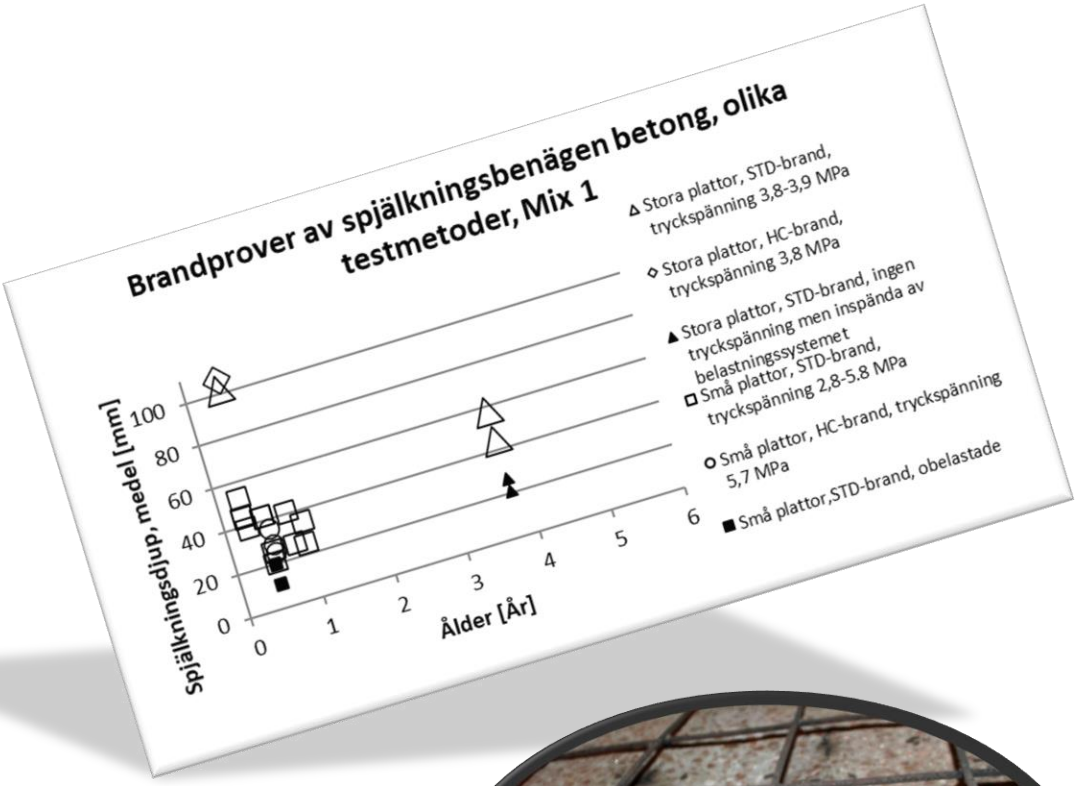
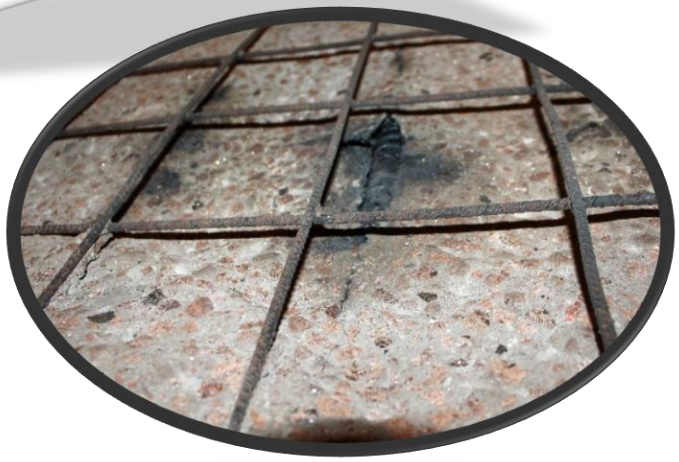
SÄKERHET OCH
TRANSPORT
BRANDFORSKNING





Brandspjälkning hos tunnelbetong – Fenomen och testmetoder

Robert McNamee och Joakim Albrektsson

RISE Rapport 2021:118

Brandspjälkning hos tunnelbetong – Fenomen och testmetoder

Robert McNamee och Joakim Albrektsson

© RISE Research Institutes of Sweden

Abstract

Fire spalling of concrete for tunnels – Phenomenon and test methods

Fire spalling of concrete is a complex phenomenon with many influencing factors. The concrete mix, geometry and cross section, stress state, fire exposure, age, pre-conditioning, moisture state and the amount of spalling reducing polypropylene fibres added all influences in different ways if a fire exposed concrete structure is prone to spalling or not. During fire testing of concrete structures for tunnels it is in practice difficult to do fire test on real designs with real boundary conditions. Therefore, more or less representative test methods are used.

If small test specimens are used, around 600 x 500 x 200 mm^3, these tests are in general only indicative and shall mainly be used as "screening tests", i.e. to optimise the mix before scaling up to more realistic sizes. Further on, the small test specimen size is not suitable for evaluating the fire resistance including heat penetration for longer duration of fire exposure as the geometrical and boundary effects are not representative for larger specimens.

Key words: Fire spalling, Concrete, Test methods

RISE Research Institutes of Sweden AB

RISE Rapport 2021:118
ISBN: 978-91-89561-09-0

© RISE Research Institutes of Sweden

Innehåll

Abstract 1
Fire spalling of concrete for tunnels – Phenomenon and test methods 1
Innehåll 2
Förord 3
Sammanfattning 4
1 Introduktion 5
1.1 Mål och syfte 5
1.2 Brandspjälkning vs. Brandmotstånd 5
1.3 Varför sker brandspjälkning hos betong? 6
1.3.1 Observationer 6
1.3.2 Brandspjälkningsteorier 11
1.4 Behöver man veta brandspjälkningsbenägenheten hos tunnelbetong? 13
1.5 Svenska rekommendationer inom brandspjälkningsområdet 13
1.6 Revisionen av Eurokodens brandspjälkningskapitel 14
2 Provningsmetodikens påverkan på resultatet vid brandspjälkningsprovning 15
3 Brandspjälkningsprovning i svenska tunnelprojekt-en sammanfattning 17
4 Brandspjälkningsprovning i andra länder 20
5 RILEMs rekommendationer kring brandspjälkningsprovning 21
6 Slutsatser 22
7 Referenser 23

© RISE Research Institutes of Sweden

Förord

Projektet har finansierats av TUSC som består av Trafikverket, Fortifikationsverket, SKB (Svensk Kärnbränslehantering AB), GRAMKO (Gruv- och mineralindustrins Arbetsmiljökommitté) och RISE (Research Institutes of Sweden).

Ett stort tack till Henric Modig och Alf Nilsson från Trafikverket som gett värdefulla synpunkter på innehållet i rapporten.

© RISE Research Institutes of Sweden

Sammanfattning

Brandspjälkning av betong är ett komplext fenomen med många påverkande faktorer. Betongsammansättningen, geometrin, spänningsbilden, brandexponeringen, åldern, förkonditioneringen, fuktförhållandena och mängden tillsatt spjälkningshämmande polypropylenfibrer påverkar på olika sätt om en betongkonstruktion är spjälkningsbenägen eller ej. Vid brandspjälkningsprovning av tunnelkonstruktioner i betong är det i praktiken mycket svårt att utföra brandprov som fullt ut representerar den färdiga konstruktionen. Därför används olika mer eller mindre representativa provningsmetoder. Valet av provningsmetod bör baseras på ingenjörsmässiga principer.

De två viktigaste anledningarna till att ställa krav på högsta tillåtna brandspjälkning i en tunneldesign torde vara att undvika en reduktion av brandmotståndet när brandmotståndet är viktigt och/eller att minska direkta kostnader och indirekta samhällskostnader vid en stor tunnelbrand.

De senaste två åren har primärt två provningsupplägg föreskrivits i svenska tunnelprojekt. Brandprovningar på en horisontalugn med tryckbelastade provkroppar med yttermåtten ca 1700 x 1200 x 300 mm och obelastade provkroppar med yttermåtten ca 600 x 500 x 200 mm som brandprovas på en liten ugn. Vid prover på horisontalugnen användes brandexponeringar enligt hydrokarbonkurvan och den lite tuffare EUREKA-brandkurvan. Den senare inkluderar en avsvalningsfas. På den lilla ugnen föreskrivs exponeringar enligt standardbrandkurvan och hydrokarbonkurvan.

