

SBUF-projekt 10039
Brandforsk-projekt 317-001

BRANDBESTÄNDIGHET HOS SJÄLVKOMPakterande BETONG

Slutrapport

Ett SBUF- och Brandforskfinansierat samarbetsprojekt mellan SP, Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut, Lunds Tekniska Högskola och Skanska.

Malmö 2003-04-17

Christer Dieden
Ulf Jönsson

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1. Bakgrund.....	3
2. Avgränsningar och syfte	3
3. Experimentella studier	4
3.1 Omfattning.....	4
3.2 Provningsmetoder	5
4. Organisation.....	6
4.1 Styrgrupp	6
4.2 Referensgrupp.....	6
4.3 Finansiering	6
4.4 Tidplan.....	6
5. Resultat	7
5.1 Studier av cylindrar på LTH	7
5.1.1 Mekaniska egenskaper vid normal temperatur	7
5.1.2 Mekaniska egenskaper vid förhöjd temperatur.....	7
5.2 Studier av pelare på SP	9
5.2.1 Brandförsök	9
5.2.2 Avspjälkning.....	10
5.2.3 Slutsatser av fullskaleförsöken	10
5.2.4 Rekommendationer.....	11
6. Referenser	12

1. BAKGRUND

Introduktionen av självkompakterande betong innebär ett stort tekniksprång för såväl fabriksbetong som prefabbetong. Tekniken härrör från Japan, men efter att Cement- och Betong Institutet hämtat hem kunnandet är nu Sverige ledande vad gäller praktisk tillämpning av tekniken.

Många fördelar i form av förbättrad effektivitet och bättre arbetsmiljö har noterats. Forskning och utveckling på området har bedrivits av industrin samt forskningsinstitut och högskolor. I dag har den självkompakterande betongen ca 5% marknadsandel.

För självkompakterande betong är påfrestningen vid brand större än för normal betong på grund av att strukturen är tätare till följd av fillerinblandning. En analog problemställning behandlades inom FORSKNINGSPROJEKTET HÖGPRESTERANDE BETONG, där brandbeständigheten också utvärderades och dokumenterades med förslag till åtgärder [1, 2]. Det krävs dock en betydligt bättre dokumentation av den självkompakterande betongens egenskaper för att säkerställa konstruktionernas brandbeständighet än den som finns idag, såväl i anläggningar som i huskonstruktioner. För vibrerad högpressterande betong krävs återgårdar som inblandning av plastfibrer vid ett vatten/pulverinnehåll (cement + filler) mindre än ca 0.32 [2]. Nationellt som internationellt saknas forskningsresultat beträffande brandbeständighet hos självkompakterande betong, vilket är en allvarlig brist med tanke på föreliggande tillämpningar. Vidare understryker faktiska erfarenheter från tunnelbränder vikten av att säkerställa erforderlig brandbeständighet.

Den här rapporten är projektets slutrapport och baserar sig på delrapporterna [3] och [4].

2. AVGRÄNSNINGAR OCH SYFTE

Följande problemområden beträffande brandbeständighet har utretts:

- hållfasthetsförluster hos brandpåverkad självkompakterande betong
- spjälkningsrisk hos brandpåverkad förespänd självkompakterande betong.

Föreliggande projekt har syftat till att

- dokumentera brandbeständigheten hos betong som sammansätts med förhöjda fillerhalter, med mål att kunna ge riktlinjer för val av lämpliga delmaterial vid tillverkning av en självkompakterande betong.
- undersöka om självkompakterande betong är mer känslig vad gäller spjälkning än betong med normal sammansättning, med mål att kunna ge riktlinjer för den mängd plastfibrer som eventuellt erfordras för att göra självkompakterande betong spjälkningsbeständig vid brand.

3. EXPERIMENTELLA STUDIER

3.1 Omfattning

Mätningar av hållfasthet vid varierande temperaturer, spjälkningsrisk vid standardiserade brandförlopp, inre relativ fuktighet och egenskaper i färskt tillstånd hos självkompakterande betong, genomfördes i laboratorium. Hållfastheten provades såväl vid aktuell temperatur som vid 20 °C (resthållfastheten). I tabell 1 ges en sammanställning av antalet studerade pelare och cylindrar av vardera provkroppstypen. Följande parametrar har studerats:

1. Vattencementtal, vct (0,40, 0,55 och ca 0,70)
2. Temperatur 20, 200, 400 och 800 °C (cylindrar)
Hydrocarbonfire EN 1363-2 (pelare av anläggningscement)
Standardbrand EN 1363-1 (övriga pelare)
3. Plastfiberinnehåll (32 µm diameter) 0, 2 eller 4 kg/m³ betong
4. Fyllertyp (glas eller kalksten)
5. Lufthalt (6% - betong med vct 0,40 (anläggningscement), ca 1 % i övrigt - (Byggcement))
6. Härdning (vattenlagring för vct 0,40; i övrigt RF = 60% under ca ½ år)
7. Lastnivå (ca 30% av 28-dygns hållfastheten)

Betong	Antal pel.	Vct cyl.	Cement	Filler	Plastfibrer (kg/m ³)	Härdning	
40AK0	3	*	0,40	Degerhamn	Kalk	-	Vatten
40AK2	3	*	0,40	Degerhamn	Kalk	2	Vatten
40AK4	2	*	0,40	Degerhamn	Kalk	4	Vatten
40AG0	3	*	0,40	Degerhamn	Glas	-	Vatten
40AR0	2		0,40	Degerhamn	-	-	Vatten
40BK0	3		0,40	Skövde	Kalk	-	Luft
40BR0	2	*	0,40	Skövde	-	-	Luft
55BK0	2	*	0,55	Skövde	Kalk	-	Luft
55BK2	2		0,55	Skövde	Kalk	2	Luft
55BK4	2		0,55	Skövde	Kalk	4	Luft
55BR0	2		0,55	Skövde	-	-	Luft
70BK0	3	*	0,70	Skövde	Kalk	-	Luft
70BK2	3		0,70	Skövde	Kalk	2	Luft
70BK4	3		0,70	Skövde	Kalk	4	Luft
70BG0	3	*	0,70	Skövde	Glas	-	Luft
70BR0	2		0,70	Skövde	-	-	Luft
Summa	40	140					

Tabell 1 - Sammanställning av antalet studerade provkroppar (enkla prover).
* - fördelning av antalet cylindrar redovisas i [3].

Teckenförklaring:

55 = vct 0,55

B = byggcement, A = anläggningscement

R = referensbetong (vibrerad), K = kalkfiller, G = glasfiller
0, 2, 4 = plastfiberdosering kg/m³.

Degerhamn (anläggningscement) = CEM I 42,5 BV/SR/LA

Skövde (byggcement) = CEM II/A-LL 42,5 R

Följande studier har genomförts:

1. Optimering av betonger i laboratorium på LTH med hänsyn till plastfiberinblandningen. *Målet* för denna studie var att ge anvisningar för tillverkning av betong med inblandning av plastfibrer.
2. Experimentella studier av egenskaper i färskt tillstånd och upp till 180 dygns ålder. Parallella studier av inre relativ fuktighet och hållfasthet. *Målet* för denna studie var att jämföra egenskaper hos självkompakterande betong med varierande vct och plastfiberinnehåll samt två olika filler med motsvarande egenskaper hos normal betong (LTH).
3. Hållfasthetsförluster hos betong vid förhöjd temperatur. *Målet* för denna studie var att kartlägga hållfasthetsförlusten vid hög temperatur hos självkompakterande betong samt att jämföra med motsvarande egenskaper hos normal betong (LTH).
4. Mätningar av E-modul. *Målet* för denna studie var att kartlägga E-modulförlusten vid hög temperatur hos självkompakterande betong samt att jämföra med motsvarande egenskaper hos normal betong (LTH).
5. Spjälkningsrisken hos belastad betong utsatt för standardbrand. *Målet* för denna studie var att undersöka om spjälkningsbenägenheten hos självkompakterande betong var större än hos normal betong om den i så fall kunde reduceras genom plastfibertillsats samt att jämföra med motsvarande egenskaper hos normal betong (SP, SPAB).

