

PROJEKTNR. 13630

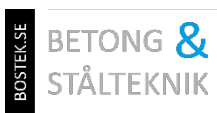
Utveckling av metoder för sprickbegränsning av hårdnande betong

Slutrapport – BILAGA 7

Martin Nilsson (1), Mats Emborg (2), Anders Hösthagen (3), Mikael Westerholm (4), Jonny Nilimaa (5), Jonas Carlswärd (6)

1) LTU, 2) 6) Heidelberg Materials Betong, 3) Bostek, 4) 5) Heidelberg Materials Cement

2024-12-16



BETONG &
STÅLTEKNIK

Slutrapport – BILAGA 7

**Projekt: Utveckling av metoder
för sprickbegränsning av hårdnande betong**

Martin Nilsson, Ltu

Mats Emborg, Heidelberg Materials Betong Sverige

Anders Hösthagen, Bostek

Mikael Westerholm, Heidelberg Materials Cement Sverige

Jonny Nilimaa, Heidelberg Materials Betong Sverige

BILAGA 7

Förord

Denna bilaga bemöter synpunkter som framförts i BILAGA 6 av två medlemmar i referensgruppen. Vissa synpunkter har inarbetats i slutrapporten och delrapporter till denna. Andra har bedömts, och betraktats, som övergripande kommentarer.

I redogörelsen följs samma disposition som i BILAGA 6.

Luleå, Stockholm

Martin Nilsson, Jonny Nilimaa, Mats Emborg, Anders Hösthagen, Mikael Westerholm

BILAGA 1

Delrapport – Analyismetodik och materialmodeller vid inmätning av betongs egenskaper för beräkning av temperatur, hållfasthet och spänningar under härdningsförlopp.

Teknisk rapport, 2024. ISBN 978-91-8048-611-8

Avsnitt 2.2: Har jämförande mätningar på verkliga konstruktioner genomförts?

- De betonger som visas i avsnitt 2.2 – även visade i Betonghandbok Material kapitel 19 (figur 19.2:3) är inmätta 2014 i Luleå och sedermera rapporterade i SBUF 12524 2019.
- Det har säkerligen gjorts mätningar i flera fall – det handlar om 6 recept med Bascement som använts under längre tid. Vi får hänvisa till författare av SBUF rapport 12524. Från Heidelberg Materials Betong har inga större mät-prognos-avvikelser från kunder uppmärksammats när parametrar för liknande betonger använts.

Påverkar inte texten. Ett förtydligande hade ev. kunnat gjorts men anses tynga ned redovisningen.

Sida 14, fig 3.2: Vilket bindemedel har det använts? Vilken betydelse har använt tillsatsmaterials (slagg) kemiska sammansättning och hur kan detta påverka egenskapsutvecklingen i den unga betongen – kan den autogena krympningen förstärkas eller blir den oförändrad oavsett delmaterialens sammansättning?

- Bascement (övre), Anl Degerhamn (nedre), se vidare Betonghandbok Material kapitel 9.
- Det påverkar givetvis egenskapsutvecklingen, dvs. spektran får ett annat utseende med avseende på tidig och senare egenskapstillväxt vid olika vct:n. Det är därför Figur 3.2 ger en bra översikt. Metodiken används och bör användas i framtida utvärdering.
- Sista frågan har inget att göra med hållfasthetstillväxt och dess presentation genom spektra.

Fråga 1 - Påverkar inte texten – den intresserade läsaren kan gå till BHB-M kap 9

Fråga 2 – förändrar inte texten

Fråga 3 - ---

Generellt: samtliga försök bör genomföras på minst 2, bättre 3 provkroppar för att kunna detektera felaktigheter (kvalitetssäkring). Förenklingar av provning eller analysmetoder där man baserar sig på för få mätningar ger osäkra utvärderingar, vilket ställer än högre krav på kvalitetssäkring på andra sätt som exempelvis temperaturmätningar och uppföljningar i verkliga byggprojekt.