Provningar på den lilla ugnen är orienterande indikativa provningar, s k ”screening tests”. Man kan alltså inte säga att provkroppar i mer realistisk storlek beter sig på samma sätt. Anledningen är att både randvillkoren och tvärsnittet är annorlunda vid provning i större skala. Det finns exempel där små obelastade provkroppar inte spjälkat alls och större tryckbelastade provkroppar spjälkar förbi armeringen. Däremot kan screeningtester användas för att sålla fram de betongrecept som verkar vara bäst optimerade för att klara prover i mer realistisk skala men för att göra dessa tester meningsfulla bör provkropparna utsättas för någon sorts yttre last eller inspänning.

Vid provningar på den lilla ugnen specificeras under de två senaste åren i flera fall mycket långa brandexponeringar såsom standardbrandkurvan i 120 minuter plus en avsvalningsfas eller 180 minuters exponering enligt hydrokarbonkurvan. Den långa varaktigheten på dessa exponeringar i den mindre provuppställningen är mycket tveksam ur två aspekter i) om det inte spjälkar under de första 40 minuterna sker ingen spjälkning senare vid dessa brandkurvor i den lilla provuppställningen och ii) randeffekterna blir betydande vilket gör att temperaturfältet inte blir representativt vid långa exponeringar. Om man vill undersöka brandmotståndet inklusive temperaturinträngningen i tvärsnittet hos element vid långvariga designbränder bör detta göras genom provning av större mer representativa provkroppar på horisontalugnen.

© RISE Research Institutes of Sweden

1 Introduktion

Brandspjälkning är ett fenomen som kan uppstå då betongkonstruktioner utsätt för brand. I sin mildaste form sker en lätt ytavflagning på några millimeter som framför allt kan ses som ett estetiskt problem. Vid en undersökning som The Concrete Society Committee of Fire Resistance utförde på nära 100 brandutsatta betongbyggnader upptäcktes spjälkning i 80% av byggnaderna (Malhotra, 1984). Dock är det viktigt att notera att ingen av de undersökta betongkonstruktionerna kollapsat under branden. Modernare tätare betonger har visat sig mer spjälkningsbenägna så numer finns det riktlinjer för hur man ska undvika mer allvarliga former av brandspjälkning i Eurokoden EN 1992-1-2. Dock är dessa riktlinjer inte heltäckande och det är viktigt att komma ihåg att huvudprincipen, markerat med ett ”P” i Eurokoden är att ”Explosive spalling shall be avoided, or its influence on performance requirements (R and/or EI) shall be taken into account”. Det är också viktigt att komma ihåg att tabellerade data, materialegenskaper och spjälkningsriktlinjerna i Eurokoden inte gäller för de mer intensiva brandscenarier som kan uppstå vid tunnelbränder.

Vid flera större bränder i tunnlar har förhållandevis kraftig brandspjälkning uppstått. T ex vid branden i Stora Belttunneln 1994 spjälkade upp till 270 mm av det 400 mm tjocka tvärsnittet bort (Höj & Tait, 1998). Betongen som användes var en C50/60 som innehåll tillsatser av både flygaska och silika. Tryckhållfastheten i produktionen var 76 MPa. Betongen innehöll inga spjälkningshämmande polypropylenfibrer.

Av beständighetsskäl använder man ofta relativt tät betong när man bygger tunnlar. Detta gör att tunnelbetong är mer spjälkningsbenägen än vanlig betong i lägre hållfasthetsklasser som används vid husbyggnad. Den vanligaste metoden för att minska spjälkningsbenägenheten är att tillsätta tunna polypropylenfibrer till betongmixen.

1.1 Mål och syfte

Denna rapport utgör ett underlag för att man ska kunna bestämma sig för varför och hur betong för tunnlar bör testas och utvärderas i Sverige. Rapporten är inte en omfattande litteraturgenomgång utan mer en lägesbeskrivning av hur brandspjälkningstester utförs just nu i Sverige samt några viktiga observationer i samband med brandspjälkningsprovning. Omfattande litteratursammanställningar från den akademiska litteraturen finns i referenslistan. Utöver referenslistan hänvisas till symposietrycken från den serie brandspjälkningsworkshops som arrangerats av RILEM sedan 2009 (Leipzig 2009, Delft 2011, Paris 2013, Leipzig 2015, Borås 2017 och Sheffield 2019).

1.2 Brandspjälkning vs. Brandmotstånd

Brandmotståndet hos en konstruktion är ett mått på hur länge en konstruktion kan bibehålla sin lastbärande, inneslutande och/eller sin isolerande funktion (REI). Vid brandprovning för att ta reda på en konstruktion brandmotstånd utsätts provobjektet för

© RISE Research Institutes of Sweden

en standardiserad brandpåverkan genom den s k standardbrandkurvan. Standardbrandkurvan är ett temperatur/tidförlopp som första gången definierades i USA för mer än 100 år sedan (McNamee & Ödeen, 2021). När man använder standardbrandkurvan som brandexponering har kopplingen till riktiga bränder historiskt skett genom det s k ”lika area konceptet” för att definiera hur lång tid med brandexponering enligt standardbrandkurvan som olika konstruktioner behöver klara. Riktiga bränder kan dock se ut på många olika sätt. Det finns också en möjlighet att beräkna brandmotståndet hos enklare konstruktioner vid riktiga bränder med hjälp av materialmodellerna i Eurokoden.

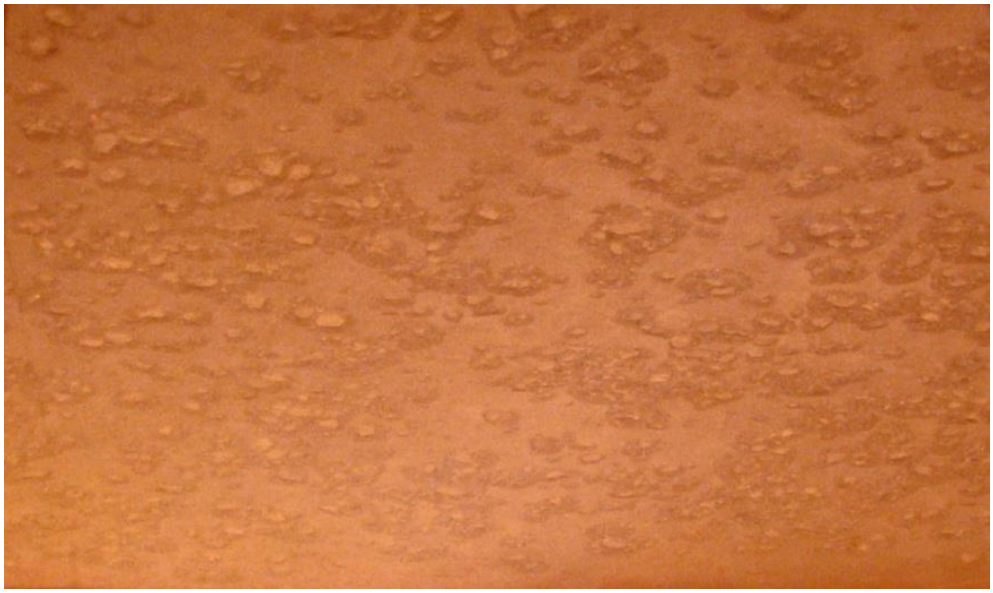
Brandspjälkning är per definition ett fenomen som leder till en förlust av delar av ett brandutsatt tvärsnitt. Tvärsnittsförlust har olika inverkan på brandmotståndet. En direkt effekt där betongen har en mekanisk funktion är när spjälkning på en sida av en pelare leder till att lasten blir excentrisk och brandmotståndet minskar. Ett annat exempel är när betongen inte har en direkt mekanisk effekt men fungerar som ett termiskt skydd för armeringen, t ex en fritt upplagd platta i taket. När då delar av betongen försvinner vid spjälkningsförloppet värms armeringen upp snabbare och brandmotståndet minskar. Om vi tittar närmare på hur fritt upplagda balkar påverkas av brandspjälkning ser vi att spjälkning i underkant nära upplagen leder till en större reduktion av brandmotståndet än spjälkning i underkant mitt på elementet (Lakhani et al., 2020).

1.3 Varför sker brandspjälkning hos betong?

1.3.1 Observationer

Vid ugnsprovning av betong då betongkonstruktionen utsätts för en simulerad övertänd brand startar spjälkningsfenomenet vanligtvis efter 2-30 minuters brandexponering. När man använder mer intensiva upphettningsförloppen som brukar användas i tunnelprojekt sker det tidigare än vid standardbrandpåverkan. I figur 1 och 2 visas exempel på kraftig brandspjälkning.

