



SPRUTBETONGS KRYMPNING - FIBERBLANDNING FÖR BÄTTRE SPRICKFÖRDELNING



Anders Ansell
Jonas Holmgren

Sprutbetongs krympning – fiberinblandning för bättre sprickfördelning

Shrinkage of shotcrete - addition of fibers for crack distribution

Anders Ansell, Betongbyggnad-KTH

Jonas Holmgren, Betongbyggnad-KTH

SveBeFo rapport 87
Stockholm 2007

ISSN 1104 – 1773

ISRN SVEBEFO-R—87—SE

FÖRORD

Erfarenheter från Södra Länken och andra tunnelprojekt har visat på ett behov av bättre kontroll över krympeegenskaper hos sprutbetong, främst för att undvika sprickbildning i samband med dräner för vatten- och frostsäkring. En förstudie har visat att vanligen använda tillsatsmedel kan ha ogynnsam inverkan på dessa egenskaper. Mot den bakgrunden har två delprojekt genomförts med syfte att förstå de grundläggande mekanismerna för krympning hos sprutbetong och undersöka möjligheter att minska krympningen med bibehållen sprutbarhet, samt att prova fiberinblandning som kan bidra till att fördela krympningen på flera fina sprickor och därmed undvika korrosion på stålfibrer.

Föreliggande rapport redovisar undersökningen av fiberinblandning för att påverka sprickfördelning och en diskussion om möjligheten att åstadkomma en tøjningshårdnande fibersprutbetong, medan delprojektet om sprutbetongens krympmekanismer redovisas i SveBeFo rapport 86 ”Sprutbetongs krympning – modifiering av betongsammansättning”, författad av Björn Lagerblad, Leif Fjällberg och Mikael Westerholm.

Projektet har genomförts gemensamt av KTH Bygghälsa, avdelningen betongbyggnad, och Cement och Betong Institutet på uppdrag av Stiftelsen Svensk Bergteknisk Forskning och med Banverket, SKB och SBUF som huvudfinansiärer. Arbetet har följts av en referensgrupp bestående av Tommy Ellison, Besab, Staffan Hjertström, Cementa, Bo Malmberg, WSP, Erik Nordström, Vattenfall, Arvid Taube, Banverket, Kjell Windelhed och Lars Österlund, Vägverket, samt undertecknad.

Stockholm i oktober 2007

Tomas Franzén

Sammanfattning

Projektet syftar till att finna metoder för att undvika eller begränsa effekten av krympsprickor i dränkonstruktioner av sprutbetong. Om sprickor uppkommer är det viktigt att sprutbetongen genom att innehålla fibrer blir töjningshårdnande, vilket ger förutsättningar för att många fina sprickor bildas i stället för en bred.

Försök utfördes med stålfiberarmerad gjuten betong, med sådan reologi att den kan bedömas vara sprutbar och motsvara vad som används i praktiken. I en del av provkropparna har glasfibrer inblandats vilka förväntas förhindra krympsprickor under tidig betongålder, tills dragspänningarna har minskat på grund av krypning, eller medverka till flertalsuppsprickning. Försök med förhindrad krympning utfördes med betongringar gjutna kring styva stålringar. Även försök med korttidsbelastade böjbalkar har gjorts, för att undersöka graden av töjningsmjuknande eller hårdnande.

Av försöken med förhindrad krympning framgår att tillsats av stålfibrer försenar uppsprickningen och begränsar sprickvidderna. Ytterligare tillsats av glasfibrer förstärker effekten och bidrog i dessa försök till att krympsprickor helt uteblev. Försöken med böjbalkar visade att betongen har varit av en för hög hållfasthet för att tillåta fibrerna att ge det eftersökta töjningshårdnande beteendet. Den höga betonghållfastheten ges av vattencementtalet, vilket här var identiskt med det som ofta föreskrivs för sprutbetongkonstruktioner.

Nyckelord: sprutbetong, fiberarmering, krympning, sprickor.

Summary

The project aims at finding methods to avoid or limit the effect of shrinkage cracking in drainage constructions of shotcrete. If cracks appear it is important that fibers within the shotcrete can contribute to a strain-hardening behavior, thus making the formation of multiple cracks possible.

Tests were done with specimens of steel fiber reinforced concrete, with a rheology similar to that of sprayable concrete (shotcrete) used in practice. Some of the specimens were cast with concrete also including glass fibers which was added to prevent shrinkage cracking at early age, until the tensile stresses were reduced due to the creep effect. These fibers were also expected to have a positive effect on the crack distribution. Tests with restrained shrinkage were done by using specimens of concrete rings cast around stiff steel rings. There were also tests with concrete beams, short term loaded in bending to investigate if the concrete behaved tension-softening or -hardening during loading.

The shrinkage tests showed that addition of steel fibers will delay the cracking and limit the crack widths. A further addition of glass fibers will enforce this effect and contributed in these tests to that shrinkage cracking was avoided. The bending beam tests revealed that the tested concrete was too strong to allow the fibers to give the sought after strain-hardening concrete behavior. The high concrete strength is a result of the water-cement ratio which in these tests were chosen identical to that often prescribed for shotcrete constructions.

Keywords: shotcrete, fiber reinforcement, shrinkage, cracking.

Innehållsförteckning

| | |
|--|------------|
| 1 Bakgrund | 1 |
| 2 Försöksbeskrivning | 3. |
| 2.1 Försöksserie | 3. |
| 2.2 Betongsammansättning | 4. |
| 2.3 Betongkuber | 7. |
| 2.4 Böjbalkar | 7. |
| 2.5 Krympringar | 8. |
| 3 Betongens egenskaper | 10. |
| 3.1 Sättnått och konsistens | 10. |
| 3.2 Densitet och vattenförlust | 11. |
| 3.3 Tryckhållfasthet | 12. |
| 4 Böjdraghållfasthet och seghet | 14. |
| 4.1 Resultat från böjprovning | 14. |
| 4.2 Residualhållfasthet | 14. |
| 5 Förhindrad krympning | 19. |
| 5.1 Tid för uppsprickning | 19. |
| 5.2 Mikrosprickor | 20. |
| 6 Kommentarer och slutsatser | 21. |
| 6.1 Allmänna kommentarer | 21. |
| 6.2 Böjdraghållfasthet | 21. |
| 6.3 Förhindrad krympning | 22. |
| Erkännanden | 23. |
| Litteratur | 24. |

1 Bakgrund

Målet för det aktuella SveBeFo-projektet är i första hand att finna metoder att helt undvika krympsprickor i dränkonstruktioner av sprutbetong. Om sprickor ändå uppkommer är det viktigt att sprutbetongen innehåller fibrer i sådan mängd och av sådan(a) typ(er) att materialet blir töjningshårdnande, varmed menas att dess dragkraftskapacitet ökar även efter det att en spricka har uppkommit. Härigenom finns förutsättningar för att många fina sprickor bildas i stället för en bred.

