

RAPPORT

# Tunnelsäkerhet

## Dimensioneringsmetod för tunnelkonstruktioner

Beslutsunderlag och beräkningsmodell för temperaturer i tunnlar med spårbunden persontrafik

Forsknings- och utvecklingsuppdrag

Foto: Per Rolén



Dokumenttitel: Dimensioneringsmetod för tunnelkonstruktioner – Beslutsunderlag och beräkningsmodell för temperaturer i tunnlar med spårbunden persontrafik.  
Skapat av: Haukur Ingasson och Ying Zhen Li, SP Fire Research, Niclas Åhnberg och Johan Häggström, Brandskyddslaget AB  
Dokumentdatum: 2017-08-30  
Dokumenttyp: Rapport 2017:108  
DokumentID: ISBN 978-91-7725-105-7  
Ärendenummer: TRV 2016/69/69492  
Projektnummer: 6245  
Version: 1.0

Publiceringsdatum: 2017-09-01  
Utgivare: Trafikverket  
Kontaktperson: Olle Olofsson  
Uppdragsansvarig: Jan Ekström  
Tryck:  
Distributör: Trafikverket, 781 Borlänge, telefon: 0771-921 921

# Innehåll

1.	Inledning.....	4
2.	Bakgrund.....	5
3.	Lagar och regler.....	8
4.	Sannolikhet och brandeffekt.....	9
4.1	Sannolikhet för tågbrand med stopp i tunnel.....	9
4.2	Brandstorlek i enskild vagn.....	10
4.3	Brandbelastning och brandens varaktighet.....	12
5.	Temperaturpåverkan vid förflyttningsbar brand.....	14
5.1	Förflyttningsbar brand.....	14
5.2	Brandspridningshastighet mellan vagnar.....	14
5.3	Temperaturer ovan olika delar av tåget.....	15
6.	Antaganden och förutsättningar.....	17
7.	En förenklad metod för dimensionerande tid-temperaturkurvor.....	20
7.1	Metod för beräkning av temperatur i höjd med taket.....	20
7.2	Metod för dimensionerande brandeffekt för en personvagn.....	20
7.3	Arbetsgång.....	20
7.4	Exempel - energiinnehåll på 75 GJ enligt Figur 3.....	22
7.5	Exempel - 60 minuters varaktighet.....	25
7.6	Exempel - 120 minuters varaktighet (förflyttningsbar brand).....	27
8.	Korrigerig av maximal temperatur – steg 5 och 6.....	29
8.1	Exempel – 75 GJ enligt Figur 3.....	31
8.2	Exempel – 60 min varaktighet.....	32
8.3	Exempel – 120 min varaktighet.....	34
9.	Sammanfattning och slutsatser.....	35
10.	Referenser.....	36
	Bilaga A – Bakgrund: lagar och regler.....	37
	Bilaga B – Brandskydd i tunnelkonstruktioner.....	40

# 1. Inledning

Syftet är att utveckla en ny dimensioneringsmetod för tunnelkonstruktioner som är utsatta för brand. Metoden bygger på ett analytiskt tillvägagångssätt och gäller för tunnlar med spårbunden persontrafik (ej godstransporter).

Det är viktigt att tunnelkonstruktionen håller för den brandbelastning den kan komma att utsättas för. I de flesta fall utgörs brandbelastningen av de fordon som trafikerar tunneln. Beräkning av vilken storleksordning av brandbelastning som ska användas vid dimensionering görs på grundval av det antal och de typer av fordon som förväntas trafikera tunneln kombinerat med den uppskattade brandrisken. Detta ger underlag för den riskbedömning som ligger till grund för valet av dimensionerande brandeffektkurvor, vilka beskriver hur branden utvecklas under den tidsperiod för vilken det krävs att tunnelns bärande system står emot brandpåverkan.

Vid dimensioneringen krävs det inte enbart kunskap om de fordon som är inblandade i branden utan även vilken typ av tunnelkonstruktion det rör sig om: en renodlad betongtunnel med armering, en bergtunnel med sprutbetong över ett isolerande skikt, eller en tunnel med betongvalv. Det finns många olika typer av tunnelkonstruktioner, men gemensamt för dem alla är att de ska tåla den värmepåkänning de kan komma att utsättas för. Tunneltaket får inte heller rasa in eftersom detta skulle innebära risk för att hela konstruktionen kollapsar och därmed livsfara för den räddningspersonal som utför brandsläckningsarbetet.

Gällande betongtunnlar är frågan om huruvida brandspjälkning av betong, vilket innebär att uppvärmningen leder till att det yttersta betonglagret sprängs bort, uppkommer. Det är en avgörande faktor för dimensionering av tunnelkonstruktionens bärförmåga. Det finns olika lösningar för att förhindra spjälkning, varav de vanligaste är tillsats av plastfibrer i betongen eller att konstruktionen skyddas med hjälp av skivor av isoleringsmaterial. Spjälkning av stora ytor kan leda till att armeringen friläggs och exponeras för branden, vilket försämrar bärförmågan i det exponerade området. Risken för spjälkning ökar vid snabb och kraftig ökning av värmepåkänningen.

Det är ovanligt att delar av en tunnel kollapsar på grund av brand, men det är känt att skador på innertak eller lokala spjälkningsskador på konstruktionen har inträffat. Skadeomfattningen är avgörande för reparationsstilleståndets längd. Dimensioneringen fokuserar främst på att förhindra kollaps av tunneln och går till som så att en standardiserad tid-temperaturkurva väljs, vilken fyller en viktig funktion vid dimensionering av tunnelkonstruktionens bärförmåga (de olika kurvorna beskrivs närmare i nästa kapitel). I många projekt har förvirring och osäkerhet uppstått gällande valet av tid-temperaturkurva, vilket ofta beror på att detta val setts som oberoende av brandbelastning och dimensionerande brand.

För att lösa ovanstående dilemma behövs en metod som kan koppla den dimensionerande branden till en motsvarande tid-temperaturkurva. Att på detta sätt koppla valet av tid-temperaturkurva till den förväntade brandbelastningen minskar osäkerheten och därmed behovet av diskussion kring valet. Beroende på tunneltyp och beräknad trafikmängd kan sedan en mer noggrann analys utföras, vilken bygger på mer nyanserade ingenjörsmässiga metoder. Den metod som presenteras här bygger på enkla grafiska lösningar vilka tar hänsyn till såväl brandbelastningen som tunnelns geometri

och ytbeskaffenhet. Metodens teoretiska grunder presenteras i en separat SP-rapport [1].

Denna rapport inleds med en kort bakgrundsbeskrivning och redogörelse för hur brandeffektkurvor för persontåg tas fram. Därefter följer en beskrivning av både den förenklade grafiskametoden och en mer avancerad, kompletterande metod.

I kapitel 2 ges en sammanfattning av de olika tid-temperaturkurvor som finns idag och kapitel 3 ger en kort sammanfattning av de regler och lagar som gäller för tunnlar bärfförmåga. I kapitel 3 görs också en hänvisning till bilaga A, i vilken mer detaljerad bakgrundsinformation kring den historiska utvecklingen av regler och lagar för bärfförmåga fram till dags dato presenteras. I kapitel 4 ges en sammanfattning av hur dimensionerande brandeffektkurvor för persontåg tas fram, vilka utgör den viktigaste parametern i den nya metod som presenteras i kapitel 6 och 7. Kapitel 4 bygger på en befintlig rapport som behandlar dimensionerande brandeffektkurvor för persontåg i tunnlar [2]. I kapitel 5 ges en kort sammanfattning av förflyttningsbara bränder (travelling fires), vilket också är av betydelse för den nya metoden. I kapitel 6 presenteras de antaganden och förutsättningar som ligger till grund för den förenklade metoden. I kapitel 7 presenteras metoden i detalj i samband med att förklaring ges av hur den är tänkt att användas. Kapitel 8 tar upp de korrigeringar som det kan bli nödvändigt att göra med hänsyn till tunnelkonstruktionens ytbeskaffenhet och vilka blir aktuella att utföra om tunneln inte uppfyller de krav som ställs i den förenklade metoden (kapitel 6 och 7). Kapitel 9 innehåller en kort diskussion och i kapitel 10 ges de viktigaste slutsatserna. Bilagorna innehåller kompletterande information om lagar och regler (bilaga A) och olika sätt att skydda konstruktioner (bilaga B).

## 2. Bakgrund

Vid projektering av bärfförmågan i en tunnel med spårbunden persontågstrafik föreligger krav på användning av standardiserade tid-temperaturkurvor. Dessa kurvor består vanligtvis av antingen en ISO- [3] eller HC-kurva [4] och antas simulera brandförloppet genom den angivna standardiserade brandgastemperaturen. I många projekt används en brandvaraktighet om 120 minuter, men även 90 och 60 minuter kan användas.

De vanligaste standardiserade tid-temperaturkurvorna för tunnlar visas i Figur 1. Olika regelverk hänvisar till olika tid-temperaturkurvor. Standardkurvan enligt ISO 834 (EN 1363-1) [3] har sitt ursprung i brand i byggnader (cellulosabrand) och används oftast för provning av byggnadskonstruktionsdelar, medan HC-kurvan (EN 1363-2; även kallad "kolvätekurvan") [4], vilken idag ofta används i tunnlar, ursprungligen togs fram för brandprovning inom den petrokemiska industrin (t.ex. för oljeplattformar).

Nedan ges en ekvation för ISO kurvan där  $T$  är temperaturökningen i °C som funktion av tiden  $t$ .  $T_0$  är temperaturen i tunneln före brandstart.

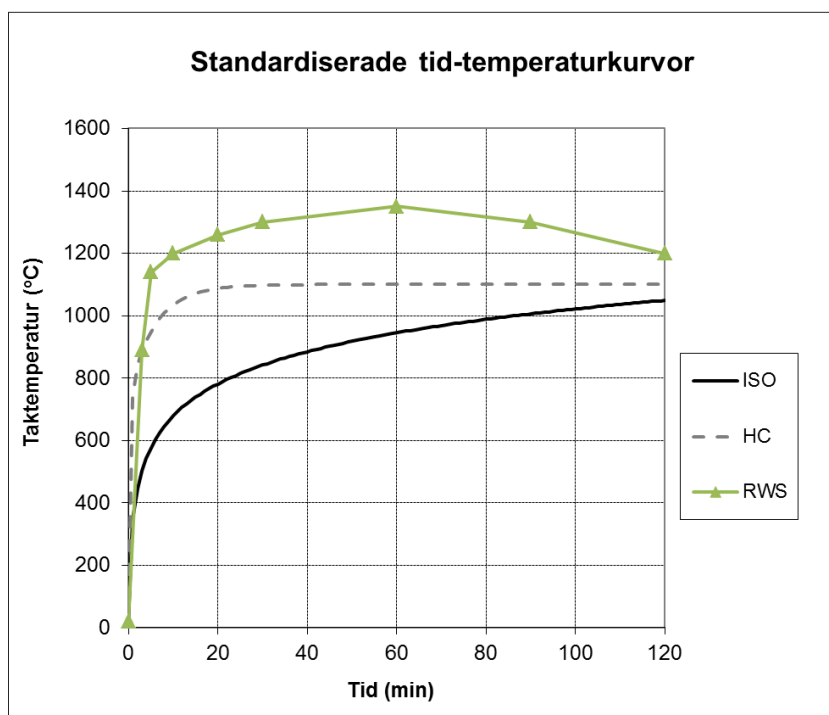
$$T(t) = T_0 + 345 \log(8t+1) \quad (1)$$

Det finns även ett matematiskt uttryck för HC-kurvan som ser ut på följande sätt:

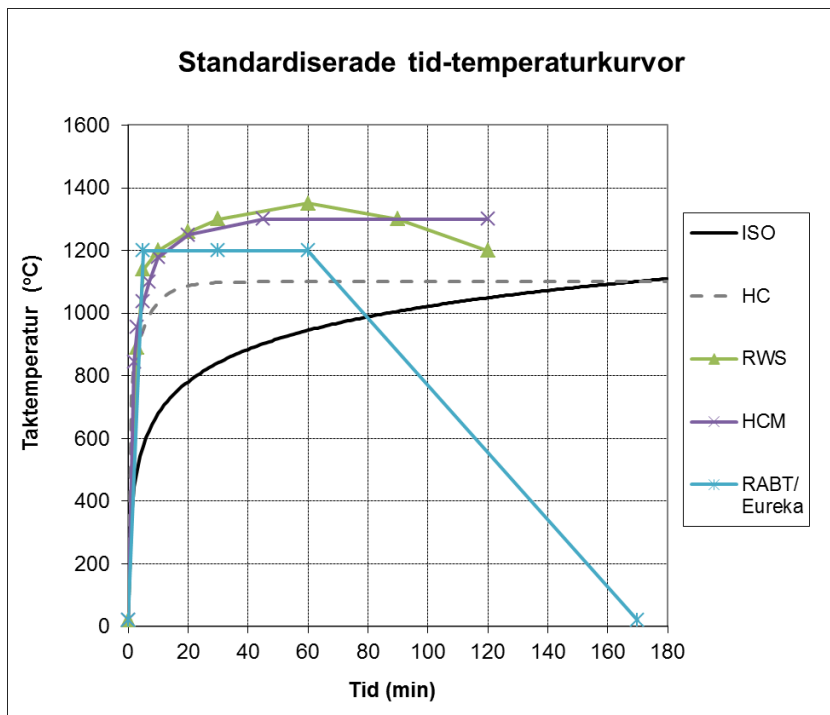
$$T(t) = T_0 + 1080(1 - 0.325 \exp^{-0.167t} - 0.675 \exp^{-2.5t}) \quad (2)$$

RWS-kurvan [5] används nästan uteslutande i vägtunnlar och ger de högsta temperaturvärdena. Denna kurva är framtagen av nederländska vägverket (Rijkswaterstaat, RWS) och bygger på modellskaleförsök med vätskebränder som utförts av TNO (Netherlands Organisation for Applied Scientific Research) i syfte att simulera en brand i en tankbil motsvarande 50 m<sup>3</sup> bränsle (olja eller bensin), vilket resulterar i en 300 MW brand med en varaktighet om 120 minuter. Motsvarande temperaturer uppmättes i Runehamarförsöken 2003, i vilka en långtradarlast användes, och bekräftade därmed de relativt höga temperaturnivåer som branddimensionering enligt RWS-kurvan kan ge i vägtunnlar [6].

