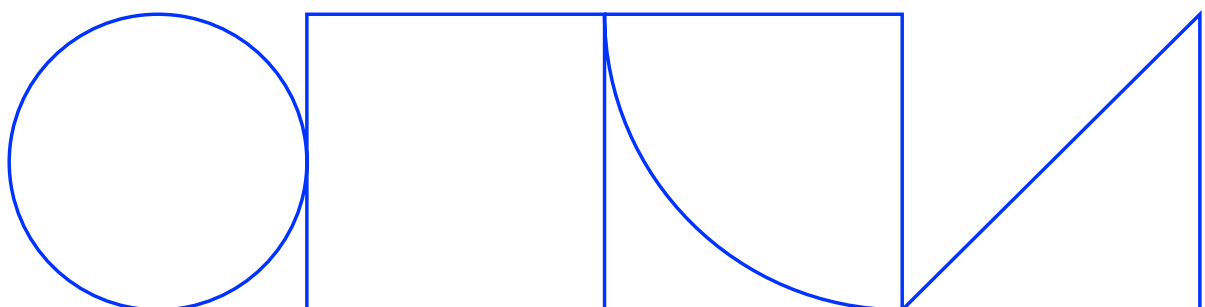


Ekobetong i brand - del 2

Slutrapport

Marcin Sundin, Andrzej Cwirzen och Hans Hedlund
LTU, Skanska

2025-11-18



Ekobetong i brand - del 2



Förord

Denna rapport sammanfattar den andra delen av doktorandprojektet (SBUF 14247) med fokus på termiskt beteende hos betong med lägre klimatpåverkan som utsätts för höga temperaturer vid brand.

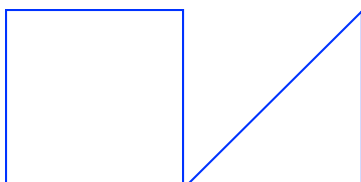
Författarna vill uttrycka sin uppriktiga tacksamhet till SBUF och Skanska Sverige AB för stöd och delaktighet i projektets genomförande. Det ekonomiska bidraget från SBUF har varit ovärderliga för genomförandet av detta arbete, och vi uppskattar djupt ditt engagemang för att främja detta projekt. Tack för ert förtroende och stöd.

Projektets arbetsgrupp vill även rikta ett stort tack till samtliga branschrepresentanter som deltog i arbetet med både sin tid, energi, idéer, branschkunskap och erfarenhet, och ett mer specifikt tack till referensgruppen:

- Urs Müller, Schwenk,
- Staffan Carlström, Swerock,
- Mikael Westerholm, Heidelberg Material – Cement,
- Giedrius Zirgukis, RISE
- Tommy Ellison, Besab
- Hans Hedlund, Skanska

Marcin Sundin et al,

Luleå, november 2025



Sammanfattning och slutsatser

I detta forskningsprojekt har effekterna av hög temperatur från brand undersökt hur prestandan hos betong med lägre klimatpåverkan påverkas. De undersökta betongblandningarna innehöll mald granulerad masugnslagg (GGBFS), olika typer av Portlandcement, kalciumsulfoaluminat (CSA)-cement, tillsatsmaterial (filler) och tillsatsmedel

Efter vatten är betong det mest använda materialet på planeten. Tillverkning av betong är mycket beroende av Portlandcement, som står för 8–10 % av de globala CO₂-belastningen. År 2023 genererade enskilt cementproduktionen över 48 miljarder ton CO₂ [2]. Det finns ett växande intresse för att utveckla nya material och teknologier för att minska betongens koldioxidavtryck. En väletablerad metod är att delvis ersätta Portlandcement med alternativa bindemedel, vilket kan minska utsläppen och, med rätt design och genomförande, kan förbättra prestandan.

Brand kan ge upphov till allvarliga skador på en byggnad om strukturens stabilitet skadas, särskilt vid fogar, som är svåra att modellera eller förutsäga. Även om traditionell betong är känd för sin goda brandbeständighet, är fenomenet som spjälkning inte helt förstådda på grund av variationen i verkliga bränder. För betong med lägre klimatpåverkan förstärks denna utmaning av varierande egenskaper hos de ingående del- och restmaterial som används och varierar beroende på källa.