Dränkonstruktionerna karakteriseras av att de är mer eller mindre skivformade och att de är fasthållna i båda ändar. Mellan fasthållningspartierna är sprutbetongen helt fri att röra sig, eftersom den är sprutad mot en cellplastskiva med mycket låg elasticitetsmodul och en ytbeskaffenhet, som förmodas ge mycket låg vidhäftningshållfasthet. När betongen börjar härda, startar också krympningen. Fasthållningen i båda ändar av dränen är ett tvång, som leder till att dragspänningar utvecklas. Storleken av dessa beror på krympningens storlek, men också på elasticitetsmodulen och betongens krypegenskaper. När sprutbetongen är ung har den låg elasticitetsmodul, varför spänningarna blir små. Samtidigt är dess draghållfasthet låg. All erfarenhet visar att de negativa effekterna överväger för såväl den oarmerade sprutbetongen som för den enbart stålfiberarmerade, vilket innebär att en krympspricka ofta uppstår. En stålfiberarmerad sprutbetong har oftast en fiberhalt, som understiger 60 kg/m^3 – med större mängd fibrer blir kompakteringen dålig. Vidare har den oftast en matris av mycket hög kvalitet. Härigenom blir normalt en sådan sprutbetong töjningsmjuknande, varför inga fler sprickor uppstår. Vid konstruktioner på några meters längd kan en sådan spricka få en bredd på flera millimeter, varigenom fibrernas livslängd riskerar att förkortas avsevärt.

För att undersöka möjligheten att förbättra sprutbetongs sprickfördelande egenskaper genomförs projektets etapp III, som avser studier av olika fiberkombinationer. Utgångspunkten har varit att stålfiberarmeringen till typ och mängd samt betongkvalitet skall motsvara vad som används i praktiken. Utgående från detta studeras effekten av tillsats av glasfibrer. Valet av glasfibrer som komplettering av fiberarmeringen grundar sig på följande:

- Glasfibrer antas kunna adderas till befintliga stålfibrer utan risk för allvarligare kompakteringsproblem.
- Glasfibrer deltar i kristallbildningen vid cementets hydratationsprocess och får därigenom en god samverkan med matrisen.
- Glasfibrer är betydligt tunnare än stålfibrer och kan förväntas förhindra sprickbildning på mikronivå bättre än dessa.
- Glasfibrer har en elasticitetsmodul, som är betydligt högre än den unga betongens, varför de kan förväntas ha god effekt i tidiga skeden.

Det är ett känt faktum att även så kallade alkalibeständiga glasfibrer kristalliseras med tiden och förlorar en del av sin effekt. Detta har inte bedömts vara till någon nackdel i aktuell tillämpning, eftersom de förväntas antingen förhindra krympsprickor under tillräckligt lång tid för att dragspänningarna skall hinna minska på grund av krypning eller medverka till flertalsuppsprickning under den tid då huvuddelen av krympningen utvecklats.

Etapp III utfördes med gjuten betong, men med sådan reologi att den kan bedömas vara sprutbar. Krympförsök med gjutning kring styva stålringar användes, vilket får betraktas som ett gynnsamt försök, eftersom ringen i någon mån hjälper till att hålla ihop betongprovkroppen. Ringförsöken har dock den fördelen att den sammantagna effekten av krympning och krypning studeras – dock tyvärr icke möjliga att separera från varandra.

Som komplement har försök gjorts med böjbalkar, som belastats under mycket kort tid. Sådana provkroppar ger utslag beträffande graden av töjningsmjuknande/hårdnande utan någon som helst inverkan av krypning.

2 Försöksbeskrivning

2.1 Försöksserie

Försöksserien utgår från gjuten stålfiberarmerad betong med samma sammansättning som i betong för våtsprutning, dock utan tillsats av accelerator vilket har undersökts i projektetapp II. Stålfiberinnehållet är 50 kg/m^3 av typen *Dramix 30/05* och vct 0,45 vilket ofta föreskrivs för sprutbetong i tunnlar. Den stålfiberarmerade betongen jämförs med betong där även 25 kg/m^3 glasfiber har tillsatts, samt med en oarmerad referensbetong. Glasfibrerna var av typen *CEM-Fil 62/2*, tillverkade av *Saint-Gobain Vetrotex*. Deras diameter är $14 \mu\text{m}$ och vid försöken användes fibrer med längderna 6 mm och 12 mm. En storleksjämförelse mellan stål fibrer och 6 mm långa glasfibrer görs i Figur 2.1. Försöksserien sammanfattas i Tabell 2.1 där även antalet och typen av gjutna provkroppar anges. Kuber provas för att ge tryckhållfastheten, balkar för att bestämma böjdraghållfasthet och seghet samt ringar, vilka ger ett mått på uppsprickning vid förhindrad krympning. Provningsen av kuber och balkar har skett vid 7, 28 och 84 dygns betongålder med tre provkroppar vid varje tillfälle. Samtliga gjutna provkroppar förvarades i fuktrum med 100% RH och $+20^\circ \text{C}$ där de avformades efter ett dygn. Efter ytterligare 6 dygn flyttades de till ett fuktrum med 50% RH och $+20^\circ \text{C}$ där de förvarades till provningstillfället. Respektive provkroppstyp och försöksupställningar beskrivs i avsnitten 2.3–5.

Tabell 2.1 Betongtyp samt antal och typ av provkroppar.

Concrete type, number and type of tests specimens.

| | Stålfibrer | Glasfibrer | Provkroppar (typ, antal): | | |
|----------|------------|------------|---------------------------|--------|--------|
| | | | Kuber | Balkar | Ringar |
| Betong 1 | nej | nej | 9 | 0 | 3 |
| Betong 2 | ja | nej | 9 | 9 | 3 |
| Betong 3 | ja | 6 mm | 9 | 9 | 3 |
| Betong 4 | ja | 12 mm | 9 | 9 | 3 |



Figur 2.1 Stålfibrer av typ *Dramix 30/05* och 6 mm långa glasfibrer.
Steel fibers Dramix 30/05 and 6 mm glass fibers.

2.2 Betongsammansättning

De fyra betongtypernas sammansättning redovisas i följande två tabeller. Betongerna benämns enligt Tabell 2.1. I Tabell 2.2 redovisas sammansättningen av betong utan glasfiber, med och utan stålfibrer, medan den för betong med såväl glas- som stålfiber ges i Tabell 2.3. Då sammansättningarna varierar för de två betongtyper som redovisas ges två värden åtskiljda av snedstreck. Av de tillsatser som listats är *Glenium 51* flyttillsatsmedel och *Micro Air* luftporbildare. I samtliga fall användes ballast från Sätortorp. Volymförhållanden mellan tillsatt mängd stålfiber och glasfiber visas i Figur 2.2 medan Figur 2.3 visar inblandning av glasfiber. Notera att vikten av innehållet i de två hinkarna med glasfibrer av olika längd är densamma.

Tabell 2.2 Sammansättning av betong 1 och 2, utan glasfiberarmering. Där recepten för respektive typ är olika noteras detta med ¹ eller ².