- Vi delar den uppfattningen. Vissa försök genomförs med tre provkroppar, andra med två. I några fall sker tyvärr endast mätning på en provkropp. Se vidare diskussioner kring synpunkter om materialrapporten.
- Fler provkroppar är nödvändiga i flera sammanhang och analyserade mätdatas kvalitet mår bra över att dubblera eller trefaldiga antalet – vilket kommer att öka tidsåtgång och kostnader.
- Då aktuell provningsmetodik inte alltid kan uppnå statistiskt välgrundade materialparametrar för provad betong i och med det begränsade provningsunderlag och den

naturliga variationen hos bindemedel, ballast, tillsatsmedel etc är det därför viktigt med mätning och återkoppling från fält.

- Registrering i fält innehåller dock många osäkerhetskällor, även vid en sådan basal registrering som temperaturmätning. Mätpunkter måste väljas med stor erfarenhet och givare måste placeras exakt. Val av mätobjekt är viktigt för uppföljningar. Val av typfall bör göras med stor omsorg och utifrån syften med mätningarna.
- Uppföljningar av deformationer i fält en stor utmaning. Speciellt om avsikten är att kalibrera in beräkningar av beteende hos strukturer i tidig ålder. Graden av tvång spelar en viktig roll och är svår att uppskatta i fält.
- Observation av sprickor i fält ger en viktig indikation – tyvärr är det ofta svårt att få information om exakt tidpunkt för sprickuppkomst. I vissa lägen kan flera effekter påverka sprickrisken som inte ens prognoser kan ta hänsyn till.

Kommentaren påverkar inte texten. Ett förtydligande hade ev. kunnat gjorts men anses tynga ned redovisningen.

Extra reflektioner:

- Det hade varit intressant att få kommentarer kring kapitel 8 – känslighetsanalysen, vilken troligen kommer att debatteras i framtiden. I några andra projekt har man kommit fram till vissa något annorlunda slutsatser – t.ex. att cementmängden har markant inverkan, en parameter som är väl känd och är låst.
- Inom projektet har observerats utmaningen att i relatera de olika provningarna med varandra. Exempelvis att kunna kalibrera in ”start-tider” för värmeutvecklingen, för hållfasthetsutveckling, E -modul och baskrympning. Här är skillnaderna stora i materialdata från olika rapporter.
- Författarna har försökt resonera kring detta i rapportering från projektet. Det borde finnas en logisk koppling, dvs. det bör gå att hitta samband mellan parametrarna. I vart fall mellan de mekaniska egenskaperna. Förenklade metoder finns att tillgå t.ex. hitta öppethållandetid, tid när hydratationen startar.

BILAGA 2

Delrapport – Spänningsberäkningar, metodik och kriterier.

Teknisk rapport, 2024. ISBN 978-91-8048-610-1

Underavsnitt 2.2.5: det heter ”Eigenspanningen” på tyska

- Rätt.

Avsnitt 2.3: Mediummassiva konstruktioner, betonghållfasthet över C40/50 är snarare mycket ovanligt.

- Så kan vara fallet. Vald betongkvalitet styrs ju i hög grad på exponeringsklass som kan vara aggressiv i många av applikationerna, även om de är medium-massiva, t.ex. en broöverbyggnad. Dvs då bör XD3, XF4 gälla och då får vi $v_{ct_{ekv}} = 0,40$.

Kommentaren påverkar inte texten. Ett förtydligande hade ev. kunnat gjorts angående exponeringsklasser men detta ingår inte i uppdraget. Detta anses dessutom tynga ned redovisningen.

Kap 4, generell: Här ges ett antal rekommendationer avseende återinförande av metod 1 etc. Rapporten ger dock inget underlag för detta. Det krävs ett stort antal beräkningar med de framtagna materialparametrarna för att kunna ta fram generella begränsningar avseende sprickrisken för klimatreducerad betong.

- Vi har inte menat, och inte skrivit heller detta, att vi har tagit fram något komplett underlag – vi visar exempel på beräkningar från Betonghandboken figur 4.1 och 4.2 – som är ett bra underlag för att arbeta över metod 1:s skrivingar. Som vi skriver i rapporten finns det möjligheter att lätta upp texterna redan baserat på figurerna – speciellt om man är intresserad att räkna fler typfall av ojämn temperatur.
- Som metod 1 ser ut nu är det oklart vad som ligger bakom texten, dvs. på samma sätt som författarna till remissen efterlyser ett stort antal beräkningar kan vi som externa användare tycka att det hade varit intressant att se det förarbete som ligger bakom dagens texter. Dvs., ge oss gärna referenser till bakgrundsanalyser.

