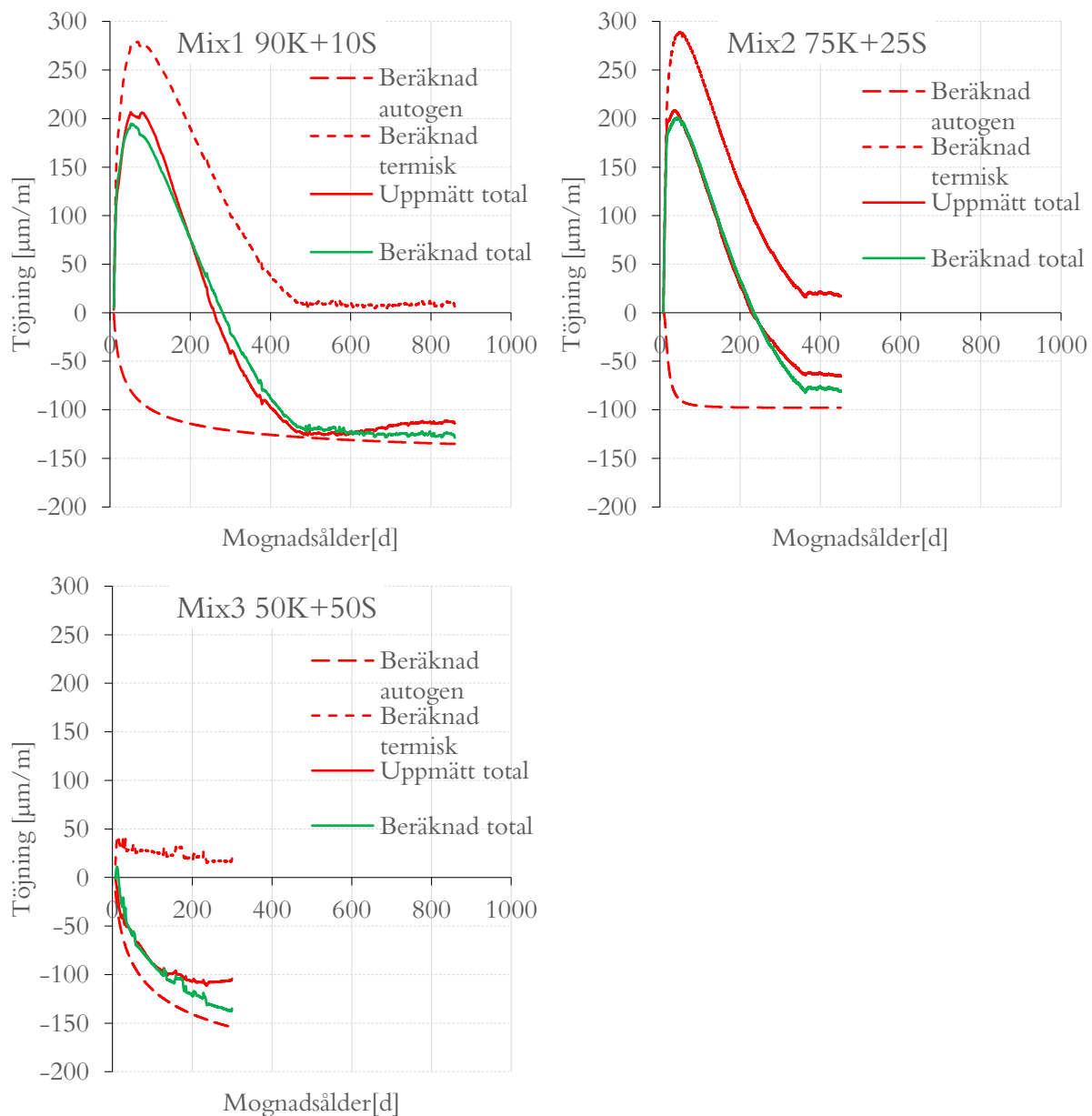
Utifrån anpassningarna enligt Figur 8 och Figur 9 kan generellt giltiga samband för totala töjningen konstrueras för godtycklig belastningsålder (t_0) och godtycklig belastningsvidd ($t-t_0$) med hjälp av metodiken i Larson (2003). Därefter beräknas ett s.k. relaxationsspektra med hjälp av datorprogrammet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

7 Frirörelse

Med frirörelse menas mätning en betongkroppns 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 självuttorkning. 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, och målsättningen med anpassningen är att den heldragna röda kurvan ("Beräknad total") ska "överensstämma" med den gröna kurvan ("Uppmätt total"). Kurvan betecknad "Beräknad termisk" anger den anpassade termiska dilatationen, och kurva betecknad "Beräknad autogen" anger den anpassade baskrympningen.



