



Fiberarmerad betong

för ett industrialiserat platsgjutet byggande

Att det med modern betongteknologi finns stora möjligheter att åstadkomma ett byggande som är effektivt, resurssnålt, industriellt och hållbart ur miljösynpunkt är något som många är övertygade om. Emellertid är frågan hur detta bäst ska åstadkommas?

Syften med denna artikel är att belysa de möjligheter som fiberarmerad betong erbjuder samt att förklara dess mekaniska verkningsätt.

Industrialiserat platsgjutet byggande

Den utveckling som har skett inom betongteknologi har redan inneb-

rit ett stort steg mot ett industrialiserat byggande. Med självkompakterande betong kan produktiviteten ökas och ett rationellare byggande erhålls med minskat arbetskraftsbehov, förbättrad arbetsmiljö och bättre gjutresultat. Med modern betongteknologi är det även möjligt att styra betongens uttorknings- och härdningsförlopp. Exempelvis



Ingemar Löfgren,
civ ing SVR,
K95, tekn dr,
CTH 2005.
Thomas
Concrete
Group &
Färdig Betong

så kan det ur formrivnings- och uttorkningssynpunkt fördelaktigt att använda en betong med ett lågt vattencementtal (*vct*) för att säkerställa en låg fukthalt i betongen och att formrivning eller avstämning kan ske tidigt. Men det bör påpekas att en betong med lågt *vct* kräver ett större armeringsinnehåll och kan dessutom vara mer sprickbenägen. Med fiberarmering i betongen och förtillverkade armeringsenheter kan armeringsarbetet förenklas och rationaliseras. Andra möjligheter att effektivisera betongbygget är att använda plattbärlag som kvarsittande form, vilket leder till kortare byggtid, ett minskat arbetskraftsbehov, bättre ytfinish, mindre efterarbete, förbättrad arbetsmiljö där andelen tunga arbetsmoment minskar.

Självkompakterande fiberbetong

Självkompakterande fiberarmerad betong är ett byggnadsmaterial med stora möjligheter eftersom vibreringsarbetet försvinner helt och arbetet med armering försvinner helt eller delvis. I vissa typer av konstruktioner, som platta på mark, grundplintar och väggar, är det möjligt att ersätta all armering med fibrer. I andra konstruktioner, såsom balkar och bjälklag, behövs en kombination av fibrer och konventionell eller efterspänd armering. I båda fallen finns potentiella fördelar, vilka kan relateras både till ekonomiska och produktionstekniska vinster, genom ett rationellt byggande och en förbättrad arbetsmiljö eftersom de tunga arbetsmomenten minskar.

Arbete med rekommendationer

Trots de fördelar som fiberarmering erbjuder, så väl produktions- som konstruktionstekniskt, så används det i dagsläget i relativt få innovativa tillämpningar. Detta kan bero på avsaknaden av normer och dimensioneringsanvisningar som tar hänsyn till de materialegenskaper (sambandet mellan dragspänning och spricköppning) som är unika för fiberarmerad betong. Interna-

”Självkompakterande fiberarmerad betong är ett byggnadsmaterial med stora möjligheter eftersom vibreringsarbetet försvinner helt”

