

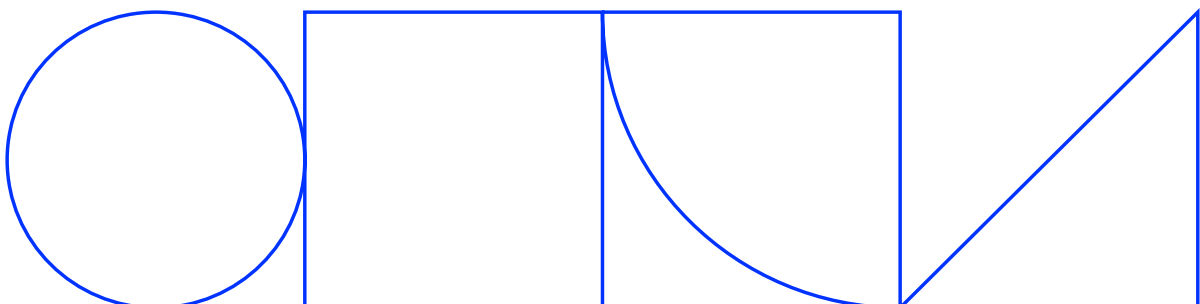
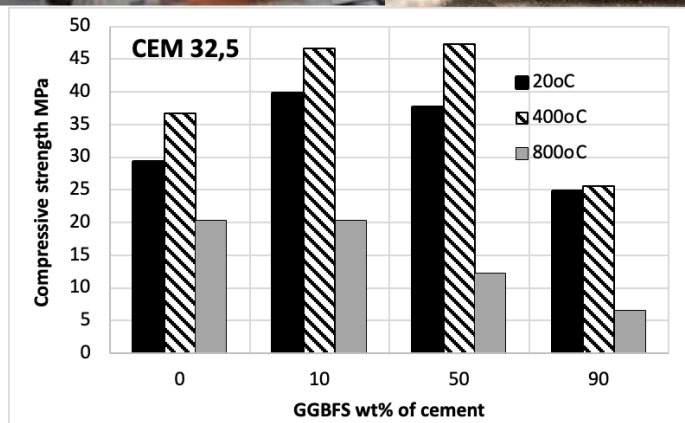
PROJEKTNR. 13928

EKOBETONG I BRAND - DEL 1

Sammanfattning

Marcin Sundin, Andrzej Cwirzen, Hans Hedlund
LTU, Skanska

2023-04-28



Summary

The Swedish construction industry transferring to use low CO₂ footprint eco concretes. These concretes are mostly based on binders containing Portland cement and alternative cementitious materials (SCMs). An alternative not used in Sweden are alkali activated binders or Calcium Sulphoaluminate Cements (CSA). The performance of normal concretes in fire exposure is relatively well studied, on the contrary to eco binders. The aim of this project is determined which eco binders are better, comparable, or worse in comparison with pure Portland cement. The focus is on binders and other factors related to the concrete mix design or testing/exposure are of secondary importance.

The of this project, tested 25 different binder combinations and close to 500 test cubes. The mix design and testing procedure were always the same. Concretes containing up to 90 wt.% of BFS performed well in temperature of up to 800°C in comparison with normal concretes containing only Portland cement. However, larger amounts of accelerator, showed mixed results. Some of the mixes performed well, while other showed explosive deterioration. Similarly, the belite-CSA cement had varying influence. All tests so far were performed in laboratory conditions without exposure to the actual fire. Such tests are planned in the second part of this PhD. The project was performed at LTU in cooperation with Skanska and several other industrial partners vis the reference group.

Sammanfattning

Den svenska byggbranschen övergår till att använda ekobetong med lågt CO₂-avtryck. Dessa betongar är mestadels baserade på bindemedel som innehåller Portlandcement och alternativa cementbaserade material (SCM). Ett alternativ som inte används i Sverige är alkaliaktiverade bindemedel eller kalciumsulfoaluminatcement (CSA). Normalbetongensformbildning vid brandexponering är relativt väl studerad, till skillnad från ekobindemedel. Syftet med detta projekt är att bestämma vilka ekobindemedel som är bättre, jämförbara eller sämre i jämförelse med ren Portlandcement. Fokus ligger på bindemedel och andra faktorer relaterade till betongblandningens design eller testning/exponering är av sekundär betydelse.