© RISE Research Institutes of Sweden



Figur 1 Exempel på brandspjälkning som börjar efter två minuters brandpåverkan enligt hydrokarbonkurvan. Kratrarna i bilden är bortspjälkat material (Jansson, 2013). Foto: Robert McNamee

Figur 2 Exempel på brandspjälkning som ätit sig igenom ett 200 mm tjockt tvärsnitt efter 40 minuters brandexponering enligt hydrokarbonkurvan. Fotot visar den icke brandexponerade sidan av provobjektet (Jansson, 2013). Foto: Robert McNamee

Den vanligaste typen av brandspjälkning torde vara den då enstaka skikt eller skikt efter skikt skjuts loss från betongytan. Det senare brukar ibland betecknas som progressiv spjälkning (Betongrapport Nr 16, 2011). I figur 3 visas exempel på spjälkat material från ytan på provkroppar av tre olika betongkvaliteter där den längst till höger var den tätaste

© RISE Research Institutes of Sweden

med högst hållfasthet vilket ledde till de tunnast avspjälkade skikten[1]. Även upphettningshastigheten påverkar tjockleken på dessa skikt där snabbare upphettning leder till tunnare skikt. I äldre litteratur används ofta termen explosiv spjälkning vilket symboliserade en spjälkning där ett ganska tjockt skikt, t ex hela täckskiktet, spjälkades loss med en kraftig smäll. Det går inte att säga att explosiv spjälkning är värre än progressiv spjälkning ur ett brandmotståndsperspektiv[2]. Vidare är inte termen explosiv spjälkning tydligt definierad, d v s var går gränsen mellan ”vanlig” spjälkning och explosiv spjälkning. Därför används termen brandspjälkning eller bara spjälkning i denna rapport[3].

Figur 3. Spjälkat material från ytan på provkroppar av tre olika betongkvaliteter, gradvis högre hållfasthet från vänster till höger (Jansson, 2008). Foto: Robert McNamee

De avspjälkade skikten från höghållfast betong liknar skikten som uppstår då granit spjälkar, se figur 4.

[1] Vid brandförsök på ultrahöghållfast betong på RISE har de avspjälkade bitarna sett ut som sandkorn som skjuts iväg från ytan.
[2] Faktorer som varierar är hur snabbt tvärsnittet spjälkar loss vid progressiv spjälkning och om det avstannar på ett visst djup.
[3] I linje med detta är termen ”explosive spalling” ersatt med ”spalling” vid den pågående revisionen av Eurokoden EN 1992-1-2.

© RISE Research Institutes of Sweden

Figur 4. Avspjälkade bitar från brandutsatt granit och en höghållfast självkompakterande betong (tryckhållfasthet över 100 MPa). Båda bitarna ungefär 5 mm tjocka (Jansson, 2013). Foto: Robert McNamee

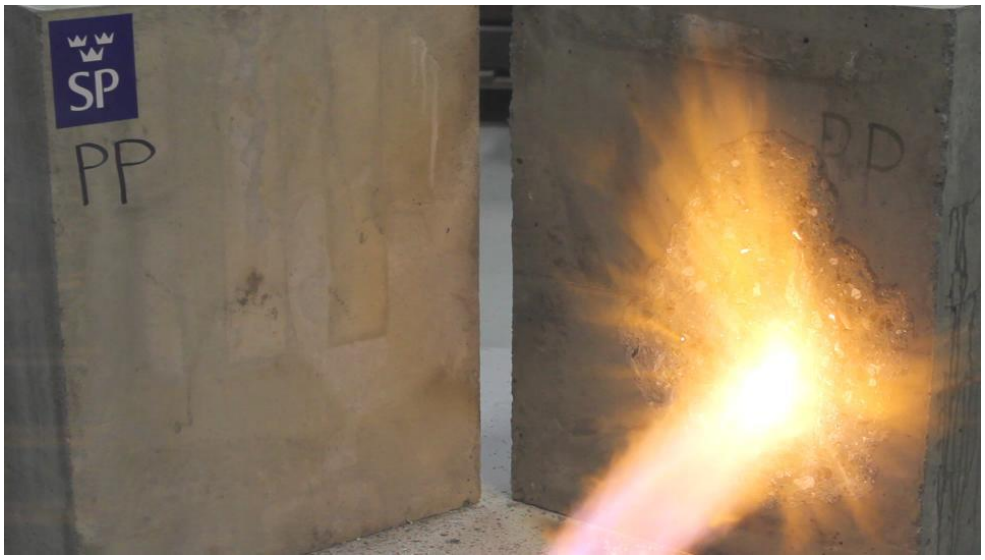
Ung betong som inte hunnit torka ut är känslig för brandspjälkning. Det brinner sällan i nybyggda konstruktioner men en noga undersökt brandskada skedde i ett lagerhus i Stockholms frihamn som var under uppförande 1966 (Lindblad et al, 1966)(Jansson & Ödeen, 2011). Under branden i byggnadens övre källare uppstod mycket kraftig brandspjälkning som på många ställen gick förbi armeringen. Brandens varaktighet uppskattades till två timmar av Kai Ödeen som var närvarande vid branden och ingick i arbetsgruppen som gjorde en utredning efter branden. En slutsats från brandutredningen var att konstruktionen, som var designad för fyra timmars brandmotstånd och vid brandtillfället bara bar upp sin egentyngd, inte skulle ha klarat att bära den riktiga brukslasten. Efter branden återställdes bjälklaget genom kompletterande armering och ett skyddande lager sprutbetong.

Konstruktionens spänningstillstånd har visat sig påverka betongens spjälkningsbenägenhet. Närvaron av externa tryckspänningar leder i allmänhet till mer brandspjälkning (Jansson, 2013). Dessa spänningar adderas till de spänningar som uppstår av den termiska utvidgningen då värmen från branden går in i tvärsnittet. Tvärsnittet hindras också från att spricka på ett mer kontrollerat sätt när en extern trycklast håller ihop det brandutsatta tvärsnittet. Även inspänning genom en extern konstruktion eller en kall zon i konstruktionselementet ökar risken för brandspjälkning. Detta illustrerades på ett tydligt sätt av Hertz (2013) genom att hetta upp en area på 20 x 20 cm centralt placerad på en större platta 60 x 60 x 20 cm. Under testet spjälkade provkroppen under den första 20 minuterna tills större sprickor bildades i den kalla zonen vilket ledde till att spjälkningen avstannade tvärt genom att inspänningen försvann. Fenomenet illustreras även genom figur 5 och 6 där en snabb upphettning av hörnen på två provkroppar inte ledde till brandspjälkning men då flamman riktades mot den centrala delen av en provkropp utan PP-fibertillsats spjälkade det kraftigt. Mer

© RISE Research Institutes of Sweden

diskussioner kring provkroppens inverkan på spjälkningsbenägenheten återfinns i kapitel 2.

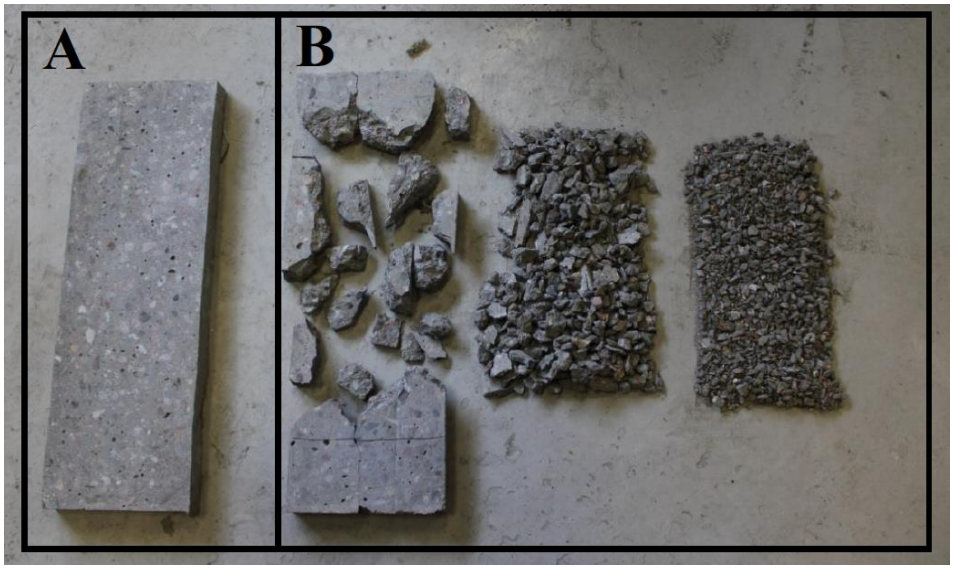
Figur 5. Initial upphettning av provplattans hörn ledde inte till någon brandspjälkning. (Jansson och Boström, 2012). Foto: Robert McNamee