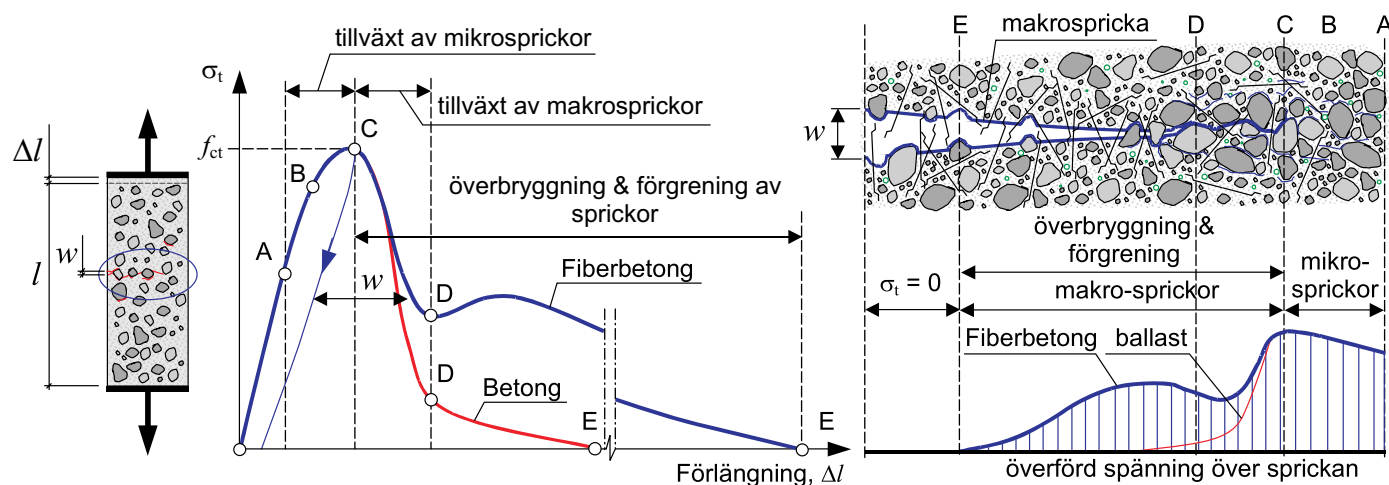
tionellt pågår arbete inom olika organisationer för att ta fram rekommendationer (t.ex. *fib* TG 8.3 och RILEM) och ett antal länder har nyligen tagit fram egna anvisningar (exempelvis Italien, Norge och Tyskland). I Sverige kommer en arbetsgrupp inom SIS (TK 190-AG2) att ta fram rekommendationer och vid Chalmers tekniska högskola, avdelningen för konstruktionsteknik, har ett forskningsprojekt, finansierat av Färdig betong, nyligen startats.

Introduktion till fiberarmerad betong

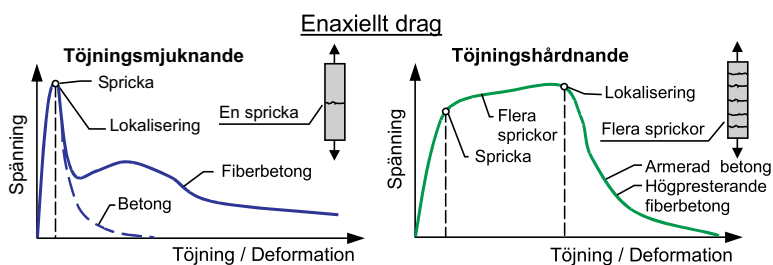
Genom att tillsätta korta (diskontinuerliga) fibrer till betong är det möjligt att motverka betongens sprödhet och ändra responsen. Fibrerna påverkar beteendet genom deras förmåga att överföra kraft över sprickor, vilket resulterar i en ökad seghet. Det är först efter uppsprickning som fibrerna ger en effekt, innan uppsprickning, vilket sker vid en töjning som är ungefär 0,1 mm/m, har de en så låg spänning att normala mängder fibrer (mindre än en volymprocent för stålfibrer, dvs. < 80 kg/m³) inte leder till någon nämnvärd ökning av draghållfastheten.

Respons vid belastning i drag

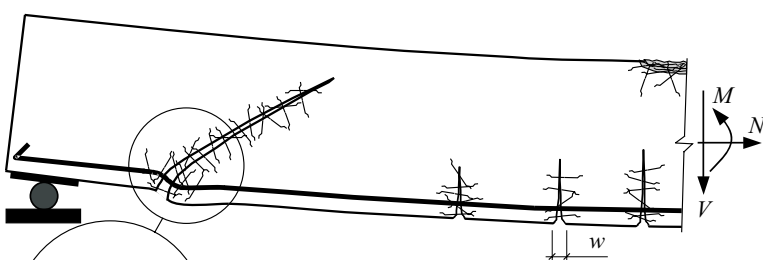
Vid ett dragbrott i betong (se Figur 1), med och utan fibrer, kan spännings-deformationssambandet (σ - w sambandet) karakteriseras av en initieell linjär del (upp till A), ett område där mikrospäckor tillväxer (A-B-C) och en nedåtgående del (C-D-E). Mikrospäckor initieras vid försvagningar som finns i betongen redan innan denna belastas och de finns ofta i övergångszonen mellan ballast och cementpasta. Mikrospäckorna tillväxer alltmer tills dessa växer ihop och bildar makrospäckor (C) där deformationerna lokaliseras. För en fiberarmerad betong är den största skillnaden att fibrerna hämmar tillväxten av makrospäckor (C-D) och att de, i jämförelse med konventionell betong, överför en relativt stor spänning efter uppsprickning (D-E). Fibrerna kan även för stora spricköppningar (upp till 3-4 mm) överföra en betydande spänning. Viktigt att påpeka är att fibrerna generellt tar last först när makrospäckor tillväxer, vilket sker vid en spricköppning av ungefär 0,05 mm. Men det finns även vissa typer av fibrer, så kallade mikrospäckor, som har en inverkan på mikrospäckor (B-C) och kan hämma tillväxten av dessa och följaktligen öka draghållfastheten.