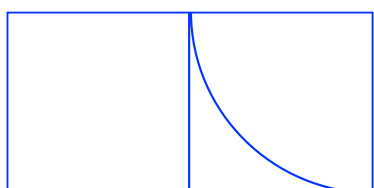
Att förstå hur dessa variationer påverkar beteendet vid höga temperaturer kräver standardiserade brandtester vid ackrediterade institut, såsom RISE (Sverige), CEF (Frankrike) eller ITB (Polen). Forskningen vid LTU bidrar till detta område och tillhandahåller data som gradvis förbättrar modeller, riktlinjer och vår övergripande förståelse av brandprestanda för betong med lägre klimatpåverkan.

Det viktigaste slutsatserna är:

- Generellt genomgår GGBFS-baserade system betydande omvandlingar under höga temperaturer.
- Betong med 50 % GGBFS presterade bättre än rena PC-mixar när den exponerades för 400 °C.
- Bildandet av melilit verkade ha en betydande positiv inverkan på prestandan efter branden hos mixar som innehåller GGBFS.
- Blandningar med CSA-cement förefaller vara mindre lämplig för höga temperaturer, men tillsatsen av äggsalspulver (ESP) minskade spjälkningen
- Exponering för öppen eld orsakade spjälkning för alla testade blandningar oavsett sammansättning. PVA-fibrer minskade dock spjälkningen.

Innehåll

Bakgrund	5
Mål och syfte	5
Material	6
Undersökta sammansättningar	7
Provningar	7
Temperaturbelastning	7
Svepelektronmikroskopi (SEM)	8
Röntgendiffraktion (XRD)	8
Tryckhållfasthet	8
Brandprovning av cement-slaggbetong - labbskala	8
Resultat och diskussion	9
System baserade på PC+GGBFS	9
System baserat på PC+CSA+LS	10
Brandprovning av cement-slaggbetong – större skala	11
Slutsatser	12
Referenser:	13



Bakgrund

Nya IPCC-rapporter betonar det akuta behovet av att minska CO₂- och utsläpp av andra växthusgaser. I linje med detta främjar FN:s globala mål (12) för hållbar resursanvändning, vilket uppmuntrar miljömässigt ansvarsfulla industriella metoder, som är viktigt för människors välbefinnande och ekosystemets stabilitet.

Inom byggbranschen är en effektiv metod att delvis ersätta Portlandcement med andra alternativa bindemedel som exempelvis industriella bi- eller restprodukter, som mald granulerad masugnsslagg (GGBFS), flygaska, gruvavfall och många andra alternativ. Dessa material kan minska betongens koldioxidavtryck samtidigt som de potentiellt även kan förbättra betongkonstruktionens prestanda och vissa egenskaper när de kombineras med korrekt design och utförande.

Efter vatten är betong det mest använda materialet på planeten. Tillverkning av betong är mycket beroende av Portlandcement, som står för 8–10 % av de globala CO₂-belastningen. År 2023 genererade enskilt cementproduktionen över 48 miljarder ton CO₂ [2]. Det finns ett växande intresse för att utveckla nya material och teknologier för att minska betongens koldioxidavtryck. En väletablerad metod är att delvis ersätta Portlandcement med alternativa bindemedel, vilket kan minska utsläppen och, med rätt design och genomförande, kan förbättra prestandan.

Brandsäkerhet är viktigt, men ofta förbisedd aspekt vid hållbar design och underrepresenterad i forskning på grund av dess komplexitet och den relativt få incidenter. Nordisk brandstatistik (Statliga civila beredskapsmyndigheten, 2016–2021 [1]) rapporterar 6 000–7 000 byggnadsbränder årligen, mestadels i "övriga byggnader", följt av lägenheter och trähus.

Brand kan ge upphov till allvarliga skador på en byggnad om strukturens stabilitet skadas, särskilt vid fogar, som är svåra att modellera eller förutsäga. Även om traditionell betong är känd för sin goda brandbeständighet, är fenomen som spjälkning inte helt förstådda på grund av variationen i verkliga bränder. För betong med lägre klimatpåverkan förstärks denna utmaning av varierande egenskaper hos de ingående del- och restmaterial som används och varierar beroende på källa.

Att förstå hur dessa variationer påverkar beteendet vid höga temperaturer kräver standardiserade brandtester vid ackrediterade institut, såsom RISE (Sverige), CEF (Frankrike) eller ITB (Polen). Forskningen vid LTU bidrar till detta område och tillhandahåller data som gradvis förbättrar modeller, riktlinjer och vår övergripande förståelse av brandprestanda för betong med lägre klimatpåverkan.

Mål och syfte

Denna studie är en fortsättning på SBUF 13928 "*Ekobetong i brand - säkert eller farligt?*". Alla resultat har publicerats i en doktorsavhandling och flera vetenskapliga publikationer.