Förutom de tre etablerade tid-temperaturkurvorna finns det ytterligare några, vilka med avseende på temperatur placerar sig någonstans mitt emellan den högsta (RWS) och den lägsta (ISO). Två exempel är RABT/ZTV, den så kallade "EUREKA-kurvan" för tåg, och HCM, vilken har samma form som HC-kurvan förutom att dess högsta temperatur är 1300 °C (se Figur 2). Notera att tiden i Figur 2 är utökad till 180 minuter jämfört med 120 minuter i Figur 1.



Figur 1. Tid-temperaturkurvor för brand i byggnader och tunnlar med varaktighet upp till två timmar [7].



**Figur 2. Tid-temperaturkurvor för brand i byggnader och tunnlar med varaktighet upp till tre timmar.**

Vilken tid-temperaturkurva som ska användas för ett specifikt projekt är inte givet, utan oftast ett val som görs baserat på beslut tagna inom projektet. Om ett regelverk som tydligt talar om vilken kurva som ska användas finns, görs valet i många fall på grundval av detta och i annat fall byggs det oftast indirekt på den brandbelastning som kan förväntas i den aktuella tunneln. Med undantag av avancerade CFD<sup>1</sup>-beräkningar har det tidigare inte funnits någon enkel beräkningsmodell som baserar sig på den dimensionerande brandens brandeffekt mätt i MW. Det har emellertid skett en förändring gällande möjligheten att genomföra enkla ingenjörsmässiga beräkningar av de aktuella gastemperaturerna i och med att Li och Ingason [8] utvecklade en metod som skapar ett samband mellan brandeffekt (MW), brandbelastning (GJ), ventilation (m/s) och tunnelns geometri (tunnelhöjd i meter). Detta har gjort det möjligt att ersätta de mer avancerade numeriska 3D-beräkningarna (CFD) med enklare, ingenjörsmässiga sådana.

Tid-temperaturkurvor har både tillkommit och tagits bort i lagar och regelverk: Exempelvis har EUREKA-kurvan (RABT/ZTV, tåg) för betongtunnlar tagits bort i senaste versionen av TSD:n (EU:s tunneldirektiv). Detta bidrar i hög grad till en förändrad situation eftersom det dokument som har varit det styrande för svenska tunnlar, Trafikverkets tekniska krav för tunnlar (TRVK Tunnel 11), hänvisar till en HC-kurva, medan det är sannolikt att en ISO-kurva kommer att användas vid branddimensioneringen av Stockholms nya tunnelbana. Detta visar på den osäkerhet som råder kring val av tid-temperaturkurva och behovet av att ta fram en mer nyanserad ingenjörsmässig metod att basera detta val på. Ett otydligt regelverk öppnar för möjligheten att använda beräkningsmodeller av mer analytisk natur.

<sup>1</sup> Computational Fluid Dynamics.

Den teoretiska bakgrunden till den analytiska metod som läggs fram i denna rapport presenteras i SP-rapport [1]. En vidareutveckling av denna metod har gjorts inom ramen för det projekt som presenteras i denna rapport och innebär att resultaten anpassats till det sätt på vilket man idag utför branddimensionering av tunnelkonstruktioner.

### 3. Lagar och regler

En viktig aspekt i detta arbete är de lagar och regler som gäller för dimensionering av tunnelkonstruktioners bärförmåga, varför en översikt av området ges här. I bilaga A ges en historisk bakgrund till de lagar och regler som berör järnvägstunnlar och brandmotstånd. De krav, regler och standarder som gäller för brandmotstånd i tunnlar för spårbunden trafik i Sverige uppvisar stor variation med avseende på kravnivåer och detaljgrader.

Översikten visar att befintliga tid-temperaturkurvor varierar mellan R 60 och R 120, där R står för bärförmåga och siffran anger antal minuter av brandmotstånd, samt att de även använder sig av brandklasserna EI 60 och EI 90, där E står för brandtätthet och I för isolering. De värden som finns beskrivna i nu gällande TSD/TDOK-regelverk (se bilaga A) är antingen EI 60 eller EI 90 minuter – tidigare fanns även HC 180 (en HC-kurva för en brandvaraktighet om 180 minuter) beskriven, men är numera borttagna. I Transportstyrelsen senaste remiss gällande branddimensionering av Stockholms nya tunnelbana föreslås det att HC 120 ska användas.

I TRVK Tunnel 2011 avsnitt D.4.4 anges att järnvägstunnlar i vilka enbart persontransporter tillåts ska dimensioneras enligt HC 120. Sedan 18 november 2014 finns en ny TSD för "säkerhet i järnvägstunnlar" (nr 1303/2014), vilken dock ännu inte implementerats i TRVK Tunnel 11. I denna TSD har en kravändring gjorts för det bärande huvudsystemet i tunnlar. Denna ändring innebär att en tunnels bärande huvudsystem måste klara av att stå emot brandtemperaturen under en tillräcklig lång tid för att utrymning av de hotade delarna av tunneln samt av närliggande byggnadsverk ska kunna ske.

I Trafikverkets skrift TDOK 2016:0231 anges att den inredning som markerar gränsen mellan ett trafikutrymme och ett utrymme som ingår i en utrymnings- eller angreppsväg ska uppfylla kraven för brandteknisk klass REI 90, medan övrig inredning i ett trafikutrymme ska uppfylla kraven för brandteknisk klass R 60. Undantag får göras för inredning som är placerad eller utformad så att den, om den skulle falla ner, inte utgör hinder eller fara vid räddningsinsats.

Det förutsätts att gastemperaturen vid brand i ett trafikutrymme följer kolvätekurvan (HC) enligt det uttryck som anges i SS-EN 1363-2, kapitel 4.2 med följande varaktighet:

- 180 minuter i en järnvägstunnel där godstransporter är tillåtna.
- 120 minuter i en järnvägstunnel där godstransporter inte är tillåtna.

Tunnel som leder under fritt vatten samt tunnel vars kollaps kan påverka en byggnads stabilitet ska dimensioneras så att avsvälning efter brand inte leder till kollaps, varvid avsvälningshastigheten ska sättas till 600 °C/h.



## 4. Sannolikhet och brandeffekt

I följande kapitel redovisas de metoder och antaganden som använts vid framtagandet av dimensionerande bränder för persontåg [2]. Syftet är att bidra till bättre förståelse för hur en dimensionerande brandeffektkurva tas fram samt hur erforderligt beslutsunderlag skapas. Den dimensionerande brandeffektkurvan är viktig eftersom den fungerar som en ingångsparameter i den nya metod som presenteras i denna rapport.

De konsekvenser som en brand i en tunnel resulterar i är beroende av brandens storlek (högsta brandeffekt angivet i MW) och varaktighet (den totalabrandbelastningen i tåget angivet i GJ) och kan innebära att tunnelkonstruktionen skadas och/eller kollapsar helt eller delvis. Det är av förklarliga skäl svårt att ta fram enkla metoder för att beräkna sannolikheten för att den grad av kollaps som inträffar på grund av brandpåverkan ska kunna bedömas som acceptabel. Trots att det inom olika typer av skyddsklasser anges värden som är kopplade till sannolikheter, vilka i sin tur är baserade på generella antaganden gällande brandlaster. Dock finns det svårigheter att använda dessa rakt av för olyckslaster exempelvis vid brand. Det som menas med "sannolikt" är hur troligt det är för en viss händelse att inträffa.

Om en tunnel inte är byggd så att den passerar under ovanliggande byggnader eller vatten är den del av skyddsvärdet som grundar sig på personskydd relativt lågt, vilket betyder att en relativt sett högre sannolikhet för lokal kollaps kan tillåtas. Då en stängd järnvägstunnel resulterar i mycket höga kostnader för samhället ligger det i Trafikverkets intresse att gränserna sätts så högt som möjligt.

### 4.1 Sannolikhet för tågbrand med stopp i tunnel

Ett ungefärligt antal tågbränder med stopp i en tunnel kan beräknas genom att multiplicera antalet tåg som är i trafik per år med det genomsnittliga antalet bränder per tågkm, tunnelns längd samt andelen bränder där tåget inte fortsätter ut ur tunneln. Uppgifter om inträffade bränder i persontåg kan hämtas från Trafikverkets databas, Synergi, samt Myndigheten för samhällsskydd och beredskaps (MSB) databas för insatsrapporter, IDA.

Utdragen från Synergi har samkörts med utdragen från MSB:s insatsrapporter för perioden januari 2002 till juli 2012. Av de inrapporterade insatserna startade 183 bränder i järnvägsfordon för persontrafik (exklusive bränder i uppställda fordon, andra typer av fordon eller bränder som startat utanför fordonen). Under samma period producerades ca 1 miljard persontågskm<sup>2</sup> på Sveriges järnvägar, vilket ger en total brandfrekvens på  $2 \cdot 10^{-7}$  bränder per tågkm. Brandfrekvensen, vilken här avser antal likartade händelser som inträffat inom ett givet tidsintervall, har historiskt sett varit lägre för motorvagnsfordon än lokdragna fordon och trenden i Sverige går mot en ökning för motorvagnsfordon. En brandfrekvens på ca  $4 \cdot 10^{-8}$  bränder per fordonskm har använts i säkerhetsvärderingar i ett flertal stora tunnelprojekt såsom Citybanan och Västlänken.

Andelen bränder där tåget inte fortsätter ut ur tunneln beror dels på tunnelns längd och dels på om de inblandade fordonen uppfyller europadirektiven gällande framdriftsförmåga vid brand eller hävning av nödstopp. I exempelvis Citybanan med ca

---

<sup>2</sup> Bantrafik 2012 och Bantrafik 2009, <http://www.trafa.se/bantrafik/bantrafik/>.

1500-2000 m mellan stationer/mynningar antogs exempelvis att fordonet stannade i tunneln (mellan stationer) i 6 % av fallen<sup>3</sup>.

Totalt sett blir sannolikheten för fordonsbrand med stopp i en 1 km lång tunnel i storleksordningen  $1 \cdot 10^{-8}$  multiplicerat med antalet fordon per år.

#### 4.2 Brandstorlek i enskild vagn

Av 183 inrapporterade brandincidenter har 83 % varit mindre omfattande så till vida att de självslocknat eller kunnat släckas med hjälp av handbrandsläckare och 2 % så pass omfattande att en hel vagn blivit utbränd eller att branden p.g.a. intensitet och omfattning ansetts vara särskilt svårsläckt. I tunnlar där möjligheterna att utföra släckinsatser kan anses vara relativt begränsade kan dock andelen bränder vilka resulterat i omfattande brandskador antas vara högre än 2 % [2].

Som ett exempel kan nämnas Citybanan, där andelen bränder i persontåg som riskerar att nå en brandeffekt på över 1 MW antogs vara 10 % och fördelade enligt NFPA:s (National Fire Protection Association) kurvor för brandtillväxthastighet – ”Slow”, ”Medium”, ”Fast” och ”Ultrafast” – enligt nedan:

- 5 % bränder med brandtillväxthastighet motsvarande NFPA Slow ( $0.003 \cdot t^2$ ) upp till 15 MW.
- 5 % bränder med brandtillväxthastighet motsvarande NFPA Medium ( $0.012 \cdot t^2$ ) upp till 15 MW.<sup>4</sup>

Utifrån EUREKA-testerna har en brandeffektkurva som motsvarar NFPA Medium upp till 15 MW bedömts rimlig och använts vid branddimensionering i samband med utrymning för ett stort antal tunnlar i Sverige under perioden 1990-2010 [2]. Senare forskning har dock visat att maximal potentiell brandstorlek varierar mellan olika fordonstyper [7].

En bedömning av vilken tid-brandeffektkurva som ska användas för varje enskild del av tunnelsystemet görs enligt den metod som finns beskriven i en rapport från Trafikverket [2] och baseras på statistik över brandstorlekar samt analys av de tågtyper som trafikerar tunneln.

För motorvagnsfordon föreslås följande scenarier med tillhörande brandeffektkurvor såvida inte annat kan visas med hjälp av fördjupad analys av fordonet:

- A. Brand med mindre tändkällor (elfel, små bagage och mindre anlagda bränder)
- B. Brand i kupé med mycket vandaliserat säte eller tändkälla mellan 10 och 200 kW
- C. Brand i kupé med tändkälla över 200 kW samt stor mängd kvarlämnat bagage
- D. Betydande brand i underrede/förarhytt (inklusive vidare brandspridning)

Fördelningen mellan scenarierna kan enligt metoden antas vara A: 85 %, B: 2,5 %, C: 2,5 % och D: 10 %, se referens [2].

Det bör noteras att metoden för framtagande av dimensionerande brandeffekt innehåller osäkerhet gällande framför allt indata i form av framtida trafikerande fordon. I syfte att ge utrymme för felmarginal görs därför ett antagande att cirka 15 % av

<sup>3</sup> PM Säkerhetsvärderingen för Citybanans tunnlar, Dokumentnr 9552-2007-025-82, Trafikverket.

<sup>4</sup> PM Säkerhetsvärderingen för Citybanans tunnlar, Dokumentnr 9552-2007-025-82, Trafikverket.

tågbränder som inträffar i tunnlar sprider sig maximalt inom den branddrabbade vagnen, trots att statistiken endast anger ett genomsnitt på 2 %, oavsett var utmed spåret branden inträffar.

