

Mats Emborg,
Jonas Carlswärd Betongindustri AB,
Luleå Tekniska Universitet
Björn Syvertsen,
Betongteknik AB, Stockholm

SAMMANFATTNING

Stålfiberarmerade pågjutningar av självkompakterande betong

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Användningen av stålfiberarmerad självkompakterande betong har ökat kraftigt de senaste åren, framför allt inom områden som golv på mark, beläggningar, prefabricerade produkter och pågjutningar. Väsentliga fördelar är att den ofta tunga och slitsamma hanteringen av stång- eller nätarmering elimineras samt att behovet av vibratorer för kompaktering försvinner. Således förbättras arbetsmiljön samtidigt som produktiviteten i många fall kan ökas avsevärt.

Av de tekniska förbättringarna framhålls ofta att stålfiberbetong är effektivare än vanlig slakarmerad betong när det gäller sprickkontroll eftersom en seghetsförhöjande effekt fås i alla riktningar och i hela betongmassan. Detta är sannolikt också en av orsakerna till att fiberbetong har blivit populärt i just markunderstödda plattor och pågjutningar, där begränsning av sprickor i många fall utgör ett väsentligt krav. Anmärkningsvärt är att det idag saknas dimensioneringsverktyg för att bedöma erforderlig mängd stålfibrer, eller snarare vilka egenskaper som krävs hos fiberbetongen för att tillgodose eventuella sprickkrav.

1.2 Syfte

En viktig ambition i projektet var således att verifiera om stålfiberbetong fungerar som sprickbegränsande armering. Projektet behandlar enbart tunna pågjutningar (35-50 mm) utsatta för långtidskrympning, där underlagets egenskaper varierades i syfte att även studera vidhäftningens roll. Avsikten var vidare att projektet skulle leda fram till praktiska rekommendationer avseende dimensionering av stålfiberbetong med hänsyn till sprickkontroll.

1.3 Genomförande

Med finansiellt stöd från SBUF och Betongindustri AB har arbetet utförts som ett forskningsprojekt (Carlswärd, 2006) under tiden 2003-2006 i samarbete mellan LTU, Betongindustri AB och Betongteknik AB.

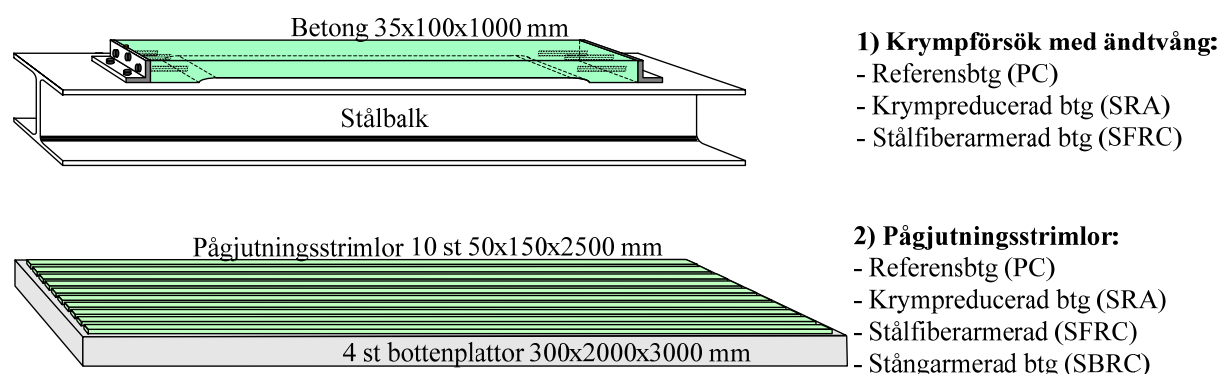
I projektet har laboratorieförsök genomförts för att verifiera inverkan av olika faktorer (vidhäftning, tvång, fibrer, krympning) på sprickrisk och sprickvidder. Dessutom har beräkningsmetoder utvecklats för att uppskatta hur olika parametrar enligt ovan påverkar sprickbildningen.

2 Försök förhindrad krympning

2.1 Provningsmetodik och utförande

Två försöksuppställningar utvecklades och användes för att studera sprickbildning till följd av förhindrad uttorkningskrympning, 1) och 2) i Figur 1. I metod 1) göts en tunn betongstrimla (35 mm) på en styv stålbeak. Vidhäftning mot överflänsen förhindrades medan betongens ändrar förankrades till L-stål som var fastskruvade i stålbeaken. Dragspänningar, som i förlängningen ledde till sprickbildning, genom mothållet i ändarna som förhindrade betongens fria krympning. I försöken studerades således effekten av stålfibrer på sprickor utan påverkan av vidhäftning mot underlaget. Även inverkan av krympreducerad betong (SRA) på sprickrisk och sprickvidd studerades.