I detta projekt testades 25 olika bindemedelskombinationer och närmare 500 testkuber. Blandningsdesignen och testproceduren var alltid densamma. Betong som innehåller upp till 90 vikt-% BFS presterade bra i temperaturer upp till 800°C jämfört med normala betongar som endast innehöll Portlandcement. Men större mängder accelerator visade blandade resultat. Några av blandningarna fungerade bra, medan andra visade explosiv försämring. På samma sätt har belite-CSA-cementetd varierande inflytande. Alla tester hittills utfördes under laboratorieförhållanden utan exponering för den faktiska branden. Sådana tester planeras att genomföras i den andra delen av doktorandprojektet. Projektet genomfördes vid LTU i samarbete med Skanska och flera andra industriella partners gentemot referensgruppen.

Innehåll

| | |
|------------------------------------|-----------|
| <u>SAMMANFATTNING.....</u> | <u>1</u> |
| <u>INNEHÅLL</u> | <u>2</u> |
| <u>BAKGRUND.....</u> | <u>3</u> |
| <u>SYFTE</u> | <u>4</u> |
| <u>METODER</u> | <u>4</u> |
| <u>UTFÖRDA UNDERSÖKNINGAR.....</u> | <u>5</u> |
| <u>SLUTSATSER.....</u> | <u>8</u> |
| <u>LITTERATUR.....</u> | <u>10</u> |

Bakgrund

Byggbranschen är särskilt känslig för brandrisken. Samtidigt kan tiotals eller till och med tusentals personer utsättas för livshotande situationer när de kör genom tunnlar, befinner sig i underjordiska garage, bor i lägenheter eller arbetar i flervåningshus. Alla dessa strukturer kan bli döda fällor när de utsätts för grane. Överlevnadschanserna beror på många faktorer, inklusive arkitektoniska och strukturella mönster och typer av begagnade material. Egenskaper hos det använda materialet är en av de viktigaste faktorerna som påverkar strukturens brandmotstånd och integritet (Ingason, 2016). Doktorandstudien kommer att fokusera på betongmaterial, som är det vanligaste, använda byggmaterialet i världen. Generellt har den en relativt god hållbarhet i brandexponering jämfört med andra material, särskilt inklusive stål eller trä. Betong används till och med som skyddande sköld mot andra material. Exponering av betong för eld initierar flera processer som utvecklas inom materialet, vilket kommer att påverka dess integritet och bärförmåga. Huvudprocesserna är avdunstning och migration av kapillärvatten, uttorkning av flera faser närvarande i den hydratiserade cementmatrisen. Detta inkluderar särskilt den huvudsakliga bärande fasen CSH (kalciumsilikathydrat) och CH (kalciumhydroxid). Alla processer sker i temperaturområdet strax under 1000°C vilken temperatur lätt kan nås under brand, (Zdenek Bazant och Kaplan, 1998) (Khoury, 2000) (Lu, Zhao och Han, 2009). Som ett resultat förstörs bindemedelsmatrisen och förlorar sin mekaniska hållfasthet. Dessutom finns det inkompatibilitet mellan bindemedelsmatrisen och ballastmaterialet.