Figur 6. När brännaren flyttades från hörnet till centrum av provkroppen startade ett kraftigt brandspjälkningsförlopp (Jansson och Boström, 2012). Foto: Robert McNamee

Det är känt sedan länge att balkar med tunna liv kan spjälka mycket kraftigt vid upphettning (Wierig, 1963). Det är en av anledningarna till att det finns en begränsning i livtjocklek i Eurokoden för betong och brand EN 1992-1-2. Vid en provserie genomförd under 90-talet på SP noterades mycket kraftig spjälkning på balkar med livtjockleken 80 mm (Bengtsson, 1997). Då en kvarvarande balk från detta projekt testades vid åldern 2162 dagar skedde ingen brandspjälkning (Jansson & Boström, 2011). Det explosionsartade fenomenet som kan uppstå om balklivet är för tunt illustreras i figur 7. Denna typ av explosionsartad spjälkning där ett helt tvärsnitt försvinner i en explosion har också observerats hos pelare men både i balkar och pelare är den ovanlig (McNamee, 2013).

© RISE Research Institutes of Sweden



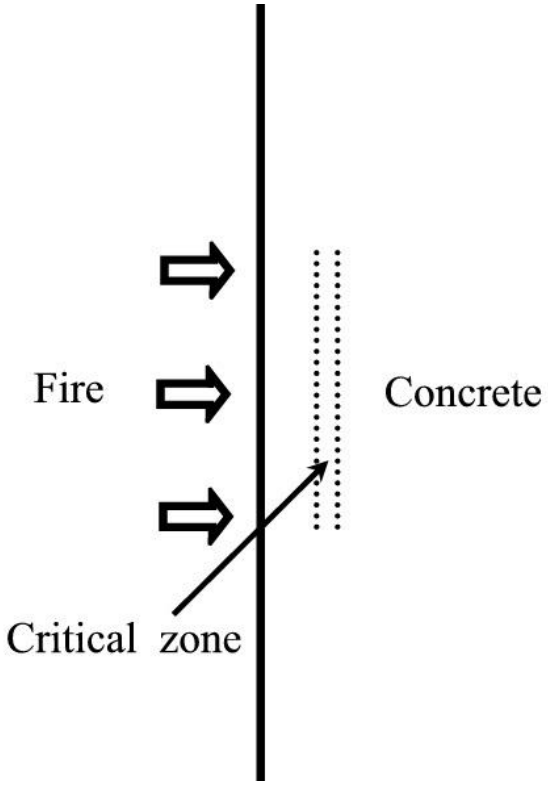
Figur 7. A) En 40 mm tjock provkropp innan brandprov med tvåsidig upphettning. B) Olika fraktioner från en provkropp som spjälkade sönder i en explosion efter 11 minuters brandpåverkan enligt standardbrandkurvan. Provkroppen var belastad med en tryckspänning på 3 MPa under provet (Jansson, 2013). Foto: Robert McNamee

1.3.2 Brandspjälkningsteorier

Trots över 100 år av teoretiserande och experimenterande vi vet inte alla detaljer kring de olika fenomen som bidrar till brandspjälkning av betong (Jansson, 2013b)(McNamee, 2019).

Vid spjälkning, avskalning från ytan, finns en kritisk zon där en instabil spricktillväxt sker p g a spänningarna som byggts upp av den termiska utvidgningen under upphettningsförloppet, se figur 8. Spänningarna tillsammans med materialegenskaperna bestämmer om det kommer att spjälka loss en bit. Tyvärr är båda dessa faktorer i praktiken mycket svåra att studera i detalj eftersom detta är en zon med mycket höga termiska gradienter där materialet hela tiden förändras både genom kemiska processer, spricktillväxt i olika skalor samt genom närvaron och transporten av fukt. Till detta läggs det faktum att betong är en sorts komposit där ballasten har andra egenskaper än cementpastan.

© RISE Research Institutes of Sweden



Figur 8. Den kritiska zonen där en instabil sprickbildning sker och en bit spjälkar loss. (Jansson, 2008).

En vanligt förekommande men förenklad teori är att det är vattnet i betongen som bildar ett ångtryck vid högre temperaturer som spränger betongen. När man analyserar en större mängd litteratur inom området inser man dock att de experimentella bevisen för att ångtrycket är det dominerande fenomenet i brandspjälkning inte är tydliga, snarare tvärtom. Vid mätning av ångtryck vid olika upphettingshastigheter visade t ex Mindeguia et al. (2009) ett exempel på att trycket blev högre vid sakta uppvärmning men ingen spjälkning jämfört med uppvärmning enligt standardbrandkurvan som gav lågt ångtryck men spjälkning. Vidare visade Jansson & Boström (2010) ett exempel på att det maximala trycket i spjälkande betong utan polypropylenfibertillsats var lägre än det maximala trycket uppmät i icke spjälkande betong med polypropylenfibertillsats. Dock kan närvaron av fukt i den kritiska zonen försämra de mekaniska egenskaperna i den kritiska zonen även om inte själva ångtrycket är den viktigaste anledning till brandspjälkning (Jansson, 2008).

Bazant (2005) beskriver spjälkningsfenomenet som *"brittle fracture and delamination buckling caused by compressive biaxial stresses parallel to the heated surface"*. Bazant (2005) poängterar också att spänningar från trycket i porsystemet kan fungera som trigger för brandspjälkning men att den viktigaste faktorn är spänningarna som uppkommer genom den termiska utvidgningen av materialet som värms upp.

© RISE Research Institutes of Sweden

1.4 Behöver man veta brandspjälkningsbenägenheten hos tunnelbetong?

Det kan finnas olika motiv till att vilja ha en betong med begränsad brandspjälkningsbenägenhet i tunnelkonstruktioner. Huvudmotiven torde vara att:

- kraftig brandspjälkning där delar av tvärsnittet försvinner leder till ett reducerat brandmotstånd hos konstruktionen vilket kan leda till kollaps vid brand. Beroende på den ovanliggande strukturen kan detta få olika konsekvenser.
- kraftig brandspjälkning kan leda till lång tids nedstängning av tunneln efter en brand vilket leder till en stor direkt kostnad för att renovera tunneln samt eventuellt stora indirekta samhällskostnader då kritisk infrastruktur temporärt inte fungerar. Enligt Coates (1996) uppskattades kostnaderna för renoveringen efter branden i kanaltunneln till 46 miljoner pund.

Dock är det viktigt att komma ihåg att man alltid måste renovera en tunnel efter större bränder med lång varaktighet eftersom betongens egenskaper försämras vid höga exponeringstemperaturer (Albrektsson et al., 2012). Ur ett samhällsperspektiv bör det vara önskvärt att redan vid projekteringsstadiet ta fram en plan för hur tunneltvärsnitt i kritisk infrastruktur ska renoveras ifall en stor brand inträffar. Frågor man då bör ställa sig är t ex om man räknar med att plocka ned och ersätta tunnelelement efter kraftiga bränder eller om det räcker att vattenbila bort de delar av tvärsnittet som har reducerade egenskaper och ersätta dessa med pågjutningar eller sprutbetong.

1.5 Svenska rekommendationer inom brandspjälkningsområdet

Brandspjälkning kan, som vi sett i kapitel 1.2, ha en direkt effekt på brandmotståndet hos en betongkonstruktion. I SP Rapport 2010:70 ”Verifiering av brandmotstånd för betong och sprutbetong i tunnlar” finns en genomgång av hur brandmotståndet kan verifieras genom provning (Boström., 2010). Grundprinciperna som bör följas vid utformning av dessa verifierande prover är att provföremålen i möjligaste mån efterliknar det utförande som ska användas i praktiken. Detta kan i många fall vara svårt av praktiska skäl så en minsta brandutsatt yta på 1200 x 1200 mm rekommenderas. Rapporten innehåller också ett förslag på provningsmetoder i två olika skalor vilken i stort sett är de provningsmetoder som används idag.