Figur 1. Respons vid belastning i drag, jämförelse mellan betong och fiberarmerad betong.



Figur 2. Karaktisering av olika typer av respons vid belastning i drag och böjning.



- Minskat sprickavstånd
- Minskad sprickvidd
- Ökad momentkapacitet
- Ökad böjstyvhet
- Ökad seghet i tryck
- Förbättrat beteende vid brandbelastning
- Ökad tvärkraftskapacitet
- Ökad stansningskapacitet
- Ökad dymlingseffekt
- Hämmad tillväxt av spjälksprickor

Figur 3. Exempel på inverkan av fiberarmering.

Skillnad mellan oarmerad-, armerad- och fiberarmerad betong

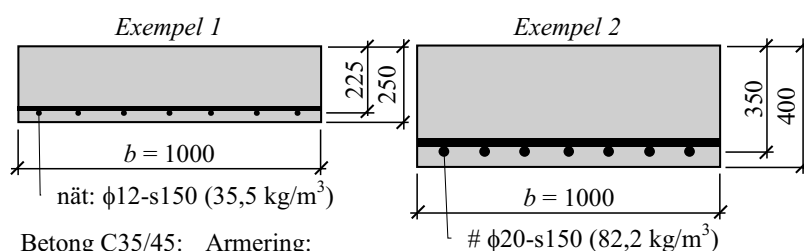
Skillnaden mellan fiberarmerad betong och armerad betong är följande: (1) fibrerna är fördelade över hela tvärsnittet medan armeringsstängerna är placerade där de bäst behövs (t.ex. i dragzonen) men med ett relativt stort täcksikt i jämförelse med fibrerna; (2) fibrerna är små, korta (diskontinuerliga), och relativt tätt placerade medan stängerna är långa (kontinuerliga) och inte så tätt placerade; (3) det är generellt sett inte möjligt att med fibrer erhålla en lika stor armeringsarea som med stänger. En konsekvens av detta, och en viktig principiell skillnad mot armerad betong, är att fiberbetong uppvisar en töjningsmjuknande respons såvida inte en stor mängd fibrer tillsätts (för stålfibrer betyder det minst 1,5 volym% , eller 120 kg/m³).

Klassificering av respons

För att förtydliga dessa skillnader visas i Figur 2 en klassificering av responserna vid dragbelastning. Till att börja med, oarmerad betong uppvisar ett töjningsmjuknande beteende – vilket karakteriseras av en hastigt minskande bärförmåga efter uppsprickning. Armerad betong utformas normalt så att det uppvisar ett töjningshårdnande beteende – vilket karakteriseras av en gradvis ökande bärförmåga efter uppsprickning. Fiberarmerad betong, å andra sidan, är lite mer komplex. I dragbelastning uppvisar fiberarmerad betong normalt ett töjningsmjuknande beteende men, beroende på volymen fibrer som tillsätts, kan ett töjningshårdnande beteende uppnås och klassificeras då som en högpressterande fiberarmerad betong (som inte innebär en hög hållfasthet). En högpressterande fiberarmerad betong har en betydande sprickfördelningseffekt och funktionsmässigt en enorm potential, men i dagsläget begränsar den höga materialkostnaden dess användning. Högpressterande fiberarmerad betong har använts bland annat vid reparation av farbanor och kantbalkar på broar.

Tabell 1. Exempel på effekten och möjligheterna med stålfiberarmering, för en betong C 30/37 eller C 35/45 med $V_f = 0,5\%$ (20 kg/m³).