Bindemedelsmatrisen genomgår expansion tills upp till 150°C följt av termisk krympning. Samtidigt aggregerar expansion med temperaturökning som ger termisk relaterad töjning och sprickbildning. Således beror den slutliga nedbrytningen av mekaniska egenskaper på betongblandningens design, inklusive särskilt cement- och aggregattypen. Den ökade kornstorleken på ballasten visade också att nedbrytningstakten ökade, *ALBREKTSSON, 2015*, (European Committee for Standardization, 2004). Exponering av betong för brand kan också leda till spjälkning, som skalar av små betongbitar, från ytan och gradvis fortskrider mot det inre som så småningom leder till exponering av armeringen och slutlig kollaps av strukturen, (Sarker, Kelly och Yao, 2014) (R. R. Jansson, 2013). Fenomenet uppmärksammades redan på XIX-talet följt av omfattande forskning även i Sverige av SP från Borås, (Silfwerbrand, 2011) (Persson, 2004) (Ingason, 2016). Flera teorier skapades, inklusive "The Vapour pore pressure and moisture clog theory", "The fully saturated pore pressure theory", "The Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion", "The frictional forces from vapour flow theory", (Phan, 2008) (R. Jansson, 2013) (Smith, 1991) (Hertz, 2003) (R. R. Jansson, 2013) (European Committee for Standardization, 2004). Polypropylenfibrer är typiska medel för att minska spjälkningen vid brand, ("Brandbeständig tunnelkonstruktion: resultat av brandbeteendetester och tillämpningskriterier", 2004) (Silfwerbrand, 2011) (R. Jansson, 2013) (Persson, 2004).

Skapandet av ekobetong genom omfattande användning av alternativa bindemedel och SCM väcker en fråga, bland många andra egenskaper, hur dylik betong kommer att fungera när den utsätts brand och höga eller mycket höga temperaturer.

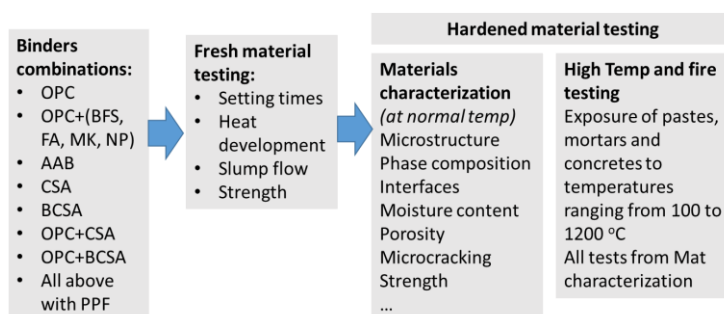
Huvudsyftet med forskningsprojekt adresserar detta problem. Den första, avslutade delen av detta doktorandprojekt, som sammanfattas i detta dokument, har gett värdefulla testresultat och ny kunskap, men också skapat flera nya frågeställningar.

Syfte

Det slutliga målet för forskningsprojektet är att stödja den svenska byggbranschen i dess säkra och hållbara övergången till en ny verklighet med omfattande användning av betong med lågt CO₂-avtryck. Doktorandprojektets bidrag är att bygga upp nödvändig vetenskaplig kunskap och möjliggöra för entreprenörer att säkert utnyttja ekobetong i konstruktioner utsatta för höga temperaturer och brand.

Metoder

Studien inleddes med en omfattande litteraturgenomgång. Det experimentella programmet inkluderade tester på mindre prover, 10x10x10 mm kuber, och det beskrivs i Figur 1. Allmän översikt över projektets experimentella program. 1. Totalt testades över 20 olika typer av betongblandningar och närmare 500 testkuber producerades, detaljer finns i Sundin, M., (2023). Högtemperaturugnen möjliggjorde exponering av betongprover till upp till 800°C. Alla prover testades före och efter exponering för höga temperaturer, inklusive bestämning av mekaniska egenskaper, visuell undersökning av yttre skador, bestämning av mikrostruktur och kemisk fassammansättning, figur 2.



Figur 1. Allmän översikt över projektets experimentella program. 1OPC - Portlandcement, CSA - kalciumsulfoaluminatcement, BCSA - Belite kalciumsulfoaluminatsement, PP - polypropylenfibrer, BFS - masugnsslagg, FA - flygaska, MK - metakaolin, NP - naturliga puzzolaner, RCA - återvunnen betongballast.



Figur 2. Ugn som användes i projektet för att exponera prover för 400°C och 800°C och svepelektronmikroskop som användes för karakterisering av prover utsatta för hög temperatur.