Med försöksmetod 2) studerades istället fibereffekten vid olika grad av vidhäftning mot underlaget. Försöksuppställningen bestod av strimlor av 50 mm tjocka pågjutningar som göts direkt på ca 1 år gamla betongplattor. Vidhäftningen varierades genom att välja olika förbehandlingsar av de fyra underlagsplattorna. De alternativ som ingick var torr och slipad (slät yta), förvattnad och slipad, förvattnad och fräst (rå yta) samt primad och fräst. På varje platta göts 10 st strimlor; 2 med referensbetong (PC), 2 med krympreducerad betong (SRA), 2 med en centriskt placerad ϕ 8 mm armeringsstång (SBRC) och 4 med stålfiberbetong, fibermängd 30-60 kg/m³ (SFRC). Försöken utfördes genom att, efter en inledande härdningsperiod på 5 dygn, låta pågjutningarna krympa varvid sprickor, och i en del fall vidhäftningssläpp, efter hand uppstod till följd av mothållet från underlaget.

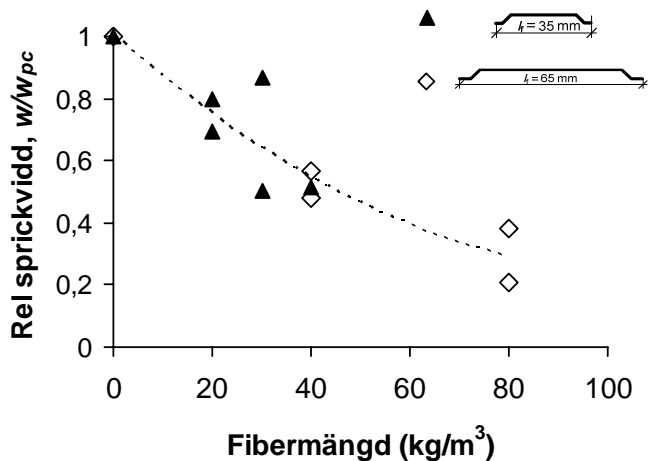


Figur 1 – Försöksuppställningar som användes för värdering av stålfibrers effekt på krympsprickor.

2.2 Resultat – förhindrad krympning

En summering av resultat från de två provningsmetoderna för mothållen krympning redovisas i Figur 2 och 3. Resultaten från metod 1) (Figur 2) visar att stålfibrer ger en sprickviddsreducerande effekt. Reduktionen var i storleksordningen 50 % jämfört med oarmerad betong vid en fiberhalt på 40 kg/m³. Armeringseffekten var dock inte tillräcklig för att fördela sprickor, dvs endast en spricka uppstod i betongprisman.

För betong med krympreducerande tillsatsmedel (SRA) visade det sig att krympreduktionen var tillräckligt stor för att sprickor skulle kunna undvikas inom den studerade försökstiden. Detta indikerar att användning av krympreducerare är en effektiv metod för att minska risken för krymprelaterade sprickor.



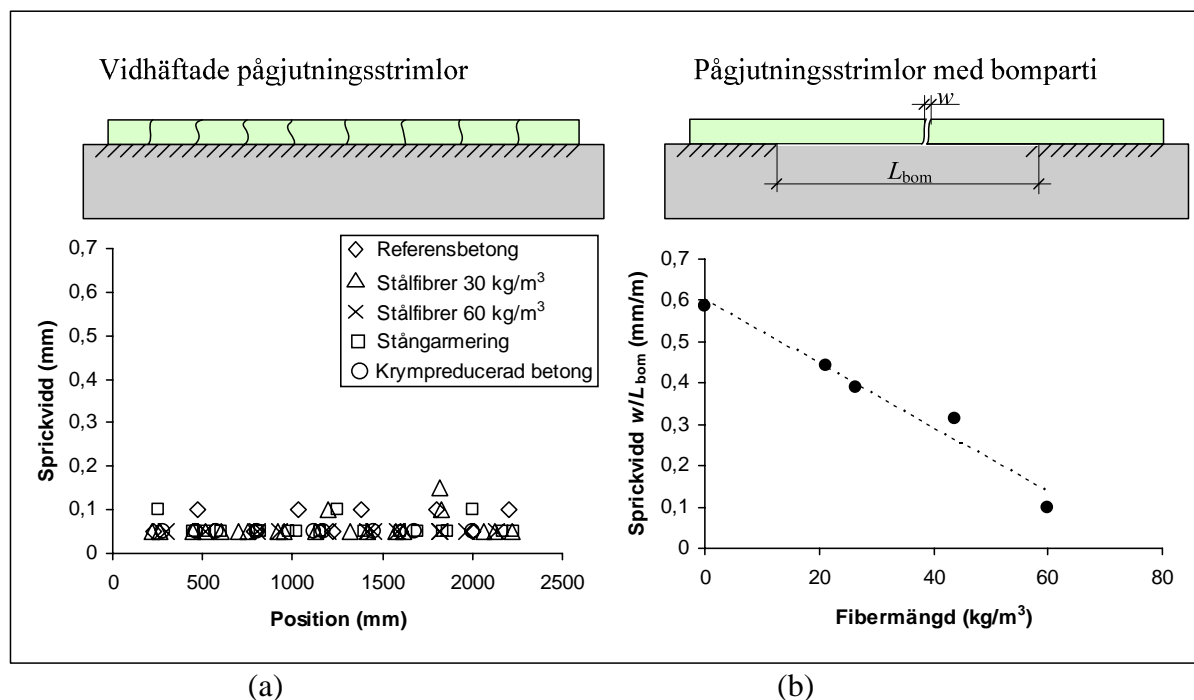
Figur 2 – Sprickviddsreducerande effekt av stålfibrer uppmätt med metod 1).