3.2 Provningsmetoder

Följande provningsmetoder har använts:

1. Standardkon enligt Abrams (utbredningsmått), lufthaltsmätare, L-box
2. ASTM E 104-85 (inre relativ fuktighet)
3. Hållfasthet hos cylindrar (100 mm diameter) i ugn vid förhöjda temperaturer (200, 400 800°C)
4. Spjälkning hos förspända pelare 200x200x2000mm i ugn efter standardbrand EN1363-1 samt Hydrocarbon fire EN1363-2

4. ORGANISATION

Projektets organisation har sett ut som följer:

Projektledare:

Christer Dieden, Skanska Prefab AB, Malmö

Ansvarig för laboratorieförsök:

Christer Dieden, Skanska Prefab AB, Malmö (pelartillverkning)

Lars Boström, SP, Borås (brand)

Bertil Persson, LTH, Avd. Byggnadsmaterial, Lund (övrigt)

4.1 Styrgrupp

I projektets styrgrupp har ingått följande personer:

Ulf Jönsson, Skanska Sverige AB, Malmö

Jens Oredsson, Skanska Prefab AB, Malmö

Göran Fagerlund, LTH, Avd. Byggnadsmaterial, Lund

4.2 Referensgrupp

I projektets referensgrupp har ingått följande personer:

Patrik Groth, NCC, Solna

Robert Ronnebrant, Vägverket, Borlänge

Katarina Kieksi, Banverket, Borlänge

Tomas Hermodsson, repr. för Brandforsk

4.3 Finansiering

Projektbudget var totalt 1,2 milj. kr. Projektet har finansierats av

- SBUF (huvudfinansiär)
- Brandforsk
- SP, Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut
- Skanska Prefab AB

4.4 Tidplan

Projektstarten skedde i december 2000 och projektet avslutades i mars 2003.

5. RESULTAT

5.1 Studier av cylindrar på LTH

Denna delstudie innehöll experimentella studier av mekaniska egenskaper hos självkompakterande betong vid normal och hög temperatur. Betongen tillverkades i laboratorium på LTH. Recepten utvecklades av LTH i samråd med leverantörer av filler, se [3]. Studerade SKB (självkompakterande betong) innehöll en varierande mängd polypropylenfiber, olika typer av cement, filler och lufthalt, förlagrade antingen i luft eller i vatten. Resultaten jämförs med motsvarande egenskaper i NB (normalt vibrerad betong). Ungefär ett halvt års provningsålder användes. Hållfasthetsutvecklingen hos betongen följdes parallellt. Sju SKB med vattencementtal, vct = 0.40, 0.55 och 0.70 och en NB med vct = 0.40 studerades i fråga om hållfasthet i en högtemperatursugn. Provningsrum såväl vid förhöjd temperatur som efter avsvälning. Parallellt studerades även elasticitetsmodulen, stukning vid maximal hållfasthet, dynamiska elasticitetsmodulen samt relativa fuktigheten. Betongen var antingen lufthärdad vid en omgivningsfuktighet = 60% eller vattenlagrad från gjutning till provning. Effekten av förhöjd mängd polypropylenfibrer, olika typer av cement, filler och lufthalt, lagring i luft eller vatten studerades.

5.1.1 Mekaniska egenskaper vid normal temperatur

Fillertillsats i betongen ökade hållfastheten avsevärt, även om cementhalten samtidigt var något lägre än i referensbetongen. Troligen berodde detta på en bättre partikelpackning i den färskbetongen. Tillsats av polypropylenfiber minskade hållfastheten något.

5.1.2 Mekaniska egenskaper vid förhöjd temperatur

Den uppmätta relativa tryckhållfastheten efter avsvälning redovisas i FIG.1. Den relativa tryckhållfastheten vid förhöjd temperatur är den parameter som används vid bestämning av bärförmåga i brandutsatta konstruktionsdelar. I FIG.2 jämförs, i detta projekt uppmätta värden för relativ hållfasthet hos upphettad SKB, med motsvarande värden för NB och HPB (högpresterande betong).

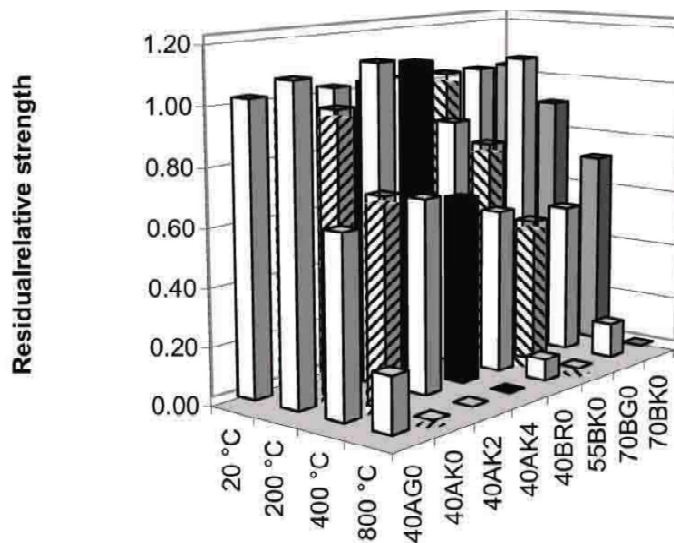


FIG.1. Kvarstående relativ hållfasthet vid +20°C enl. [3] (0 för betong med kalkstensfiller efter avsvälning från +800°C).