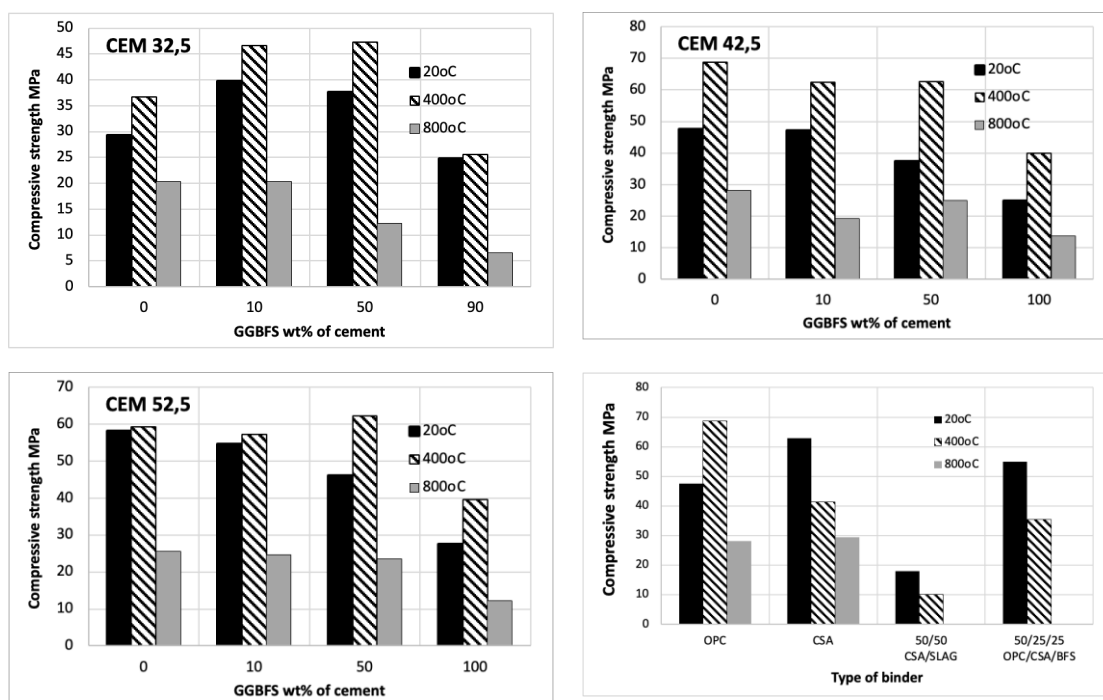
Utförda undersökningar

Litteraturgenomgången visade att variationen i prestanda hos ekobetong när den utsätts för brand är betydande. Det beror starkt på typen av det använda bindemedlet. Resultaten beskrivs i detalj på annat håll, (Sundin, M. på al 2023).

Den första delen av denna forskning har fokuserat på att studera prestanda hos olika ekobetong utsatta för 400°C respektive 800°C. De studerade blandningarna innehöll från 10 till 90 vikt-% mald granulerad masugnslag (GGBFS) och 25-50 vikt-% CSA-cement (kalcium-sulfo-aluminat cement), som ersatte Portlandcement.

Resultaten visade en generellt god prestanda för betong med GGBFS, Figur 3. En exponering för 400°C respektive 800°C resulterade i en liknande eller bättre tryckhållfasthet jämfört med referensbetongen gjord med 100 vikt-% Portlandcement.

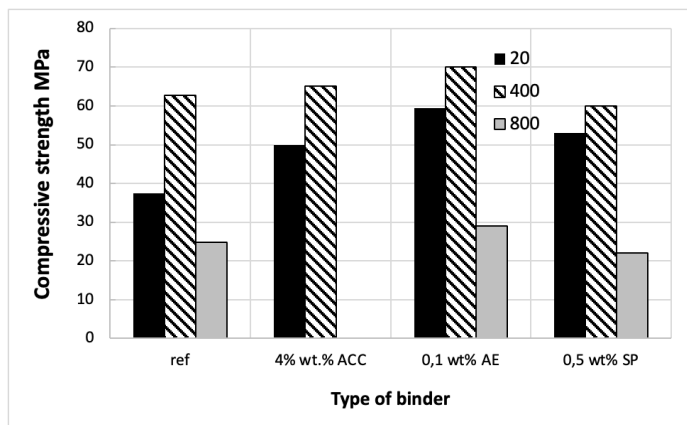
Vid 800°C var tryckhållfastheten signifikant lägre när 90 vikt-% av Portlandcement ersattes med GGBFS. Betong innehållande CSA-cement i kombination med OPC och/eller BFS visade blandade resultat och behöver undersökas ytterligare.