I detta forskningsprojekt har effekterna av hög temperatur från brand undersökt hur prestandan hos betong med lägre klimatpåverkan påverkas. De undersökta betongblandningarna innehöll mald granulerad masugnslagg (GGBFS), olika typer av Portlandcement, kalciumsulfoaluminat (CSA)-cement, tillsatsmaterial (filler) och tillsatsmedel. Projektet hade följande forskningsmål:

- Design av betongsammansättningar med GGBFS (mald granulerad masugnslagg), CSA (kalciumsulfoaluminat) cement, fyllmedel och tillsatser för att minska koldioxidavtrycket.
- Utsätta betongsammansättningarna för förhöjda temperaturer för att simulera brandscenarier.
- Utvärdera mekanisk prestanda före och efter exponering vid höga temperaturer.
- Bedöm förändringar i fysikaliska, kemiska och mikrostrukturella egenskaper.
- Undersöka förändring av prestandan hos betong med lägre klimatpåverkan jämfört med traditionell Portlandcement efter exponering för hög temperatur.
- Undersöka synergistiska effekter av att kombinera olika cement med GGBFS, tillsatsmaterial och fibrer för att förbättra brandbeständigheten.

Material

Följande Portlandcement har använts:

- CEM II/B-V 32.5 R – HSR (flygskablandad Portlandcement),
- CEM I 42.5 N (Anläggningscement) och
- CEM I 52.5 R (Snabbcement Skövde),
- kalciumsulfoaluminatcement av typ ALI CEM GREEN.

Övriga delmaterial som använts:

- Malda granulerad masugnslagg "Merit" levererades av Swecem, Sverige.
- Krossade granit-ballast i två storleksfraktioner, 0–4 mm och 4–8 mm, levererades av Jehander Heidelberg Cement Group.
- Kvartspulver erhöles från Norquartz 45, Norge.
- Kalkstenspulver erhöles från en lokal leverantör.

Följande kemiska tillsatser användes:

- Master X-Seed 100 (Master Builders, ACC),
- Master Glenium ACE 30 (Master Builders, SP) och
- Master Air (Master Builders, AE).
- MasterFiber 400 tillverkas av BASF Construction Solutions GMBH.
- MasterFiber 050, basaltmikrofibrer, tillverkas av BASF Construction Chemical Italia SpA.

Därutöver användes torkat och malet äggskalpulver (ESP) i några av blandningarna

Undersökta sammansättningar

Betongblandningar förbereddes med en 20 L Hobart A200N-blandare. Sammansättning av pastamixar följde rekommendationer enligt RILEM TC-238 SCM. Blandning av pasta gjordes med en liten volym vakuumentyp Bredent. De använda mixdesignerna visas i R. O. Snellings Jacek Chwast (2018) [3], Tabell 1, Tabell 2 och Tabell 3.

Tabell 1: PC- och GGBFS-baserade mixar

Mix	W/B	PC kg/m ³	GGBFS kg/m ³	Ballast (2-8 mm) kg/m ³	Ballast (0-4 mm) kg/m ³	Sand B15 kg/m ³	Kvarts pulver kg/m ³
1B5050	0.50	200	200	522	1131	87	87

Mix	ACC	SP	AE
1B5050.1	10%	-	-
1B5050.2	4%	-	-
1B5050.3	-	0.5%	-
1B5050.4	-	-	0.1%

Tabell 2 CSA-cementbaserade blandningar

Mix	Cement kg/m ³	Ballast 0-2 mm kg/m ³	Ballast 0-4 mm kg/m ³	Ballast 4-8 mm kg/m ³	LSP kg/m ³	ESP kg/m ³	W/B
1 (REF)	392.00	273.40	614.90	878.5	0	0	0.5
2	372.59	273.40	614.90	878.5	19.60	0	0.5
3	353.00	273.40	614.90	878.5	39.20	0	0.5
4	372.59	273.40	614.90	878.5	0	19.60	0.5
5	353.00	273.40	614.90	878.5	0	39.20	0.5

Tabell 3 CSA-cement, sammansättning av pasta

Blanda	Cement kg	LSP kg	ESP kg	Vatten kg	W/B-
1 (REF)	80	0	0	32	0.4
2	76	4	0	32	0.42
3	72	8	0	32	0.44
4	76	0	4	32	0.42
5	72	0	8	32	0.44

Provningar

Temperaturbelastning

Brandtemperaturtester utfördes i en LAC LH15-ugn. Temperaturen höjdes till 400°C på 30 minuter (13,33°C per minut) och till 800°C på 175 minuter (4,57°C per minut). Prover av betong och cementpasta placerades direkt på ugnsgolvet utan extra

avstånd. Värmeelementen var placerade på vänster och höger sida av kammaren, och ingen fläkt eller tvångsventilation användes. Efter att ha nått måltemperaturen låg proverna kvar vid den temperaturen i 1 timme. När uppvärmningscykeln var slut hölls ugnen stängd så att proverna kunde svalna naturligt till rumstemperatur under cirka 12 till 24 timmar.