Föreslagna brandeffektkurvor för respektive scenario presenteras i Tabell 1, där det görs skillnad mellan olika ytskikt och huruvida någon eller några ytterdörrar, dvs. dörrar som leder från passagerarutrymmet och ut ur tåget, är öppna. EUREKA-testerna utfördes i huvudsak med stängda ytterdörrar. Vid en nödutrymning i en tunnel antas ytterdörrarna däremot stå öppna. Det ska dock noteras att flera vagnstyper innehåller självstängande innerdörrar mellan vestibuler och passagerarutrymmen, vilket hämmar syretillförseln och därmed även brandutvecklingen.

**Tabell 1. Föreslagna brandeffektkurvor för brandscenerierna A-D, angivna enligt NFPA:s definitioner för brandtillväxthastighet samt för olika typer av ytskikt och med hänsyn till om tågets ytterdörrar antas vara öppna eller stängda.**

Scenario	Obrännbara väggar och tak och i övrigt enligt BS 6853 Vehicle Category 1 eller EN 45545-2 HL 2	Ytskikt enligt BS 6853 category 1 eller EN 45545-2 HL 2	Sämre ytskikt
<b>Öppna dörrar mellan passagerautrymmet och det fria</b>			
A.	Slow 1 MW	Slow 1 MW	Slow 1 MW
B.	Slow 15 MW	Medium 20 MW	Medium 1 MW och därefter Fast 60 MW
C.	Medium 15 MW	Fast 20 MW	Fast 60 MW
D.	Slow 15 MW	Slow 2 MW och därefter Medium 20 MW	Slow 2 MW och därefter Fast 60 MW
<b>Stängda dörrar mellan passagerautrymmet och det fria</b>			
A.	Slow 1 MW	Slow 1 MW	Slow 1 MW
B.	Slow 10 MW	Slow 1 MW och därefter Medium 15 MW	Medium 20 MW
C.	Medium 2 MW och därefter Slow 15 MW	Medium 20 MW	Fast 1 MW och därefter Medium 25 MW
D.	Slow 10 MW	Slow 2 MW och därefter Medium 15 MW	Slow 2 MW och därefter Medium 20 MW

Metoden ger fyra scenarier (A-D) som täcker in flertal möjliga brandeffektkurvor. Utrymningssäkerheten påverkas av en kombination av brandtillväxthastighet och maximal brandeffekt, där brandtillväxthastighet är den faktor som oftast har störst inverkan på utfallet. Vid brandpåverkan på tunnelns bärverk kan dock den maximala brandeffekten vara av överordnad betydelse för utfallet. Resultatet av en utvärdering av Strängnästunneln enligt den ovan beskrivna metod visade att en brandeffektkurva motsvarande NFPA Medium för brandeffekter upp till 20 MW (hädanefter refererat till som "NFPA Medium 20 MW") täcker in ca 98 % av de bränder som potentiellt kan inträffa i tunneln, och täckningsgraden ökade till 99,5 respektive 100 % för brandeffektkurvor motsvarande NFPA Fast 20 respektive 40 MW.

Hur stor andel av bränderna som ska täckas in av den dimensionerande tid-temperaturkurvan i en tunnel avgörs av den ambitionsnivå som satts upp för det aktuella projektet. En brandeffektkurva motsvarande NFPA Medium 20 MW kan antas täcka in majoriteten av de bränder som kan inträffa i en enskild vagn och NFPA Fast 60 MW kan antas täcka in även extremfall.

### 4.3 Brandbelastning och brandens varaktighet

Den beräknade brandbelastningen i en tågagn varierar. För en vagn i en våning kan en total brandbelastning på ca 3,5 GJ/löpmeter och en förbränningseffektivitet på ca 80 % (2,8 GJ/löpmeter) antas [2]. Dessa värden överensstämmer med det intervall inom vilket de värden som anges i Tabell 2 ligger. Medelvärde för samtliga typer av vagnar i tabellen är 2,5 GJ/löpmeter. För en 27 m lång vagn motsvarar detta en brandbelastning om ca 75 GJ efter justering för förbränningseffektivitet.

Om brandens avsvalningsfas antas vara liknande dess tillväxtfas kommer en brandbelastning om 75 GJ att börja ta slut, och brandeffekten därmed att avta, ca 70 minuter efter tändning enligt en brandeffektkurva som motsvarar NFPA Medium 20 MW. Det totala brandförloppet kommer att vara i 90 minuter. Om istället en brandeffektkurva som motsvarar NFPA Fast 60 MW används beräknas brandeffekten börja avta efter ca 30 minuter och det totala brandförloppet antas bli ca 45 minuter långt med motsvarande antagande gällande tillväxt/avsvälning (se Figur 3).

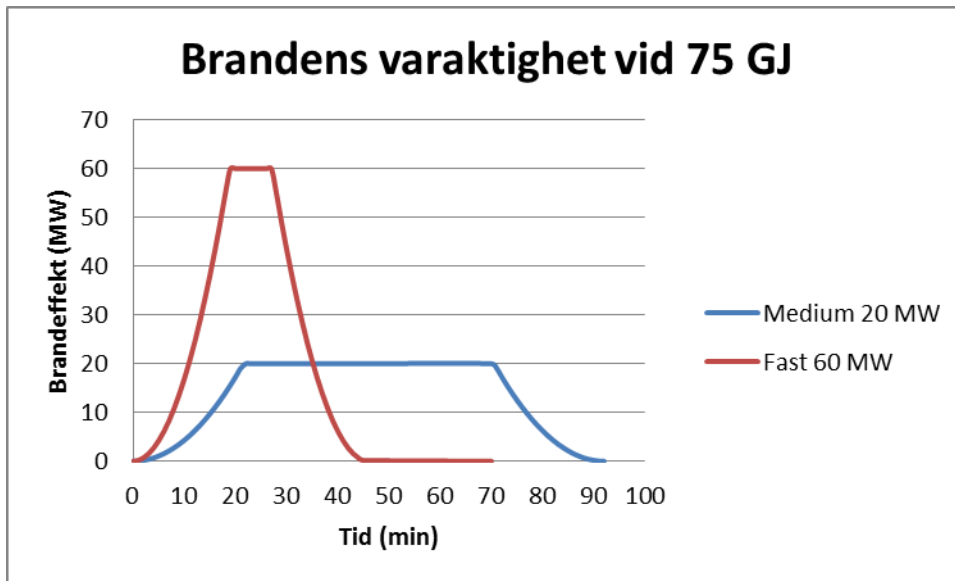
**Tabell 2. Beräknad brandbelastning för olika typer av tågagnar baserat på materialinnehåll och brandeffektutveckling.**

Vagn	Brandbelastning		Referens
	Totalt (GJ)	per meter (GJ/m)	
Halv stålvagn (13 m)	15,4 *	1,2	SP Rapport 2004:30
Halv stålvagn (13 m)	12,1 *	0,9	SP Rapport 2004:30
Två sammankopplade halvagnar (6,8 + 8,7 m)	14,6 + 42,8	3,7	SP Rapport 2004:30
ICE (Inter City Express), "modernt"	63	2,4	SP Rapport 2004:30
IC (Inter City), "former design" F11 (21 m)	77 * 55 **	3,7 * 2,6 **	Ingason H., Gustavsson S., Dahlberg M., Heat Release Rate Measurements in Tunnel Fires BRANDFORSK project 723-924. SP Report 1994:08.
Tunnelbanevagn F42 (18 m)	41 * 37 **	2,3 * 2,1 **	Ingason H., Gustavsson S., Dahlberg M., Heat Release Rate Measurements in Tunnel Fires BRANDFORSK project 723-924. SP Report 1994:08.

Vagn	Totalt GJ	per meter GJ/m	Referens
Koreanskt intercitytåg	50	1,9	George Hadjisophocleus, D. Hee Lee and W. Hee Park, <i>Full-scale Experiments for Heat Release Rate Measurements of Railcar fires</i> . Fifth International Symposium Tunnel Safety and Security, New York, USA, 2012.
Koreanskt tunnelbanetåg	25	1,0	George Hadjisophocleus, D. Hee Lee and W. Hee Park, <i>Full-scale Experiments for Heat Release Rate Measurements of Railcar fires</i> . Fifth ISTSS, New York, USA, 2012.
Pendeltåg X1	62 **	2,4	Lönnermark A., Lindström J., Zhen Y. and Ingason H., <i>Large Scale Commuter Train fire Tests – Results from the METRO Project</i> . Fifth International Symposium on Tunnel and Security, New York, USA, March 12-16, 2012.
Pendeltåg X1, kopia av modell C20	71 **	2,7	Lönnermark A., Lindström J., Zhen Y. and Ingason H., <i>Large Scale Commuter Train fire Tests – Results from the METRO Project</i> . Fifth International  Symposium on Tunnel and Security, New York, USA, March 12-16, 2012.
Citytunneln, Tåg A	82 *	3,2	Materialspecifikation – Brandsäkerhet, Dok. Nr: KO 99031, Datum:1999-02-01,  Revision: 1- 1999-02-08, ADtranz Sweden
Citytunneln, Tåg B	55 *	2,1	Materialspecifikation - Brandsäkerhet, Dok. Nr: KO 99031, Datum:1999-02-01,  Revision: 1- 1999-02-08, ADtranz Sweden
C20 (47 m)	170 *	3,6	Brandlastberäkning; Skillnadsstudie mot C20, Dok nr, 3EST7-512, Adtrans 2001-03-01.
A32 (30 m)	101 *	3,4	Överdäckning Tvärbanan - PM Dimensionerande tid-temperaturkurva, Brandskyddslaget, 2013-04-02.

\* Beräknat utifrån materialinnehåll.

\*\*Beräknat utifrån brandeffektutveckling.



Figur 3. Brandens varaktighet vid en brandbelastning om 75 GJ beräknat enligt brandeffektkurvor motsvarande NFPA Medium 20 MW och Fast 60 MW.

## 5. Temperaturpåverkan vid förflyttningsbar brand

### 5.1 Förflyttningsbar brand

En förflyttningsbar brand ('travelling fire') kan uppstå om en kontinuerlig tillgång på bränsle föreligger för en längre sträcka i en tunnel som t.ex. ett brinnande tågsätt. Branden kan då exempelvis sprida sig från en del av en vagn till tågsättets resterande delar. Brandens riktning och hastighet styrs av var och hur den startade samt av luftflödet inne i tunneln. Platsen där branden först påbörjar sin förflyttning[/startade] är därför av intresse vid studier av förflyttningsbara bränder. Detta i sin tur påverkar hur gastemperaturen i taket förändras och sprids.

Efter hand kommer brandbelastningen på den plats där branden startade att ta slut, varefter endast det segment av tåget dit branden spritt sig kommer att fortsätta att brinna intensivt. Hur stor del av ett tåg som brinner samtidigt påverkar maximala brandeffekten och är avhängigt både brandspridningstakt och ytmaterialens energiinnehåll.

Brandspridning från den initiala brandplatsen kan, om luftflödet är relativt högt ( $> 1,5\text{--}2,5\text{ m/s}$ ), ske i en riktning eller, om branden inträffar i en av vagnarna nära mitten av tåget och luftflödet är relativt lågt ( $< 0,5\text{ m/s}$ ), i två riktningar.

### 5.2 Brandspridningshastighet mellan vagnar

Under försök utförda inom ramen för Metro-projektet uppmättes en brandspridningstakt på ca  $1,5\text{--}1,8\text{ m/minut}$  efter en lokal övertändning inne i ett passagerarutrymme [9, 10]. Fordonet i fråga var en pendeltågsvagn med brännbara väggar och tak, öppna ytterdörrar och en brandtillväxthastighet motsvarande NFPA Ultrafast 60 MW ( $0,19 \cdot t^2$ ). Ungefär samma brandspridningstakt uppmättes vid både fullskaletester och nedskalade tester. Branden nådde vagnens motsatta ände ca 15 minuter efter att maximal brandeffekt uppnåtts, ungefär samtidigt som brandbelastningen började ta slut i ytskiktet på den plats där branden startade. Detta ledde fem minuter senare till att brandeffekten sjunkit till 20 MW och den fortsätter

därefter att sjunka gradvis. Detta överensstämmer relativt väl med en beräkning utförd för ett energiinnehåll om 75 GJ och en maximal brandeffekt om 60 MW (se Figur 3).

Enligt EU-direktiven gällande säkerhet i järnvägstunnlar ska passagerarutrymmen i tågen vara utrustade med brandbarriärer i klass E 15 (avskiljande förmåga i 15 minuter), vilka får vara placerade med maximalt 28 meters avstånd från varandra<sup>5</sup>, vilket i praktiken innebär att det ska finnas en brandbarriär i änden av varje vagn. Inga krav ställs emellertid på isolerande förmåga, vilket innebär att branden inte kommer att hindras från att sprida sig i 15 minuter utan endast att en reducering av brandspridningstakten lokalt längs tåget sker.

Om en brand startar i ena änden av en vagn så kommer brandspridning till närmsta intilliggande vagn ske inom 5–10 minuter efter det att en lokal övertändning inträffat. Vid en brandspridning med relativt hög hastighet (motsvarande NFPA Fast eller Ultrafast 60 MW) tar det minst 20 minuter för branden att övergå från en lokal övertändning i en vagn i ena änden av tågsättet till dess att den fått fäste i en vagn i motsatt ände. Vid det laget börjar brandbelastningen ta slut på den plats där branden startade. Detta innebär att ett antagande om att maximalt tre vagnar brinner intensivt samtidigt kan göras – i ett senare skede kan dock fler vagnar brinna samtidigt, men med betydligt lägre intensitet.