Svenska betongföreningens kommittee för betong och brand publicerade en interimsrapport kring brandspjälkning 2011 (Betongrapport 16, 2011). När det gäller provkroppsstorlek vid brandspjälkningsprovning resonerar man på följande sätt: *”Eftersom fullskaleförsök är kostsamt och tidskrävande har det utvecklats metoder som försöker värdera betongens spjälkningsbenägenhet med hjälp av små provkroppar. Problemet med små provkroppar är att det inte uppstår samma tvångskrafter under försöken som i stora element. På ett stort och tjockt element kommer ytan att effektivt*

© RISE Research Institutes of Sweden

förhindras att utvidga sig, vilket kan vara en utlösande faktor för spjälkningen. Andra skillnader som finns är antal brandbelastade sidor, fuktinnehåll, hållfasthet och möjligheterna till spänningsomlagring.

Olika metoder för att åstadkomma tvång i små provkroppar har utvecklats men har knappast gett en rättvisande bild av hur större element fungerar. Det måste därför förväntas att små provkroppar överskattar betongens förmåga att motstå brandspjälkning då randeffekterna får större betydelse. Därför rekommenderas det att endast använda små provkroppar till en grovsortering av olika betongtyper, t. ex. med olika fiberinnehåll. Mot denna bakgrund kan man välja ut det betongrecept som har klarat provningen med en sådan säkerhet att det är lönt att kosta på ett fullskaleförsök på dem."

Betongrapporten innehåller även en tabell för minsta mängd polypropylenfibrer för att undvika brandspjälkning (Betongrapport 16, 2011). Baserat på senare erfarenheter från brandprovning är den tabellen ytterst osäker att använda för tunnelprojekt. Framför allt därför att många av de bakomliggande testerna baserades på brandexponering enligt standardbrandkurvan och inte de tuffare upphettningsscenarierna man dimensionerar tunnlar för.

En sammanfattning av kravnivåer i regelverk, använda tekniska lösningar och ett antal provresultat finns publicerade in en SweBeFo rapport 2007 (Häggström et al., 2007).

1.6 Revisionen av Eurokodens brandspjälkningskapitel

Eurokoden för brand och betong, EN 1992-1-2, genomgår en omfattande revision[4]. Detta är ett arbete som pågått sedan 2013 och nu finns en sammanhängande version som varit på remiss till medlemsländerna. Nästa fas som pågår just nu är en revidering av förslaget baserat på kommentarerna från remissrundan vilket kommer att följas av en "formal vote" där standarden förhoppningsvis fastslås. Gruppen som jobbat med revisionen har även tagit fram ett bakgrundsdokument på 355 sidor.

I det senaste utkastet till Eurokoden för brand och betong, EN 1992-1-2, har strukturen på brandspjälkningskapitlet ändrats. Allt som har med brandspjälkning att göra har flyttats till kapitel 10 "Rules for spalling". Några andra förändringar i det senaste utkastet är:

- De två kurvorna för termisk konduktivitet som finns i den nuvarande versionen ersätts av en kurva som är identisk med den nuvarande övre kurvan upp till 140 °C och sedan linjärt avtar till 160 °C varefter den följer den nuvarande nedre kurvan.
- 500 graders isotermmetoden med reducerat tvärsnitt för att göra förenklade mekaniska beräkningar tas bort och ersätts av en utvecklad zonmodell.
- Formuleringen kring en fuktkvot under vilken brandspjälkning är osannolik har tagits bort.

[4] *Robert McNamee på RISE är SIS svenska representant vid detta revisionsarbete.*

© RISE Research Institutes of Sweden

- Ett nationellt val kring mängd PP fibrer för att undvika betydande spjälkning kan göras. Om inget nationellt val görs sätts värdet till 2 kg/m^3 (vilket är det angivna värdet i den nuvarande Eurokoden).
- När det behövs experimentella bevis för att visa att en konstruktion är spjälkningssäker ska dess experiment utföras vid representativa förhållanden när det gäller geometri, spänningar och fuktnivå.
- Ordet ”explosive” har tagits bort från uttrycket ”explosive spalling”.

2 Provningsmetodikens påverkan på resultatet vid brandspjälkningsprovning

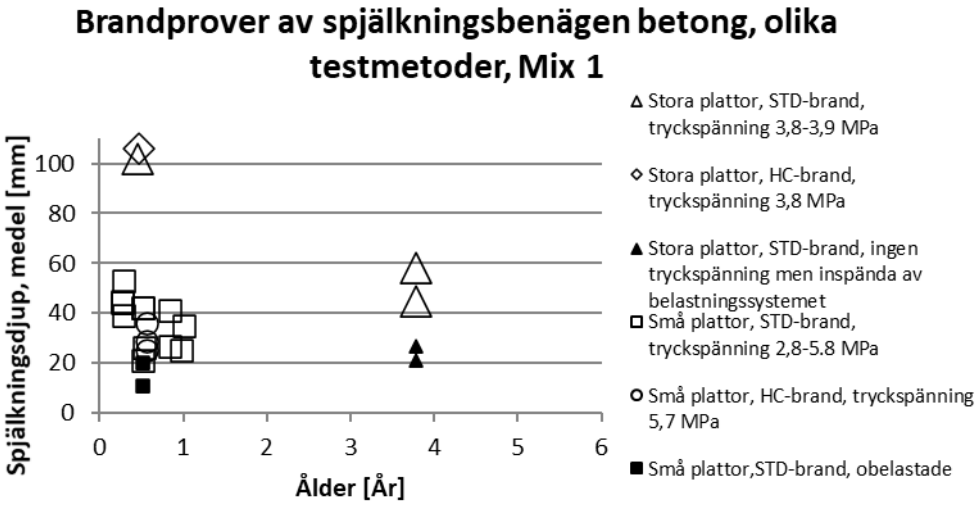
Syftet med att göra brandspjälkningsprovningar är att förutsäga eller indikera hur en tunnelkonstruktion kommer att bete sig vid en riktig brand i en tunnel. Från det förra kapitlet förstår vi att många olika faktorer påverkar spjälkningsbenägenheten. I detta kapitel går vi igenom några exempel där den valda provningsmetodiken påverkar resultatet. Spridningen mellan olika sorters provningsmetodik är i flera fall mycket stor vilket understryker vikten av att valet av provningsmetod bör baseras på ingenjörsmässiga principer.

Ett av de enklaste provuppläggen är att brandprova standardkuber eller cylindrar som i vanliga fall används för att testa tryckhållfastheten. Detta har gjorts i mängder med studier som redovisas i den vetenskapliga litteraturen där inverkan av olika parametrar på spjälkningsresultatet visas. Dock är det mycket tveksamt om man kan dra några mer detaljerade slutsatser från denna sorts småskaliga tester. Provkroppens utformning och upphettning från flera olika håll gör att resultaten inte motsvarar mer realistiska tester i större skala. Spricktillväxten under upphettning p g a den termiska utvidgningen är en mycket viktig faktor där små sprickor kan relaxera uppkomsten av tryckspänningar vilka om de inte relaxeras kan leda till brandspjälkning (instabil spricktillväxt). I figur 9 visas ett exempel där en kub inte spjälkar alls när motsvarande större provkropp spjälkade förbi armeringen.

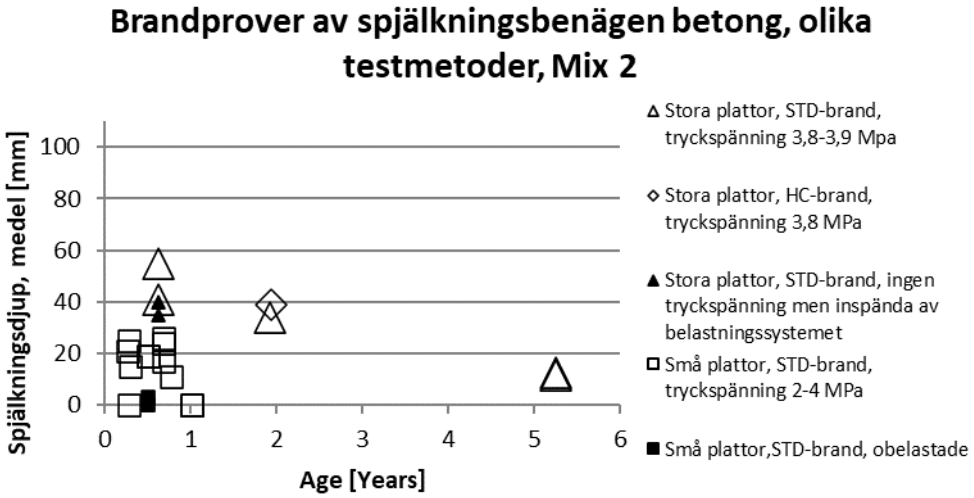
Figur 9. Skillnaden i spjälkningsdjup mellan olika provkroppsutformningar och last, identisk betong provad vid samma brandprov. A) Storlek 150 x 150 x 150 mm, ingen last, ingen spjälkning. B) Storlek 1800 x 1200 x 200 mm, trycklast 10 procent av tryckhållfastheten, max spjälkning 92 mm. (Jansson & Boström, 2012).