Composition of concrete 1 and 2, without glass fiber reinforcement. Content unique for one type of concrete is denoted by indices ¹ or ².

| Material | Densitet (kg/m ³) | Volym (l) | | Vikt per m ³ betong (kg) | |
|------------------------|----------------------------------|------------------|------------------|--|-------------------|
| Anläggningscement | 3150 | 157 | | 495 | |
| Silika 940U | 2230 | 9 | | 20 | |
| Filler | 2800 | 0 | | 0 | |
| Vatten: | 1000 | 221 ¹ | 220 ² | 221 ¹ | 220 ² |
| Glenium 51 | 1100 | 3 ¹ | 4 ² | 3 ¹ | 4 ² |
| Micro Air | 1010 | 0 | | 0 | |
| Stålfiber Dramix 30/05 | 7800 | 0 ¹ | 6 ² | 0 ¹ | 50 ² |
| Glasfiber | 2600 | 0 | | 0 | |
| Mikrobruk + fibrer | | 390 ¹ | 396 ² | 739 ¹ | 789 ² |
| Ballast, 0-8 mm | 2650 | 590 ¹ | 584 ² | 1564 ¹ | 1547 ² |
| Ballast, 8-11 mm | 2650 | 0 | | 0 | |
| Luft | | 20 | | | |
| Totalt | | 1000 | | 2303 ¹ | 2336 ² |

Tabell 2.3 Sammansättning av betong 3 och 4, med stål- och glasfiberarmering. Längden av glasfibrerna är 6 mm för betong 3 och 12 mm för betong 4.

Composition of concrete 3 and 4, with steel and glass fiber reinforcement The length of the glass fibers are 6 mm in concrete 3 and 12 mm in concrete 4

| Material | Densitet (kg/m ³) | Volym (l) | | Vikt per m ³ betong (kg) | |
|---------------------------|----------------------------------|--------------|--|--|--|
| Anläggningscement | 3150 | 157 | | 495 | |
| Silika 940U | 2230 | 9 | | 20 | |
| Filler | 2800 | 0 | | 0 | |
| Vatten | 1000 | 218 | | 218 | |
| Glenium 51 | 1100 | 7 | | 8 | |
| Micro Air | 1010 | 0 | | 0 | |
| Stålfiber Dramix 30/05 | 7800 | 6 | | 50 | |
| Glasfiber (6 eller 12 mm) | 2600 | 10 | | 26 | |
| Mikrobruk + fibrer | | 407 | | 817 | |
| Ballast, 0-8 mm | 2650 | 573 | | 1518 | |
| Ballast, 8-11 mm | 2650 | 0 | | 0 | |
| Luft | | 20 | | | |
| Totalt | | 1000 | | 2335 | |



Figur 2.2 Stålfibrer *Dramix 30/05*, 6 mm och 12 mm långa glasfibrer. Volymförhållanden enligt betongrecepten.

Steel fibers Dramix 30/05, 6 mm and 12 mm long glass fibers. Volume ratios according to concrete compositions.



Figur 2.3 Inblandning av glasfibrer i blandare.

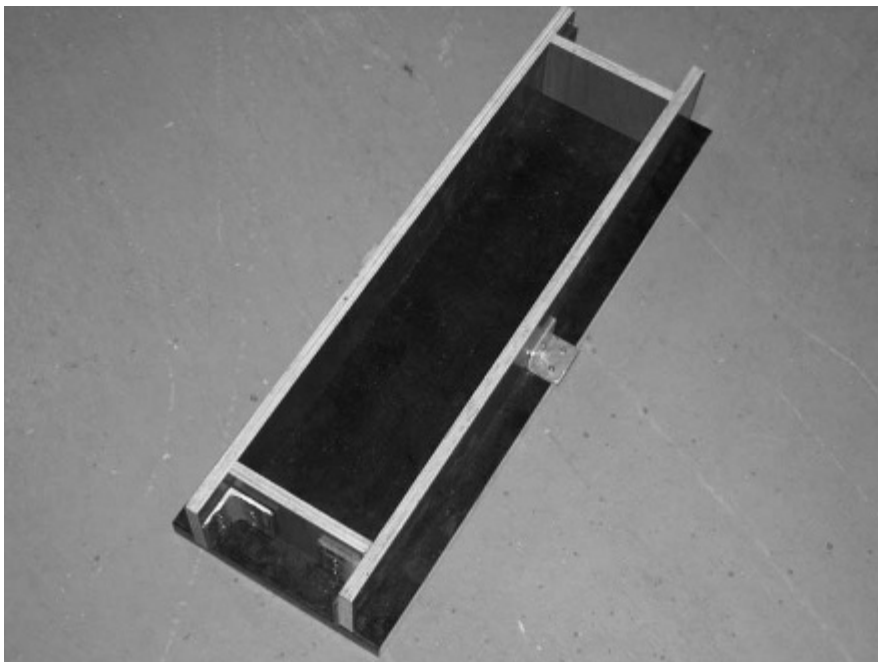
Addition of glass fibers to the concrete mix.

2.3 Betongkuber

Betongens tryckhållfasthet bestäms genom tryckning av betongkuber. Provningsen utförs enligt svensk standard SS 13 11 11 [1] med kuber $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}^3$. En *MTS* provningsmaskin användes vid försöken som genomfördes med en pålastningshastighet på ca 1 MPa/s.

2.4 Böjbalkar

Böjdraghållfasthet och mått på betongens seghet bestäms genom försök med böjbalkar. Provningsen följer i princip den amerikanska standarden ASTM C-1018 [2] och beskrivs även i rapporten *Stålfiberbetong* [3]. Provkropparna utformas som 500 mm långa balkar med tvärsnittsmåtten $75 \times 125 \text{ mm}^2$, där det större är bredden. En form för provkropparna visas i Figur 2.4. Provningsarna utfördes med en särskild rigg monterad i *MTS* provningsmaskinen, så som visas i Figur 2.5. Balkarnas spännvidd var 450 mm och lasten påfördes samtidigt i de två tredjedelspunkterna, 150 mm från stöden. Belastningshastigheten var 0,009 mm/s vilket styrdes av *MTS* maskinens rörliga övre del där även den totala lasten registrerades. Balkens mittnedböjning uppmättes med två förskjutningsgivare placerade på ömse sidor om balken.