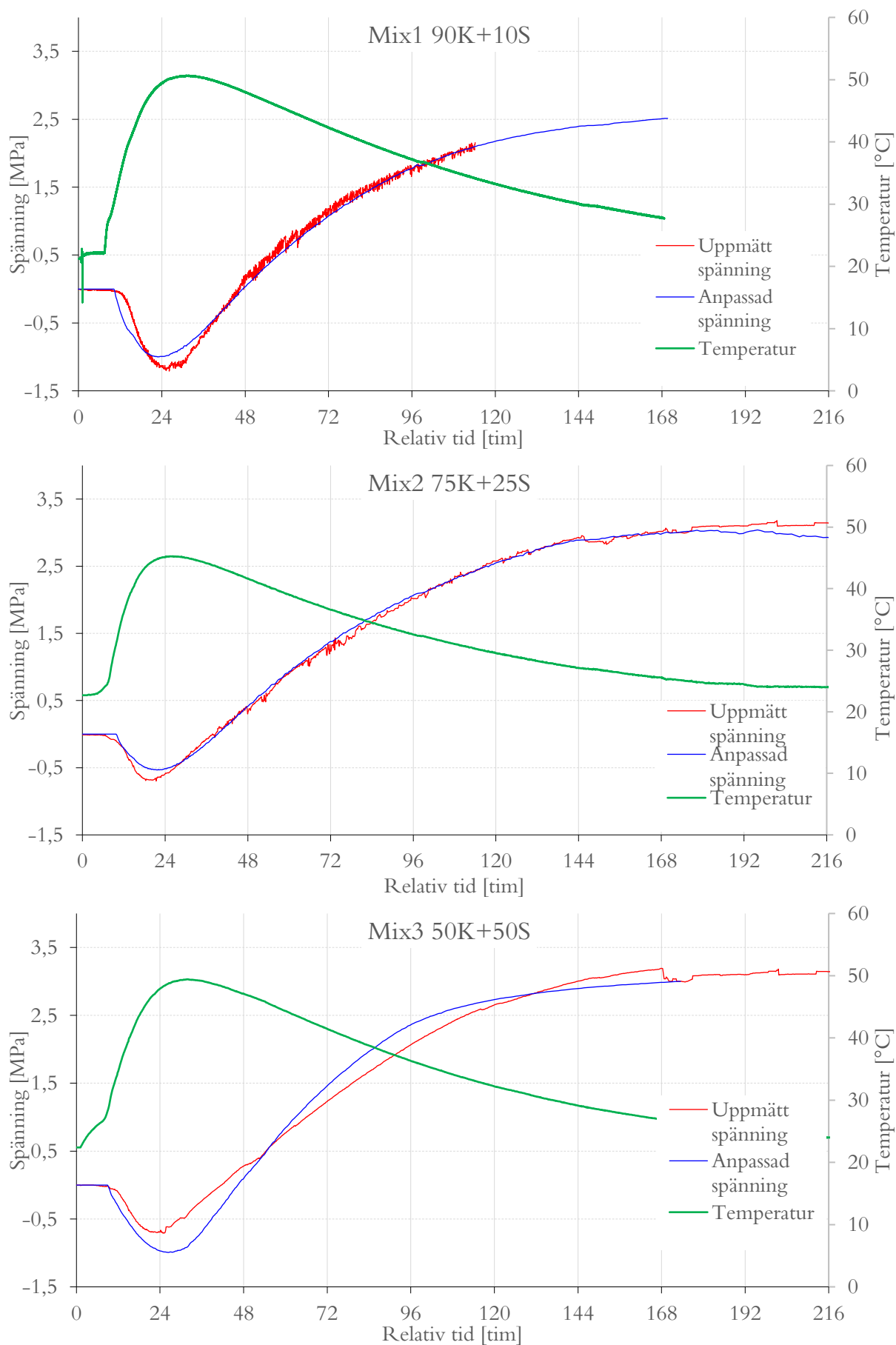
Figur 10 Anpassning av termisk töjning och baskrympning.