Svepelektronmikroskopi (SEM)

Ett svepelektronmikroskop (SEM) användes för att undersöka råmaterial, pastor och betongprover. Instrumentet som användes var en JEOL JSM-IT100. Provförberedelsen inkluderade förvaring i isopropanol och i vakuumtorkare. Följt av impregnering med ett epoxiharts med låg viskositet under vakuum. Härdade prover polerades med diamantsprayer med partikelstorlekar på 9 µm, 3 µm och 1 µm.

Röntgendiffraktion (XRD)

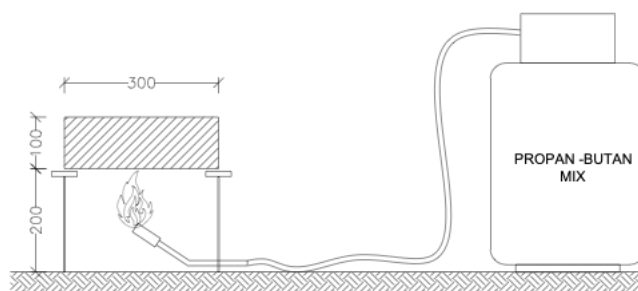
Högtemperatur-XRD-analys utfördes med en Panalytical Empyrean-diffraktometer utrustad med en Anton Paar HTK 2000N högtemperaturkammare med en platina-värmeremsa. Mätningarna upprepades i steg med 100 °C från 100 °C till 1200 °C vid en uppvärmningshastighet på 30 °C/min, med initiala och slutliga mätningar vid 25 °C. För att stoppa hydrationsprocessen i bindemedel och pasta sänktes proverna ner i isopropanol i fem dagar, följt av fem dagar i en vakuumtorkare. De maldes sedan med en planetkula kvarn tills partikelstorleken var mindre än 63 µm.

Tryckhållfasthet

Tryckhållfasthetstester utfördes med en Toni Technik-kompressionsmaskin. Proverna belastades vid provning med en konstant hastighet på 10 kN/s till tryckbrott. Testningen följde SS-EN 12390-3-standarden för härdad betong. Den maximala lasten vid brott mättes, och tryckhållfastheten erhöles genom att dividera detta värde med provets tvärsnittsarea.

Brandprovning av cement-slaggbetong - labbskala

Proverna exponerades för en propandrivna eldbrännare. Den varmaste punkten av lågan nådde cirka 1026 °C, men lågan rörde inte betongen direkt. Varje element placerades på en metallram 200 mm ovanför marken, med brännaren placerad direkt under. Exponeringstiden för varje prov var 10 minuter. Efter testet togs proverna bort, fick svalna och inspekterades för skador.



Figur 1. Uppställningen som används för brandtestning, labbskala

Resultat och diskussion

System baserade på PC+GGBFS

Efter 28 dagars förseglad vattenhärdning och förvaring under normala rumsförhållanden exponerades betongproverna för 400°C och 800°C i 60 minuter. När de hade kylts ner i 24 timmar testades deras tryckstyrka. Resultaten vid omgivningstemperatur fungerar som referenspunkt (100 %) för att utvärdera effekten av värme på varje blandning avseende förändringen i tryckhållfasthet. Resultaten presenteras i Tabell 5 .

Efter uppvärmning till 400°C behöll de flesta prover antingen sin ursprungliga styrka eller visade märkbara förbättringar. Denna trend var särskilt tydlig i mixarna som innehöll lika delar GGBFS och PC, där hållfasthetsökningarna var mest påtagliga. Bland dessa visade blandningen med PC 42.5 och slagg den mest betydande förbättringen.