Figur 3. Effekter av 400 och 800°C på tryckhållfastheten hos betong tillverkad av tre typer av Portlandcement och innehållande 10, 50 och 90 vikt-% GGBFS. Effekter av CSA-cement på tryckhållfasthet.

Visuell undersökning av prover utsatta för höga temperaturer visade varierande resultat men i allmänhet visade ekobetong innehållande BFS liknande mikrosprickbildning och spjälkning som referensblandningar baserade på Portlandcement. Ett exempel på bilder visas i Tabell 3. Effekter av hög temperatur på nedbrytning av betong, som innehåller 50 vikt-% Portlandcement och 50 vikt-% GGBFS – exempelbilder.1.

All betong som innehåller SCM innehåller vissa kemiska tillsatser, och ofta är deras mängder högre än vad som rekommenderas av producenter. Därför testades också deras möjliga effekter på egenskaper hos betong som utsätts för höga temperaturer i detta projekt.



Exempel på resultat visas i

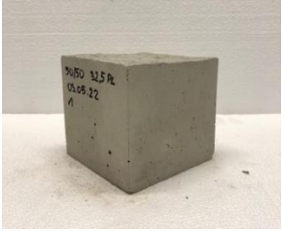




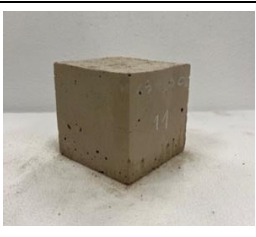











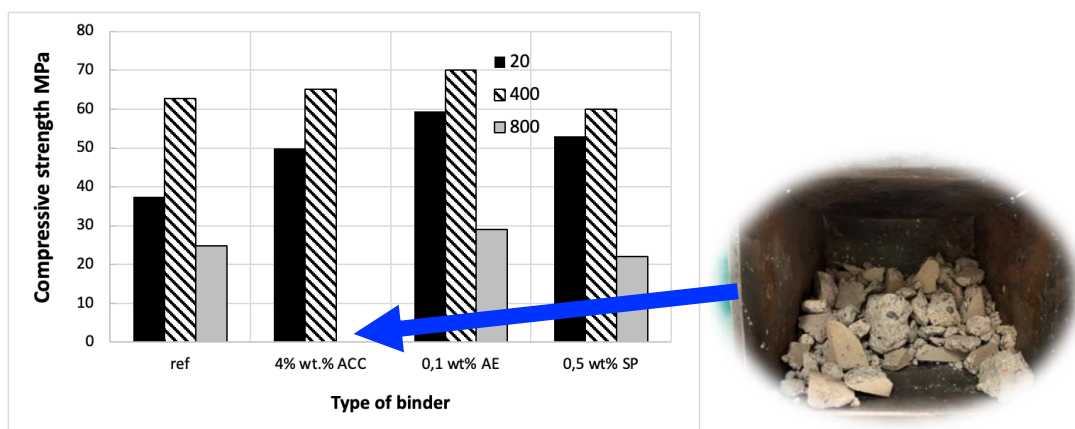
Figur 4. Effekter av kemiska tillsatser på tryckhållfastheten hos betong som innehåller 50 vikt-% CEM 42,5 och 50 vikt-% GGBFS. ACC- syntetisk CSH-baserad accelerator, AE-luftanslutande blandning, SP-polykarboxylatbaserad supermjukgörare. Höger bild visar rester av provkropp som innehåller ACC och exponeras för 800 °C.

Ingen av de testade blandningarna hade någon negativ effekt upp till 400°C. Ökningen av temperaturen upp till 800°C orsakade emellertid nedbrytning av betong innehållande 0,4 vikt-% accelererande tillsatsmedel.

Andra undersökta tillsatsmedel, dvs superplasticerare och luftporbildande, hade inga effekter jämfört med referensbetongen. Alla testade blandningar hade 50 vikt-% ersättning av OPC med BFS. Fler studier av effekter från mängd tillsatsmedel och hur ekobetongens prestanda påverkas när den utsätts för högre temperaturer kommer att undersökas i den andra delen av detta forskningsprojekt.