En sammanfattning av uppmätta sprickvidder för provningsmetod 2) visas i Figur 3. I (a) visas resultat för strimlor med jämn och hög vidhäftning medan diagrammet i (b) visar sprickvidder för strimlor där vidhäftningen var bristfällig, dvs där ett inre bområde (L_{deb}) uppstod. Noterbart är att då vidhäftningen var jämn och hög (a) uppstod ett antal väl fördelade och fina sprickor (0,05-0,1 mm) för såväl oarmerad som för stålfiberarmerad och stångarmerad betong. Med andra ord krävdes ingen armering för att fördela sprickor och begränsa sprickvidden då hög och jämn vidhäftning uppnåddes.

I fall med bristande vidhäftning (Figur 3 (b)) bildades endast en spricka i inre bområden för oarmerad och stålfiberarmerad betong. I stångarmerade strimlor uppstod flera sprickor med maximal bredd ca 0,2 mm inom inre bområden. Detta visar att fiberbetong (normala mängder), till skillnad från den aktuella stångarmeringen, inte klarade av att fördela sprickor inom ett bområde. Enligt diagrammet i (b), som visar uppmätt sprickbredd w dividerat med längden på det inre bområdet L_{deb} som en funktion av fibermängd i sprickan, ger fiberbetong dock en sprickviddsreducerande effekt. Relativt höga mängder krävs dock för att uppnå sprickkrav på t ex 0,1-0,2 mm. Notera även att värdena i diagrammet gäller per meter av ett inre bområde, dvs ju större bområde desto vidare spricka.

Det bör även nämnas att vidhäftningen blev högst och jämnast för torrt/slipat underlag medan vidhäftningen blev betydligt mer ojämn i de övriga fallen (fuktig/slipad, fuktig/fräst och primad/fräst). För de två förvattnade plattorna antas den bristfälliga vidhäftningen ha berott på att fukt tillsattes alltför sent (20-30 minuter före pågjutning) vilket gav mörka och fuktiga motgjutningsytor vid pågjutningstillfället. Enligt HusAMA 98 bör ytan istället vara ljus och torr vid pågjutning. Plattan som primades kan möjligen ha påverkats negativt av att för lång tid förflöt mellan priming och pågjutning (>1 dygn).

Att vidhäftningen blev hög och jämn för torr motgjutningsyta (plattan hade torkat i laboriemiljö under 10-11 månader) anses vara relaterat till den höga betongkvalitet som användes för bottenplattorna (vct 0,38). Detta ger en väldigt tät betong som inte är särskilt absorberande, vilket innebär att förvattning inte behövs för att förhindra alltför hög fuktugning från den färskna pågjutningsbetongen (se vidare avsnitt 3).



Figur 3 – Effekt av vidhäftning och stålfibrer på sprickor enligt försöksmetod 2). (a) Uppmätt sprickvidd för strimlor med hög och jämn vidhäftning. (b) Relativ sprickvidd (w/L_{deb}) för strimlor med inre bomparti.

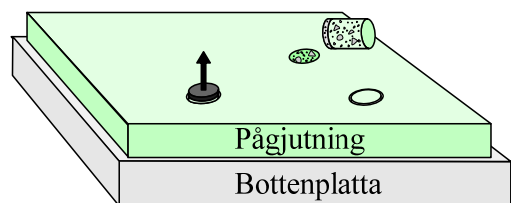
3 Vidhäftningsprovning

3.1 Provningsmetod och utförande

Med ledning av resultat från ovan beskrivna pågjutningsförsök (Figur 3) kan man konstatera att vidhäftningen har en avgörande betydelse för sprickbildningen i en pågjutning. Om det går att säkerställa hög och jämn vidhäftning behövs ingen armering för att fördela sprickor. Frågan är hur man skall gå till väga för att lyckas uppnå god vidhäftningskvalitet. Det är ett välkänt faktum att vidhäftningen i hög utsträckning påverkas av underlagets renhet, frihet från mikrosprickor och andra defekter samt av svaga ytskikt.