8 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 datainsamlingssystem med bibehållen provningsmetodik. Anpassningar av med ConTeSt 5.1 beräknade spänningsutvecklingar till registrerade förlopp visas i Figur 11.

Vid anpassning mot de uppmätta spänningsförloppen har i några fall relaxationsspektrat justerats inom $\pm 15\%$. 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 egenskapsskillnader inom ca $\pm 10\%$, även om blandningsprocedurerna utförs med hög uppreparhet. 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 Figur 10-Figur 11 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.



Figur 11 Utvärdering av spänningar vid fullständigt tvång.

9 Erhållna modellparametrar

För beskrivning av egenskaperna redovisade i denna rapport redovisas ett antal parametrar för betongen i Tabell 2. Bakomliggande ekvationer visas i kapitel 10 nedan.

Tabell 2 Utvärderade materialparametrar

	Parameter	Mix1 90K+10S	Mix2 75K+25S	Mix3 50K+50S	Enhet
Referens- hållfasthet	$t_{e,ini}$	3,0	3,0	3,0	tim
	$t_{e,fin}$	5,0	5,0	5,0	tim
	n_{set}	3,0	3,0	3,0	–
	$f_{cc,set}$	0,5	0,5	0,5	MPa
	$f_{cc,28d}$	56,2	57,6	48,3	MPa
	s	0,126	0,192	0,317	–
	$n_{cc,28d}$	0,780	0,694	0,749	–
Mognads- förlopp	Θ_{ref}	4251	4167	5307	K
	κ_3	0,245	0,312	0,317	–
	$t_{e,0}$	0,0	0,0	0,0	tim
	β_{Δ}	1,0	1,0	1,0	–
Hållfasthetstapp	$\Delta_{drop,28d}^{max}$	0,35	0,25	0,15	–
	$Temp_D$	35	41	35	°C
	κ_{Temp}	3,7	1,9	3,7	–
	$time_D$	46,8	46,8	92,4	tim
	κ_{time}	1,9	1,9	7,3	–
Värme- utveck- ling	W_u	416000	400000	365000	J/kg
	t_f	12,216	13,500	37,339	tim
	κ_1	1,215	1,230	1,010	–
Frirörelse	α_{Heat}	1,0084	1,1956	1,3022	$10^{-6}/^{\circ}C$
	α_{Cool}	1,0084	1,1956	1,3022	$10^{-6}/^{\circ}C$
	k_{ϕ}	2	2	2	–
	ε_1	0	0	0	10^{-6}
	$Time_{S1}$	2,00	2,00	2,00	tim
	ε_{su}	-232,52	-98,039	-266,33	10^{-6}
	t_{SS0}	4,00	4,00	4,00	tim
	t_{S1}	7,14	13,28	60,00	tim
η_{SH}	0,470	1,948	0,379	–	
Draghållfasthet och spänning	f_{cc28}	56,2	57,6	48,3	MPa
	f_c^{ref}	56,2	57,6	48,3	MPa
	f_t^{ref}	3,22	3,47	3,46	MPa
	β_1	0,667	0,667	0,667	–
	α_{ct}	0,625	0,904	0,771	–
	ρ_T	0,450	0,286	0,466	–

ρ_φ	0,000	0,495	0,460	–
----------------	-------	-------	-------	---

Elasticitetsmodul och krypning som justerat relaxationsspektra

Mix1:

Antal åldrar=10

Antal enheter=8

RelTime1=0.005 (d)

Ages (d): 0.124 0.275 0.39212 1.24 3.9212 12.4 39.212 124 392.12 1240

0.00925 0.00925 0.00925 0.00925 0.00925 0.00925 0.00925 0.00925 0.00925
 6.8035 1.2825 2.8092 1.1432 1.5296 0.73564 0.94189 0.004339
 6.2852 1.4851 3.1376 1.8604 1.9694 1.095 1.3019 0.04723
 1.8684 -0.64087 3.4372 5.2743 3.5944 3.0839 3.1175 0.43862
 1.1691 -1.1222 2.9224 5.4761 3.4166 3.5138 3.4184 2.9058
 0.97836 -0.45688 1.8864 3.9863 2.4531 2.4027 2.3698 8.9288
 0.8467 -0.014128 1.2403 2.6521 1.6577 1.5393 1.5437 13.559
 0.85036 0.032129 1.2008 2.5406 1.5849 1.4557 1.4627 14.189
 0.86237 0.032624 1.2176 2.5719 1.6 1.4649 1.4699 14.264
 0.86922 0.032834 1.2273 2.5897 1.6094 1.4714 1.4739 14.304