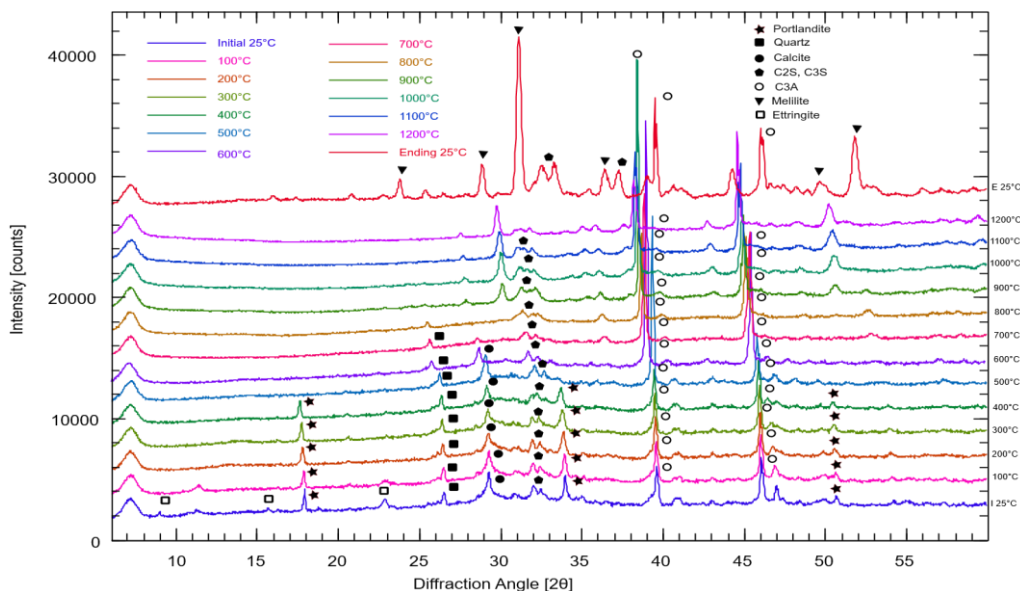
Blandningar som kombinerar slagg med antingen PC 32.5 eller PC 52.5 presterade också bra, vilket tyder på att slagg bidrar positivt till hållfasthetsutvecklingen vid måttliga temperaturer. Exponering för 800 °C visade en signifikant minskning av tryckhållfastheten. Mixar som innehöll 50 % GGBFS presterade lika bra som PC-mixar för högre cementhållfasthetsklass och sämre vid lägre cementhållfasthetsklass 32.5 CEM användes.

Tabell 5 Förändringar i tryckhållfasthetsresultat
(medelv. av 4 prov; std.av inom parentes).

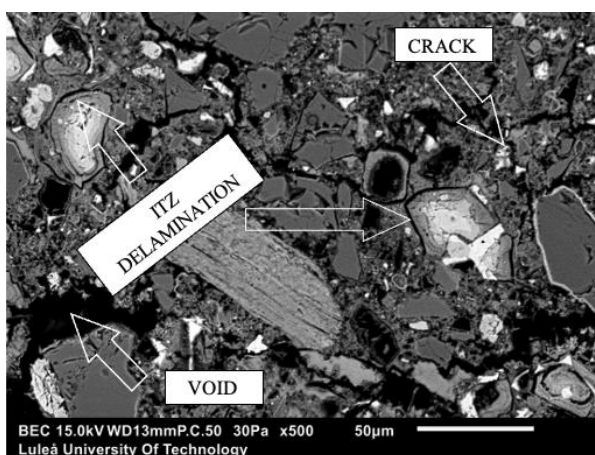
Temperatur (lab, ca 25°C)	400°C	800°C
PC 32.5		
100% (3.20)	125% (3.20)	69% (12.0)
PC 32,5 + GGBFS (50/50 %)		
100% (2.0)	128% (7.00)	33% (11.0)
PC 42.5		
100% (2.0)	144% (1.0)	59% (3.0)
PC 42,5 + GGBFS (50/50 %)		
100% (10.0)	167% (6.0)	66% (4.0)
PC 52.5		
100% (7.0)	103% (7.0)	44% (1.0)
PC 52,5 + GGBFS (50/50 %)		
100% (6.0)	135% (4.0)	51% (9.0)

Förändringarna i kemisk sammansättning utvärderades med hjälp av XRD-analys. Sammanfattningsvis förklarar de observerade transformationerna, inklusive C-S-H-amorfisering, kvartsövergångar och melilitbildning, förändringarna i mikrostrukturen och minskningen av mekanisk prestanda vid förhöjda temperaturer. Mellite verkade förbättra värmebeständigheten, minska mikrosprickbildning och bibehålla strukturell integritet. Ett exempel på XRD-spektrumet visas i Figur 2.

Exponering för 400°C orsakade avdunstning av vatten, gel- och kapillärvatten, resulterande i uttorkning, vilket lämnade tomrum och sprickor som följde aggregatens konturer och en förlängning genom matrisen. Vid 800°C drabbades matrisen av betydande nedbrytning och mikrosprickbildning i alla prov. Se exempel i Figur 3.