© RISE Research Institutes of Sweden

Även spjälkningsbeteendet hos små obelastade oarmerade plattor korrelerar dåligt till större armerade och eller tryckbelastade provkroppar. Som vi sett i kapitel 1.3.1 visade Hertz (2013) ett exempel på när spjälkningen avstannar när provkroppen spricker upp och inspänningen från den kalla zonen minskar. I en större experimentell studie för att bestämma brandspjälkningsbenägenheten hos självkompakterande betong jämfördes olika testmetoder där tryckbelastningen påfördes med interna Dywidagstag som efterspännndes. I figur 10 och 11 visas skillnaderna i brandspjälkningsresultat mellan olika storlekar på provkroppar och tryckspänningsnivå. Studien visar tydligt att både provkroppsstorleken och tryckspänningsnivån har en mycket stor inverkan på spjälkningsbenägenheten. De små obelastade provkropparna spjälkar inte alls (mix 2) eller under 20 mm (mix 1) på samma gång som motsvarande större mer representativa provkroppar kan spjälka mellan 50-100 mm.



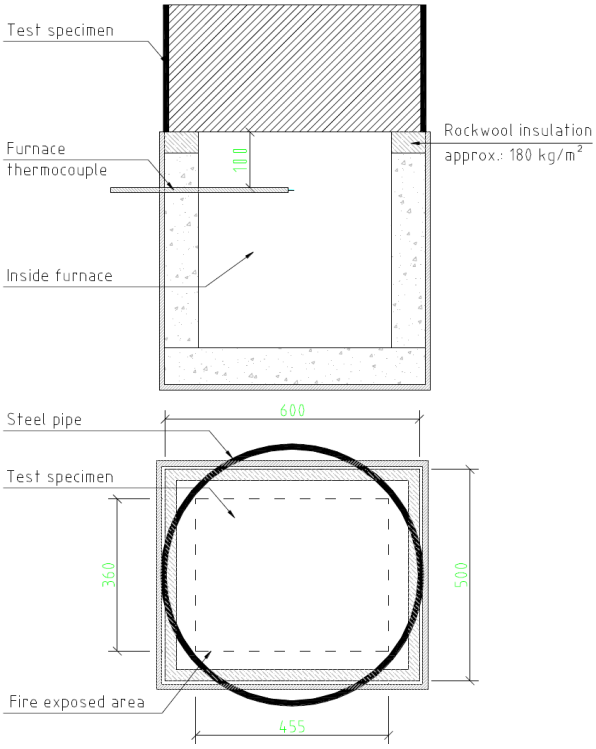
Figur 10. Exempel 1. Skillnaden i medelspjälkningsdjup vid olika provkroppsutformning och tryckspänningsnivå. Stora plattor med yttermåtten 1700 x 1200 x 200 mm och små plattor med yttermåtten 600 x 500 x 200 mm (Jansson & Boström, 2013).



Figur 11. Exempel 2. Skillnaden i medelspjälkningsdjup vid olika provkroppsutformning och tryckspänningsnivå. Stora plattor med yttermåtten 1700 x 1200 x 200 mm och små plattor med yttermåtten 600 x 500 x 200 mm (Jansson & Boström, 2013).

© RISE Research Institutes of Sweden

Vi ser mycket stora skillnader i spjälkningsbenägenhet mellan olika sorters provkroppar men det finns ett behov av att kunna sortera och optimera mixer innan man genomför större och dyrare tester som är mer representativa. Då kan man utföra ett så kallat ”screeningtest” vilket bör vara utformat på ett enkelt sätt och innehålla någon sorts tryckbelastning eller inspänning. Ett förslag på ett enkelt screeningtest har tagits fram av Boström et al. (2018). Provkroppen i detta test gjuts i ett stålrör som både fungerar som form och inspänning, se i figur 12.



Figur 12. Föreslagen metod vid s k screeningtester som används för att optimera betongmixen innan större mer representativa brandspjälkningstester genomförs. Provkroppen som är 300 mm hög gjuts i ett stålrör som fungerar som inspänning under testet (Boström et al., 2018).

3 Brandspjälkningsprovning i svenska tunnelprojekt-en sammanfattning

De senaste två åren har primärt två provningsupplägg föreskrivits i svenska tunnelprojekt. En uppställning med större provkroppar (ca 1700 x 1200 x 300 mm) som brandprovas på en horisontalugn och en uppställning där mindre provkroppar (ca 600 x 500 x 200 mm) vilka brandprovas på en liten ugn. Storleken på dessa provkroppar är optimerade för att passa de brandprovningsugnar som finns på RISE (Boström, 2010).

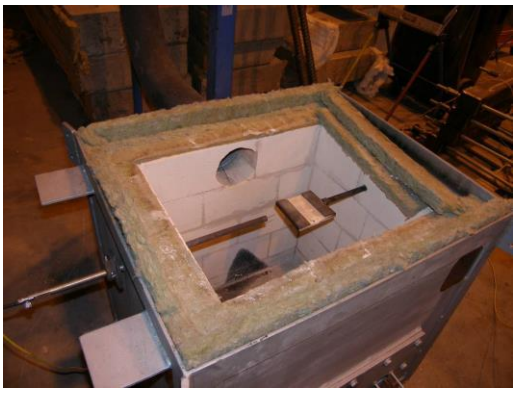
© RISE Research Institutes of Sweden

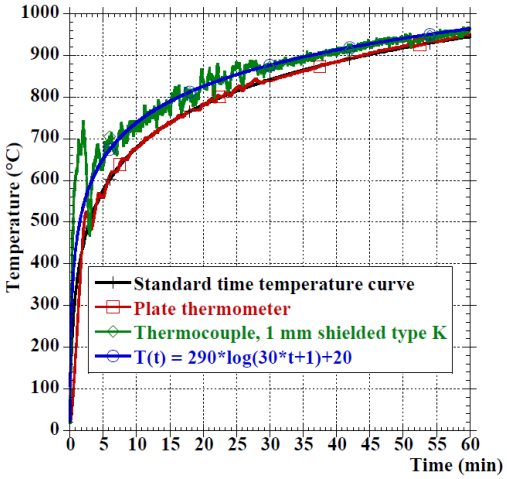
Vid provningarna på den större ugnen har både brandexponering enligt hydrokarbonkurvan och EUREKA-kurvan används där provkropparna i huvudsak har varit tryckbelastade. Endast en provkropp av 54 testade under 2020-2021 provades utan tryckbelastning men då var tvärsnittet betydligt större än det vanligast förekommande. När tryckbelastningen användes påfördes den genom efterspända Dywidagstag i central placerade rör i tvärsnitten. Både vanlig betong, självkompakterande betong och sprutbetong testades. I tabell 1 finns en översikt över några testparametrar och resultat.

Tabell 1. Översikt testparametrar och resultat från brandspjälkningsprovingar på horisontalugnen under 2020-2021. Mer detaljer kring enskilda resultat kan inte ges då uppdragsgivarna äger rapporterna.

Några testparameter och resultat	
Brandexponeringar	EUREKA 170 inkl avsvalning eller HC 180
Lastnivåer (tryckspänning)	0-8MPa
Mängd polypropylenfiber i betongmixerna	0,6-1,5 kg/m^3
Mängd spjälkning	0-förbi armeringen (39% av provkropparna spjälkade)

När man brandprovar mindre provkroppar på den lilla ugnen bör det alltid ses som en sorts grov sortering jämfört med större mer representativa provkroppar eftersom randeffekterna är signifikanta. Även om provkropparna är belastade eller inspända spricker de upp på ett annat sätt än i större mer realistisk skala. Även brandexponeringen i den lilla ugnen skiljer sig något från den standardiserade brandexponeringen trots att man använder samma brandkurva som i större ugnar. I större ugnar styrs temperaturen med s k plattermoelement vilka inte kan användas vid provning i en liten ugn då de skymmer provkroppen för mycket. I stället används mantlade termoelement med diametern 1 mm vilket vid en jämförelse ger lägre exponering i den lilla ugnen vid samma brandkurva (Jansson, 2008), vilket illustreras i figur 13.