Mix2:

Antal åldrar=10

Antal enheter=8

RelTime1=0.005 (d)

Ages (d): 0.124 0.275 0.39212 1.24 3.9212 12.4 39.212 124 392.12 1240

0.0085 0.0085 0.0085 0.0085 0.0085 0.0085 0.0085 0.0085 0.0085
 0.2799 0.2224 0.3241 0.5396 0.4825 0.1058 0.219 0.0732
 0.9343 0.5034 0.6353 1.0329 0.9054 0.2155 0.4207 0.1525
 1.5881 0.3745 1.5901 3.4585 2.4832 0.9792 1.3731 0.7534
 1.0356 -0.8135 2.2898 5.2727 3.6218 2.8626 2.8635 2.3675
 1.1282 -0.2143 1.8402 3.7804 2.418 2.2599 2.1172 9.1704
 1.2853 0.0386 1.8121 3.4524 1.9991 1.8514 1.7297 12.3315
 1.4659 0.0468 2.0598 3.8223 2.1015 1.9193 1.784 12.8005
 1.5563 0.0492 2.1839 3.9945 2.1524 1.9375 1.7865 12.8397
 1.6104 0.0505 2.2582 4.0952 2.1878 1.9564 1.7865 12.8548

Mix3:

Antal åldrar=10

Antal enheter=8

RelTime1=0.005 (d)

Ages (d): 0.124 0.275 0.39212 1.24 3.9212 12.4 39.212 124 392.12 1240

0.0085118 0.0085118 0.0085118 0.0085118 0.0085118 0.0085118 0.0085118 0.0085118 0.0085118
 0.19702 0.17209 0.27636 0.30162 0.4559 0.27856 0.31632 0.10741
 0.59974 0.38806 0.48896 0.53939 0.76684 0.53048 0.61077 0.27145
 1.0732 0.44988 0.97508 1.8524 1.8036 1.8565 2.1449 1.6991
 0.72134 -0.27144 1.2816 3.1253 2.406 2.6535 2.9798 5.7337
 1.0171 -0.1393 1.6079 3.3765 2.2931 2.5358 2.824 10.193
 1.2009 0.1323 1.6024 3.1391 2.042 2.1425 2.3912 14.414
 1.3005 0.3853 1.4922 2.7175 1.8276 1.7729 1.982 17.659
 1.3644 0.54013 1.4317 2.4335 1.7133 1.5774 1.7456 19.564
 1.4123 0.60773 1.433 2.3552 1.6924 1.5316 1.6702 20.385

10 Använda modellsamband

10.1 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

$$f_{\alpha}^{ref} = \begin{cases} 0 & \text{för } 0 \leq t_e < t_{e,ini} \\ f_{\alpha,set} \cdot \left(\frac{t_e - t_{e,ini}}{t_{e,fin} - t_{e,ini}} \right)^{n_{set}} & \text{för } t_{e,ini} \leq t_e < t_{e,fin} \\ f_{\alpha,28d} \cdot \exp \left(s \cdot \left[1 - \left(\frac{672 - t^*}{t_e - t^*} \right)^{n_{\alpha,28d}} \right] \right) & \text{för } t_e \geq t_{e,fin} \end{cases} \quad (1)$$

där $f_{\alpha,set}$, $t_{e,ini}$, $t_{e,fin}$ och n_{set} är anpassningsparametrar för betong i mycket tidig ålder, om sådana mätningar genomförs. Principiellt omfattar detta tiden mellan initial 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.

Vidare är $f_{\alpha,28d}$, s , $n_{\alpha,28d}$ och t^* anpassningsparametrar inom det område för härdande betong, där det genomförts hållfasthetsmätningar i detta projekt.