Figur 2 CEM 32.5 GGBFS 50.50 XRD diffraktogram. Identifierade faser: Portlandit (★), kvarts (■), kalcit (●), C2S C3S (◆), C3A (○), Melilit (▼), Ettringit (□)



Figur 3. Mikrosprickning av bindemedelsmatrisen på grund av exponering för höga temperaturer.

System baserat på PC+CSA+LS

Det relativa tryckhållfasthetsresultaten redovisade i Tabell 6 där referensmixen nådde 85 MPa vid omgivningstemperatur. Hållfastheten sjönk med cirka 64 % vid 400°C på grund av nedbrytningen av hydratet och fasomvandlingar. Blandningen baserad på Portlandcement + kalciumsulfat + kalk förstördes helt när den utsattes för 800°C på grund av spjälkning. Kalkstensblandningarna följde ett liknande mönster, förlorade omkring 62–64 % av hållfastheten vid 400°C och spjälkning även vid 800°C.

Denna nedgång är kopplad till CaCO₃-nedbrytning, som frigör CO₂ och försvagar strukturen. Äggska-modifierade blandningar (ESP) visade lägre initial hållfasthet (59,63 respektive 46,63 MPa) på grund av utspädning av CSA-cement men bibehöll bättre stabilitet vid höga temperaturer, med en residualhållfasthet lika med 11 MPa respektive 7 MPa vid 800°C utan spjälkning. Denna bättre prestanda beror sannolikt på modifierade porstrukturer som möjliggör gradvis fuktomlagring och minskar därigenom interna spänningar.

Tabell 6 Tryck hållfasthetsresultat (medelv. 4 prover; std.av. inom parentes; Skadaflagning).

Temperatur (labb, ca 25°C)	400°C	800°C
CSA		
100% (3.84)	36.20% (0.75)	<i>S</i>
CSA + 5 % LSP		
100% (5.86)	35.78% (4.45)	<i>S</i>
CSA + 10 % LSP		
100% (5.52)	38.11% (1.89)	<i>S</i>
CSA + 5 % ESP		
100% (3.61)	39.75% (3.59)	18.78% (0.29)
CSA + 10% ESP		
100% (3.05)	36.18% (8.77)	15.01% (1.99)

Brandprovning av cement-slaggbetong – större skala

För att utvärdera spjälkningsbeständighet gjuts mellanstora betongelement (300 × 300 × 100 mm) med blandningar som innehöll Portlandcement (PC), mald granulerad masugnsslagg (GGBFS) och olika fiberkombinationer. Testade blandningsdesigner och resultat visas i Tabell 7.

Efter gjutning och avformning härdades proverna under omgivande förhållanden i 28 dagar, fotograferades, vägdes och transporterades för provning. Varje element exponerades i 10 minuter för en propanbrännarlåga (ca 1026 °C) placerad under provet, 200 mm ovanför marken. Lågan rörde inte direkt vid ytan. Efter exponering kylde proverna och inspekterades för skador. [18]

Alla mixar visade viss spjälkning. PC-referensmixen visade minst synlig ytskada, men högst massförlust, vilket indikerar djupare intern nedbrytning och snabbare värmeöverföring, i enlighet med Sargam et al [19]. Slagginnehållande betong hade mer omfattande ytskador men grundare penetration, vilket tyder på förbättrad isolering. [19]

PVA-fibrer bryts ner vid cirka 239 °C [20] och bildade ångutsläppskanaler som minskade det inre trycket och termisk sprickbildning. Basaltfibrer (smältpunkt ca 1500 °C) förstärkte huvudsakligen matrisen mekaniskt, med verkningsgrad beroende av fiberlängd och dosering. [21] [22]

Även om ingen blandning var fri från spjälkning visar resultaten att kombinationen av GGBFS med PVA-fibrer förbättrar brandmotståndet genom att förfina mikrostrukturen

och underlätta för avlastning av ångtrycket, vilket leder till större hållbarhet och termisk motståndskraft i betong med lägre klimatpåverkan.

SEM-bilder av prover tagna från spjälkade områden bekräftade det antagna fiberbeteendet vid höga temperaturer. Basaltfibrer förblev intakta och välbundna till matrisen, vilket visade hög termisk stabilitet. PVA-fibrer visade däremot tydliga tecken på smältning och nedbrytning, synliga som hålrum och veck där fibrerna hade blivit inbäddade. Detta motsvarar PVA:s lägre smältpunkt, vilket orsakar smältning vid brandexponering. Områden där PVA-fibrer brutits ned ökade lokal porositet, vilket kan ha bidragit till ångtrycksuppbyggnad, en känd faktor vid explosiv spjälkning av högpresterande betong.