Figur 13. Jämförelse mellan temperaturer mätta med ett mantlat termoelement med diametern 1 mm och ett plattermoelemet (Jansson, 2008). Plattermoelementet registrerar en lägre temperatur i den lilla ugnen. Foto: Robert McNamee

© RISE Research Institutes of Sweden

I tabell 2 finns en översikt över några testparametrar och resultat från 95 småskaliga brandprov som utförts under 2021. Ingen av dessa provkroppar tryckbelastades under brandprovet och endast 15 av 95 testades med en yttre inspänning. Både vanlig betong, självkompakterande betong och sprutbetong provades vid dessa småskaliga tester under året.

Tabell 2 Översikt testparametrar och resultat från brandspjälkningsprovingar på den lilla ugnen under 2021. Mer detaljer kring enskilda resultat kan inte ges då uppdragsgivarna äger rapporterna.

Några testparameter och resultat	
Brandexponeringar	HC40, HC 60, HC 90 inklusive avsvalning, STD 120 inklusive avsvalning, HC 120 inklusive avsvalning eller HC 180
Lastnivåer (tryckspänning)	Inga belastade provkroppar men 15 prover med extern stålram som minskar de termiska utvidgningen under brandexponering.
Mängd polypropylenfiber i betongmixerna	1- 2 kg/m^3
Spjälkning	3% av provkropparna spjälkade

Den viktigaste slutsatsen man kan dra av att jämföra proverna på stora och små provkroppar är att större belastade provkroppar spjälkar betydligt mer än små belastade eller inspända provkroppar. Vidare ser vi att det finns exempel på väldigt långa förskrivna brandexponeringar vid prover av små provkroppar. Den långa varaktigheten på dessa exponeringar i den mindre provuppställningen är mycket tveksam ur två aspekter i) om det inte spjälkar under de första 40 minuterna sker ingen spjälkning senare vid dessa brandkurvor i den lilla provuppställningen och ii) randeffekterna blir betydande vilket gör att temperaturfältet inte blir representativt vid långa exponeringar. Om man vill undersöka brandmotståndet inklusive temperaturinträngningen i tvärsnittet hos element vid långvariga designbränder bör detta göras genom provning av större mer representativa provkroppar på horisontalugnen.

Som vi såg i kapitel 1.6 är revideringen av Eurokoden kring brand och betong inne i slutfasen. När det gäller provningsmetoder för brandspjälkningsbenägenhet finns ingen detaljerad beskrivning men det poängteras att experiment ska utföras vid representativa förhållanden när det gäller geometri, spänningar och fuktnivå. Hur pass representativa de större efterspända provkropparna är jämfört med riktiga tunneltvärsnitt provade vid realistiska förhållanden vet vi inte eftersom riktiga tunneltvärsnitt med realistiska laster mycket sällan provas i Sverige.

© RISE Research Institutes of Sweden

4 Brandspjälkningsprovning i andra länder

Brandspjälkningsprovning i tunnelprojekt sker på olika sätt i Europa. Exempel från Frankrike[5] och i Tyskland[6] visar att flera brandlaboratorier använder sig av s k ”screening tests” för att undersöka vilka betongsammansättningar som passar att testa i en större mer verklighetstrogen skala. Vid det franska provningsinstitutet används belastade provkroppar med längd/bredd 1 x 1,3 m med en tjocklek som motsvarar den verkliga tjockleken för att göra denna första sortering. Även det tyska provningsinstitutet utför ibland s k screening tests men man är mycket tydlig med att resultaten från små provkroppar inte bör användas som utvärderingsmetod för beteendet hos riktiga konstruktioner (se även Juknat och Dehn, 2017).

Varken det franska eller tyska provningsinstitutet utför någon sorts extrapolation av testresultaten när det gäller betongsammansättning eller geometri. De har inte heller hört talas om att man gör någon sorts uppföljande provning under pågående gjutningar i tunnelprojekt vilket sker i Sverige.

I Nederländerna har Rijkswaterstaat och Efectis definierat en testprocedur för brandprovning av tunnelstrukturer. Redan 1986 togs en testuppställning för brandskyddad betong fram vilken innehöll en brandexponering enligt RWS-kurvan (Rijkswaterstaat-kurvan). Denna testprocedur har sedan vidareutvecklats i ett antal steg där den senaste specifikationen publicerades 2020 (Efectis, 2020). Specifikationen innehåller riktlinjer kring hur man ska göra:

- brandspjälkningstester,
- tester av isolerande produkter för skydd av betong,
- tester i befintliga tunnlar med en mobil ugn,
- samt hur komponenter såsom dörrar och andra installationer i tunnlar bör testas

När prefabricerade tunnelelement testas gör detta i full storlek och när platsgjutna konstruktioner provas ska de ha en tjocklek som i den riktiga konstruktionen (upp till 400 mm). Vidare ska platsgjutna oskyddade konstruktioner ha en minsta brandexponerad yta på 5 m^2 och med minsta bredd på 1,6 m. När isolerande skikt provas ska den exponerade ytan vara minst 8 m^2. Alla tester utförs också som dubbeltester. Grundtanken i specifikationen är att proverna ska vara så representativa som möjligt både när det gäller geometrin inklusive armeringen och lasterna som konstruktionen utsätts för i den riktiga tunneln. Även i Frankrike och Tyskland utförs brandprov på hela tunnelelement.

[5] Christophe Tessier och Fabienne Robert från CERIB i Frankrike har intervjuats.
[6] Michael Juknat från MFPA i Tyskland har svarat på frågor via epost.

© RISE Research Institutes of Sweden

5 RILEMs rekommendationer kring brandspjälkningsprovning

Under ett antal år har arbetsgruppen *TC256-SPF: Spalling of concrete due to fire: testing and modelling* inom RILEM[7] jobbat med att ta fram två rekommendationer inom brandspjälkningsområdet. Arbetsnamnen på dessa två rekommendationer är:

- ”Recommendations on fire spalling assessment during standardised fire resistance tests - Complementary guidance and requirements”
- ”Recommended method of testing concrete spalling due to fire - material screening test”

Arbetet med dessa rekommendationer är förhoppningsvis inne i sitt slutskede när denna rapport skrivs. Det som återstår är en remissrunda till kommitteens 41 medlemmar. När det gäller rekommendationen om s k ”material screening test”, tänkt att användas för att sortera ut lämpliga betongmixer innan man utför större verifierande tester, finns tre exempel på provkroppar. Alla tre är designade för att på olika sätt hindrats från att utvidgas vid upphettning vilket är mer representativt för större provkroppar. Detta sker genom att:

- provkroppen omges av en extern stålram som skruvas ihop
- inkludera kontinuerlig (ihopsvetsad) armering runt provplattans kalla zon på tre olika höjder
- provkropparna gjuts i stålrör med en diameter på minst 600 mm och en minsta höjd på 200 mm

Alternativ ett och tre har provats vid RISE av Boström et al. (2018) där provkropparna som gjöts in i stålrör stämde bäst överens med större provkroppar. Även upplägget med armering på olika höjder i den kalla zonen har använts vid RISE både i kommersiella projekt och i en forskningsstudie (Mohammadi Mohaghegh et al., 2017).

[7] Förkortningen kommer ursprungligen från ett franskt namn men officiellt står det nu för *”International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures”*

© RISE Research Institutes of Sweden

6 Slutsatser

Brandspjälkning av betong är ett komplext fenomen med många påverkande faktorer. Betongsammansättningen, geometrin, spänningsbilden, brandexponeringen, åldern, förkonditioneringen, fuktförhållandena och mängden tillsatt spjälkningshämmande polypropylenfibrer påverkar på olika sätt om en betongkonstruktion är spjälkningsbenägen eller ej. Vid brandspjälkningsprovning av tunnelkonstruktioner i betong är det i praktiken mycket svårt att utföra brandprov som fullt ut representerar den färdiga konstruktionen. Därför används olika mer eller mindre representativa provningsmetoder. Valet av provningsmetod bör baseras på ingenjörsmässiga principer.

De två viktigaste anledningarna till att ställa krav på högsta tillåtna brandspjälkning i en tunneldesign torde vara att undvika en reduktion av brandmotståndet när brandmotståndet är viktigt och/eller att minska direkta kostnader och indirekta samhällskostnader vid en stor tunnelbrand.