Tidsparametern t^* har ingen fysisk betydelse och beräknas genom

$$\delta_c = \left(1 - \ln \frac{f_{\alpha,set}}{f_{\alpha,28d}} \frac{1}{s} \right)^{n_{\alpha,28d}} \quad (2)$$

vilket ger

$$t^* = \frac{672 - \delta_c t_{e,fin}}{1 - \delta_c} \quad (3)$$

Mognadsåldern eller ekvivalent tid, t_e , beräknas enligt

$$t_e = \beta_{\Delta} \int_0^t \beta_T dt + t_{e,0} \quad (4)$$

där

$$\beta_T = \exp \left(\Theta \left[\frac{1}{293} - \frac{1}{T + 273} \right] \right) \quad (5)$$

och

$$\Theta = \Theta_{ref} \left(\frac{30}{T + 10} \right)^{\kappa_3} \quad (6)$$

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

Ekvivalenta tiden enligt ekv (4) betecknas här med index "e", eftersom endast temperaturen beaktas explicit för betongens härdning via temperaturfaktorn β_T , och en tekniskt riktigare benämning på mognadsåldern enligt ekv (4) skulle vara "temperaturrelaterad mognadsålder" eller "temperaturekvivalent tid", men för enkelhetsskull använd i resten av denna rapport enbart "mognadsålder" respektive "ekvivalent tid". Detta förhållningsätt (med β_T benämnd "maturity function") är vedertaget internationellt för temperaturrelaterad härdning.

10.2 Hållfasthetstapp på grund av förhöjd härdningstemperatur

Den reducerade hållfastheten orsakad av förhöjd härdningstemperatur beskrivs av

$$f_{\alpha} = f_{\alpha}^{ref} - \gamma_{drop} \Delta_{drop,28d}^{\max} f_{\alpha,28d} \quad \text{för alla } t_e \geq 0 \quad (7)$$

där

$\Delta_{drop,28d}^{\max}$ = maximalt hållfasthetstapp vid $t_e = 28d$, vilket motsvara mycket höga

härdningstemperaturer, i relation till

$f_{\alpha,28d}$ = parameter som bestäms vid anpassning mot försök

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

Tekniken att beskriva hållfasthetstappet enligt ekv (7) 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) hydrationshastigheten ($d\alpha^*/dt_e$) vilket motsvarar bildad mängd hydrationsprodukter per tidsenhet, vilket är rimligt ur ett materialtekniskt synsätt.

Lämpliga funktioner att beakta dessa tre fenomen är

$$\gamma_{drop} = \frac{\delta_{drop}}{\delta_{ref}} \quad (8)$$

med

$$\delta_{drop} = \int_0^{t_e} \gamma_{Temp} \gamma_{time} \frac{d\alpha^*}{dt_e} dt_e \quad (9)$$

och

$$\delta_{ref} = \int_0^{672h} \gamma_{time} \frac{d\alpha^*}{dt_e} dt_e \quad (10)$$

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

$$\gamma_{Temp} = \exp\left(-\left(\frac{T}{Temp_D}\right)^{-\kappa_{Temp}}\right) \quad (11)$$

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

$$\gamma_{time} = \exp\left(-\left(\frac{t_e}{time_D}\right)^{-\kappa_{time}}\right) \quad (12)$$

Den beräknade skenbara hydratationshastigheten sker genom tidsderivering av hydratationsgraden formulerad enligt

$$\alpha^* = \exp\left(-\left(\ln\left(1 + \frac{t_e}{t_1}\right)\right)^{-\kappa_1}\right) \quad \text{och} \quad \alpha = \alpha^* \alpha_u \quad (13)$$

och dess tidsderivata blir

$$\frac{d\alpha^*}{dt_e} = \frac{\alpha^*}{t_1 + t_e} \kappa_1 \left(\ln\left(1 + \frac{t_e}{t_1}\right)\right)^{-(\kappa_1+1)} \quad (14)$$

där

α^* = skenbar hydratationsgrad

α = hydratationsgrad

α_u = hydratationsgrad efter "oändlig tid".

10.3 Betongens värmeutveckling

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

$$Q = W_u \alpha^* C \quad (15)$$

där

Q = utvecklad värme i betongen per volymenhet

W_u = utvecklad värme efter "oändlig" tid per cementmängd

C = cementhalt

α^* = skenbar hydratationsgrad, se ekv. (13).

10.4 Frirörelser

För en temperaturbelastning som motsvarar en 0,7 m 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 (s.k. baskrympning), dvs. den krympning som sker inne i en konstruktion på grund av självuttorkningen. Utvärderingstekniken finns detaljerat beskriven i Hedlund (2000).