Tabell 3. Effekter av hög temperatur på nedbrytning av betong, som innehåller 50 vikt-% Portlandcement och 50 vikt-% GGBFS – exempelbilder.1

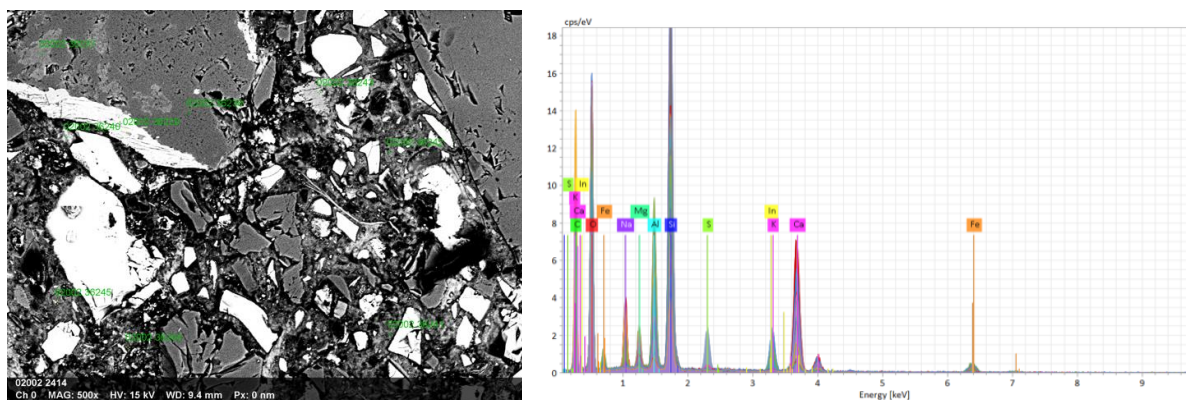
| BLANDA | 20 °C | 400°C | 800°C |
|----------------------------|---|--|---|
| OPC SLAGG (Referens) |  |  |  |
| CSA- SLAGG |  |  |  |
| Våt på våt OPC SLAGG |  |  |  |
| OPC SLAGG ACC |  |  |  |
| OPC CSA SLAGG |  |  |  |



Figur 4. Effekter av kemiska tillsatser på tryckhållfastheten hos betong som innehåller 50 vikt-% CEM 42,5 och 50 vikt-% GGBFS. ACC- syntetisk CSH-baserad accelerator, AE-luftanslutande blandning, SP-polykarboxylatbaserad supermjukgörare. Höger bild visar rester av provkropp som innehåller ACC och exponeras för 800°C.

SEM/EDX-analys av prover efter exponering för höga temperaturer visade bildning av mikrosprickor i bindemedelsmatrisen och möjliga förändringar i fassammansättningen, Figur 5. Exempel på SEM-EDX-studie av betongens mikrostruktur och fassammansättning före och efter exponering för brand initierades. 3.

Resultaten kommer att analyseras mer i detalj i följande del av projektet.



Figur 5. Exempel på SEM-EDX-studie av betongens mikrostruktur och fassammansättning före och efter exponering för brand initierades. 3

Slutsatser

Litteraturstudien visade att prestanda för betong med helt eller delvis ersättning av Portlandcement med SCM, geopolimerer eller CSA-cement vid exponering för brand fortfarande är tveksamt och krävde mer djupgående tester och analyser.

Den experimentella studien som hittills utförts gav blandade resultat. Några av de studerade bindemedlen fungerade mycket bra men vissa visade potentiella problem som behöver undersökas ytterligare.