Kommentaren påverkar inte texten, möjligen hade delar av utläggningen ovan kunnat läggas in.

Skrivingarna i kapitel 4 ger intrycket att det är bara att skriva in metod 1 i AMA.ANL igen. Så är inte fallet, det krävs förarbete. Rapporten levererar inte detta förarbete.

- Återigen; det står helt klart att rapporten inte levererat detta förarbete. Det har inte funnits som vare sig ambitioner eller mål för projektet. Se ovan.

Kommentaren påverkar inte texten, möjligen hade något av utläggningen ovan kunnat läggas in.

Dessutom finns inga jämförelser mellan beräkningar och mätningar på verkliga konstruktioner.

- Det har inte funnits ramar inom projektets att göra mätningar i fält med de aktuella parametrarna. Dessutom representerar de inmätta betongerna kvaliteter som mycket sällan eller inte alls hade börjat användas vid färdigställande av materialrapporten 2023. Att göra dylika mätningar är en lämplig uppgift för framtida projekt.

Kommentaren påverkar inte texten, möjligen hade delar av utläggningen ovan kunnat läggas in.

Läsaren får information i slutsatser m.m. och i delrapporters slutsatser.

Rapporten konstaterar i avsnitt 3.5 att ” Temperaturrelaterade metoder bör på grund av inneboende otillräcklighet användas om stort erfarenhetsunderlag föreligger för den aktuella tillämpningen.”. Metod 1 är en temperaturrelaterad metod och därmed bör den enligt rapporten enbart tillämpas med stort erfarenhetsunderlag.

- Det är rätt konstaterat. Det var det vi försökte förmedla.

Texten anses inte behövas förtydligas med hänsyn till kommentaren.

Kap 4, sida 21. De ändrade skrivningarna i AMA 23 baseras bl.a. på resultat som redovisas i SBUF 14096. Därmed är det felaktig att skriva att beräkningar inte är redovisade.

- Det hade uppskattats om vi fått hjälp att se de resultat som åberopas. Det som man kan utläsa ur 14096 är beräkningar på ett typfall; vindkraftverksfundament – vad vi kan hitta.

Vi har inte hittat några resultat som har gett underlag till ändringarna i AMA 23 som berör ytsprickfall med symmetriskt och osymmetriskt temperaturfördelning.

Kommentaren påverkar inte texten. Den initierade läsaren kan själv reda ut förhållandena och studera tidigare rapporter från SBUF.

Kap 4, sida 21: Det är felaktig att påstå att ” insatser snarast sätts in eftersom gällande kriterier, dvs. enligt AMA 23, troligen innebär åtgärder som inte är nödvändiga och ofta är kostsamma.”

- Om man tolkar Figur 4.1 och 4.2 och jämför med de krav som står för metod 1 kan man nog se att många fler fall kan innehållas utan att åtgärder behöver vidtas. Figur 4.1 och 4.2 skulle kunna vara några delfigurer i uppgradering av metod 2. Och redan nu kunna ge besparingar.

Kommentaren påverkar inte texten. Vi anser att texten är korrekt.

Kap 4, sida 21: osymmetrisk temperaturfördelning (läs platta på mark) ingår redan i nuvarande metod 1.

- Se ovan – dvs. oklart i text metod 1.

En förenklad metod (metod 1) kommer alltid ge mera åtgärder än noggrannare beräkningar (metod 3). Annars är den förenklade metoden inte på säkra sidan vilket den alltid ska vara.

- Rätt!

Kommentaren är korrekt och påverkar inte textmassan.

Kap 4, sida 22, Figur 4.1: Dessa är framtagna för ren Anl-FA. Figurerna finns publicerade i BHB-M och har använts även idag. Det framgår dock inte hur inblandning av slagg eller mera flygaska inverkar.