Inom projektet har två försöksserier genomförts för att studera inverkan av förvattning, primer och ytråhet (serie I i Figur 4). En försöksserie (serie II) utfördes även för att verifiera effekten av underlagsbetongens vct vid olika fuktförhållanden. Provnings utfördes genom utdragsförsök av cylindrar från pågjutningar av självkompakterande betong (SKB) på betongunderlag enligt Figur 4.

Bottenplattorna i serie I tillverkades med betong med anläggningscement och vct 0,49 medan plattorna i serie II innehöll byggcement och hade vct 0,35, 0,45 eller 0,55 (två av varje). Pågjutningsbetongen hade likadan sammansättning i båda försöksserierna (SKB med Byggcement och vct 0,53).



3) Vidhäftningsprovning:

Serie I

- Fräst/slipad yta
- Förvattning/priming/torr

Serie II

- vct (bottenpl) 0,35, 0,45 och 0,55
- Förvattnad/torr yta

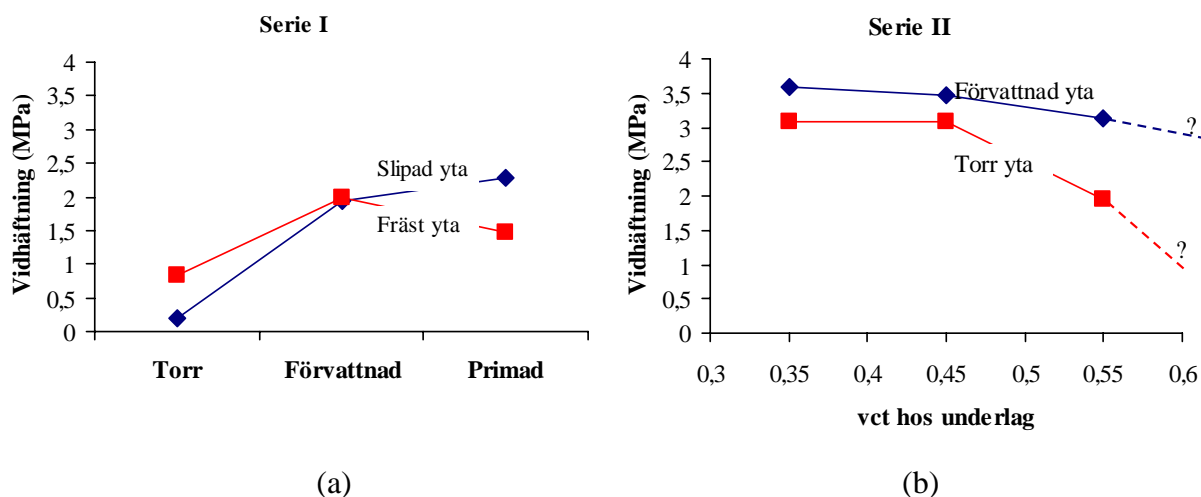
Figur 4 – Utdragsförsök för verifiering av vidhäftningshållfasthet.

3.2 Resultat - vidhäftningsprovning

Resultat från vidhäftningsförsök redovisas i Figur 5. I (a) framgår att förvattning är en bra metod för att förbättra vidhäftningen. Även primer (MB16) kan vara ett effektivt sätt att nå god vidhäftning. Däremot verkar det inte som om underlagets råhet är en avgörande faktor för vidhäftningskvaliteten.

Vidhäftningen blev generellt högre i serie II, se Figur 5 (b), vilket sannolikt är relaterat till bättre betongkvalitet i underlaget (åtminstone för vct 0,35 och 0,45). Ett annat intressant resultat är att torra motgjutningsytor nästan gav lika hög vidhäftning som förvattnade för betong med vct 0,35 och 0,45. För underlagsbetong med vct 0,55 var skillnaden mellan förvattnad och torr motgjutningsyta dock större. Resultatet anses spegla det faktum att permeabiliteten ökar med ökande vct, vilket även innebär att behovet av förvattning ökar. För ytor med hög absorption (permeabla) kommer alltför mycket fukt att sugas från den färskna pågjutningsbetongen, varvid det uppstår ett underskott av vatten för cementreaktionerna.