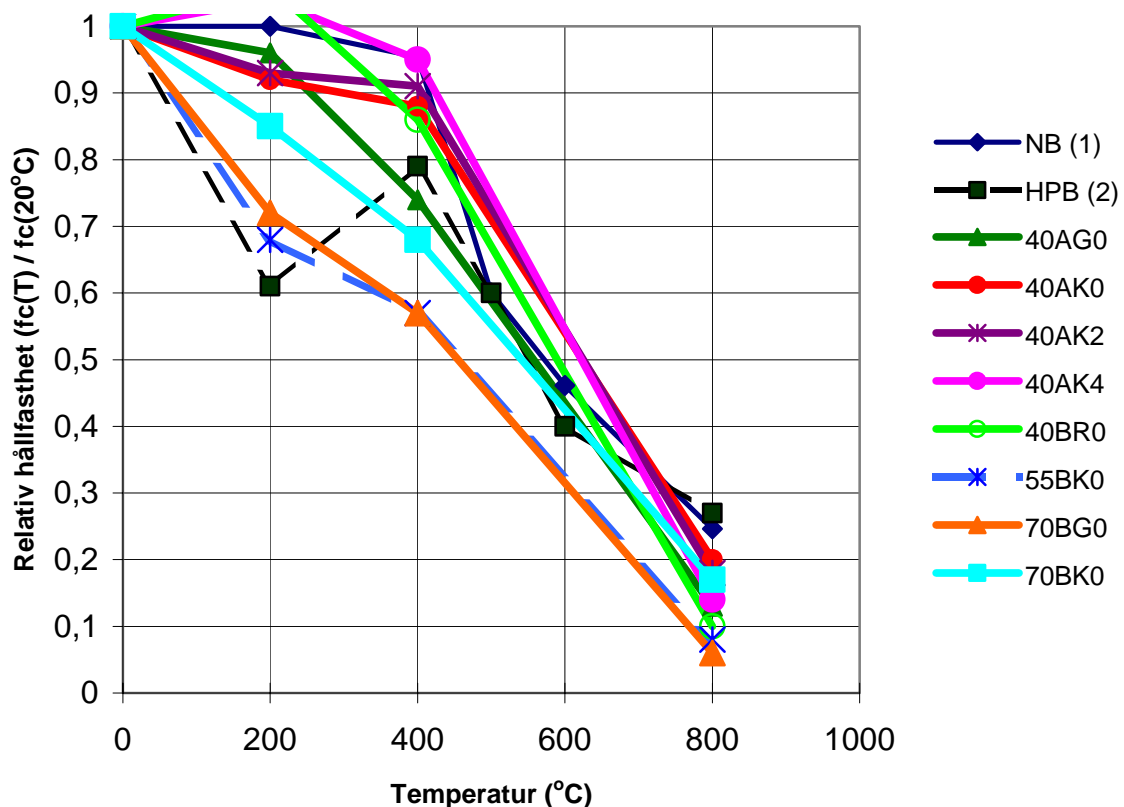


FIG. 2. Relativ hållfasthet för NB enl. [6] och HPB enl. [1] jämfört med betongerna från cylinderförsöken på LTH [3].

Hållfasthetsförlusten för de SKB som provats med plastfiberinblandning vid temperaturhöjning är av samma storleksordning som för NB.

Alla SKB utan plastfiber, utom en, tappar betydligt mer hållfasthet vid uppvärmning till +200°C och +400°C än såväl referensbetongen som NB från [6]

Vid +800°C kan inte hållfasthetsförlusten särskiljas för någon av de här studerade betongrecepten. De har dock en lägre hållfasthet än referenserna HPB [1] och NB [6].

Vid uppvärmning till +800°C och därefter avsvälning till +20°C finns ingen kvarvarande hållfasthet för samtliga betonger med kalkstensfiller, se FIG.1. Inblandning av fibrer har ingen inverkan.