- Det är helt korrekt. Det har inte varit ambitionen i detta projekt att ta fram Figur 4.1 och 4,2 och liknande diagram vid tillsats av slagg, flygaska osv.
- Det fanns inte utrymme för mer arbete inom projektet. Det får användare av de nya parametrarna reda ut – det sker redan vilket kan dokumenteras i framtida projekt.

Kommentaren påverkar inte texten. Förtydliganden enligt ovan hade tyngt ned redogörelsen.

Kap 4, sida 24: metod 2 klara inte 95% av ytsprickrisken eftersom isolerad betongyta inte finns med. Därmed saknas vinterhalvåret. Det är ungefär 70% av ytsprickriskfallen som kan lösas med metod 2. Metod 2 diagram finns dock inte framtagen för klimatreducerade betonger utöver Anl-FA. Se kommentar ovan, det krävs omfattande förarbete.

- Vi håller med. ”Utöver Anl-FA” – då menas ovan att metod 2 gäller för Anl-FA. I så fall borde bakomliggande beräkningar redovisas.

Ändrat

- Bara en kommentar: de 95 % som författarna fått information om kommer från Jan-Erik Jonasson ursprungligen. Dvs. vi har utgått från att de är välgrundade, så var tydligen inte fallet och vi borde ha kontrollerat källan noggrannare.
- På samma sätt hade det varit trevlig att få bakgrund till 70 % ovan.

Kommentaren påverkar inte texten.

Kap 4, sida 24: Crax1 räknas som metod 3 redan, se även avsnitt 4.4. Det spelar dock ingen roll om den kallas för metod 2 eller 3. I dagsläge kan den inte användas för klimatförbättrade betonger.

- Helt rätt!

Kommentaren påverkar inte texten.

Kap 4, sida 26: Uttorkning ingår idag inte i beräkningarna. Varför lyfts detta fram i rapporten och vad ligger till grund för skrivningarna?

- Idag ingår självuttorkningen i ConTest programmet, Detta mäts, ges som indata till modeller från bl.a. avhandling vid LTU och beräknas. Metodiken är dock tämligen osäker, speciellt för klimatreducerade betonger, se även kommentarer kring remissvar beträffande krympförsök och dess inmätning.

Ska ändras till krympning av självuttorkning i framtida justeringar.

Kap 4, sida 26: det är väl nästan enbart ConTeSt som används idag. Undantaget är andra programvaror.

- ? – dvs. förstår inte kommentaren.

Kommentarer rörande en refererad del i *Slutrapport SBUF 13630* samt *BILAGA 1 av Trafikverket (FOI-BBT 2018-033) Materialdata för beräkning av temperatur, hållfasthet och spänningar – betong med AnlFA-cement, flygaska och slagg.*

Teknisk rapport, 2024. ISBN 978-91-8048-597-5

Sida 9, Figur 2.2: saknar förklaring varför vissa mätvärden inte är med i utvärderingen av mognadsfunktionen. Det är rätt så många för de högre lagringstemperaturer. Utvärderingen baserat på ett fåtal mätvärden/punkter blir osäker eller fiktiv. Provad betong uppvisar viss temperaturkänslighet och hållfasthetstapp vid lagring vid högre temperaturer.

Kommentaren påverkar inte texten. Ett förtydligande hade ev. kunnat gjorts men anses tynga ned redovisningen i materialrapporten som bör vara kort och koncis.

Sida 12: det bör förtydligas att storleken på uppmätt hållfasthetstapp sannolikt beror på provningsmetodik. Det går nog däremot inte att genom val och antagande helt utesluta att de provade betongerna kan vara temperaturkänsliga. Här behöver man kanske vara tydligare med att detta inte är/har utretts i detta projekt?

- Som nämns i materialrapporten under rubriken “Hållfasthetstapp vid förhöjd temperatur”, med stöd av refererade kapitel i Betonghandbok material och vidläggande rapport “Analysmetodik och materialmodeller” till detta projekt, har det bedömts att hållfasthetstappet varit ringa för betong med aktuella bindemedel.
- De värden som uppmätts i Figur 2.2 (se även förtydligandet i Figur 2.6 (i relation till t_{ckv})) är baserade på den speciella metodiken där provkroppar utsätts för en omedelbar temperaturhöjning till 35 °C resp. 50 °C, vilken anses vara tämligen exceptionellt. Mätvärden för högre tryckhållfastheter, över 50 % av sluthållfasthet, bedöms därför vara osäkra och har uteslutits i utvärderingen. (De visas ändå för den intresserade).