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

$$\frac{\partial \varepsilon_T^0}{\partial t} = \alpha_T \frac{\partial T}{\partial t} \quad (16)$$

med

$$\alpha_T = \begin{cases} \alpha_{Heat} & \text{f\u00f6r } \frac{\partial T}{\partial t} \geq 0 \\ \alpha_{Cool} & \text{f\u00f6r } \frac{\partial T}{\partial t} < 0 \end{cases} \quad (17)$$

d\u00e4r

T = betongens temperatur

t = realtid

ε^0_T = betongens temperaturr\u00f6relse

α_{Heat} = betongens temperaturutvidgningskoefficient

α_{Cool} = betongens temperaturkontraktionskoefficient.

Den autogena krympningen, ε^0_{SH} , beskrivs av

$$\varepsilon^0_{SH} = \exp\left(-\left[\frac{t_{s1}}{t_e - t_{s0}}\right]^{\eta_{SH}}\right) \varepsilon_{su} \quad \text{f\u00f6r } t_e > t_{s0} \quad (18)$$

d\u00e4r ε_{su} , t_{s0} , t_{s1} och η_{SH} \u00e4r anpassningsparametrar.

10.5 Krypning

Begreppet krypning definieras som den deformations\u00f6kning med tiden som sker f\u00f6r en belastad betongkropp. Krypning sker f\u00f6r b\u00e5de tryck- och dragbelastad betong. Utifr\u00e5n ett tekniskt perspektiv \u00e4r det vanligt att definiera elastisk och tidsberoende deformation f\u00f6r betong enligt

$$\varepsilon_c(t, t_0) = \varepsilon_{e0}(t_0) + \varepsilon_{\alpha}(t, t_0) = \frac{\sigma_c(t_0)}{E_c(t_0)} (1 + \varphi(t, t_0)) \quad (19)$$

d\u00e4r

t = tiden (betong\u00e5ldern) d\u00e5 t\u00f6jningen studeras

t_0 = tiden (betong\u00e5ldern) d\u00e5 p\u00e5lastningen sker

ε_c = betongens totala t\u00f6jning

ε_{e0} = betongens elastiska ("momentana") t\u00f6jning

ε_{α} = betongens krypt\u00f6jning

σ_c = p\u00e5lagd betongsp\u00e4nning

E_c = betongens elasticitetsmodul

$\varphi(t, t_0)$ = betongens kryptal.

Ett alternativt s\u00e4tt att beskriva totala t\u00f6jningen \u00e4r att ange t\u00f6jning per p\u00e5lagd sp\u00e4nningsenhet, vilket definieras som kompliansen, J [Pa^{-1}], enligt

$$J_c(t, t_0) = \frac{\varepsilon_c(t, t_0)}{\sigma_c(t_0)} = J_{e0}(t_0) + J_{\alpha}(t, t_0) \quad (20)$$

med

$$J_{e0}(t_0) = \frac{1}{E_c(t_0)} \quad (21)$$

Ekv. (19) \u00e4r praktisk att anv\u00e4nda d\u00e5 man har s.k. linj\u00e4r krypning, vilket inneb\u00e4r att b\u00e5de elastiska t\u00f6jningen och krypt\u00f6jningen \u00e4r linj\u00e4rt beroende av p\u00e5lagd sp\u00e4nning. F\u00f6r studierna av ung betong anv\u00e4nds formellt kompliansen definierad enligt ekv. (20) och (21) genom att f\u00f6rs\u00f6ken utv\u00e4rderas med en effektiv E -modul f\u00f6r belastningsvidden = $t - t_0 = 0,001$ d med f\u00f6ljande samband:

$$E_c(t_0) = \begin{cases} 0 & \text{för } t_e \leq t_{e,ini} \\ \frac{1}{J(t_0 + 0,001, t_0)} = E_{ref} \cdot \left(\exp \left(s_E \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{672 - t_{e,ini}}{t_e - t_{e,ini}}} \right) \right) \right)^{\eta_E} & \text{för } t_e > t_{e,ini} \end{cases} \quad (22)$$

där

$t_0 = t_e$, då tidsskalan för momentandeformation och krypning är relaterad till ekvivalent tid

s_E = en anpassningsparameter

η_E = en anpassningsparameter som här är satt till $\eta_E = 0,5$.