5.2 Studier av pelare på SP

Totalt 16 olika betonger studerades i fullskaleprov. Av dessa var fyra NB och de återstående tolv SKB. Samtliga recept till provkroppstillverkningen utvecklades av LTH, se [3]. Det bör noteras att man kan tillverka SKB med andra recept än de här använda och förmodligen få andra resultat.

Fullskaleproverna utfördes på relativt små provkroppar (nedan nämnt ”pelare”) och provades i ugnen motsvarande en fyrsidig brandexponering. Samtliga pelare tillverkades av Skanska Prefab i Bollebygd och hade dimensionerna 200x200x2000mm. Mekanisk last påfördes genom förspänning i pelarnas längsriktning. Ritningar på pelarna redovisas i [4].

Pelarnas vikt, densitet och relativa fuktighet uppmättes före brandprovning. Därefter hängdes pelarna upp i ugnens tak.

Tre brandprovningar utfördes. Den första utfördes på de pelare som tillverkats av betong med anläggningscement. De utsattes för en brand enligt EN 1363-2 (HydroCarbon Fire), vilken är mer intensiv än EN 1363-1 (ISO-834), som används för tillämpningar där våldsamma brandförlopp kan förväntas som i tunnlar eller i offshore industrin. De två följande brandprovningarna utfördes på övriga pelare och brandpåverkan följde där EN 1363-1 (ISO-834).

En dag efter brandprovning vägdes pelarna igen, efter att allt löst material tagits bort. Vikten bestämdes också mellan en och tre veckor efter brandprovningen.

5.2.1 Brandförsök

Det gick inte att följa den föreskrivna EN 1363-2 fullt ut. Ca tre minuter in i provningen och fram till 50 minuter efter start var temperaturen lägre än EN 1363-2. Anledningen var den stora mängden fukt i betongen som skulle förångas, något som kapaciteten hos brännarna var för liten för.

De två försöken enligt EN 1363-1 kunde köras utan avvikelser.

Spjälkning inträffade först vid hörnen i samtliga försök. I test 1 började spjälkningen efter 2 minuter, i test 2 efter 6 minuter och i test 3 efter 7 minuter. För SKB utan plastfiber var spjälkning generellt av explosiv natur. Vid alla prov slutade spjälkningen efter ca 20 minuter.

Vatten kunde ses avgå från betongen. Vattenavgången skedde efter 10, 18 och 13 minuter i de tre olika provningarna.

5.2.2 Avspjälkning

I tabell 2 redovisas mängden avspjälkat material i procent. Vattencementtal (vct) samt vattenpulvertal (v/p-tal) redovisas för varje betongsammansättning.

Betong	V/p-tal	Vct	Spjälkning (%)		
			Max (%)	Min (%)	Medel (%)
40AK0	0,29	0,40	34,2	28,6	31,7
40AK2	0,28	0,40	15,0	10,9	12,5
40AK4	0,30	0,40	6,1	5,2	5,7
40AG0	0,35	0,40	22,9	15,6	18,4
40AR0	0,40	0,40	6,9	6,3	6,6
40BK0	0,31	0,40	24,7	22,5	23,8
40BR0	0,40	0,40	5,6	3,9	4,8
55BK0	0,31	0,55	27,0	26,4	26,7
55BK2	0,32	0,55	16,6	12,8	14,2
55BK4	0,34	0,55	15,6	12,8	14,2
55BR0	0,55	0,55	18,3	10,1	14,2
70BK0	0,41	0,70	21,0	16,2	18,4
70BK2	0,40	0,70	3,5	3,3	3,4
70BK4	0,39	0,70	15,4	12,7	14,1
70BG0	0,56	0,70	15,0	10,0	12,6
70BR0	0,70	0,70	8,2	7,0	7,6

Tabell 2. Avspjälkning av betong efter brandprovning.

5.2.3 Slutsatser av fullskaleförsöken

En relevant fråga är om spjälkning kan accepteras överhuvudtaget. Någon spjälkning måste accepteras för att betong ska kunna användas när brandmotstånd krävs. En rimlig referensnivå för vilken omfattning av spjälkning som kan accepteras bör kunna utgöras av den spjälkning som erhålls för NB, för vilken det idag inte krävs några speciella åtgärder i gällande normer. I de föreliggande testerna spjälkade all betong mer eller mindre. Försöken visade dock en markant förhöjning av spjälkningsbenägenheten hos SKB jämfört med de referensbetonger som vibrerats och som ingick i provningsserien. För många av SKB-provkropparna var spjälkningen så omfattande att armeringen frilades fullständigt.