För obrännbara ytskikt i väggar, tak och öppna dörrar har en brandspridningstakt om 0,15–0,45 m/minut uppmätts, förutsatt att tillgång till brännbart material som t.ex. bagage föreligger och bidrar till brandspridningen [11]. Detta innebär att brandens intensitet kommer variera mellan de olika delarna av vagnen vid ett givet tillfälle. Vid en brandspridningstakt om 0,45 m/min efter det att en lokal övertändning inträffat beräknas det att branden färdas 27 m på 60 minuter, varefter det kommer att ta en stund för branden att ta sig igenom brandbarriären i änden av vagnen. En total brandbelastning om 75 GJ beräknas vara förbrukad efter ca 80 minuter vid en brand med en maximal brandeffekt om 20 MW (se Tabell 1). En del av EUREKA-testerna inbegrepp test av brand på ett Intercitytåg, för vilket dörren närmast brandens startpunkt lämnades öppen, vilket resulterade i en uppmätt brandspridningstakt om ca 0,3 m/min vid brandeffekter i spannet 10–13 MW. Detta stödjer det antagande som gjorts ovan om att maximalt tre vagnar kan antas brinna intensivt samtidigt.

Om brandspridning endast sker i en riktning längs tågsättet (förflyttningsbar brand) kan tiden det tar branden att sprida sig mellan en vagn till en annan komma att bli relativt kort. Det är därför rimligt att anta att flera vagnar kan brinna samtidigt, dock maximalt tre vagnar med en totallängd om 75 m.

### **5.3 Temperaturer ovan olika delar av tåget**

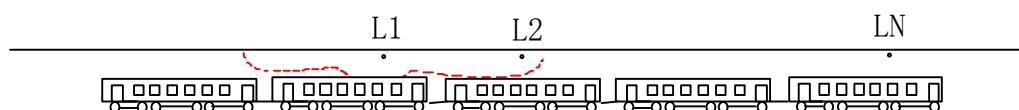
Vid förflyttningsbara bränder är den termiska brandpåverkan på tunnelkonstruktionen av stort intresse, eftersom den kommer att variera utmed tunnelns sträckning: Högst brandpåverkan på tunneltakets konstruktion uppkommer inte nödvändigtvis direkt ovanför den plats (vagn) där branden startade, utan kan uppkomma längre bort i den riktning branden sprider sig, varför de kumulativa effekterna av brandpåverkan på konstruktionen kan variera.

---

5 KOMMISSIONENS FÖRORDNING (EU) nr 1303/2014 av den 18 november 2014 om teknisk specifikation för driftskompatibilitet (TSD) avseende ”säkerhet i järnvägstunnlar” i järnvägssystemet i Europeiska unionen

Den högsta gastemperaturen uppnås i allmänhet på brandens nedströmssida, d.v.s. i den riktning från vilken luftströmmen kommer, eftersom det är därifrån syre tillförs och därmed den plats där den högsta syrenivån föreligger. Om branden förflyttar sig nedströms (från L1 till L2, osv. i Figur 4), d.v.s. i samma riktning som luftströmmen, förflyttas området där brandens har som högst temperatur i samma riktning. Hela brandförloppetets högsta temperatur uppnås i samband med att branden når andra delar av tågsättet, t ex. L2 eller LN, i förhållande till den initiala brandplatsen.

Armeringsstängernas temperatur påverkas inte främst av brandens högsta gas temperatur utan av brandens varaktighet. För att kunna beräkna den temperatur som armeringen maximalt kan komma att utsättas för är det därför av vikt att en helhetsanalys utförs, i vilken en analys av luftströmmen i tunneln kombineras med en analys av värmeledning i betongen. Med andra ord är det nödvändigt att simuleringar av de luftflöden som den förflyttningsbara branden ger upphov till tillsammans med värmeledningen in i konstruktionen utförs för att en komplett analys av förloppet ska kunna erhållas.



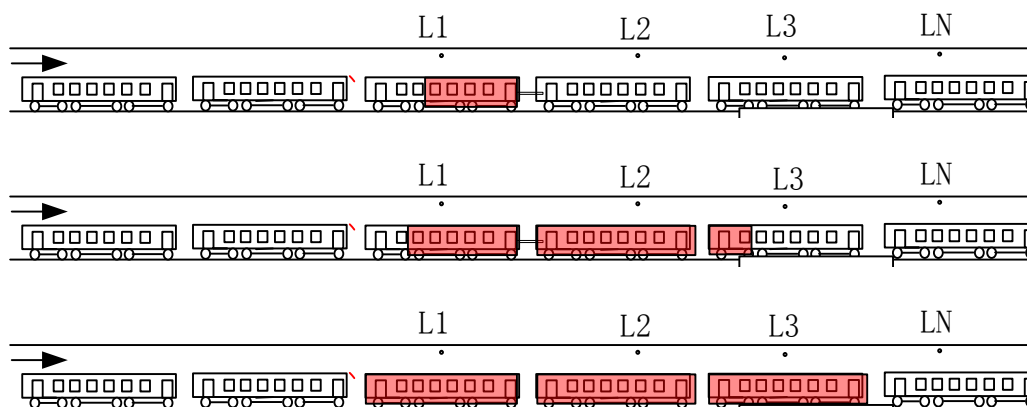
**Figur 4.** En förflyttningsbar brand ('travelling fire') som sprids från en av tågsättets första vagnar (L1) till dess sista (LN).

I de metoder som presenteras längre fram i rapporten kommer en förflyttningsbar brand av den typ som visas i Figur 4 att behandlas som en brand i en position, d.v.s. den position där branden uppstod, och det värde för energiinnehåll som kommer att användas motsvarar den andel vagnar i tågsättets som brinner samtidigt. Den dimensionerande branden (max brandeffekt) kommer däremot att motsvara brandeffektkurvan för en enda vagn. Dessa ställningstaganden görs för att vara på den säkra sidan gällande slutresultatet av dimensioneringen. Vidare görs ett antagande om att maximalt tre vagnar med en sammanlagd längd om högst 75 m (tre vagnar i en riktning eller en vagn i vardera riktningen med utgångspunkt i den vagn i vilken branden startar, totalt tre vagnar). Mer avancerade numeriska beräkningar krävs om branden antas innefatta fler vagnar eller den sammanlagda längden överstiger 75 m.

Initialbranden kan spridas i olika riktningar inne i tågen och mellan vagnar beroende på vindriktningen inne i tunneln. När det finns en längsgående ventilation så kommer det att påverka hur de flammor som kommer ut i från vagnarna böjs. Det i sin tur påverkar vidare brandspridning. I Figur 5 visas ett tänkbart brandförlopp när branden startar i en av vagnarna och sprids vidare till de närmaste vagnarna. Gas temperaturen i taket ökar gradvis i punkt L1 och även i L2, men den är betydligt lägre i början. När branden närmar sig punkt L2 så har temperaturen ökat avsevärt jämfört med när det endast brann i första vagnen. Branden sprids till tredje vagnen (se den röda färgen som markerar placeringen på branden). Till slut så antas alla tre vagnarna brinna och temperaturen i L3 uppnår sitt maximum. Den började påverkas redan när första vagnen började brinna. Nu har branden i första och andra vagnen börjat avta, samtidigt som branden förmodligen sprids vidare till fjärde vagnen och så småningom till den Nte vagnen. Samtidigt har första vagnen i stort sätt brunnet färdigt. Principiellt så kommer gas temperaturen i taket att bli högst vid L3, och påverkan motsvarar en brand som har motsvarande brandbelastningen som i tre vagnar. Detta är en förenkling men ett rimligt

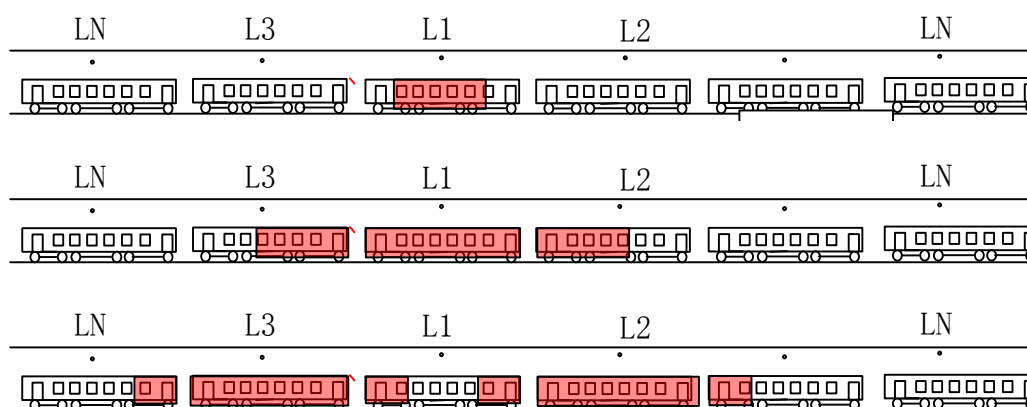


antagande för den enkla grafiska metod som presenteras i kapitel 8. Nivån på gas temperaturerna bestäms av maximala brandeffekten och den totala varaktigheten.



**Figur 5** En schematisk bild över hur branden sprids från första vagnen till tredje vagnen vid längsgående ventilation. Temperaturerna i taket vid positioner L1, L2 och L3 förändras kontinuerligt under förloppet. Högst tre vagnar brinner samtidigt.

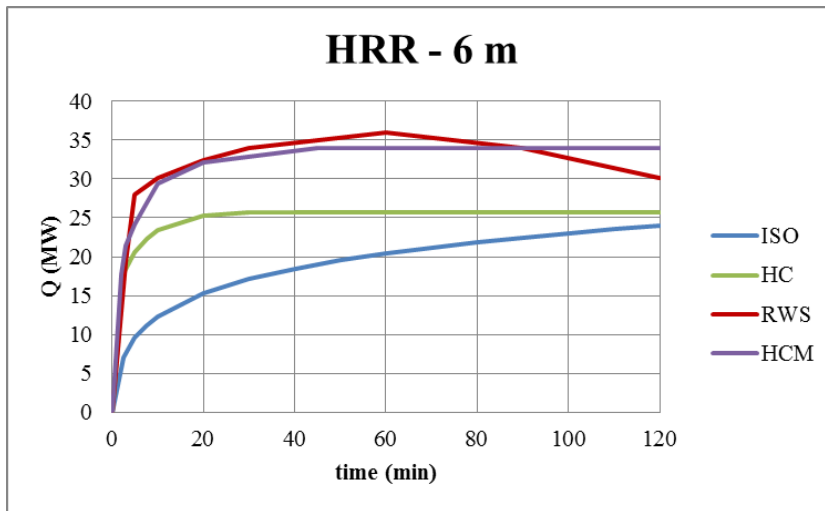
När den längsgående ventilationen är låg ( $<0,5$  m/s) eller ingen så kan man anta att brandspridningen sker enligt den princip som visas i Figur 6. Skillnaden är att inte lika många vagnar kan antas brinna samtidigt då brandspridningen är långsammare.



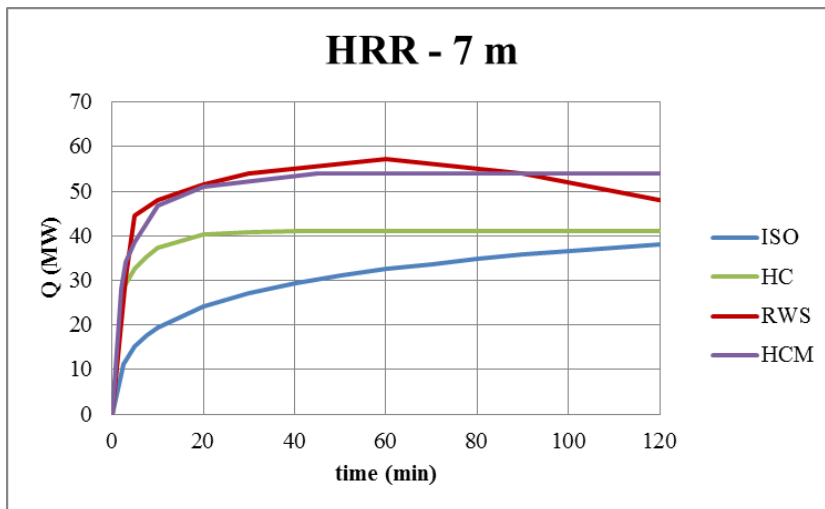
**Figur 6** En schematisk bild över hur branden sprids från första vagnen till den tredje vagnen utan längsgående ventilation. Temperaturerna i taket vid positioner L1, L2 och L3 förändras kontinuerligt under förloppet. Högst tre vagnar brinner samtidigt.

## 6. Antaganden och förutsättningar

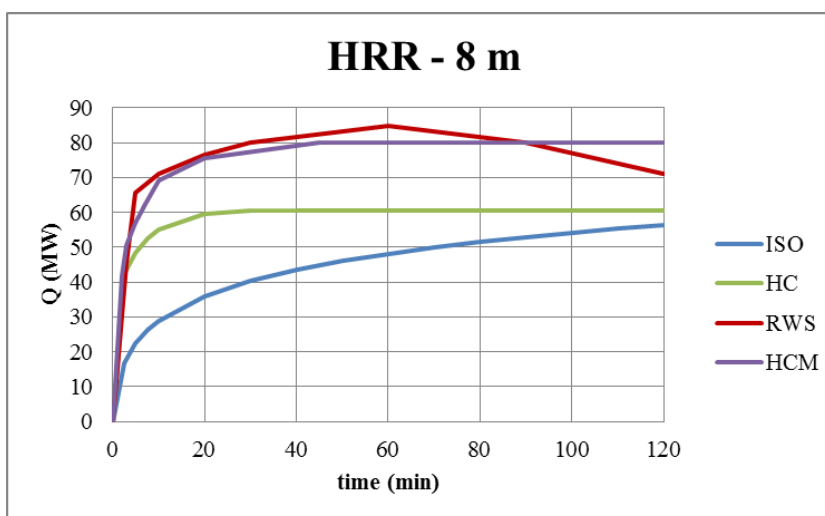
För att kunna arbeta fram en ingenjörsmässig metod krävs en modell som synliggör sambandet mellan den dimensionerande branden (MW som funktion av tid) och den temperatur branden genererar i höjd med tunneltaket. Den analytiska metod som ligger till grund för den metod som presenteras här har verifierats genom försök och finns beskriven i detalj i en Li och Ingason [8] och i SP-rapport [1]. I denna rapport har den förenklats och anpassats för ändamålet, d.v.s. att utföra branddimensionering vid nybyggnation av tunnelar.