Gränstillstånd och typ av kravbelastning	Effekt	Reduktion
Bruksgräns		
Sprickvidd (för att säkerställa 0,2 mm)		
• Dragbelastning orsakad av förhindrat rörelsebehov (krympning, temperatur)	Minskad armeringsmängd (konventionell)	10-25%
• Böjning (belastning)	Minskad armeringsmängd	20-50%
• Cyklisk belastning (trafik, maskiner, etc.)	Förbättrad beständighet	—
Nedböjning	Minskad deformation (ökad styvhet)	Upp till 25%
Brottgräns		
Tvärkraft och stansning	Minskad armeringsmängd	50-100%
Böjning	Minskad armeringsmängd	20-75%
	Minskad konstruktionstjocklek	Upp till 25%



Betong C35/45: $f_{ctm} = 3.2$ MPa $f_{cm} = 43$ MPa $E_{cm} = 34$ GPa
Armering: $f_y = 500$ MPa ($f_u = 540$ MPa) $E_s = 200$ GPa

Figur 4. Beräknings-exempel.

Användningsområden och möjligheter

I dagsläget är de största användningsområdena för fiberbetong grundplattor (platta-på-mark och pålade grundplattor), sprutbetong och olika markbeläggningar (t.ex. busshållplatser). Exempel på andra

relevanta och intressanta tillämpningar är tunnelin-
klädnad, anslutningsdetaljer som normalt kräver
en stor mängd armering, pelardäck, källarvägg,
grundplatta med vattentryck, konstruktioner som
är utsatta för utmattning eller kräver en stor energi-
upptagande förmåga och tunna pågjutningar (t.ex.
reparationer).

Konstruktivt finns det många fördelar med fiber-
armerad betong, varav några redovisas i Figur 3,
men generellt är fiberarmering intressant för kon-
struktioner där sprickbildning dominerar beteendet
och i synnerhet där det finns begränsningar på till-
låten sprickvidd. I Tabell 1 ges exempel på möjlig-
heterna med fiberarmerad betong och den effekt
som kan uppnås i form av reducerad armerings-
mängd, etc.

Produktionstekniskt finns det stora fördelar
att kombinera självkompakterande betong med
fiberarmering. Fördelarna är främst att tunga och
arbetskrävande moment, som vibrering försvinner
helt. Men det har visat sig att det även finns materi-
altekkniska fördelar; bland annat genom att fibrerna
får en jämnare orientering (bättre dispergerade) och
att den tätare strukturen i självkompakterande be-
tong ger fibrerna en bättre vidhäftning och därmed
bättre egenskaper.

Exempel på effekten av fiberarmering i balkar/bjälklag

En tänkbar tillämpning för fiberarmerad betong är
balkar, bjälklag och plattor där det är möjligt att
minska mängden konventionell armering. För att
påvisa möjligheterna skall två exempel redovisas (se
Figur 4) som har analyserats med hjälp av de beräk-
ningsmodeller som presenterades i Löfgren (2005),
se även Löfgren (2003) och (2004). I det första ex-
emplet analyseras en platta med en liten armerings-
mängd, där bärförmågan och styvheten är det primä-
ra, och i det andra exemplet analyseras en platta
med högt armeringsinnehåll, där det primära kravet
är att sprickvidden skall begränsas till 0,2 mm.

Det mekaniska verknings sättet hos balkar med
en kombination av fiber- och konventionell armer-
ing skiljer sig från konventionellt armerad balkar
eftersom fiberarmeringen är effektivare på att häm-
ma spricktillväxten. Fiberarmeringens effektivitet (i
förhållande till den konventionella armeringen) är
beroende av armeringsinnehållet i tvärsnittet, vilket
kan ses i de två exemplen (Figur 5 och Figur 6).
Fiberarmering är mer effektivt när armeringsinne-
hållet är litet (exempel 1 och Figur 5) och i detta
fall kan armeringsmängden minskas från 0,26%
till 0,075% (en minskning med 67%) jämfört med
det andra exemplet (Figur 6) där det minskar från
0,52% till 0,39% (en minskning med 25%).

Diskussion

I Figur 5, för exempel 1 med en liten armerings-
mängd, illustreras fiberarmeringens effekt tydligt
och dess inverkan vid uppsprickning är betydande.
För den konventionella betong bildas ganska snabbt
en spricka som växer till en höjd som är ungefär
80 % av tvärsnittshöjden. Fibrerna däremot har en
förmåga att hålla ihop sprickan och att hindra den
från att växa. En annan skillnad som kan observe-
ras är att detta förändrar konstruktionens styvhet

IMPACT Reinforcement

NY VERSION!