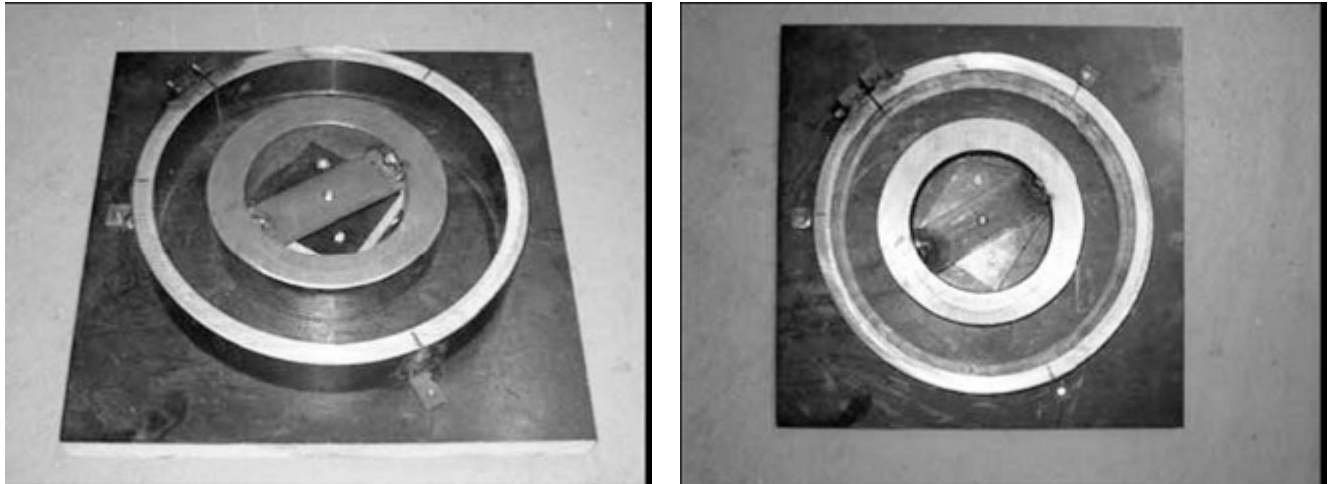
Figur 2.4 Form för gjutning av $500 \times 75 \times 125 \text{ mm}^3$ böjbalkar.
Mould for casting $500 \times 75 \times 125 \text{ mm}^3$ concrete beams.



Figur 2.5 Böjbalk monterad på rigg i MTS provningsmaskin.
Beam mounted in test rig in MTS testing machine.

2.5 Krympringar

Betongens egenskaper vid förhindrad krympning undersöktes med krympringar, betongringar gjutna kring 28 mm tjocka stålcyndrar. Betongringarnas tvärsnittsmått var $40 \times 40 \text{ mm}^2$ och deras yttre och inre diametrar var $\phi 253 \text{ mm}$ och $\phi 171 \text{ mm}$. Diametern vid tvärsnittets centrumlinje var alltså $\phi 212 \text{ mm}$. Provkropparnas utformning stämmer överens med dem beskrivna av Malmberg [4] och Grzybowski & Shah [5]. Av vardera betongtypen göts tre provkroppar vilka förvarades liggande i fuktrum med 50% RH och $+20^\circ \text{ C}$ där de hölls under kontinuerlig observation tills de uppnått ca 100 dygns ålder. Formar för gjutning av ringprovkroppar visas i Figur 2.6. Före gjutningen oljades formarnas samtliga ytor noggrant.

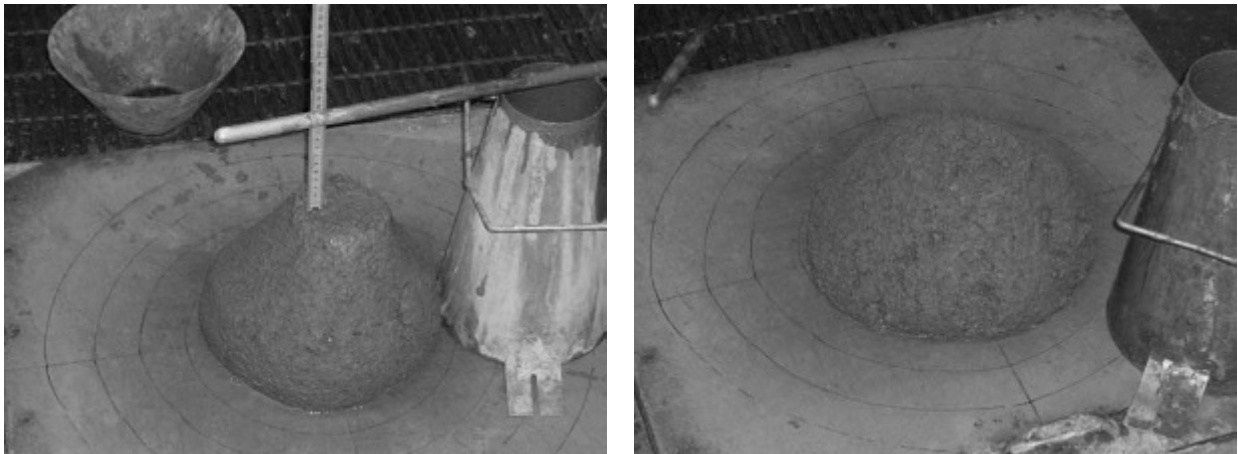


Figur 2.5 Formar för gjutning av $40 \times 40 \text{ mm}^2$, $\phi 212 \text{ mm}$ krympringar.
Moulds for casting $40 \times 40 \text{ mm}^2$, $\phi 212 \text{ mm}$ shrinkage test rings.

3 Betongens egenskaper

3.1 Sättmått och konsistens

Den färska betongens konsistens bestämdes genom provning med sättkon direkt efter blandningen. Provningsmetoden följer svensk standard [6] och sättmåttet avser den sträcka som den 300 mm höga betongkonen sjunker ihop då sättkonen avlägsnas. Betongens utseende vid provningstillfället visas i Figur 3.1 och sättmåtten för de fyra provade betongtyperna redovisas i Tabell 3.1. Betongens sprutbarhet har provats inom projektets andra etapp där betong av den typ som här benämns nr 3 (med 6 mm glasfibrer) sprutades efter att luftporbildande medel hade tillsatts.



Figur 3.1 Provning av färsk betong, sättmått.
Testing of fresh concrete, slump test.

Tabell 3.1 Sättmått för färsk betong av typerna 1–4.*Slump value for fresh concrete of types 1–4.*

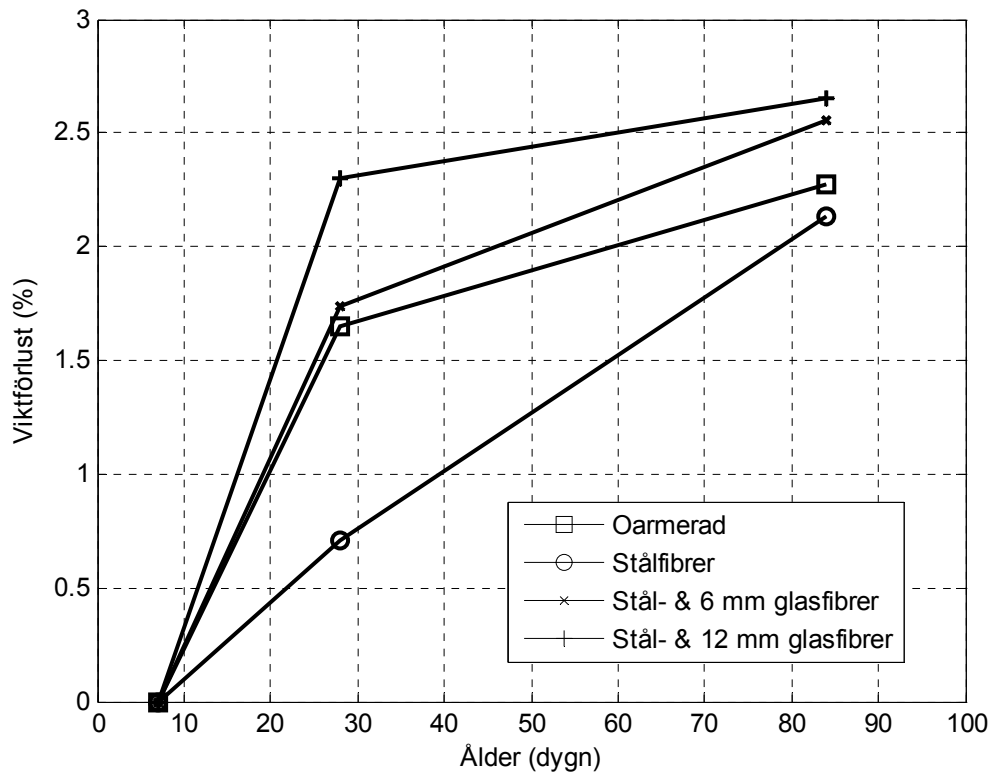
| | Stålfibrer | Glasfibrer | Sättmått |
|----------|------------|------------|----------|
| Betong 1 | nej | nej | 160 mm |
| Betong 2 | ja | nej | 140 mm |
| Betong 3 | ja | 6 mm | 70 mm |
| Betong 4 | ja | 12 mm | 105 mm |