Figur 7. Beräknad brandeffekt enligt Li och Ingason [8] vid en antagen tunnelhöjd om 6 m och en lufthastighet om 0,5 m/s.



Figur 8. Beräknad brandeffekt enligt Li och Ingason [8] vid en antagen tunnelhöjd om 7 m och en lufthastighet om 0,5 m/s.



Figur 9. Beräknad brandeffekt enligt Li och Ingason [8] vid en antagen tunnelhöjd om 8 m och en lufthastighet om 0,5 m/s.

Metoden bygger på en förenklad dimensioneringsprocess där den dimensionerande branden jämförs med ett antal olika brandeffektkurvor vilka beräknats baserats på

standardiserade tid-temperaturkurvor. De framräknade kurvorna bygger på den analytiska metod som beskrivs i Li och Ingason [8], men är beräknade för givna tunnelhöjder. Figur 7–9 visar fyra brandeffektkurvor (baserade på temperaturkurvorna för ISO, HC, RWS och HCM) för tre olika tunnelhöjder och en antagen lufthastighet om 0,5 m/s. Indata förutom de fyra standardiserade kurvorna (ISO, HC, RWS och HCM) och lufthastighet på 0,5 m/s är höjden till underkant brandkällan  $h_c=1,1$  m och en effektiv radie på brandkällan  $b_{fo} = 4,7$  m.

Med anledning av att projekts fokus är persontåg i järnvägstunnlar har endast ISO- eller HC-kurvorna använts, eftersom RWS-kurvan främst används för vägtunnlar. I Figur 7-9 ges även kurvan HCM då den föreslås användas istället för RWS när inte HC kurvan räcker till enligt den beräkningsmetod som presenteras i kapitel 8.

En av de grundvalar på vilken den förenklade metodens vilar på är att en ny beräkning kan göras i det fall den dimensionerande branden visar sig överstiga de värden som motsvaras av en ISO eller HC-brandeffektkurva för olika tunnelhöjder. Denna grafiska metod gör det möjligt att utföra nödvändiga korrigeringar av temperaturerna på ett enkelt sätt (se kapitel 8).

En grundläggande förutsättning för användandet av den förenklade grafiska metoden är **en lägsta varaktighet på 60 minuter**, oavsett om den dimensionerande brandens varaktighet är kortare. Detta betyder att ISO 60 är den lägsta kurva som denna metod kan använda sig av.

En av de viktigaste ingångsparametrarna är tunnelhöjden  $H$ . I Sverige finns i huvudsak två typer av järnvägstunnlar: enkelspårig och dubbelspårig. Den största skillnaden mellan de två typerna ligger i förhållandet mellan bredd och höjd för de båda tunneltypernas tvärsnitt. En dubbelspårig tunnel är ungefär dubbelt så bred som en enkelspårig, vilket betyder att bredd/höjd-förhållandet är cirka ett för en enkelspårig tunnel och två för en dubbelspårig. Höjden på järnvägstunnlar i Sverige varierar mellan 6 och 8,85 m. I denna rapport har tre höjder (6, 7 och 8 m) och en bredd/höjd-förhållanden (1) använts. Att använda bredd/höjd förhållande (1) är att betrakta på säkra sidan.

Lufthastigheten är en annan viktig parameter i metoden. Eftersom ytterst få järnvägstunnlar har utrustats med takfläktar och lufthastigheten för det mesta sker enligt principerna för naturligt luftflöde kan valet att använda en lufthastighet om 0,5 m/s i beräkningarna anses ge rymliga felmarginaler.

I de fall där de för den aktuella tunneln uppmätta värdena hamnar utanför de här angivna, antingen gällande tunnelns geometri eller att lufthastigheten överskrider 0,5 m/s, ska en ny beräkning göras i enlighet med vad Li och Ingason [8] föreskriver.

Tågsättens karosstyp och isolering har betydelse för vilken branddimensioneringsmetod som ska användas. Det finns en trend att bygga tåg av aluminium (t.ex. MTR X74) och antalet sådana tågsätt kommer sannolikt att öka inom en snar framtid. Tåg i Sverige har isoleringsmaterial i karossen, antingen mineralull eller plastisolering, och vagnar avsedda för persontrafik kan därför antas vara välisolerade. Enligt EN 45545-3 består en godkänd brandbarriär av en 3 mm tjock aluminiumplåt med en 30 mm tjock mineralfiberisolering mot den heta ytan. Motsvarande prestanda är E 30, vilket betyder att vagnen ska skyddas från brandpåverkan i minst 30 minuter.

Tåg konstruerade av hårdplast på en stålram är alltmer vanligt förekommande. Dessa tåg består ofta av långa, öppna sektioner, vilket är en nackdel utifrån ett brandspridningsperspektiv. Det förekommer på marknaden idag osektionerade tågagnar som är över 40 m långa, vilket särskilt gäller spåragnar. Fullskaliga brandtester har inte utförts för denna typ av vagnar och behovet att utföra sådana ökar allteftersom de blir allt vanligare förekommande. Någon värdering av giltigheten gällande denna typ av tågagnar har därför inte kunnat utföras för den metod som presenteras här.

I det följande kapitlet presenteras en arbetsmetod avsedd att ta fram en dimensionerande tid-temperaturkurva för en järnvägstunnel baserat på en dimensionerande brand i en enskild eller ett flertal personvagnar med en sammanlagd längd om maximalt 75 m.

## 7. En förenklad metod för dimensionerande tid-temperaturkurvor

I det följande presenteras den förenklade grafiska metod som utvecklats i detta projekt och vilken har sitt ursprung i de teoretiska resonemang som läggs fram i Li och Ingason [8] och som har vidareutvecklats i SP-rapport [1].

### 7.1 Metod för beräkning av temperatur i höjd med taket

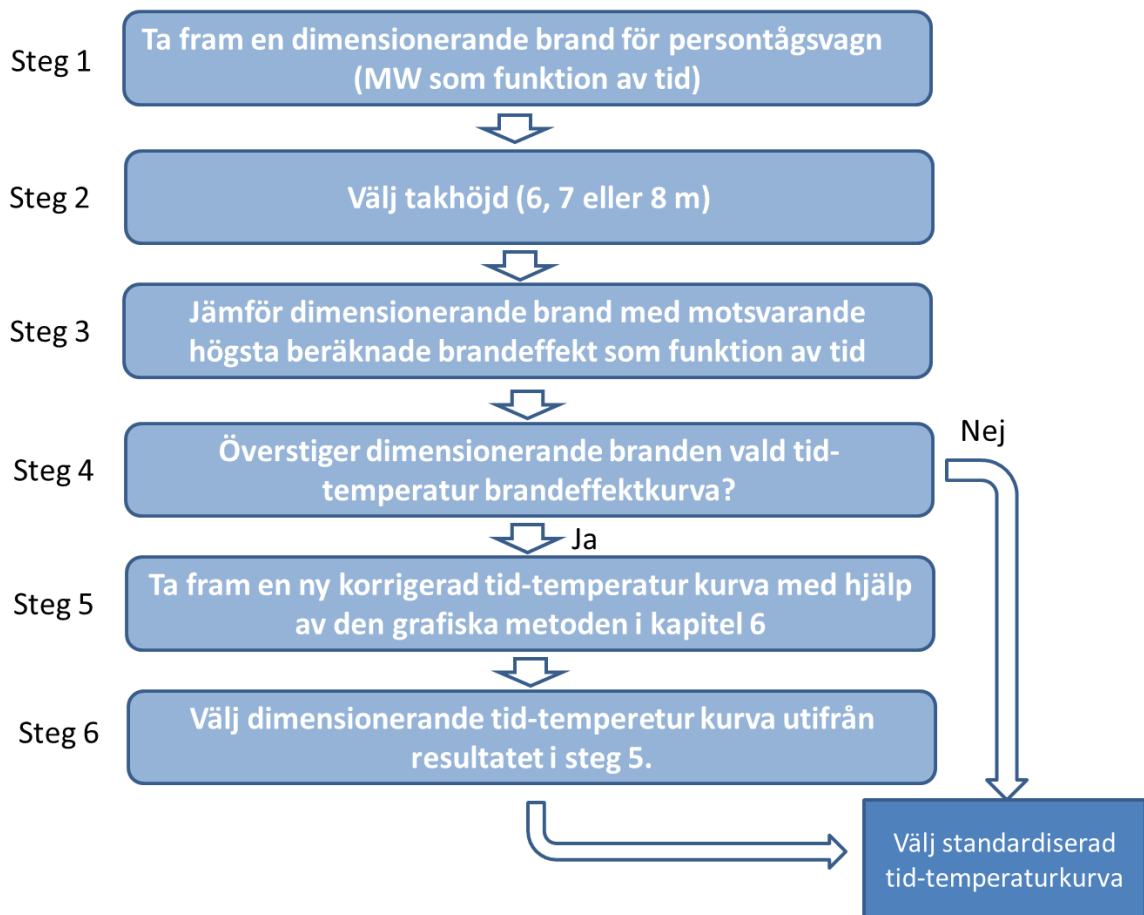
Den beräkningsmetod som används tar hänsyn till följande parametrar: det brinnande objektets vagnsyta, höjd till bränslets brandyta, tunnelns takhöjd samt längsgående ventilation i tunneln.

### 7.2 Metod för dimensionerande brandeffekt för en personvagn

I en tidigare publicerad rapport [2] ges beskrivningar för hur brandeffektkurvor tas fram. En kortare beskrivning finns i kapitel 4 i denna rapport.

### 7.3 Arbetsgång

Dimensionerande brandeffektkurvor tas fram för de vagnstyper som kan tänkas trafikera den aktuella tunneln. När en eller flera sannolika brandeffektkurvor valts ut kan processen att ta fram dimensionerande tid-temperaturkurvor påbörjas. I Figur 10 visas arbetsgångens sex steg, där vart och ett representerar ett val som görs. I steg 4 kan processen ta en av två olika vägar beroende på om svaret på frågan är *ja* eller *nej*.



**Figur 10.** Översikt av arbetsprocessen för att ta fram en standardiserad tid-temperaturkurva för järnvägstunnlar enligt den förenklade metoden.

Nedan följer en mer detaljerad beskrivning av de olika stegen som utgör processen för val av tid-temperaturkurva enligt den föreslagna metoden.

### **Steg 1: Ta fram en dimensionerande brand för persontågsvagn**

I varje projekt tas det fram en eller fler dimensionerande brandeffektkurvor (MW som funktion av tid), vilka i de flesta fall gäller brand i en enskild vagn. I de fall branden sprids från ursprungsvagnen till en närliggande vagn (se kapitel 5 om förflyttningssbar brand), kommer brandeffektkurvan att gälla för den vagn där branden startade, men påverkas av den längre varaktigheten och det högre totala energiinnehållet när flera vagnar involveras i branden. I de olika metoder för att ta fram en dimensionerande brand som finns görs vanligen först ett antagande om brandens tillväxthastighet upp till dess att den når maximal brandeffekt, varefter längden på den efterföljande perioden, under vilken brandeffekten ligger på en konstant nivå, fram till dess att branden börjar avta beräknas. Längden på den sistnämnda varierar med energiinnehållet i den eller de vagnar som berörs av branden. I kapitel 4 samt i två av Trafikverkets publikationer [2, 12] presenteras metoder för framtagande av en dimensionerande brandeffektkurva. Ett exempel på en sådan kurva beräknad för en enskild vagn med en brandbelastning om 75 GJ visas i Figur 3.

### **Steg 2: Välj takhöjd (6, 7 eller 8 m)**

Nästa steg är att välja takhöjd för den tunnel den dimensionerande branden gäller. Lägre takhöjd ger normalt högre slutgastemperatur och är därför att föredra om osäkerhet gällande valet av takhöjd föreligger. I samtliga fall som redovisas i denna

rapport antas lufthastigheten vara 0,5 m/s. Beroende på takhöjd plottas respektive brandeffektkurva in för direkt jämförelse med de i förväg framräknade tid-brandeffektkurvorna (refereras till som ”standardiserade” ISO och HC brandeffektkurvor) för respektive tunnelhöjd (6, 7 och 8 m).

### **Steg 3: Jämför den dimensionerande brandens brandeffektkurva med ”standardiserade” brandeffektkurvor**

Figur 11–13 visar jämförelser för de tre olika tunnelhöjderna av brandeffektkurvorna som funktion av tiden för dels den dimensionerade brand som introducerades i Figur 3 ovan med de beräknade värdena för dels en ISO- och dels en HC-kurva. Lufthastigheten antas i samtliga fall vara 0,5 m/s, vilket har antagits vara ett representativt värde för järnvägstunnelar i Sverige.

### **Steg 4: Välj en tid-temperaturkurva inom vilken den dimensionerande brandens högsta beräknade brandeffekt ryms**

I detta steg avgörs om processen ska avslutas (då ett val träffats) eller fortsätta till att använda en mer avancerad grafisk metod (steg 5–6). Om den dimensionerande brandens brandeffektkurva på samtliga punkter visar sig uppnå lägre värden än en ISO-kurva ska den senare väljas som dimensionerande tid-temperaturkurva (svar *ja* i Figur 10). Om så inte är fallet för ISO-kurvan men för HC-kurvan ska den senare väljas som dimensionerande tid-temperaturkurva (svar *ja* i Figur 10). I annat fall, t ex om kurvan ligger strax över ISO-kurvan (*gränsfall*) eller om branden betraktas som förflyttningssbar (d.v.s. mer än en vagn är involverad, se kapitel 5), går dimensioneringsprocessen vidare till steg 5 (svar *nej* i Figur 10). Detta gäller även om dimensionerande brandens tillväxthastighet är högre för samtliga ISO- och HC-kurvor, varvid processen går vidare till steg 5-6 (svar *ja* i Figur 10).