De senaste två åren har primärt två provningsupplägg föreskrivits i svenska tunnelprojekt. Brandprovningar på en horisontalugn med tryckbelastade provkroppar med yttermåtten ca 1700 x 1200 x 300 mm och obelastade provkroppar med yttermåtten ca 600 x 500 x 200 mm som brandprovas på en liten ugn. Vid prover på horisontalugnen användes brandexponeringar enligt hydrokarbonkurvan och den lite tuffare EUREKA-brandkurvan. Den senare inkluderar en avsvalningsfas. På den lilla ugnen föreskrivs exponeringar enligt standardbrandkurvan och hydrokarbonkurvan.

Provningar på den lilla ugnen är orienterande indikativa provningar, s k ”screening tests”. Man kan alltså inte säga att provkroppar i mer realistisk storlek beter sig på samma sätt. Anledningen är att både randvillkoren och tvärsnittet är annorlunda vid provning i större skala. Det finns exempel där små obelastade provkroppar inte spjälkat alls och större tryckbelastade provkroppar spjälkar förbi armeringen. Däremot kan screeningtester användas för att sålla fram de betongrecept som verkar vara bäst optimerade för att klara prover i mer realistisk skala men för att göra dessa tester meningsfulla bör provkropparna utsättas för någon sorts yttre last eller inspänning.

Vid provningar på den lilla ugnen specificeras under de två senaste åren i flera fall mycket långa brandexponeringar såsom standardbrandkurvan i 120 minuter plus en avsvalningsfas eller 180 minuters exponering enligt hydrokarbonkurvan. Den långa varaktigheten på dessa exponeringar i den mindre provuppställningen är mycket tveksam ur två aspekter i) om det inte spjälkar under de första 40 minuterna sker ingen spjälkning senare vid dessa brandkurvor i den lilla provuppställningen och ii) randeffekterna blir betydande vilket gör att temperaturfältet inte blir representativt vid långa exponeringar. Om man vill undersöka brandmotståndet inklusive temperaturinträngningen i tvärsnittet hos element vid långvariga designbränder bör detta göras genom provning av större mer representativa provkroppar på horisontalugnen.

© RISE Research Institutes of Sweden

7 Referenser

Albrektsson J., Jansson R., Flansbjer M., Lindqvist J-E. (2012) *"Quantification of fire damage of concrete for tunnel applications"* Proceedings from the Fifth International Symposium on Tunnel Fire Safety and Security, New York, USA, March 14-16, 2012

Bažant , Z. P. (2005) *"Concrete Creep at High Temperature and its Interaction with Fracture: Recent Progress"*, Concreep-7 Conference: Creep, Shrinkage and Durability of Concrete and Concrete Structures, Nantes, France, pp 449–460

Betongrapport Nr 16 (2011) "Betong och Brand – Rekommendationer för att förhindra spjälkning i anläggningskonstruktioner – Interimsrapport" ISBN 978-91-978823-7-8

Boström L. (2010) *" Verifiering av brandmotstånd för betong och sprutbetong i tunnlar"* SP Rapport 2010:70

Boström L, McNamee R., Albrektsson J. & Johansson P. (2018) *"Screening test methods for determination of fire spalling* of concrete" RISE Report : 2018:05

Coates J. (1996) *"HSE warned of fire risk three years ago Chunnel: They have been told"* Construction News No. 6494, December 5, 1996.

Efectis (2020) *"Fire testing procedure for concrete tunnel linings and other tunnel components"* Report Efectis-R0695:2020

EN 1992-1-2: Design of Concrete Structures – Part 1-2: General Rules- Structural fire design, December, 2004

Hertz (2003) *"Limits of Spalling of Fire-Exposed Concrete"* Fire Safety Journal 38, pp.103-116.

Häggström J., Wahlström B. & Hjolman M. (2007) "Brandskydd av tunnelkonstruktioner" SveBeFo Rapport 82, 2007

Höj N. P. & Tait C. (19998) *"Great Belt Tunnel Repairs and Refurbishment Following a Fire"* 2nd International Conference on Tunnel Management, Operation and Maintenance, Seminar on Tunnel Fires, Hong Kong, China, February 16-18, 1998.

Jansson R. (2008) *"Material properties related to fire spalling of concrete"* Licentiatavhandling, Report TVBM-3143 Lunds tekniska högskola, 2008

Jansson R. (2013) *"Fire spalling of concrete- Theoretical and Experimental studies"* Doktorsavhandling, KTH, Stockholm Sweden, 2013.

Jansson R. (2013b) *"Fire spalling of concrete - A historical overview"* Keynote at the 3rd International RILEM Workshop on Concrete Spalling due to Fire Exposure, Paris, France, Sept. 2013

Jansson R. & Boström L. (2012) *"Brandspjälking av betong är mer än materialegenskap"* Husbyggaren, Nr 2, 2012

Jansson R. & Boström L. (2010) *"The influence of pressure in the pore system on fire spalling of concrete"* Fire Technology, Vol 43, No 1, pp 217-230.

© RISE Research Institutes of Sweden

Jansson R. and Boström L.(2012b)*"Determination of fire spalling of concrete – relevance of different test methods"* Proceedings from the 7th International Conference on Structures in Fire, M. Fontana, A. Frangi, M. Knobloch (Eds.), Zurich, Switzerland, June 6-8, 2012

Jansson R. & Boström L. (2013) "Factors influencing fire spalling of self compacting concrete" Materials and Structures 46:1683–1694

Jansson R., Ödeen K. (2011) *"Fire in Storehouse 6 in the Free Port of Stockholm"* Proceedings of the 2nd International RILEM Workshop on Concrete Spalling due to Fire Exposure, Delft, The Netherlands Oct. 2011

Juknat M. & Dehn F. (2017) *"Influence of the Test Specimen Dimensions and the External Mechanical Load Application on the Fire and Spalling Behavior of Tunnel Concretes"* Proceedings from the 5th International Workshop on Concrete Spalling Borås, Sweden, 12-13 October 2017

Lankani H., Pham D T., Msaad Y., Pimienta P. & McNamee R. (2020)*"Effect of loss of concrete cover due to spalling on response of simply supported RC beam during fire"* fib SYMPOSIUM, 2020

Lindblad Å., Pettersson O., Schmidt B. & Ödeen K. (1966) "Brand i magasin 6 i Stockholms frihamn", Väg- och vattenbyggaren nr 12, 1966

McNamee R. (2019) *"Fire spalling theories- Realistic and more exotic ones"* Keynote at the 6th International RILEM Workshop on Concrete Spalling due to Fire Exposure, Sheffield, UK, September 19-20, 2019

McNamee R. & Ödeen K. (2021) *"Standardbrandkurvan– En pigg 103-åring?"* Bygg & Teknik, nr 5, 2021

Mindeguia J-C., Pimienta P., Carre H., La Borderie C. (2009) *"Experimental study on the Contribution of Pore Vapour Pressure to the Thermal Instability Risk of Concrete*, Proceedings of the 1st International Workshop of Concrete Spalling due to Fire Exposure, Leipzig, 2009

Mohammadi Mohaghegh, A., Silfwerbrand J., Årskog V. & Jansson McNamee R. (2017) *"Fire Spalling of High-Performance Basalt Fibre Concrete"* Nordic Concrete Research, ISSN 0800-6377, Vol. 57, nr 2, s. 89-102

Wierig H. J. (1963) *"Das Verhalten von Betonwaren und Stahlbetonfertigteilen im Feuer"* Betonstein-Zeitung, 29 (8): 395-407; (9): 443-45l; (10): 503-510, 1963: translated to English by National Research Rouncil of Canada, Technical Translation 1317.

© RISE Research Institutes of Sweden

Through our international collaboration programmes with academia, industry, and the public sector, we ensure the competitiveness of the Swedish business community on an international level and contribute to a sustainable society. Our 2,800 employees support and promote all manner of innovative processes, and our roughly 100 testbeds and demonstration facilities are instrumental in developing the future-proofing of products, technologies, and services. RISE Research Institutes of Sweden is fully owned by the Swedish state.

I internationell samverkan med akademi, näringsliv och offentlig sektor bidrar vi till ett konkurrenskraftigt näringsliv och ett hållbart samhälle. RISE 2 800 medarbetare driver och stöder alla typer av innovationsprocesser. Vi erbjuder ett 100-tal test- och demonstrationsmiljöer för framtidssäkra produkter, tekniker och tjänster. RISE Research Institutes of Sweden ägs av svenska staten.

RISE Research Institutes of Sweden AB
Box 857, 501 15 BORÅS
Telefon: 010-516 50 00
E-post: info@ri.se, Internet: www.ri.se

BrandForskning
RISE Rapport 2021:118
ISBN: 978-91-89561-09-0

© RISE Research Institutes of Sweden