Vår nya version av IMPACT Reinforcement 2.0 har fått
ett antal nya funktioner som förbättrar och rationalise-
rar projekteringsarbetet.

- Nytt kompletterande användargränssnitt med palett
- Armeringsförslag lösjärn
- Armeringsförslag hål
- Armeringsförslag nät
- Skarvning
- Gruppering av armeringsjärn
- Textgrupper
- Typdetaljer (armeringsmakron)
- Grip-stretchning av rakjärn
- Rullarmering BAMTEC

Nyheter i IMPACT Reinforcement har utvecklats i nära samarbete med
representanter från byggkonsultföretag, betong- och armeringsföretag. Ut-
vecklingsarbetet har även finansierats med stöd från nedanstående parter.

CEMENTA
HEIDELBERGCEMENT Group

SFF Svenska
Fabrikbetongföreningen
Den svenska fabriksbetongindustrins branschorganisation

Fundia

ABETONG
HEIDELBERGCEMENT Group

Betongindustri
HEIDELBERGCEMENT Group

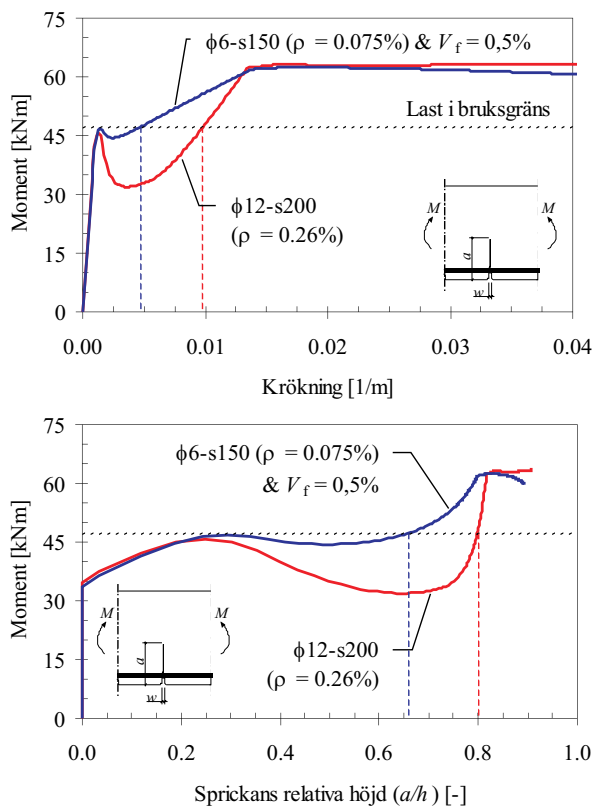
FÄRDIG BETONG **fb**

SWEROCK

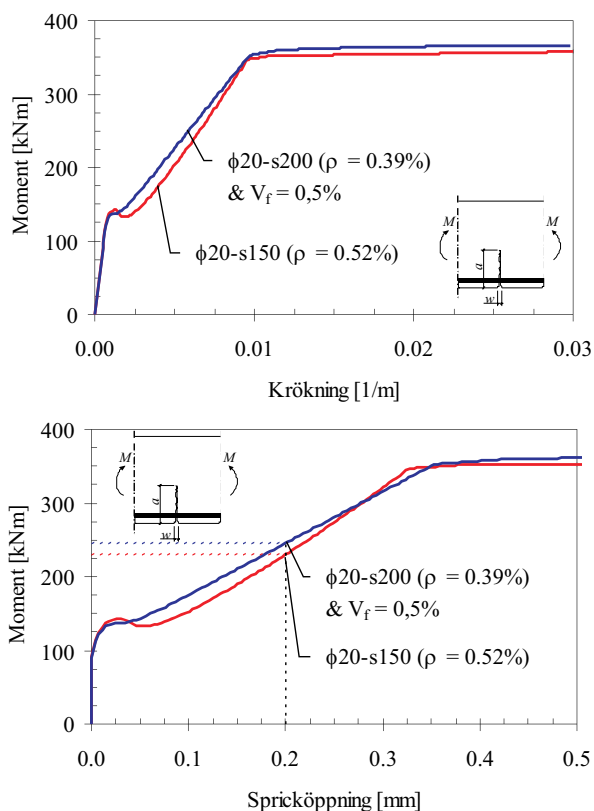
StruSoft

Structural Design Software

Tel: 040-530 100, Fax: 040-530 105, Tel: 08-652 58 40
www.strusoft.com



Figur 5. Exempel 1 – skillnaden mellan fiberarmerad betong och konventionell betong: moment-krökning (överst) och moment-spricktillväxt (underst).