Tabell 7: Brandprovning i större skala. Resultat.

Fall	C 1	C 2	C 3	C 4	C 5
Bindemedel	PC 42.5	PC+GGBFS (50/50)	PC+GGBFS (50/50)	PC+GGBFS (50/50)	PC+GGBFS (50/50)
Fibertyp	-	-	Basalt	PVA	Basalt + PVA
Mängd [% vol]	-	-	0.13	0.60	0.13+0.60
Startvikt [kg]	19.10	19.12	19.10	19.05	19.00
Slutvikt [kg]	18.30	18.42	18.29	18.32	18.36
Förlorad massa [kg]	0.80	0.70	0.81	0.73	0.64
Tid för spalling [min]	2:26	0:44	1:59	1:40	1:22
Skadans yta [mm ²]	13350	23950	29039	24741	25574
Max. skadedjup [mm]	13	10	12	8	10

Slutsatser

Denna rapport sammanfattar den andra delen av doktorandprojektet med fokus på termiskt beteende hos betong med lägre klimatpåverkan som utsätts för höga temperaturer vid brand.

De viktigaste slutsatserna:

- Generellt genomgår GGBFS-baserade system betydande omvandlingar under höga temperaturer.
- Blandningen som innehöll 50 % GGBFS presterade bättre än rena PC-mixar när den exponerades för 400 °C.
- Bildandet av melilit verkade ha en betydande positiv inverkan på prestandan efter branden hos mixar som innehåller GGBFS.
- Blandningar med CSA-cement förefaller vara mindre lämplig för höga temperaturer, men tillsatsen av äggskalpulver (ESP) minskade spjälkningen
- Exponering för öppen eld orsakade spjälkning för alla testade blandningar oavsett sammansättning. PVA-fibrer minskade dock spjälkningen.

Referenser:

- [1] "Nordisk brandstatistik | MSB." Åtkomst: 18 juni 2025. [Online]. Tillgänglig: <https://www.msb.se/en/about-msb/research-and-statistics/nordic-fire-statistics/>
- [2] P. Friedlingstein *med flera.*, "Globalt koldioxidbudget 2023," *Earth Syst Sci Data*, vol. 15, nr 12, s. 5301–5369, 2023, doi: 10.5194/ESSD-15-5301-2023.
- [3] R. O. Snellings Jacek Chwast *med flera.*, "RILEM TC-238 SCM-rekommendation om hydreringsstopp genom lösningsmedelsutbyte för studier av hydratassemblag," *Material och strukturer 2018 51:6*, vol. 51, nr 6, s. 1–4, dec. 2018, doi: 10.1617/S11527-018-1298-5.
- [4] J. E. Rossen och K. L. Scrivener, "Optimering av SEM-EDS för att bestämma C–A–S–H-sammansättningen i mogna cementpastaprover," *Mater-karakteren*, vol. 123, s. 294–306, jan. 2017, doi: 10.1016/J.MATCHAR.2016.11.041.
- [5] H. Song, Y. Jeong, S. Bae, Y. Jun, S. Yoon och J. Eun Oh, "En studie av termisk nedbrytning av faser i cementhaltiga system med HT-XRD och TG," *Constr Build Mater*, vol. 169, s. 648–661, apr. 2018, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.03.001.
- [6] R. Igami, G. Igarashi, A. Aili, D. Minato, R. Kurihara och I. Maruyama, "Klinkermineralbildning och termisk nedbrytning av kalciumkarbonater i karbonathaltiga tobermoriter: Mekanismen för CO₂-frisättning i lågtemperaturområden," *Cem Concr Res*, vol. 197, s. 107969, nov. 2025, doi: 10.1016/J.CEMCONRES.2025.107969.
- [7] G. Dolino och P. Bastie, "Fasövergångar av kvarts," *Key Eng Mater*, vol. 101–102, s. 285–310, 1995, doi: 10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/KEM.101-102.285.
- [8] I. Ohno, K. Harada och C. Yoshitomi, "Temperaturvariation av elastiska konstanter för kvarts över α - β övergången," *Fysik Chem Miner*, vol. 33, nr 1, s. 1–9, mar. 2006, doi: 10.1007/S00269-005-0008-3/FIGURES/6.
- [9] I. Van der Molen, "Skiftet av kvartsens α - β övergångstemperatur i samband med granitens termiska expansion vid högt tryck," *Tektonofysik*, vol. 73, nr 4, s. 323–342, mars 1981, doi: 10.1016/0040-1951(81)90221-3.
- [10] J. B. Ferreira Neto *med flera.*, "Modifiering av smält stålslagg för cementapplicering," *Journal of Sustainable Metallurgy*, vol. 2, nr 1, s. 13–27, mar. 2016, doi: 10.1007/S40831-015-0031-7/TABLES/8.
- [11] K. K. Ramagiri, D. R. Chauhan, S. Gupta, A. Kar, D. Adak och A. Mukherjee, "Högtemperaturprestanda hos omgivningshärdad alkaliaktiverad bindemedelsbetong," *Innovativa infrastrukturlösningar*, vol. 6, nr. 2, s. 1–11, juni 2021, doi: 10.1007/S41062-020-00448-Y/TABLES/4.
- [12] K. K. Ramagiri och A. Kar, "Effekten av högtemperatur på mikrostrukturen hos alkaliaktiverat bindemedel," *Mater idag Proc*, vol. 28, s. 1123–1129, jan. 2020, doi: 10.1016/J.MATPR.2020.01.093.