Betongen i denna undersökning var relativt ung vid provning, endast sex månader. Hållfastheten ökar med ökande ålder. Några parametrar som påverkade spjälkningen negativt i detta fall var det vid provning relativt sett höga fukttinnehållet, den kvadratiska geometrin och den fyr-sidiga brandbelastningen. Å andra sidan var last anbringad som förspänd armering vilket kan ge mindre spjälkning än en yttre last.

SKB är inte en produkt utan en ”familj” av betonger som kan vara sammansatta på en mängd olika sätt. I undersökningen användes recept som ska vara exempel på vanligt förekommande sammansättningar på den svenska marknaden i dagsläget.

Med de recept som ingått i den här studien kan man åstadkomma ett mer eller mindre linjärt samband mellan mängd spjälkat material och vattenpulvertal. Med inblandning av plastfibrer kunde avspjälkningen sänkas till ungefär samma nivå som för normal betong.

5.2.4 Rekommendationer

Det får anses klarlagt genom försöken att de provkroppar som tillverkats med SKB hade en betydligt större tendens till spjälkning än referensproverna med vibrerad betong. Fenomenet spjälkning på grund av brandpåverkan är komplicerat men brukar förenklat förklaras som en kombination av de termiska spänningar och det höga portryck som uppstår i betongen då den utsätts för brand. De termiska spänningarna uppkommer då en betongyta värms upp och det bildas en temperaturgradient över betongens tvärsnitt. Det höga portrycket byggs upp då porvatten förångas. Av denna anledning är problemet störst för täta och fuktiga betonger med små porer och därmed snabba portrycksökningar. Exempel på täta betonger är högpresterande betong och självkompakterande betong.

Konsekvensen av att en konstruktionsdel spjälkar kraftigt under brand varierar. I en betongklädd tunnel i ett bra berg utsatt för litet vattentryck kan kanske betongen tillåtas spjälka av utan allvarliga konsekvenser. Om bakomliggande berg är av låg kvalitet och är kraftigt vattenförande kan en spjälkning kanske ej accepteras. Möjligheten att genomföra reparationer påverkar också acceptansen.

Brandkrav på betong i en byggnad uttrycks i form av att bärförmågan vid brand ska vara säkerställd i ett visst antal minuter (30, 60, 90 eller 120) beroende på typ av byggnad. Vid kraftig avspjälkning kan detta inte garanteras.

Vissa konstruktioner är mer utsatta än andra vad gäller spjälkningsbenägenhet, eftersom spjälkningen påverkas av hur konstruktionsdelen belastas och hur stor del av dess yta som är brandpåverkad. För sådana konstruktioner bör man tillsätta plastfibrer som vid brandpåverkan smälter och bildar ett finmaskigt hålrumsnät som tillåter det förångade vattnet att ledas ut ur betongen utan att orsaka spjälkning.

Med ledning av resultaten från försöken rekommenderas för spjälkningsbenägen betong till utsatta konstruktionsdelar en inblandning av 4 kg/m^3 plastfiber vid vatten/pulvertal $< 0,35$. Vid vatten/pulvertal $> 0,35$ tillsätts 2 kg/m^3 . Dessa rekommendationer gäller endast den plastfiber och de betongsammansättningar som använts i detta projekt.

Vid användning av en plastfiber med tunnare diameter (18 micron) kan plastfiberdoseringen minskas, kanske tom halveras, enligt [5].

6. REFERENSER

1. Yngve Anderberg. Handbok Högpresterande betong – Material och utförande, kapitel 16 Brand. Danderyd, 1998.
2. Jens Oredsson and Gunnar Rise. High Performance Concrete Structures – Design Handbook, Luleå. 1998.
3. Bertil Persson. Self-compacting Concrete at Fire Temperatures. TVBM3110, Lund 2003
4. Lars Boström,. The Performance of some Self-compacting Concretes when exposed to Fire. SP report 2002-23, Borås 2002.
5. Muntligt uttalande från Yngve Anderberg IFSD, Symposium Brandbeständighet hos Självkompakterande betong, LTH, 2002-12-10.
6. Yngve Anderberg, Ove Pettersson. Brandteknisk dimensionering av betongkonstruktioner, del 1. T13:1992 del 1 Statens råd för byggnadsforskning.