3.2 Densitet och vattenförlust

Betongkuberna vägdes och mättes vid varje provningstillfälle och respektive betongs beräknade densitet redovisas i Tabell 3.2. Betongprovkropparna har minskat i vikt i och med vattenavgången som började vid 7 dygns ålder då flytten från 100% RH till 50% RH ägde rum. Den beräknade vattenförlusten för betongkuberna redovisas grafiskt i Figur 3.2.

Tabell 3.2 Betongens densitet vid provningstillfällena, efter lagring i 50% RH och +20° C.*Concrete density at testing, following hardening at 50% RH and +20° C.*

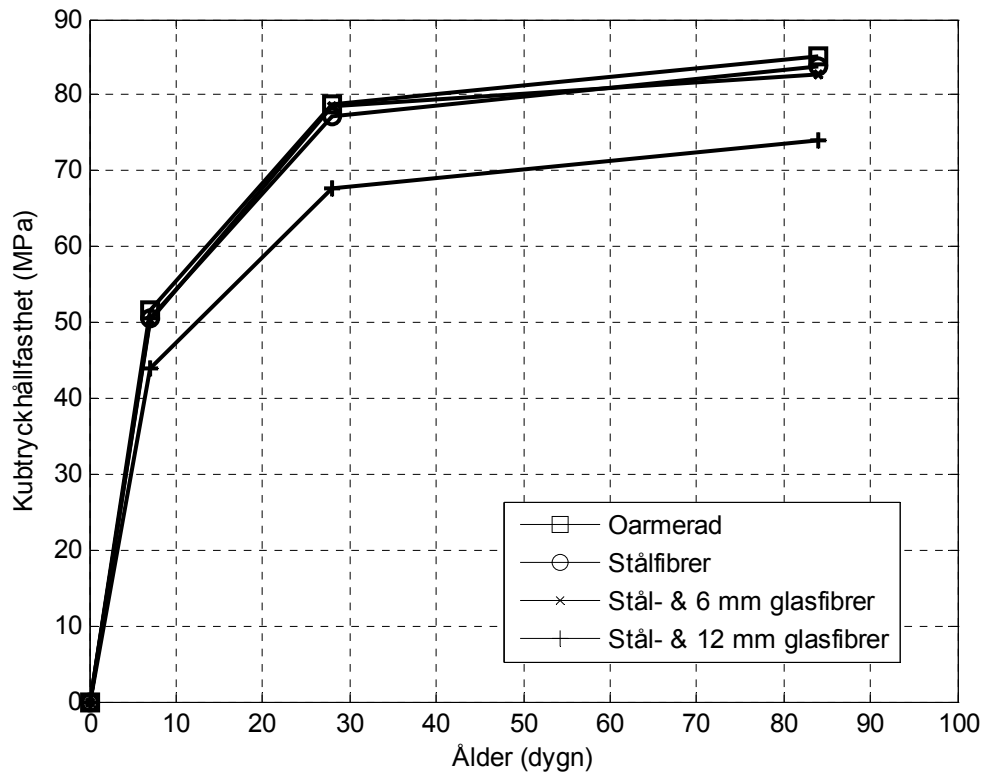
| | Densitet (kg/m ³) vid betongåldrarna: | | |
|----------|---|---------|---------|
| | 7 dygn | 28 dygn | 84 dygn |
| Betong 1 | 2312 | 2277 | 2261 |
| Betong 2 | 2325 | 2339 | 2273 |
| Betong 3 | 2292 | 2272 | 2246 |
| Betong 4 | 2283 | 2231 | 2226 |



Figur 3.2 Vattenförlust vid lagring i 50% RH och +20° C (fr.o.m. 7 dygn).
Loss of water during hardening at 50% RH and +20° C (from 7 days).

3.3 Tryckhållfasthet

Betongens tryckhållfasthet anges här som kubtryckhållfasthet, bestämd genom tryckning av 150 mm standard betongkuber [1]. Medelvärdena av tre kuber vid varje provningstillfälle visas grafiskt i Figur 3.3. Notera att betong 1–3 följs åt och har uppnått ca 50–51 MPa efter 7 dygn, ca 77–79 MPa efter 28 dygn och ca 83–85 MPa efter 84 dygn. Betongtyp 4 med 12 mm glasfibrer visar lägre hållfasthet och uppnår på motsvarande tid endast ca 44 MPa, 68 MPa och 74 MPa.



Figur 3.3 Kubtryckhållfasthetens tillväxt vid lagring i 50% RH och +20° C.
Cube strength growth during hardening at 50% RH and +20° C.

4 Böjdraghållfasthet och seghet

4.1 Resultat från böjprovning

Resultaten från böjprovningarna redovisas i Figur 4.1–6. För betongtyperna 2–4 ges parvis grafer över spänning-deformationssamband och ett foto som visar motsvarande böjbalkar efter provning. I fotona är de tre översta balkarna provade vid 7 dygns ålder, de tre mittersta vid 28 dygn och de tre nedre vid 84 dygn. Den angivna nedböjningen avser mittnedböjning och spänningen är nominell böjdragspänning beräknad från pålagd last enligt teori för elastisk, homogen balk. Ur graferna framgår att brotthållfastheten f_{flu} och sprickhållfastheten f_{flcr} var av samma storlek för samtliga balkar. Medelvärden för sprickhållfastheterna ges i Tabell 4.1–3.