- [13] F. Tavangarian, C. A. Zolko, S. Sadeghzade, M. Fayed och K. Davami, "Tillverkning, mekaniska egenskaper och in vitro-beteende hos akermanitbiokeramisk keramik," *Materials 2020, Vol. 13, sida 4887*, vol. 13, nr 21, s. 4887, okt. 2020, doi: 10.3390/MA13214887.
- [14] W. Xuan, S. Yan, J. Zhang, S. Luo, Q. Wang och J. Zhang, "En djup insikt i den dynamiska kristalliseringen av kolslagg och korrelationen med smältmikrostruktur," *Bränslebearbetningsteknik*, vol. 254, s. 108005, feb. 2024, doi: 10.1016/J.FUPROC.2023.108005.
- [15] M. Sundin, A. Cwirzen, J. L. Provis, H. Hedlund och K. Dvorak, "Prestanda hos betong med lägre koldioxid efter exponering vid höga temperaturer," Lulea tekniska universitet, Lulea, 2025.
- [16] F. Waheed, W. Khaliq och R. A. Khushnood, "Högtemperaturreststyrka och mikrostruktur i luftinbunden höghållfast betong," *ACI Mater J*, vol. 115, nr 3, s. 425–436, maj 2018, doi: 10.14359/51702037.
- [17] Y. Chen, "Hur lufthål påverkar prestandan hos betong som utsätts för brand," University of Washington, Washington, 2019. Åtkomst: 8 januari 2025. [Online]. Tillgänglig: <http://hdl.handle.net/1773/43607>
- [18] B. Zhang, Y. Liu, D. Laboureur och M. S. Mannan, "Experimentell studie av brandfaror med propanjet: Termisk strålning," *Ind Eng Chem Res*, vol. 54, nr 37, s. 9251–9256, sep. 2015, doi: 10.1021/ACS.IECR.5B02064/ASSET/IMAGES/LARGE/IE-2015-02064R_0013.JPEG.
- [19] Y. Sargam, K. Wang och J. E. Alleman, "Effekter av moderna betongmaterial på värmeledningsförmåga," *Tidskrift för material inom civilingenjörsvetenskap*, vol. 32, nr 4, s. 04020058, april 2020, doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003026/ASSET/FCDC5124-4B10-45E0-8622-E1B30E47BB85/ASSETS/IMAGES/LARGE/FIGURE12.JPG.
- [20] M. S. Magalhães, R. D. Toledo Filho och E. M. R. Fairbairn, "Hållbarhet under termiska belastningar av polyvinylalkoholfibrer," *Matéria (Rio de Janeiro)*, vol. 18, nr 4, s. 1587–1595, 2013, doi: 10.1590/S1517-70762013000400018.
- [21] K. Singha, "En kort recension av basaltfiber," *Internationell tidskrift för textilvetenskap*, vol. 2012, nr 4, s. 19–28, 2012, doi: 10.5923/j.textile.20120104.02.
- [22] M. Khan, M. Cao, X. Chaopeng och M. Ali, "Experimentell och analytisk studie av hybrid fiberarmerad betong beredd med basaltfiber under hög temperatur," *Fire Mater*, vol. 46, nr 1, s. 205–226, jan. 2022, doi: 10.1002/FAM.2968.