Kommentaren påverkar inte texten – detta är förklarat på ett vederhäftigt sätt, på flera ställen här och i Betonghandboken.

- Det är riktigt att fenomenet inte är grundligt utrett i projektet. Det fanns ambitioner att t.ex. lagra kuber i en mer verklighetstrogen temperaturbelastning, t.ex. styrkurvan för 0,7 m vägg, men kunde inte genomföras på grund av att de temperaturstyrda baden används för frirörelseförsöken. Försök genomfördes dock för ett fåtal av de ingående recepten. Resultaten från dessa försök styrker att förfarandet att exponera betongen för hög temperatur i tidig ålder kan leda till att hållfasthetstappet överskattas för fallet 0,7 m tjock vägg.
- Fenomenet är inte okänt och har påverkat tidigare inmätningar av materialdata, t.ex. de som redovisats i olika SBUF projekt. Hållfasthetstappet har troligen därvid överbestämts i de flesta fallen och det kan vara så att indata till olika beräkningsprogram inte är korrekta.
- Vi menar att det är dags att grundligt belysa fenomenet i en större utredning och förändra inmätning. Eventuellt bör modellering ändras.

Kommentaren påverkar inte texten. Ett förtydligande enligt ovan hade ev. kunnat gjorts.

Sida 18, Fig 3.4: det finns ologiska tendenser i uppmätt värme. Dessa bör kommenteras. Jämför 0,38 Ref och 0,38 18S och motsvarande för vct 0,48.

- Att det förekommer skillnader i värmeutveckling mellan bindemedelskombinationer vid olika vbt:n har observerats i flera andra undersökningar. Värmeutvecklingen påverkas ju av

hydratationsgraden och dess hastighet under härdningens olika processer där flera faktorer, förutom temperatur, påverkar. Se t.ex. kapitel 10 i Betonghandboken Material.

- I försöken observeras förväntade tendenser i hydratationsvärme, per kg bindemedel, mellan olika vbt:n, för t.ex. referensblandningarna. Det observeras även en retardation vid ersättning med slagg respektive flygaska, vilken i fallet slagg återhämtas under senare skede, dvs. på grund av senare puzzolanreaktioner. Detta har observerats i andra undersökningar. Detta sker inte för flygaska.
- Det finns några mindre “avvikelser” under det allra första skedet, dvs. första halva dygnet som möjligen kan betraktas som ologiska (enligt författarna till BILAGA 6). Dessa kan möjligen ge en smärre påverkan på beräknad temperaturutveckling för vissa förutsättningar (geometri, temperaturförhållanden etc.), troligen av ringa karaktär jämfört med andra faktorer i fält.
- Fler parallella semi-adiabat försök (nu: två) skulle kunna ge mer information om det första skedet. Att satsa på mer omfattande provning med ökade kostnader etc. ska ses i relation till nyttan, dvs. hur stor påverkan ovan egentligen har.
- Vi föreslår att man avvaktar en utökning av provning innan mer grundläggande studier utförs. T.ex. genom det nystartade projektet finansierat av FOI-BBT.

Kommentaren påverkar inte texten. Ett förtydligande enligt ovan hade eventuellt kunnat gjorts men anses tynga ned redovisningen i materialrapporten, se även ovan.

Sida 20, Fig 4.1 + 4.2: Det verkar bara vara en provkropp per ålder och betongsort. Hur kan (mät)fel (=kvalitetssäkring) uteslutas?

- Beträffande krypförsöken och fri-rörelseförsöken utförda vid LTU finns en full förståelse att det är vanskligt att förlita sig på endast en försöksuppställning per betongkombination. Med tanke på försökens komplexitet där mycket stor noggrannhet erfordras, finns det alltid en oro för olika felkällor.
En till synes minimal avvikelse i t.ex. provkroppshantering, montering av givare, fuktisolering etc., som sker under ett tidigt skede där betongens hållfasthet (ythållfasthet provkropp) är låg, kan få konsekvenser på uppmätta värden.
- Idealet är att utföra försök parallellt på tre provkroppar med samma betongblandning, dvs. från samma batch. Det inses att detta påverkar omfattning av blandning och genomförande med ökad tid och kostnader som följd.
- Det är bra att detta påpekas i BILAGA 6 – problemet har ju genomsyrat tidigare inmätningar, bl.a. inom nämnda SBUF projekt, där man i vissa fall endast har provat två åldrar vid krypförsöken.
- Detta bör utredas i framtiden, varför inte inom ovannämnda BBT-projekt?