Med känd E -modul beräknas totala deformationen (kompliansen) som ”elastisk” deformation och en (för $t-t_0 \leq \Delta t_1$) eller två (för $t-t_0 > \Delta t_1$) räta linjer i logaritmisk tidsskala beroende av belastningsvidden $t-t_0$, Larson (2003), enligt:

$$J_c(t, t_0) = \begin{cases} \frac{1}{E_c(t_0)} + a_1 \cdot 10 \log \frac{t-t_0}{0,001} & \text{för } 0,001 \text{ d} \leq t-t_0 \leq \Delta t_1 \\ \frac{1}{E_c(t_0)} + a_1 \cdot 10 \log \frac{\Delta t_1}{0,001} + a_2 \cdot 10 \log \frac{t-t_0}{\Delta t_1} & \text{för } t-t_0 > \Delta t_1 \end{cases} \quad (23)$$

10.6 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

$$\sigma_{i+1} = \sigma_i + \Delta \sigma_{i+1} \quad (24)$$

Med

$$\Delta \sigma_{i+1} = E_{i+1}^{tot} (\Delta \varepsilon_{m,i+1} - \Delta \varepsilon_{i+1}^0) \quad (25)$$

där

E_{i+1}^{tot} = totalt fiktiv elasticitetsmodul inklusive krypning under tidssteget samt tillämpning av icke-linjär arbetskurva enligt Figur 12

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

$\Delta \varepsilon_{i+1}^0$ = total icke-elastisk deformation under tidssteget, se ekv. (30)

Den totala fiktiva E -modulen beskrivs av

$$E_{i+1}^{tot} = E_{\alpha,i+1} (1 + \gamma_d) \quad (26)$$

där $E_{\alpha,i+1}$ = effektiva E -modulen inklusive krypeffekter beräknad ur det s.k. relaxationspektrat (Jonasson och Westman, 1999), γ_d = korrektionsfaktor för icke-linjär tillämpning av betongens arbetskurva, se Figur 12.

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

$$\gamma_d = \exp \left(- \frac{\varepsilon_{m,i+1} - \alpha_{ct}}{1 - \alpha_{ct}} \right) - 1 \quad (27)$$

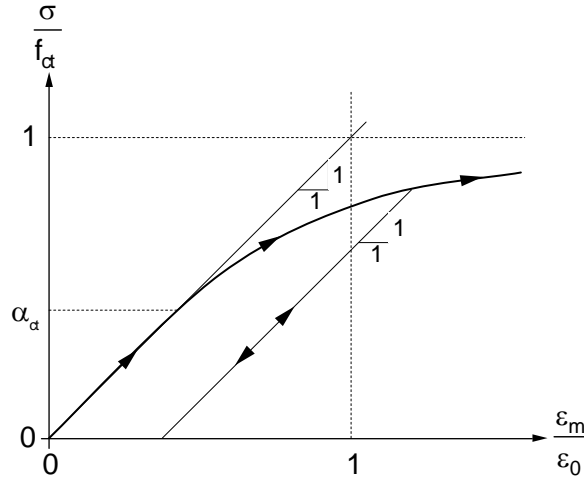
där

$\varepsilon_{m,i+1}$ = medelvärde av spänningsrelaterad "material"-töjning 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 12.

För alla andra fall av belastningsändringar gäller

$$\gamma_d = 0 \quad (28)$$

vilket är liktydigt med "lutningen = 1" i Figur 12.



Figur 12 Antaget spännings-töjnings-samband (s.k. arbetskurva) för betong.

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

$$f_{ct} = \left(\frac{f_{cc}}{f_c^{ref}} \right)^{\beta_1} f_t^{ref} \quad (29)$$

där

f_{cc} = aktuell tryckhållfasthet
 f_c^{ref} , f_t^{ref} , och β_1 är anpassningsparametrar.

Den totala icke-elastiska deformationen under tidssteget, se $\Delta\varepsilon_{i+1}^0$ i ekv. (25), uttrycks av

$$\Delta\varepsilon_{i+1}^0 = \Delta\varepsilon_{rel} + \Delta\varepsilon_T + \Delta\varepsilon_{SH} \quad (30)$$

där

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

$\Delta\varepsilon_T$ = töjningsändring av temperaturändring under tidssteget, se ekv. (16) och (17)

$\Delta\varepsilon_{SH}$ = krympningsändring under tidssteget, se ekv. (18)

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

$$\Delta\varepsilon_T = \Delta\varepsilon_T^0 \left(1 + \rho_T \frac{\sigma}{f_{ct}} \text{sign}(\Delta T) \right) \quad (31)$$

$$\Delta\varepsilon_{SH} = \Delta\varepsilon_{SH}^0 \left(1 + \rho_\varphi \frac{\sigma}{f_{ct}} \text{sign}(\Delta T) \right) \quad (32)$$

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

11 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.