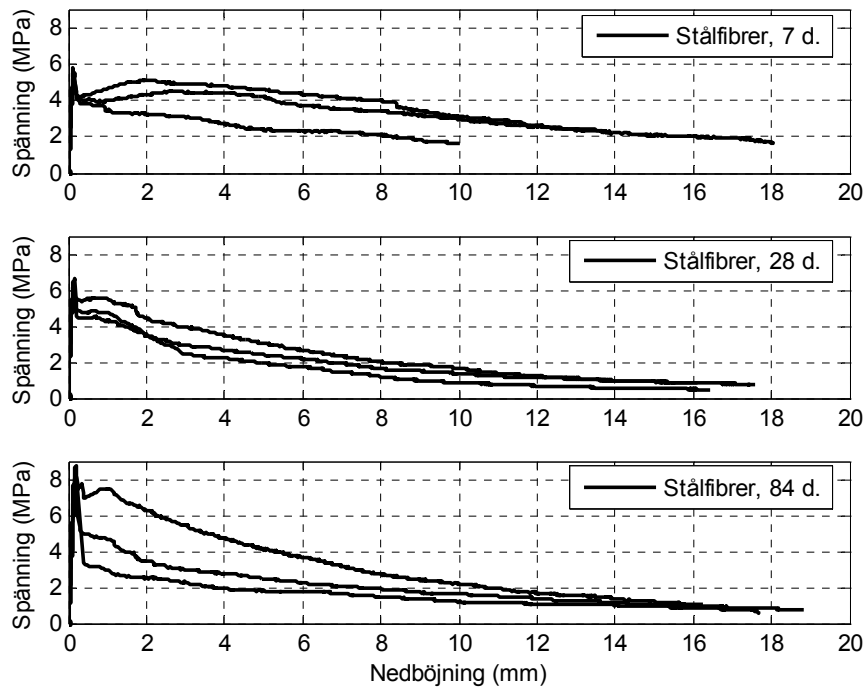
4.2 Residualhållfasthet

Residualhållfasthetsfaktorer har beräknats för samtliga 27 provade böjbalkar, utifrån seghetsindex bestämda för deformation fram till 20,5 gånger mittnedböjningen δ_{cr} vid uppsprickning. Faktorerna redovisas i Tabell 4.1–3 där även medelvärden för sprickhållfastheterna ges. Hållfasthetsfaktorerna ges som intervall på grund av den stora spridningen i resultaten, vilket framgår i graferna i Figur 4.1, 4.3 och 4.5. Beteckningar enligt rapporten *Stålfiberbetong* [3] används. Seghetsindex betecknas I_X och beräknas som kvoten mellan arean under spänning-nedböjningskurvan fram till deformationen $0,5(X+1)\delta_{cr}$ och arean $0,5 f_{flcr}\delta_{cr}$. I grunddefinitionen utgås från en kraft-nedböjningskurva men eftersom kvoten används kan kraft ersättas av spänning. Motsvarande residualhållfasthetsfaktor bestäms som:

$$R_{10,X} = 100 \cdot \frac{I_X - I_{10}}{X - 10}$$

I detta fall beräknas faktorer för $X = 20, 30, 40$ vilket alltså beaktar areor beräknade fram till och med mittdeformationerna $10,5\delta_{cr}$, $15,5\delta_{cr}$ och $20,5\delta_{cr}$. Residualhållfastheter för fiberbetongen redovisas ej här men kan beräknas enligt:

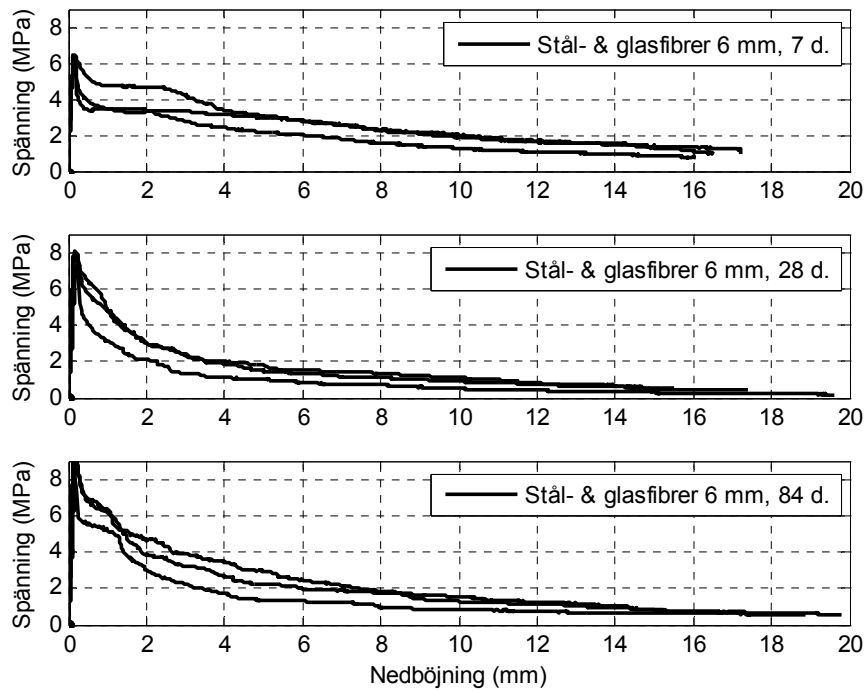
$$f_{flres} = f_{flcr} \cdot \frac{R_{10,X}}{100}$$



Figur 4.1 Böjdragspänning för betong 2, stålfiberarmerad referensbetong.
Bending tensile stresses for concrete 2, steel fiber reinforced reference.



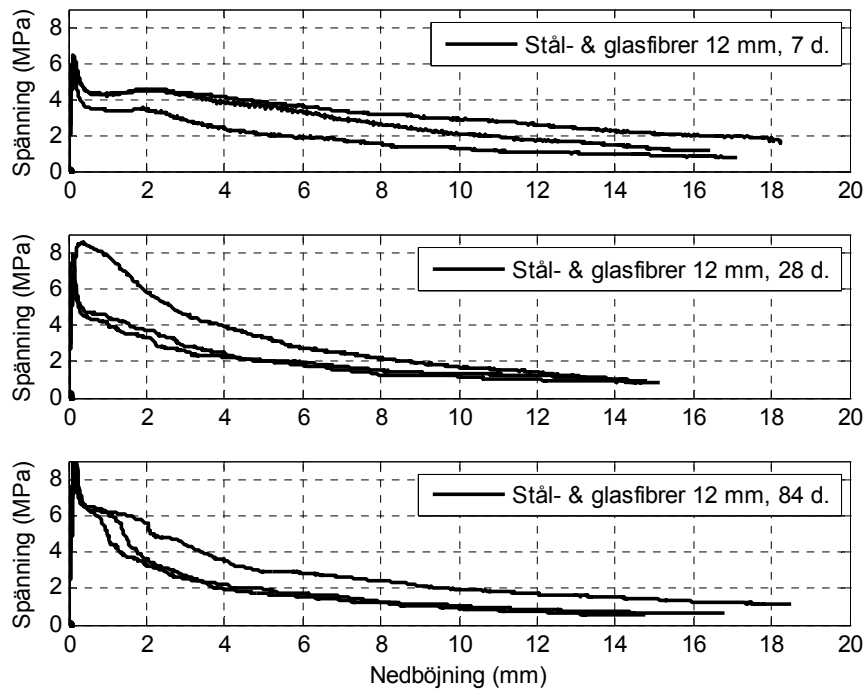
Figur 4.2 Uppsprickning efter provning av betong 2, stålfiberarmerad referensbetong.
Bending cracks after testing concrete 2, steel fiber reinforced reference.