### **Steg 5: Undersök tunnelkonstruktionens påverkan på val av tid-temperaturkurva (endast om svaret är *ja* i steg 4)**

Den dimensionerande brandens varaktighet jämförs med motsvarande värden för de standardiserade tid-temperaturkurvorna. Beroende på brandens varaktighet sätts dess dimensionerande varaktighet till 60, 90 eller 120 min. I fall där flera vagnar är involverade behöver hänsyn tas till den totala energin, vilken i sin tur är avgörande för brandens totala varaktighet – för analysens skull antas i dessa fall högst tre vagnar och/eller en totallängd på 75 m. Om analysen gäller fler vagnar än tre eller totallängden överstiger 75 m måste en mer avancerad metod användas, exempelvis en numerisk metod som beräknar värmeflödet in i konstruktionen baserat på brandens placering vid varje enskild tidpunkt under brandförloppet.

### **Steg 6: Undersök tunnelkonstruktionens påverkan med korrigerad dimensionerande brand**

I kapitel 8 beskrivs en metod för korrigerad varaktighet och maximal temperatur beroende på tunnelns konstruktionstyp. Detta gör det möjligt att anpassa den dimensionerande brandens brandeffektkurva till en HC- eller ISO-kurva. Denna process inkluderar även förflyttningssbar brand.

## **7.4 Exempel - energiinnehåll på 75 GJ enligt Figur 3.**

**Steg 1:** Två dimensionerande brandeffektkurvor tas fram; NFPA Medium 20 MW (fall 1) NFPA Fast 60 MW (fall 2). Sannolikheten för att dessa brandeffektkurvor ska motsvara en uppkommen brand presenteras i kapitel 4. Angående valet av kurva så är det för järnvägstunnelar i Sverige inte aktuellt med en RWS-kurva – däremot kan i vissa fall en EUREKA-kurva (se Figur 2) eller HCM-kurva vara det. I detta fall görs dock valet att arbeta med standardiserad tid-temperaturkurvor, d.v.s. HC- eller ISO-kurvorna och i

undantagsfall med HCM. I Figur 11–13 visas en jämförelse av de valda brandeffektkurvorna för en brand i en tågagn med en brandbelastning om 75 GJ för de tre tunnelhöjderna.

**Steg 2:** I detta fall görs valet att undersöka tre tunnelhöjder (6, 7 och 8 m) snarare än en enda.

**Steg 3:** Brandeffektkurvorna som valdes i steg 1 ritas in i diagrammen för tunnelhöjderna 6, 7 och 8 m (Figur 11–13).

**Steg 4:**

*Fall 1 - NFPA Medium 20 MW*

För en brand motsvarande NFPA Medium 20 MW i en tunnel med en takhöjd på 6 m ger brandeffektkurvan på somliga punkter högre värden än ISO-kurvan, men på samtliga punkter lägre värden än HC-kurvan, vilket betyder att HC-kurva för en varaktighet om 90 minuter (HC 90) kan väljas som dimensionerande tid-temperaturkurva. Notera att valet av 90 minuter gjorts på grundval av att brandens varaktighet överstiger 60 minuter, varvid nästa steg är 90 minuter oavsett den faktiska varaktigheten. Kurvan ligger inte mycket över ISO kurvan och enligt konceptet kan man vid *gränsfall* undersöka om det finns möjlighet att uppnå en lägre kurva. Då kan man gå till steg 5, vilket visas i kapitel 8. För en brand i en tunnel med en takhöjd på 7 m ger brandeffektkurvan på samtliga punkter lägre värden än både ISO- och HC-kurvorna, vilket innebär att ISO 90 kan väljas för denna tunnelhöjd. För en brand motsvarande NFPA Medium 20 MW i en tunnel med en takhöjd på 8 m ger brandeffektkurvan på samtliga punkter lägre värden än både ISO- och HC-kurvorna, vilket innebär att ISO 60 kan väljas för denna tunnelhöjd.

*Fall 2 – NFPA Fast 60 MW*

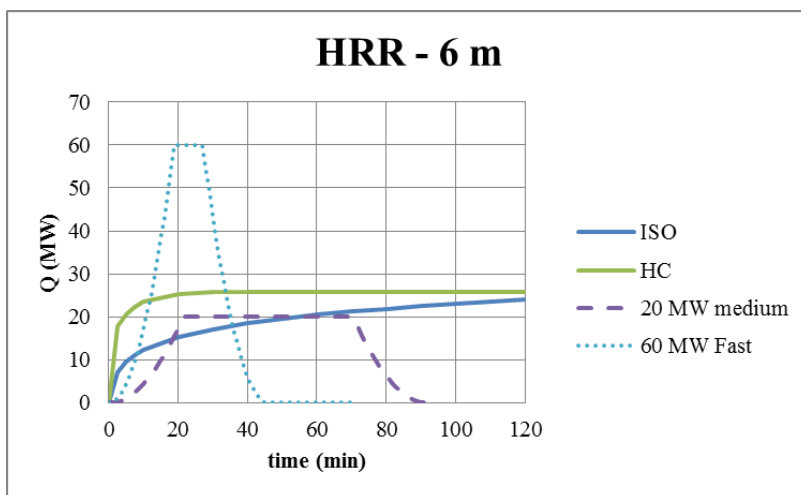
För en brand motsvarande NFPA Fast 60 MW och tunneltakhöjd på 6 m ger brandeffektkurvan högre värden än både ISO- och HC-kurvorna och även för brandens tillväxtsfas, varför processen i detta fall måste fortsätta till steg 5–6.

För en brand motsvarande NFPA Fast 60 MW och tunneltakhöjd 7 m ger brandeffektkurvan på somliga punkter högre värden än både ISO- och HC-kurvorna, varför processen i detta fall måste fortsätta till steg 5–6. För en brand motsvarande NFPA Fast 60 MW och tunneltakhöjd på 8 m ger brandeffektkurvan på somliga punkter högre värden än ISO-kurvan, men på samtliga punkter lägre värden än HC-kurvan. Eftersom varaktigheten är kortare än 60 minuter kan därför HC 60 väljas.

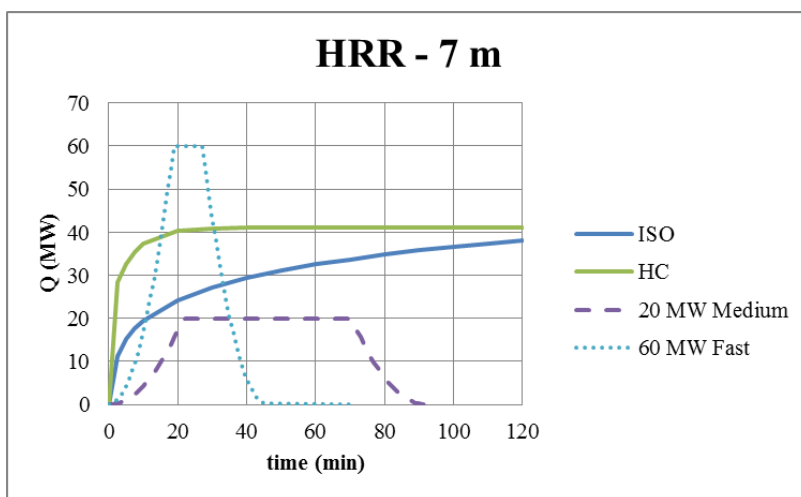
I syfte att tydligare åskådliggöra processen i steg 4 presenteras den i form av en tabell nedan:

**Tabell 3. Sammanställning av jämförelsen mellan de dimensionerande brandeffektkurvorna och de standardiserade tid-temperaturkurvorna i exemplet i avsnitt 7.4.**

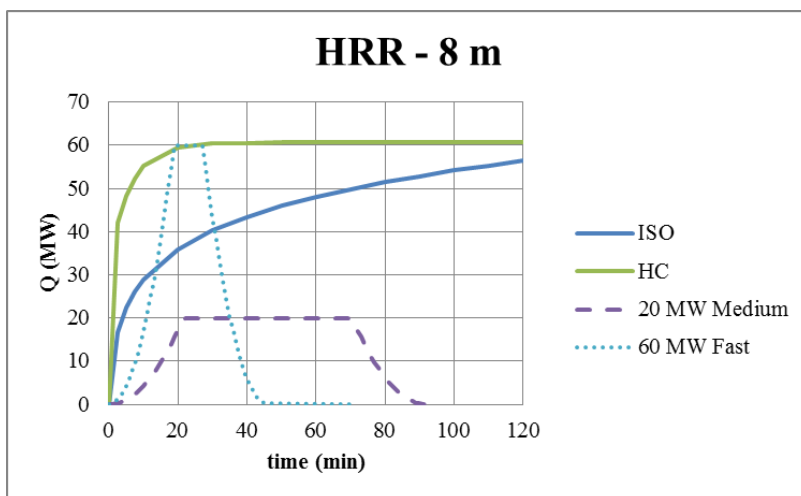
Tunnelhöjd	Dim. brand	ISO	HC	Val av kurva	Nästa steg
6	NFPA Medium 20 MW	<i>Högre (gränsfall)</i>	Lägre	HC 90 alternativt ISO 90 om steg 5-6 utreds	Processen avslutas alternativt gå till steg 5-6
7		Lägre	Lägre	ISO 90	Processen avslutas
8		Lägre	Lägre	ISO 90	Processen avslutas
6	NFPA Fast 60 MW	<i>Högre</i>	<i>Högre</i>	->	5–6
7		<i>Högre</i>	<i>Högre</i>	->	5–6
8		<i>Högre</i>	Lägre	HC 60	Processen avslutas



Figur 11. Beräknade brandeffektkurvor för tänkta brandscenarier baserade på NFPA Medium 20 MW och Fast 60 MW, samt ”standardiserade” ISO- och HC-kurvor. Tunnelhöjden antas vara 6 m och lufthastigheten 0,5 m/s.



Figur 12. Beräknade brandeffektkurvor för tänkta brandscenarier baserade på NFPA Medium 20 MW och Fast 60 MW, samt ”standardiserade” ISO- och HC-kurvor. Tunnelhöjden antas vara 7 m och lufthastigheten 0,5 m/s.



Figur 13. Beräknade brandeffektkurvor för tänkta brandscenarier baserade på NFPA Medium 20 MW och Fast 60 MW, samt ISO- och HC-kurvor. Tunnelhöjden antas vara 8 m och lufthastigheten 0,5 m/s.



Sammanfattningsvis visar sig minst en av de standardiserade kurvorna (HC eller ISO) utgöra möjliga val för branddimensionering i tre av sex scenarier (process avslutas) ovan och de resterande tre fortsätter till steg 5–6 (se kapitel 8).

### 7.5 Exempel - 60 minuters varaktighet

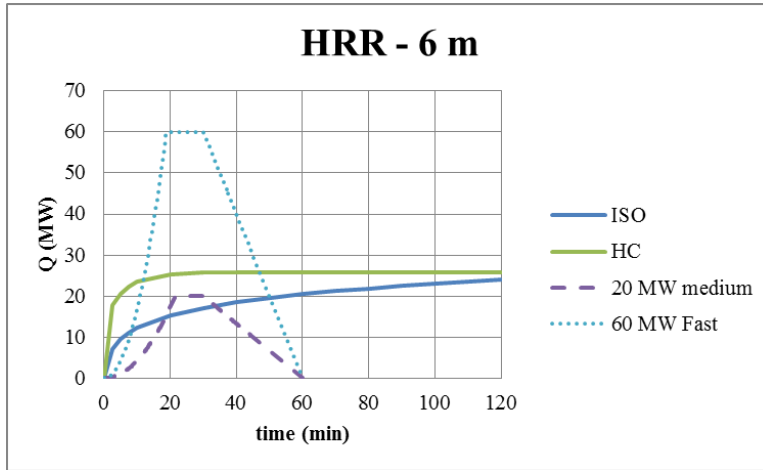
Det kan förekomma fall där brandeffektkurvan ger en relativt kort varaktighet, exempelvis vid en brand motsvarande NFPA Medium 20 MW eller Fast 60 MW för vilken avsvälning sker inom 60 minuter (se Figur 14-16 **Fel! Hittar inte eferenskälla.**). I detta exempel faller valet av dimensionerande brandeffektkurva på standardiserade kurvor i tre av sex fall: HC 60 för 60 MW-branden (takhöjd 8 m), ISO 60 för 20 MW-branden (takhöjd 7 och 8 m) och HC 60 för 20 MW-branden (takhöjd 6 m) (alternativt att gå till steg 5-6 då detta är att betrakta som *gränsfall*). Gränsfall får bedömmas från fall till fall, men om kurvan ligger lite över (<15 %) en av standardbrandeffektkurvorna under en kort tid (<20 min) så kan man också gå vidare och undersöka det med den mer noggranna metoden som presenteras i kapitel 8. Då kan det betraktas som *gränsfall*, se Tabell 4. Resultatet kan dock bli att den måste höjas ändå.

För 60 MW-bränder med takhöjder om 6 och 7 m ger den beräknade brandeffektkurvan värden som på somliga punkter är högre än HC-kurvan (>15%), varför processen i detta fall måste fortsätta till steg 5–6. För 8 m takhöjd så faller kurvan strax under HC-kurvan och därmed väljs HC 60 som dimensionerande kurva. Processen avslutas.