Kommentaren påverkar inte texten i rapporten. Ett förtydligande enligt ovan hade eventuellt kunnat gjorts men anses tynga ned redovisningen, se ovan.

Sida 27/28, Fig 5.1 + 5.2: Det verkar bara vara en provkropp per betongsort. Hur kan (mät)fel (=kvalitetssäkring) uteslutas?

Sida 29, Fig 5.3: Svårt att se korrelation mellan uppmätt och beräknad för 0,48 18S. Bör kommenteras.

- Resultat i Figur 5.3 är förmodligen felmätta och försöken borde ha gjorts om. Vi har försökt tolka beteendet för just denna betong genom att studera övriga provningar i serien.

Ett förtydligande enligt ovan hade eventuellt kunnat gjorts men anses tynga ned redovisningen.

Sida 30, Figur 5.4: Det finns ologiska tendenser. Dessa bör kommenteras. 0,38 18S krymper mest, 0,48 18S krymper minst.

- Generell reflektion:
Beträffande krympningen (baskrympningen för 100 % isolerade provkroppar vid $T = 20$ °C) har projektgruppen konstaterat att det föreligger stora osäkerheter i inmätning, se även motsvarande kapitel i den bifogade delrapporten “Analysmetodik och materialmodeller”. Där sker en grundlig genomgång av aktuell metodiks brister och utmaningar (försök, analys och modeller).
- Stor osäkerhet finns t.ex. avseende inmätning av det allra första skedet, dvs. under de första timmarnas hydratation och självuttorkning samt relaterad rörelse. Aktuell provningsmetodik på avformade cylindrar med ytmonterade givare kan inte fånga det tidiga skedet. Vi får således en “mätlucka” som bör inkorporeras i framtida försöksuppställning. Laboratoriet i LTU kommer att uppdateras för att fånga in det tidiga skedet.
- Efter långa diskussioner inom projektgruppen valdes att extrapolera värden från de uppmätta till relevanta startvärden, dvs. då hydratationen startar och då logiskt baskrympningen startar, genom erfarenhetsmässiga antaganden. Vi erhåller då starttider enligt diagram som flyttas 1 tim framåt från referens vbt = 0,38 med hänsyn till respektive vbt-nivå och tillsats av flygaska respektive slagg. Krympningen tidsförlopp kalibreras in för att nå förväntade långtidsvärden.
- När det gäller långtidsvärden är försökstiden alldeles för kort för att säkerställa slutvärden. Här bör försök genomföras minst 1 år vilket är ogörligt om parametrar ska mätas in inom rimlig tid. Ett alternativ är att genomföra försök under kortare tid och nyttja semi-empiriska funktioner för tidsförloppet, se t.ex. Betonghandboken Material kapitel 18. En omfattande databas utgör också ett stöd.
- Alla inmätta krympningsresultat utförda vid LTU lider av fenomenet, mer eller mindre beroende på bindemedel, vattenbindemedelstal etc. Parametrar rapporterade i t.ex. olika SBUF-projekt bör lämpligen ses över.
- Beträffande kommentarer ovan: För de aktuella betongblandningarna har således nyttjats mätta värden och extrapolering baserat på erfarenhet – från bl.a. tidigare utförda försök vid LTU och från litteratur.
- Huruvida en betongblandning krymper mer eller mindre beror eventuellt till högre grad på betongrecept än smärre variationer av vbt, i detta fall 0,10.

Kommentaren påverkar inte texten i rapporten. Ett förtydligande enligt ovan hade eventuellt kunnat gjorts men anses tynga ned redovisningen i materialrapporten, se även resonemang i delrapporter. Framtida insatser får studera problematiken.