Den höga vidhäftningen uppmätt för torra ytor med låga vct (0,35 och 0,45) i serie II (b) kan omvänt förklaras med en hög täthet hos de aktuella betongerna, vilket medförde att ytornas absorption av fukt från pågjutningarna var begränsad även för torra ytor, dvs vattning var ej nödvändigt för att motverka uppsugning.



Figur 5 – Resultat från vidhäftningsförsök. (a) Inverkan av råhet, förvattning och primer. (b) Inverkan av förvattning vid olika vct hos underlaget.

Resultaten från serie II (i Figur 5 b) stöds även av vidhäftning uppmätt för de tidigare diskuterade pågjutningsförsöken, där ju bäst vidhäftning erhöles för torrt underlag enligt tidigare (se diskussion i avsnitt 2.2).

4 Beräkningsmodell

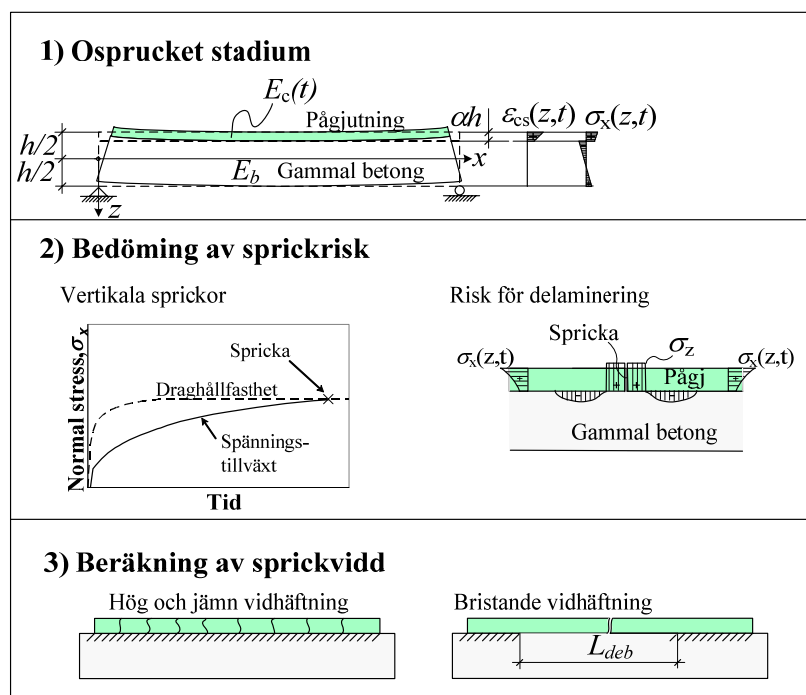
4.1 Beskrivning av modell

En beräkningsmetod föreslogs i avhandlingen för beräkning av sprickrisk och sprickvidd. Modellen (se Figur 4) består i princip av tre delar:

- 1) spänningsanalys i osprucket stadium
- 2) bedömning av risk för sprickor och/eller vidhäftningssläpp
- 3) sprickviddsanalys.

Beräkningar i osprucket stadium (1) följer i stort en tidigare modell, se Silfwerbrand (1997), där spänningstillväxten bedöms baserat på enkel balkteori för den pågjutna konstruktionen. Analysen tar hänsyn till krympningens och krypningens tidsförlopp, mognad och tvångssituation (som beror av E -moduler och tjockleksförhållande).

Uppsprickning antas ske då spänningen når pågjutningens draghållfasthet, 2) i Figur 4. I detta skede kontrolleras även om risk för delaminering från en inre spricka föreligger. Om så är fallet bedöms ett inre bomparti uppstå, varvid sprickvidden beräknas för en spricka inom bomområdet med längden L_{deb} (3 i Figur 4). Baserat på experimentella observationer (se t ex resultat i Figur 3 b) antas endast en spricka uppstå inom ett bomområde. Om vidhäftningen däremot är tillräcklig för att förhindra delaminering kommer sprickorna enligt resultat från försök (se t ex Figur 3 a) att bli fina och väl fördelade varför sprickviddsanalys inte är nödvändig.