Hittills erhållna resultat kan sammanfattas enligt följande:

- Betong som innehåller upp till 90 vikt-% BFS presterade bra i temperaturer upp till 800°C.
- Exponering för 800°C resulterade i kemiska förändringar i några av bindemedlen och orsakade bildning av mikrosprickor i bindemedelsmatrisen.
- Förhöjda mängder accelererande tillsatsmedel orsakade explosiv nedbrytning.
- Närvaron av luftporbildande och superplasticerande tillsatsmedel enligt tillverkaren rekommenderade mängder försämrade inte prestandan hos ekobetong utsatt för upp till 800°C jämfört med referensbetongen.
- CSA-cement, i kombination med OPC och BFS, visade varierande resultat och bör studeras mer innan några slutsatser kan dras.
- Använt Portlandcement påverkade hållfasthetsförlusten, särskilt när den utsattes för 800°C.

Forskning/tester som planeras för den andra delen av detta projekt:

- Fortsatt provning och kunskapsuppbyggnad hur klimatförbättrad betong exponerad för brand.
- Undersökning av olika betongsammansättningar och fibrers effekt och inverkan vid brand
- Applicering av olika brandtemperaturförlopp och dess inverkan på ekobetongs brandhårdighet.

Litteratur

1. ALBREKTSSON, J. (2015) *Beständighet hos brandexponerad betong - experimentella studier med fokus på styvhet och transportegenskaper*. KTH-Sverige.
2. Chung, J. (2016) *Utvärdering av termiska egenskaper hos gipsskivor. Bestämning av värmeledningsförmåga baserat på konkallorimetertester*. Luleå tekniska universitet.
3. Correia, J. R. et al. (2012) "Fire reaction properties of concrete made with recycled rubber aggregate", *Fire and Materials*, 36 (april 2011), s. 139–152. doi: 10.1002/fam.
4. Europeiska standardiseringskommittén (2004) "Dimensionering av betongkonstruktioner - Del 1-2: Allmänna regler - Brandteknisk dimensionering", Eurokod 2.
5. "Brandbeständig tunnelkonstruktion: resultat av brandbeteendetester och tillämpningskriterier" (2004) *Tunneling and Underground Space Technology*. doi: 10.1016/j.tust.2004.01.015.
6. Hertz, K. D. (2003) "Gränser för spjälkning av brandexponerad betong", *Fire Safety Journal*. doi: 10.1016/S0379-7112(02)00051-6.
7. Ingason, H. (2016) 'Bränder i fordonstunnlar', i *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, femte upplagan. doi: 10.1007/978-1-4939-2565-0_88.
8. Ingason, H., Li, Y. Z. och Lönnermark, A. (2015) *Tunnelbranddynamik*, *Tunnelbranddynamik*. doi: 10.1007/978-1-4939-2199-7.
9. Jansson, R. (2013) 'Fire spalling of concrete - A historical overview', i *MATEC Web of Conferences*. doi: 10.1051/mateconf/20130601001.
10. Jansson, R. R. (2013) *Brandskalning av konkreta teoretiska och experimentella studier*. KTH-Sverige.
11. Houry, G. A. (2000) "Effekt av brand på betong- och betongkonstruktioner", *Framsteg inom konstruktionsteknik och material*. doi: 10.1002/PSE.51.
12. Persson, B. (2004) 'Brandmotstånd hos självkompakterande betong, SCC', *Material och konstruktioner/Materiaux et Constructions*. doi: 10.1617/13980.
13. Phan, L. T. (2008) 'Portryck och explosiv skalning i betong', *Material och strukturer / Materiaux et Constructions*. doi: 10.1617 / s11527-008-9353-2.
14. Silfwerbrand, J. (2011) 'Svenska rekommendationer för att förebygga brandskalning i betongkonstruktioner för civilingenjör', i 2: a internationella Rilem-workshop om betongskalning på grund av brandexponering.
15. Smith, FP (1991) "Betongskalning: kontrollerade brandtester och granskning", *Journal of the Forensic Science Society*. doi: 10.1016/S0015-7368(91)73119-8.
16. Zdenek Bazant, BP och Kaplan, MF (1998) *Betong vid höga temperaturer: materialegenskaper och matematiska modeller*, *Journal of Structural Engineering*.
17. Sundin, M., Hedlund H., Provis L J., Cwirzen, A. (2023), Miljövämlig betong i brand och förhöjda temperaturer- granskning. (inlämnad)
18. Sundin, M., (2023), "Miljövämlig betong i brand", LTU Halvtidsrapport, 45p