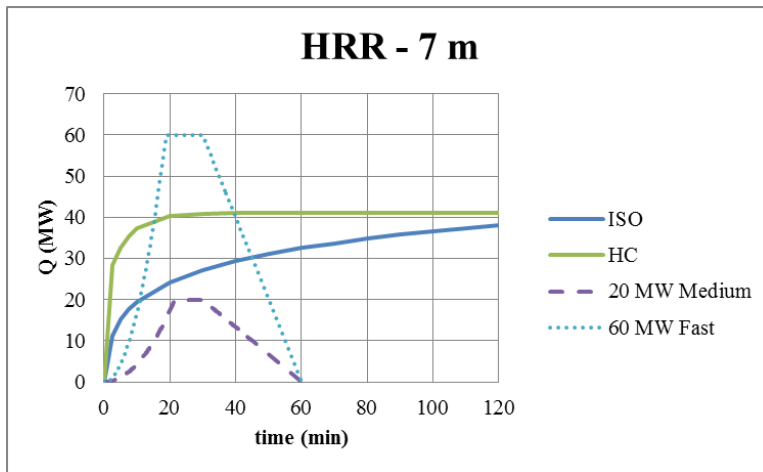
**Tabell 4. Sammanställning av jämförelsen mellan de dimensionerande brandeffektkurvorna och de standardiserade tid-temperaturkurvorna i exemplet i avsnitt 7.5.**

Tunnelhöjd	Dim. brand	ISO	HC	Val av kurva	Nästa steg
6	NFPA Medium 20 MW	<i>Högre (gränsfall)</i>	Lägre	HC 60 alternativt ISO 60 om steg 5-6 utreds	Processen avslutas alternativt gå till steg 5-6
7		Lägre	Lägre	ISO 60	Processen avslutas
8		Lägre	Lägre	ISO 60	Processen avslutas
6	NFPA Fast 60 MW	<i>Högre</i>	<i>Högre</i>	->	5–6
7		<i>Högre</i>	<i>Högre</i>	->	5–6
8		<i>Högre</i>	Lägre	HC 60	Processen avslutas

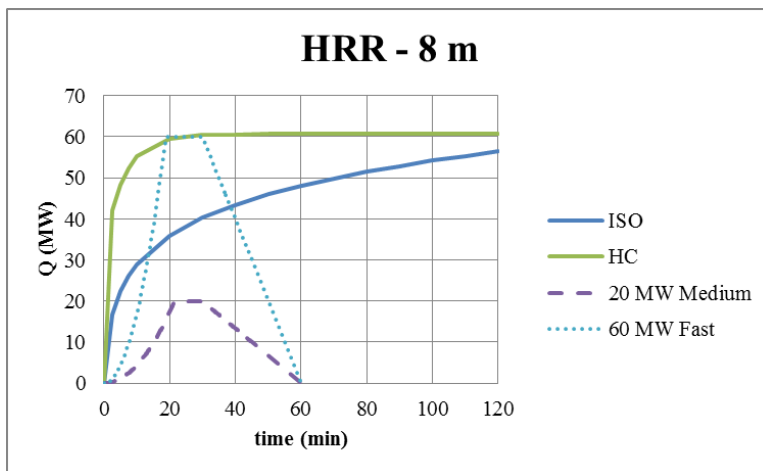
Sammanfattningsvis visar sig minst en av de standardiserade kurvorna (HC eller ISO) utgöra möjliga val för branddimensionering i tre av sex scenarier ovan (process avslutas) och de resterande tre kan fortsätta till steg 5–6 (se kapitel 8).



Figur 14. Beräknade brandeffektkurvor för tänkta brandscenarier baserade på NFPA Medium 20 MW och Fast 60 MW, samt ISO- och HC-kurvor. Tunnelhöjden antas vara 6 m och lufthastigheten 0,5 m/s.



Figur 15. Beräknade brandeffektkurvor för tänkta brandscenarier baserade på NFPA Medium 20 MW och Fast 60 MW, samt ISO- och HC-kurvor. Tunnelhöjden antas vara 7 m och lufthastigheten 0,5 m/s.



Figur 16. Beräknade brandeffektkurvor för tänkta brandscenarier baserade på NFPA Medium 20 MW och Fast 60 MW, samt ISO- och HC-kurvor. Tunnelhöjden antas vara 8 m och lufthastigheten 0,5 m/s.

## 7.6 Exempel - 120 minuters varaktighet (förflyttningsbar brand)

I detta exempel undersöks en brand med en varaktighet om 120 minuter för vilken energiinnehållet är okänt eller en brand som bedömts vara förflyttningsbar och därmed involverar flera vagnar. Vid brandvaraktigheter längre än 120 minuter förlängs tid-temperaturkurvorna med motsvarande tidsrymd. Den sammanlagda längden för de vagnar som brinner bör inte överstiga 75 m om denna metod används.

Det första exemplet är en jämförelse mellan två tågbränder vars brandtillväxthastigheter motsvarar NFPA Medium 20 MW respektive NFPA Fast 60 MW. Brandförloppet redovisas fram till 120 minuter, under vilket den maximala brandeffekten uppnås och övergår i en period med konstant brandeffekt.

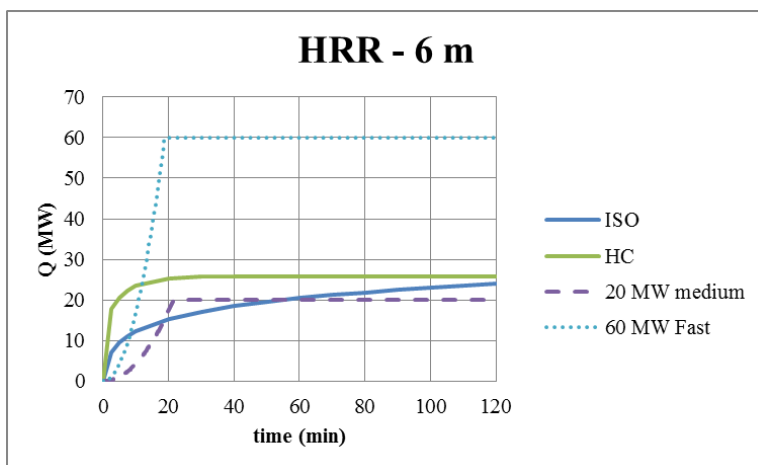
Figur 17–19 visar att den beräknade brandeffektkurvan i två av fallen rörande 60 MW-branden (takhöjd 6 och 7 m) på somliga punkter ger högre värden än HC-kurvan (>15%), vilket innebär att HC 120 inte kan väljas för 60 MW-branden för de höjderna. Man måste gå vidare till steg 5-6. I två av fallen rörande 20 MW-branden (takhöjd 7 och 8 m) ger den beräknade brandeffektkurvan värden som på samtliga punkter är lägre än ISO-kurvans värden, vilket innebär att ISO 120 kan väljas i dessa två fall. I ett av fallen, NFPA Medium 20 MW, och 6 m takhöjd ligger kurvan strax över ISO-kurvan. Den är dock inte högre än 15 % av värdet och kan därför antingen väljas som HC120 eller gå till steg 5-6 om man vill se om man kan välja ISO120 istället.

Sammanfattningsvis visar sig minst en av de standardiserade kurvorna (ISO och HC) utgöra möjliga val för branddimensionering i tre av sex scenarier ovan (process avslutas) och de resterande två fortsätter till steg 5–6 (se kapitel 8).

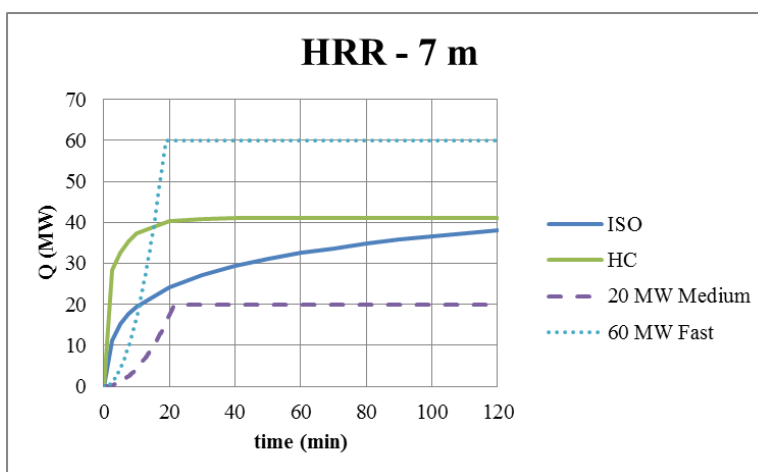
**Tabell 5. Sammanställning av jämförelsen mellan de dimensionerande brandeffektkurvorna och de standardiserade tid-temperaturkurvorna i exemplet i avsnitt 7.6.**

Tunnelhöjd	Dim. brand	ISO	HC	Val av kurva	Nästa steg
6	NFPA Medium 20 MW	<i>Högre (gränsfall)</i>	Lägre	HC 120 alternativt ISO 120 om steg 5-6 utreds	Processen avslutas alternativt gå till steg 5-6
7		Lägre	Lägre	ISO 120	Processen avslutas
8		Lägre	Lägre	ISO 120	Processen avslutas
6	NFPA Fast 60 MW	<i>Högre</i>	<i>Högre</i>	->	5-6
7		<i>Högre</i>	<i>Högre</i>	->	5-6
8		<i>Högre</i>	Lägre	HC 120	Processen avslutas

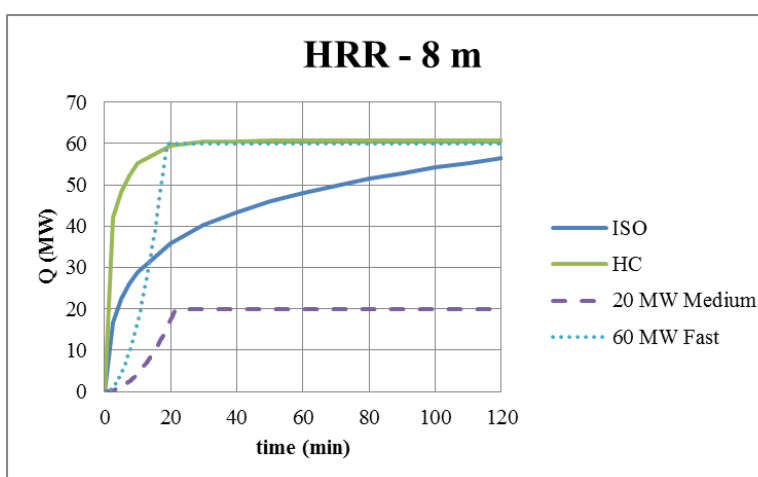
Då det totala energiinnehållet i exemplet ovan är relativt högt, motsvarande 386 GJ för 60 MW-branden och 127 GJ för 20 MW-branden, representerar dessa inte brand i enskilda vagnar utan snarare brand i flertal vagnar (förflyttningsbar brand, se kapitel 5). Energiinnehållet för enskilda vagnar är vanligtvis ca 20–80 GJ [7], medan det för dubbeldäckare, sovvagnar och långa osekktionerade vagnar kan uppgå till 170 GJ (se Tabell 2).



Figur 17. Beräknade brandeffektkurvor för tänkta brandscenarier baserade på NFPA Medium 20 MW och Fast 60 MW, samt ISO- och HC- och HCM kurvor. Tunnelhöjden antas vara 6 m och lufthastigheten 0,5 m/s.



Figur 18. Beräknade brandeffektkurvor för tänkta brandscenarier baserade på NFPA Medium 20 MW och Fast 60 MW, samt ISO- och HC-kurvor. Tunnelhöjden antas vara 7 m och lufthastigheten 0,5 m/s.



Figur 19. Beräknade brandeffektkurvor för tänkta brandscenarier baserade på NFPA Medium 20 MW och Fast 60 MW, samt ISO- och HC-kurvor. Tunnelhöjden antas vara 8 m och lufthastigheten 0,5 m/s.

Ett tågsätt för persontrafik består vanligtvis av 4–6 vagnar, vilket innebär en energimängd på uppskattningsvis 100–500 GJ. Ett problem vid branddimensionering är därför att den värmenivå som tunnelkonstruktionen utsätts för när flera vagnar brinner varierar för olika delar av tunnel eftersom branden förflyttar sig under brandförloppet.

## 8. Korrigering av maximal temperatur – steg 5 och 6

Korrigeringsmetoder för den maximala temperaturen har tagits fram för steg 5 och 6. Dessa kurvor används för att beräkna temperaturökningen från den tidpunkt vid vilken den dimensionerande brandeffektkurvan ger högre värden än ISO-brandeffektkurvan. Hur temperaturen utvecklas blir beroende av valet av ytbeklädnad [1].

Valet av ISO-brandeffektkurvan som referens för fastställande av tidpunkt för start av beräkning av temperaturökningen har möjliggjorts på grundval av att tidigare beräkningar visat att den dimensionerande temperaturkurvan kommer att ge värden som är högre än de som denna kurva ger. Dessa gäller för tre olika tunnelhöjder (6, 7 och 8 m) och tre olika material i tunnelkonstruktionen (isoleringsskivor, betong eller berg utan sprutbetong). Sprutbetong på berg, med eller utan isolering på baksidan, betraktas i detta sammanhang som tillhörande kategorin ”betong”. Processen gäller även om brandeffektkurvan ligger lite ovanför en given standardbrandeffektkurva (se *gränsfall* i Tabell 3-5).

**I Fel! Hittar inte referenskälla.** Figur 20 visas ett antal beräknade tid-temperaturkurvor för tunnelhöjder om 6, 7 och 8 m. De är beräknade enligt den metod som utvecklats och presenterats i SP-rapport [1]. En kurvanpassning till kurvorna i Figur 20 visar att det inte skiljer så mycket i resultat beroende på höjden. Därför har tre ekvationer som representerar alla höjderna  $H=6, 7$  och  $8$  m men olika typer av material tagits fram för att underlätta användningen av den grafiska metoden.