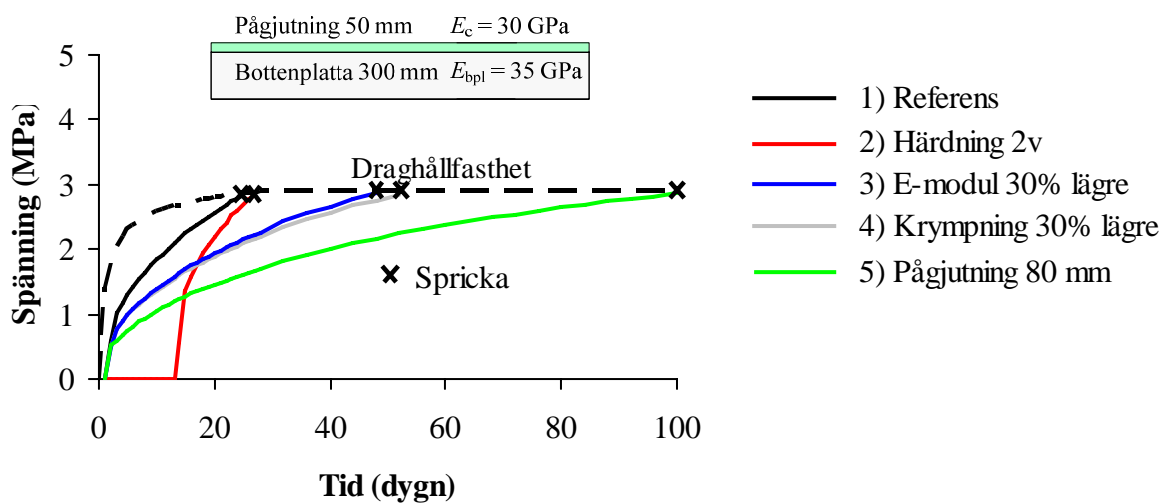
Figur 6 – Föreslagen modell för beräkning av risk för sprickor och sprickvidd.

4.2 Inverkan av olika faktorer på sprickrisken

Uppskattad spänningstillväxt (stadium 1 i Figur 4) i en pågjutning 50 mm på en 300 mm tjock betongplatta (jfr tidigare beskrivna pågjutningsförsök fall 2 i Figur 1) ges i Figur 5.

Krympning och krypning hos pågjutningen beräknades enligt EC 2 (2001), modifierade för att ge bättre överensstämmelse med pågjutningsförsöken (fall 2 i Figur 1). Krympning och krypning för bottenplattan försumrades. Beräknad tid till uppsprickning för referensfallet (1) blev ca 25 dygn. Med förlängd härdning från 1 till 14 dygn (2) blev tidpunkten ungefär densamma. Orsaken till att förlängd härdning, i teorin, inte är fördelaktig är att ungefär samma krymplast läggs på vid en senare tidpunkt då den gynnsamma effekten av krypning blir lägre.

Positiv effekt uppnåddes däremot vid reduktion av krympningen eller pågjutningens elasticitetsmodul med 30 % (3 och 4), vilket gav en fördubbling av tiden till uppsprickning. Mest gynnsam effekt uppnåddes dock då tjockleken hos pågjutningen ökades från 50 till 80 mm. Härigenom åstadkoms två mycket viktiga effekter: dels reduceras krymphastigheten och dels sjunker graden av tvång genom att den relativa pågjutningstjockleken ökar, dvs den sammansatta balken deformeras mer.

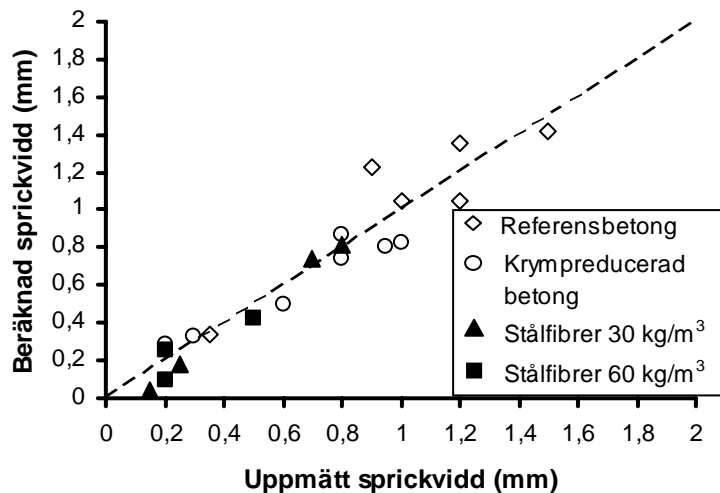


Figur 7 – Beräknad inverkan av olika faktorer på sprickrisken.

För att undvika sprickor i en pågjutning bör man således primärt inrikta sig på att utveckla betong med låg krympning och låg E -modul. Exempel på möjliga lösningar är att använda krympreducerare och polymerer för att modifiera betongen. Om möjligt bör man dessutom välja lite tjockare pågjutning för att minska tvånget.