Figur 4.3 Böjdragspänning för betong 3, stål- och glasfiberarmerad betong.
Bending tensile stresses for concrete 3, steel and glass fiber reinforced.



Figur 4.4 Uppsprickning efter provning av betong 3, stål- och glasfiberarmerad betong.
Bending cracks after testing concrete 3, steel and glass fiber reinforced.



Figur 4.5 Böjdragspänning för betong 4, stål- och glasfiberarmerad betong.
Bending tensile stresses for concrete 4, steel and glass fiber reinforced.



Figur 4.6 Uppsprickning efter provning av betong 4, stål- och glasfiberarmerad betong.
Bending cracks after testing concrete 4, steel and glass fiber reinforced.

Tabell 4.1 Sprickhållfasthet och residualhållfasthetsfaktorer för betong 2, stålfiberarmerad referensbetong.

Yield strength and factors of residual strength for concrete 2, steel fiber reinforced reference.

| Betongålder | 7 dygn | 28 dygn | 84 dygn |
|------------------|---------|---------|---------|
| f_{fkr} | 5,6 MPa | 6,2 MPa | 8,2 MPa |
| $R_{10,20}$ | 61–87% | 67–92% | 31–78% |
| $R_{10,30}$ | 59–89% | 60–88% | 30–72% |
| $R_{10,40}$ | 58–89% | 54–82% | 28–68% |

Tabell 4.2 Sprickhållfasthet och residualhållfasthetsfaktorer för betong 3, betong med stålfibrer och 6 mm glasfiber.

Yield strength and factors of residual strength for concrete 3, with steel fibers and 6 mm glass fibers.

| Betongålder | 7 dygn | 28 dygn | 84 dygn |
|------------------|---------|---------|---------|
| f_{fkr} | 6,4 MPa | 7,8 MPa | 9,2 MPa |
| $R_{10,20}$ | 54–73% | 32–52% | 51–55% |
| $R_{10,30}$ | 52–72% | 28–45% | 47–49% |
| $R_{10,40}$ | 52–70% | 24–40% | 40–45% |

Tabell 4.3 Sprickhållfasthet och residualhållfasthetsfaktorer för betong 4, betong med stålfibrer och 12 mm glasfiber.

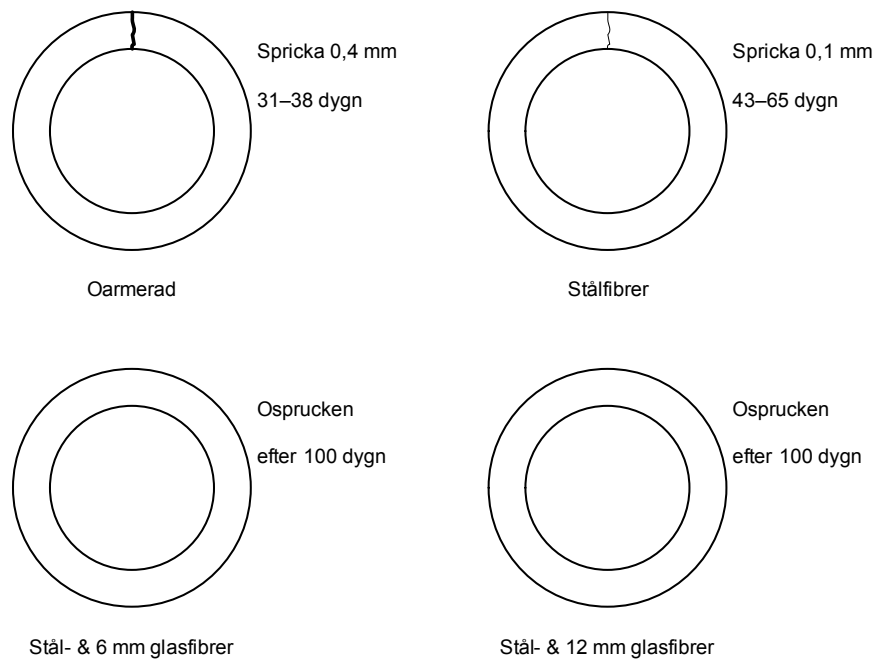
Yield strength and factors of residual strength for concrete 4, with steel fibers and 12 mm glass fibers.

| Betongålder | 7 dygn | 28 dygn | 84 dygn |
|------------------|---------|---------|---------|
| f_{fkr} | 6,1 MPa | 7,8 MPa | 9,2 MPa |
| $R_{10,20}$ | 55–73% | 55–57% | 41–70% |
| $R_{10,30}$ | 55–74% | 48–54% | 36–64% |
| $R_{10,40}$ | 55–74% | 42–51% | 32–59% |

5 Förhindrad krympning

5.1 Tid för uppsprickning

Samtliga 12 provkroppar av ringtyp förvarades i 50% RH och +20° C där de inspekterades 1–3 gånger per vecka under 100 dygn. Endast två av betongtyperna fick krympsprickor, i samtliga tre provkroppar och endast en spricka per provkropp, så som visas i Figur 5.1. Där framgår också att ringarna av betongtyp 3 och 4 med stål- och glasfiber förblev ospruckna. I den helt oarmerade betongen sprack den första provkroppen vid 31 dygns ålder och den tredje och sista vid 38 dygns ålder. För betongtyp 2 med enbart stålfibrer var spridningen större och uppsprickningen skedde vid högre ålder, inom 43 till 65 dygn efter gjutningen. Samtliga sprickor var genomgående och uppstod i radiell riktning, så som kan ses i Figur 5.2. Sprickorna i den oarmerade betongtypen 1 var ca 0,1 mm vida då de först upptäcktes, ökade till ca 0,3 mm på 3 veckor och hade uppnått ca 0,4 mm vid 100 dygns ålder. Den förhindrade krympningen för de oarmerade ringarna var alltså ca 0,6‰. För de stålfiberarmerade provkropparna skedde ingen mätbar vidgning av sprickorna efter att de hade uppstått.



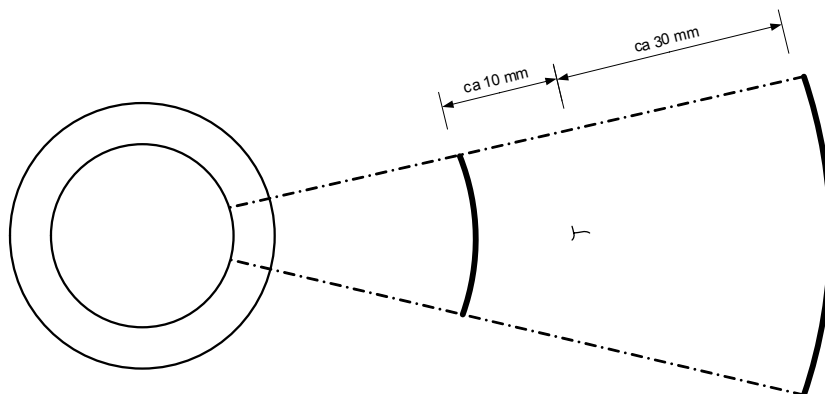
Figur 5.1 Läge hos krympsprickor samt ålder vid första sprickans uppkomst. För betong 1–4.
Shrinkage cracks and age at first cracking. For concrete 1–4.