Figur 6. Exempel 2 – skillnaden mellan fiberarmerad betong och konventionell betong: moment-krökning (överst) och moment-spricköppning (underst).

Referenser

- Löfgren, I. (2003): Analysis of Flexural Behaviour and Crack Propagation of Reinforced FRC Members. In Design Rules for Steel Fibre Reinforced Concrete Structures (ed. T. Kanstad), Proc. Nordic miniseminar, Oslo, October 2003. The Norwegian Concrete Association, pp. 25-34.
- Löfgren, I. (2004): Fiberbetong – beräkningsmetod för bärande konstruktioner. Bygg & Teknik 7/2004, pp. 32-40.
- Löfgren I (2005): Fibre-reinforced Concrete for Industrial Construction – a fracture mechanics approach to material testing and structural analysis. Doktorsavhandling Chalmers tekniska högskola; kan laddas ner från: www.tcgclab.se/ (Under fliken Projektverksamhet).
- Löfgren I (2006): Nya möjligheter med fiberbetong. Betong nr. 1/2006, pp. 52-56.

(sambandet mellan moment-krökning). Av figuren framgår det att fiberbetongen under uppspricknings-skedet (innan armeringen flyter), vid en given deformation (krökning), ger en högre bärförmåga och en större böjstyvhet. För ett högt armeringsinnehåll (exempel 2 och Figur 6) har fiberarmeringen inte lika stor inverkan på spricktillväxten, men den är ändå effektiv på så sätt att den minskar sprickvidden på ett effektivt sätt.

Det bör påpekas att i båda exemplen ökade den totala mängden armering (fiber plus stänger), i det första exemplet med 16 kg/m³ och i det andra fallet med 19 kg/m³ (om det antas att tvärsnitten är enkelarmerade med lika mycket armering i båda riktningarna). Å andra sidan, eftersom arbetskostnaden med den konventionella armeringen kan minskas så kan detta kompensera den ökade kostnaden för fibern.

Sammanfattning och slutsatser

Ökade krav på produktivitet och kvalitet i byggbranschen har aktualiserat behovet av att utveckla ett resurssnålt byggande. Fiberarmerad betong i kombination med självkompakterande betong innebär en möjlighet att förenkla byggandet och är ett stort steg mot ett industriellt platsgjutet byggande.

Ett hinder för denna utveckling är avsaknaden av generella dimensioneringsregler som beaktar de materialegenskaper som är karakteristiska för fiberarmerad betong, det vill säga sambandet mellan spänning-spricköppning ($\sigma-w$), men dimensioneringsregler är under utveckling. En analysmetod som presenterades av Löfgren (2005) har i denna artikel använts för att analysera två beräkningsexempel. I exemplen visades att stålfiberarmerad betong i kombination med konventionell armering medför att mängden konventionell armering kraftigt reduceras vid en dosering av 0,5 volymprocent (~40 kg/m³) samtidigt som en förbättrad prestanda (minskad sprickvidd och ökad böjstyvhet) erhålls. En fördel med detta är att armeringsdetaljer kan förenklas och att armeringsnät, som finns som lagerstandard (typ NPS 500 ϕ 6-s150), kan användas även för bjälklag och mer krävande tillämpningar när de kombineras med fiberarmering.

Artikeln bygger delvis på avhandlingen "Fibre-reinforced Concrete for Industrial Construction – a fracture mechanics approach to material testing and structural analysis" som nyligen presenterades vid Chalmers tekniska högskola, avdelningen för konstruktionsteknik.

fib – The International Federation for Structural Concrete (<http://fib.epfl.ch/>)

RILEM – International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials (<http://www.rilem.org/>).

Läs mer på internet

www.chalmers.se/cee/SV/avdelningar/konstruktionsteknik/forskargrupper/betongbyggnad/dimensioneringsmetoder

Författarens e-post

ingemar.lofgren@tcg.nu