4.3 Beräkning av sprickvidder

Den tredje delen av beräkningsmodellen (sprickviddsanalys i stadium 3 i Figur 6 för fallet med bristande vidhäftning) har verifierats genom jämförelser med resultat från pågjutningsförsöken. Överensstämmelsen mellan uppmätta och beräknade sprickvidder visade sig vara relativt god (se Figur 8). Det bör poängteras att modellen förutsätter att endast en spricka uppstår inom ett område med bom, vilket enligt ovan har verifierats för fibermängder upp till 60 kg/m^3 . En viktig förutsättning för en korrekt uppskattning av sprickvidder är således att storleken på ett bomparti kan bedömas på förhand.



Figur 8 – Jämförelse mellan beräknade och uppmätta sprickvidder för pågjutningsförsöken (försöksmetod 2 i Figur 1).

5 Slutsatser

5.1 Faktorer som påverkar risken för sprickor i en pågjutning

Tillväxten av dragspänningar i en pågjutning styrs av följande faktorer:

Krympning:

Pågjutningens krympning eller snarare skillnaden i krympning mellan pågjutning och underlag utgör lasten. Genom att välja betong med begränsad krympning minskar således risken för sprickor. För tunna pågjutningar kan det vara svårt att minska krympningen på traditionellt sätt genom t ex ökad stenhalt och begränsad pastamängd eftersom betong med låg stenhalt, begränsad D_{max} och hög pastamängd krävs av arbetbarhetsskäl. Resultat från projektet har visat att ett effektivt alternativ för att minska krympningen är att använda krympreducerare.

Grad av tvång:

Graden av tvång definieras som 100 % vid helt oeftergivligt underlag och 0 % vid fullständigt flexibelt underlag. Avgörande för graden av tvång är tjockleksrelationen mellan pågjutning och underlag samt de olika materialens E -moduler och krympning. Graden av tvång, och därmed risken för sprickor, minskas genom att öka pågjutningens tjocklek och/eller minska E -modulen hos pågjutningen.

Härdning:

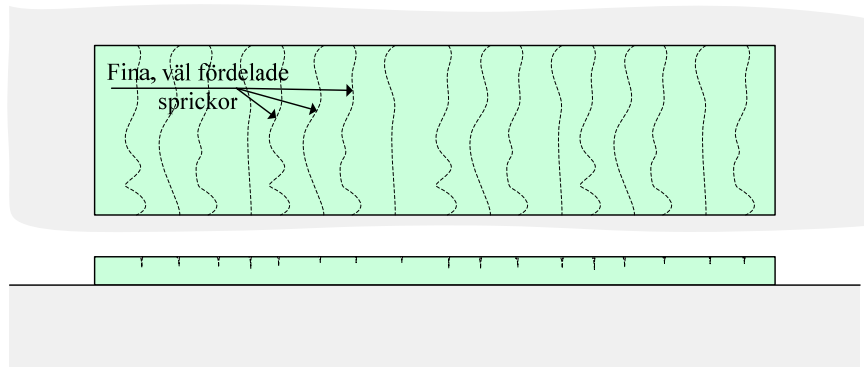
I teorin är långa härdningstider negativt eftersom krympningen skjuts upp till ett senare tillfälle då pågjutningen har en högre E -modul och dessutom mindre krympning. Teoretiskt borde det således vara bäst att avsluta härdningen redan efter något dygn då betongen fortfarande är ganska mjuk och krypbenägen. Det finns dock andra skäl, t ex slitstyrka och ythållfasthet, som talar för en förlängd härdning.

5.2 Armeringsbehov beror av vidhäftningsförhållande

Resultat från genomförda försök har visat att vidhäftningen har en betydande inverkan på sprickbildningen i pågjutningar. Beroende på grad av vidhäftning kan man skilja på två fall enligt följande:

Fall 1 – Hög och jämn vidhäftning:

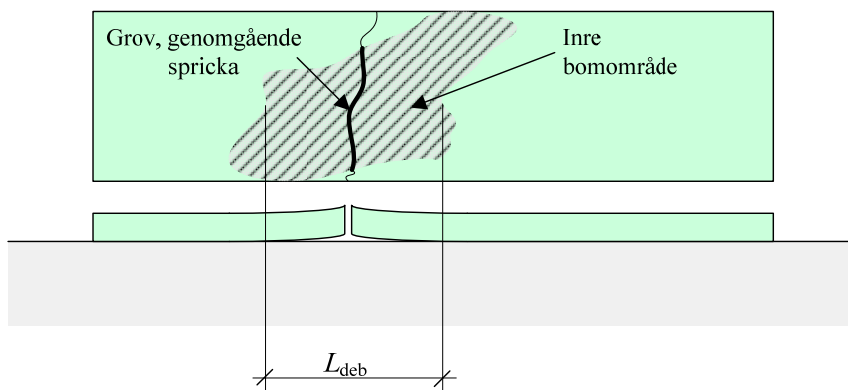
För detta fall har resultat visat att fina och väl fördelade sprickor (0,05-0,1 mm) uppstår i tunna pågjutningar (50 mm) även utan armering (se Figur 9). Med andra ord krävs ingen armering för att begränsa sprickor om hög och jämn vidhäftning kan säkerställas.