Figur 5.2 Provkropp av betong 1, oarmerad referensbetong, 100 dygn efter gjutning.
Test specimen of concrete 1, un-reinforced reference, 100 days after casting.

5.2 Mikrosprickor

Förekomsten av eventuella mikrosprickor undersöktes vid ca 100 dygns betongålder. Ett sprickmikroskop av typ *Leitz MZII* användes för att avsöka provkropparnas släta yta, vänd mot formens botten vid gjutning. Endast en spricka med en vidd på ca 0,03 mm hittades i en av ringarna av betongtyp 4. Sprickan var T-formad med en utsträckning på 1,5 mm i radiell riktning och 1,0 mm tangentiellt. Sprickans läge redovisas i Figur 5.3.



Figur 5.3 Mikrospricka funnen i provkropp av betongtyp 4.
Micro crack found in test specimen of concrete type 4.

6 Kommentarer och slutsatser

6.1 Allmänna kommentarer

Betongens tryckhållfastheten var mycket hög för samtliga provade betongtyper, men märkbart lägre för betong med stålfibrer och 12 mm glasfiber. Denna betong uppvisade dessutom fler ytporer än de övriga och var något svårare att vibrera vid gjutningen. Samtliga betongtyper hade relativt låga sättmått, särskilt de med glasfibertillsats. Det bör däremot noteras att samtliga betongtyper var gjutbara och att det i en angränsande undersökning har visats att det även gick att spruta betong med stål- och glasfibrer sammansatt enligt det använda betongreceptet, dock med viss tillsats av luft. Kubprovkropparna uppvisade en viktförlust på ca 2,5% orsakad av vattenavgång. För varje 150 mm betongkub motsvarar detta en vattenkub på 60 mm.

6.2 Böjdraghållfasthet

Resultaten från balkböjningen visar att fiberbetongen inte har uppträtt töjningshårdnande, vilket var önskvärt. De provade balkarna uppvisar en relativt hög grad av fiberbrott vilket ger ett styvt deformationsförlopp vid böjning. Dessutom uppstod endast en böjspricka i samtliga fall, i motsats till flera sprickor vilket är vanligt vid ett mjukt brottförlopp. Sprickans läge har varierat relativt mycket men för samtliga fall har den slagit upp någonstans emellan de två pålastningspunkterna. Betongens sprickhållfasthet var mycket hög och i samtliga fall identisk med brotthållfastheten. Det finns en tendens till att balkarna med glasfibertillsats har något högre sprickhållfasthet än de med enbart stålfiber. De beräknade residualhållfasthetsfaktorerna bekräftar den stora spridningen och det töjningsmjuknande beteendet. Betongens töjningshårdnande egenskaper försämras dessutom då betongen åldras. Slutsatsen är att betongen har varit av en för hög hållfasthet för att tillåta fibrerna att ge det eftersökta töjningshårdnande beteendet. Det bör noteras att den onödigt höga betonghållfastheten ges av vatten-cementtalet, vilket här är identiskt med det som ofta föreskrivs för sprutbetongkonstruktioner.

6.3 Förhindrad krympning

Av försöken med förhindrad krympning framgår att tillsats av stålfibrer försenar uppsprickningen och begränsar sprickvidderna. Ytterligare tillsats av glasfibrer förstärker effekten och bidrog i dessa försök till att krympsprickor helt uteblev. För de oarmerade betongringarna uppstod krympsprickor efter ca 30–35 dygn medan det tog upp emot ca 40–60 dygn vid tillsats av stålfibrer. De fiberarmerade ringarna uppvisade också större spridning i tiden för uppsprickningen vilket troligen beror på stålfibrernas slumpvisa fördelning i betongen. Stålfibrerna kunde ej förhindra sprickbildningen men begränsade sprickvidden så att denna blev 0,1 mm istället för 0,4 mm som i det oarmerade fallet. Skillnaden kan hänföras till fibrernas dragkapacitet och anledningen till att det överhuvudtaget uppstår sprickor beror troligen på att ändförankrade stålfibrer behöver en viss uppspanning innan de kan överföra full kraft. Det bör noteras att det endast uppstod en spricka per provkropp och att inga mikrosprickor kunnat upptäckas, utom i ett undantagsfall. Tillsatsen av glasfiber har varit gynnsam, mestadels på grund av det stora antalet fibrer som tillsatts. Det bör noteras att någon ny typ av krympförsök inte har utvecklats. En annan form av provkroppar kunde möjligen ha bidragit till att reducera den gynnsamma, mothållande effekt som stålringarna ger den motgjutna betongen. Fördelen med att använda ringförsöken är dock att det möjliggör jämförelser med andra krympförsök av samma typ.

Erkännanden

Projektet genomförs gemensamt av KTH Bygghvetenskap, avdelningen för Betongbyggnad och Cement och Betong Institutet (CBI) på uppdrag av Stiftelsen Svensk Bergteknisk Forskning (SveBeFo) och Banverket. Till samtliga inblandade riktas ett stort tack för det givande samarbetet!

Stockholm i oktober 2007

Anders Ansell och Jonas Holmgren

Litteratur

1. SS 13 11 11. *Provkroppar - Form, mått och toleranser*, Svensk standard SS 13 11 11, Byggstandardiseringen, Stockholm (1983).
2. ASTM C-1018. *Standard test method for flexural toughness and first-crack strength of fibre-reinforced concrete (using beam with third-point loading)*, Annual book of ASTM Standards, Section 4 Construction, Vol 04.02 Concrete and aggregates, p.510–516, ASTM, Philadelphia, USA (1992).
3. *Stålfiberbetong - rekommendationer för konstruktion, utförande och provning*, Betongrapport nr 4, Svenska Betongföreningen, Stockholm (1997).
4. Malmberg, B., “Stålfiberbetong under fri och förhindrad krympning”, *Fiberbetong. Nordforsks projektkommitté för FRC-material*, Delrapport P, Stockholm (1977).
5. Grzybowski, M., Shah, S.P., “Model to predict cracking in fibre reinforced concrete due to restrained shrinkage”, *Magazine of Concrete Research*, v 41, n 148, 125–135 (1989).
6. SS 13 71 21. *Färsk betong - Konsistens - Sättnått*, Svensk standard SS 13 71 21, Byggstandardiseringen, Stockholm (1983).

SveBeFo

Box 47047
SE-100 74 Stockholm

Telefon 08-692 22 80 • info@svebefo.se
Besöksadress: Mejerivägen 4

ISSN 1104 - 1773 • SVEBEFO-R--87--SE

tblk.