Figur 9 – Sprickbildning i en pågjutning med hög och jämn vidhäftning.

Fall 2 – Bristande eller ojämn vidhäftning:

Om vidhäftningen är otillräcklig, med risk för lokala bompartier, är risken stor att enstaka sprickor med besvärande vidd utvecklas (se Figur 10). I detta fall krävs armering för att begränsa sprickvidder. Försöksresultat visar att normala doseringar av stålfibrer (upp till 60 kg/m³) *inte* kan förväntas ha *sprickfördelande effekt* inom ett inre bomområde. Däremot ger stålfibrer en väsentlig *reduktion av sprickvidden*.



Figur 10 – Sprickbildning i en pågjutning med ojämn vidhäftning (där ett inre bomområde har uppstått).

Eftersom stålfibrer inte har sprickfördelande effekt går det inte att ge en generell rekommendation avseende erforderlig fibermängd för pågjutningar där vidhäftningen är bristfällig. Sprickvidden avgörs då inte enbart av fiberbetongens sprickviddsreducerande egenskaper utan även av bomområdets utbredning (L_{deb} i Figur 10). Det kan dock konstateras att betong med normala fibermängder (ca 20-40 kg/m³) inte kan betraktas som någon säker

sprickarmering för detta fall. Baserat på försöksresultat rekommenderas istället en fibermängd på 60 kg/m³ eller högre om fiberbetong används som sprickarmering i pågjutningar med osäker/bristande vidhäftning.

5.3 Faktorer som påverkar vidhäftningen

Baserat på ovanstående diskussion är det uppenbart att det bästa (mest ekonomiska) sättet att begränsa sprickor är att säkerställa hög och jämn vidhäftning. Frågan är hur man i förväg kan skapa goda förutsättningar för att nå god vidhäftningskvalitet. Helt klart är att många faktorer har betydelse, t ex mikrosprickor/kvalitet hos underlaget. I det aktuella projektet har dock underlaget bestått av relativt ny och frisk betong med ytor som har varit väl rengjorda vid pågjutningstillfället. För denna typ av underlag kan följande slutsatser dras avseende inverkan parametrar baserat på genomförda vidhäftningsförsök:

Effekt av förvattning:

Förvattning av motgjutningsytan har visat sig vara en effektiv metod för att säkerställa jämn och hög vidhäftning. Det är dock väldigt viktigt att ytan ges möjlighet att torka några timmar före pågjutning. I projektet tillsattes fukt vid ett tillfälle ca 20-30 minuter innan pågjutning (mörk yta utan fria vattensamlingar), vilket gav bristfällig vidhäftning. Notera att slutsatsen stämmer väl överens med rekommendation i HusAMA 98 och BRO 04, där man anger att förvattning skall utföras 24-48 timmar i förväg och följas av en period med uttorkning så att ytan är ljus vid pågjutning.

Då underlaget består av väldigt tät betong (med lågt vct) är det dock inte nödvändigt att förvattna ytan för att säkerställa hög och jämn vidhäftning. Resultat har visat att i stort sett lika hög vidhäftning uppnås för torrt underlag som för förvattnat underlag då vct hos underlagsbetongen är lika med eller lägre än 0,45 (Obs! gäller för betong med Byggcement). Resultatet verifierades även av pågjutningsförsöken (försöksmetod 2 i Figur 1) där den klart bästa och jämnaste vidhäftningen uppnåddes för torrt underlag.

Primer:

I en av de genomförda undersökningarna visade sig priming vara i stort sett lika effektivt som förvattning. Vid pågjutningsförsöken (försöksmetod 2 i Figur 1) blev dock vidhäftningen varierande för den yta som hade primats, vilket möjligen kan ha berott på felaktig applicering av primern. Det rekommenderas dock att man i första hand väljer förvattning och att primer endast används då vattning inte går att utföra.

Råhet:

Underlagets råhet är inte avgörande för att hög vidhäftning skall uppnås.

Referenser

Carlswärd, J. "Shrinkage cracking of steel fibre reinforced self compacting concrete overlays – Test methods and theoretical modelling," Doct Thesis 2006:55, Dep of Civ and Min Eng, Div of Struct Eng, LTU, 2006.

EC 2, "Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1: General rules and rules for buildings," prEN 1992-1 (2nd draft), Jan 2001.

Silfwerbrand, J., "Pågjutningar av betong," Rapport nr 10, utg 3, byggnadsstatik, inst för byggkonstr, KTH, Sthlm, 1997.