Isoleringskivor:

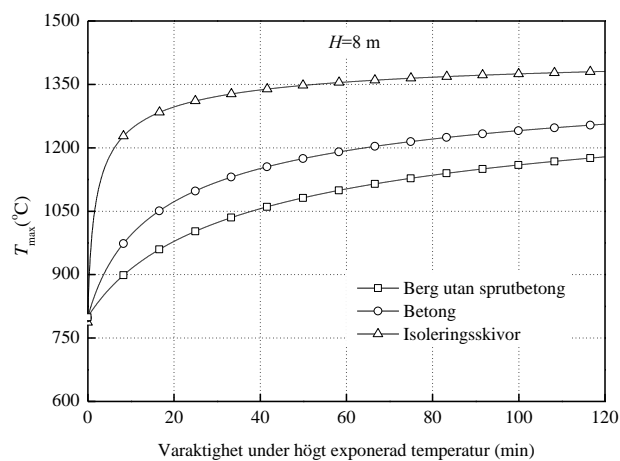
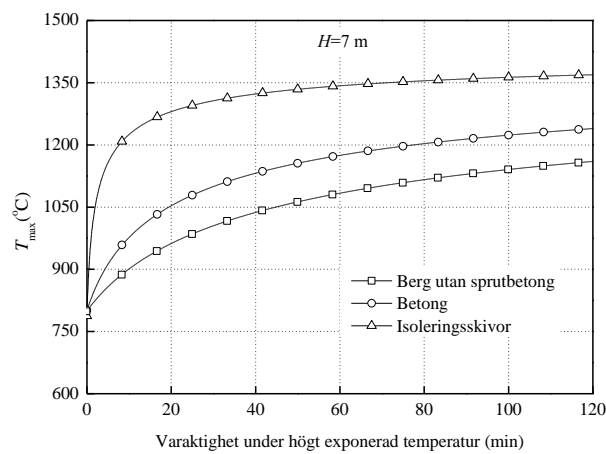
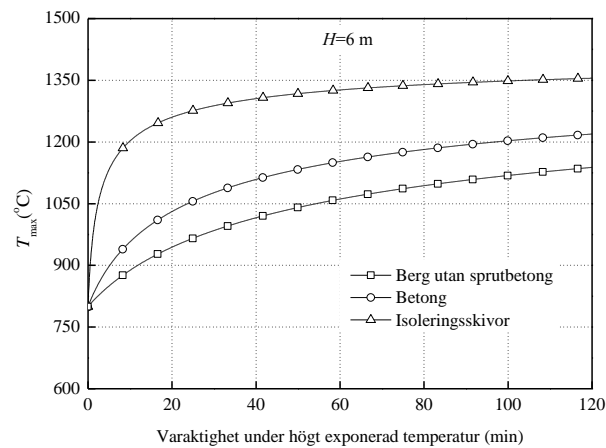
$$T_{\max} = 800 + 404[1 - \exp(-\Delta t / 2.47)] + 178[1 - \exp(-\Delta t / 40.4)] \quad (3)$$

Betong:

$$T_{\max} = 800 + 271[1 - \exp(-\Delta t / 80)] + 228[1 - \exp(-\Delta t / 10.3)] \quad (4)$$

Berg:

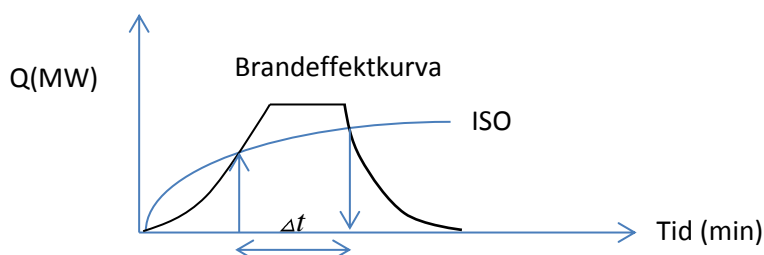
$$T_{\max} = 800 + 298[1 - \exp(-\Delta t / 104)] + 156[1 - \exp(-\Delta t / 16.3)] \quad (5)$$



**Figur 20. Maximal temperatur som en funktion av brandvaraktigheten för temperaturer över 800 °C.**

Metoden är tänkt att ge resultat i vilka en god felmarginal är inräknad från början. Målsättningen med detta steg av processen är att ta fram ett tidsintervall,  $\Delta t$ , inom vilket den dimensionerande brandeffektkurvan ger värden som är högre än för de standardiserade brandeffektkurvorna ISO eller HC. Om temperaturen blir högre än HC (>15 %) kan det bli ett alternativ att använda HCM kurvan. Tidsintervallet  $\Delta t$  definieras som tiden mellan de tidpunkter vid vilka den dimensionerande brandens temperatur

först överstiger respektive åter understiger ISO-kurvans (se Figur 21). Intervallets sluttemperatur beräknas sedan beroende på tunnelkonstruktionens ytmaterial (isoleringsskivor, betong eller berg utan sprutbetong) och varaktigheten på branden.



**Figur 21. Skiss som visar principen för hur tidsintervallet  $\Delta t$  bestäms. Detta gäller alla typer av designbränder eller brandeffektkurvor som överstiger ISO kurvan.**

En viss tolerans tillåts för hur mycket temperaturen kan överskrida det värde man siktar mot. Till exempel om man har ett gränssfall, och kurvan ligger nära ISO kurvan, men beräkningarna visar att sluttemperaturen efter tiden  $\Delta t$  blir lite högre än ISO kurvan, så tillåts en beräkning av toleransen enligt det sätt som presenteras i SS-EN 1363-1:2012 (E) för beräkning av tolerans vid tester i ugnar. Den metoden tillåter högst tolerans i början, för att sedan minska allt eftersom tiden går. Metoden har anpassats här till att gälla för  $\Delta t$ :

- a) 15 % för  $5 < \Delta t < 10$  minuter (6)
- b)  $(15 - 0.5(\Delta t - 10))$  % för  $10 < \Delta t < 30$  minuter
- c)  $(5 - 0.083(\Delta t - 30))$  % för  $30 < \Delta t < 60$  minuter
- d) 2.5 % för  $\Delta t > 60$  minuter

Där toleransen i % enligt angivna gränser ovan beräknas som

$$\frac{T_{\max,actual} - T_{\max,ISO}}{T_{\max,ISO}} \times 100 \quad (7)$$

Här är  $\Delta t$  tiden i minuter från början från tiden första skärningspunkten inträffar på ISO brandeffektkurvan.

Nedan följer exempel på användning av korrigeringsmetoden.

### 8.1 Exempel – 75 GJ enligt Figur 3

I två fall av de som redovisas i Tabell 3 (NFPA Fast 60 MW, takhöjd 6 och 7 m) ger den dimensionerande brandens brandeffektkurva värden som överstiger de standardiserades (ISO och HC), varför dessa kurvor här kommer att användas för att åskådliggöra korrigeringsmetoden (nästa steg 5-6 i Tabell 3). I detta fall antas tunnelns ytmaterial vara betong.

Figur 11 ger vid handen att brandeffektkurvan för 60 MW-branden (takhöjd 6 m, punkterade kurvan) ger högre värden än ISO-kurvan ca 8 min efter att branden startade, vilket ger starttiden för beräkning av tidsintervallet  $\Delta t$ . I samma figur ser vi att den dimensionerande brandeffektkurvan återigen ger lägre värden än ISO-kurvan ca 36 minuter efter att brandens startade, vilket ger sluttiden för beräkningen av intervallet  $\Delta t$ . I detta fall blir tidsintervallet  $\Delta t = 36 - 8 = 28$  minuter, vilket används för att läsa av

kurvan för betong och 6 m takhöjd i Figur 20, varvid en sluttemperatur på ungefär 1090 °C erhålls. Enligt ekvation (4) för betong blir motsvarande värde 1093 °C. Enligt ekvation (1) är temperaturen enligt ISO kurvan vid tiden  $t=8 + \Delta t = 8+28 = 36$  minuter  $T(34)=870$  °C. Det innebär att felmarginalen enligt ekvation (7) är 27 %, vilket överstiger ekvation 6c, som anger gränsen för  $\Delta t = 34$  min:  $(5-0.083(36-30))=4.5$  %. Därför måste vi välja en högre kurva än ISO kurvan. Enligt ekvation (2) för HC kurvan är temperaturen vid samma tid 1100 °C, vilket är högre en 1093 °C. Vi kan därför välja **HC60**. Eftersom  $\Delta t$ -värdet blir aningen lägre för en tunnel med 7 m takhöjd (Figur 12) blir resultatet detsamma som för en tunnel med 6 m takhöjd dvs **HC60**.

Det finns ett *gränsfall* i Tabell 3 som kan undersökas, 6 m takhöjd och 20 MW (Figur 11). Starttiden där 20 MW kurvan skär ISO brandeffektkurvan är vid 20 minuter och sluttiden när den skär igen ISO kurvan är ungefär 50 minuter. Det betyder att  $\Delta t = 50 - 20 = 30$  minuter. Enligt ekvation (4) blir temperaturen lika med 1100 °C, vilket ger oss HC kurvan. Detta innebär att vi måste välja en **HC90**.

I Tabell 6 nedan ges en uppdaterad version av Tabell 3 och visar valet av kurva för samtliga undersökta fall för 75 GJ vagnen.

**Tabell 6. Sammanställning av jämförelsen mellan de dimensionerande brandeffektkurvorna och de standardiserade tid-temperaturkurvorna i exemplet i avsnitt 7.4 (betongtunnel, dimensionerande brandbelastning 75 GJ).**

Tunnelhöjd	Dim. brand	ISO	HC	Val av kurva	Nästa steg
6	NFPA Medium 20 MW	Högre	Lägre	<b>HC 90</b>	Processen avslutas
7		Lägre	Lägre	ISO 90	Processen avslutas
8		Lägre	Lägre	ISO 90	Processen avslutas
6	NFPA Fast 60 MW	Högre	Högre	<b>HC 60</b>	Processen avslutas
7		Högre	Högre	<b>HC 60</b>	Processen avslutas
8		Högre	Lägre	HC 60	Processen avslutas

## 8.2 Exempel – 60 min varaktighet

I två fall av de som redovisas i Tabell 4 (NFPA Fast 60 MW, takhöjd 6 och 7 m) ger den dimensionerande brandens brandeffektkurva värden som överstiger de standardiserades (ISO och HC), varför dessa kurvor här kommer att användas för att åskådliggöra korrigeringsmetoden (nästa steg 5-6 i Tabell 4). I detta fall antas tunnelns ytmaterial vara betong.

Figur 14 ger vid handen att brandeffektkurvan för 60 MW-branden (takhöjd 6 m, punkterade kurvan) ger högre värden än ISO-kurvan ca 8 min efter att branden startade, vilket ger starttiden för beräkning av tidsintervallet  $\Delta t$ . I samma figur ser vi att den dimensionerande brandeffektkurvan återigen ger lägre värden än ISO-kurvan ca 51 minuter efter att brandens startade, vilket ger sluttiden för beräkningen av intervallet  $\Delta t$ . I detta fall blir tidsintervallet  $\Delta t = 51 - 8 = 43$  minuter, vilket används för att läsa av kurvan för betong och 6 m takhöjd i Figur 20, varvid en sluttemperatur på ungefär 1130



°C erhålls. Enligt ekvation (4) för betong blir motsvarande värde 1137 °C. Enligt ekvation (2) är temperaturen enligt HC kurvan vid tiden  $t=8 + \Delta t = 8+43 = 51$  minuter  $T(51)=1100$  °C. Det innebär att felmarginalen enligt ekvation (7) är 2,9 %, vilket är högre än värdet från ekvation 6c, som anger gränsen för  $\Delta t = 43$  min:  $(5-0.083(43-30))=1,4$  %. Därför måste vi välja en **HC 60** kurva. Eftersom  $\Delta t$ -värdet blir aningen lägre för en tunnel med 7 m takhöjd (Figur 15) blir resultatet detsamma som för en tunnel med 6 m takhöjd dvs **HC60**.

Det finns ett *gränsfall* i Tabell 4 som kan undersökas, 6 m takhöjd och 20 MW (Figur 14). Starttiden där 20 MW kurvan skär ISO brandeffektkurvan är vid 18 minuter och sluttiden när den skär igen ISO kurvan är ungefär 34 minuter. Det betyder att  $\Delta t = 34 - 18 = 16$  minuter. Enligt ekvation (4) blir temperaturen lika med 1028 °C. Enligt ekvation (1) är temperaturen 860 °C efter 34 minuter. Det innebär att felmarginalen enligt ekvation (7) är 19 %, vilket är högre än värdet från ekvation 6b, som anger gränsen för  $\Delta t = 16$  min:  $(15-0,5(16-10))=12$  %. Detta innebär att vi måste välja en **HC60**.

I Tabell 7 nedan ges en uppdaterad version av Tabell 4 och visar valet av kurva för samtliga undersökta fall för 60 minuters varaktighet.

**Tabell 7. Sammanställning av jämförelsen mellan de dimensionerande brandeffektkurvorna och de standardiserade tid-temperaturkurvorna i exemplet i avsnitt 7.5.**

Tunnelhöjd	Dim. brand	ISO	HC	Val av kurva	Nästa steg
6	NFPA Medium 20 MW	Högre	Lägre	<b>HC 60</b>	Processen avslutas
7		Lägre	Lägre	ISO 60	Processen avslutas
8		Lägre	Lägre	ISO 60	Processen avslutas
6	NFPA Fast 60 MW	Högre	Högre	<b>HC 60</b>	Processen avslutas
7		Högre	Högre	<b>HC60</b>	Processen avslutas
8		Högre	Lägre	HC 60	Processen avslutas

### 8.3 Exempel – 120 min varaktighet

I två fall av de som redovisas i Tabell 3 (NFPA Fast 60 MW, takhöjd 6 och 7 m) ger den dimensionerande brandens brandeffektkurva värden som överstiger de standardiserades (ISO och HC), varför dessa kurvor här kommer att användas för att åskådliggöra korrigeringsmetoden (nästa steg 5-6 i Tabell 5). I detta fall antas tunnelns ytmaterial vara betong.

Figur 17 ger vid handen att brandeffektkurvan för 60 MW-branden (takhöjd 6 m, punkterade kurvan) ger högre värden än ISO-kurvan ca 8 min efter att branden startade, vilket ger starttiden för beräkning av tidsintervallet  $\Delta t$ . Den dimensionerande brandeffektkurvan sjunker inte igen. I detta fall blir tidsintervallet  $\Delta t = 120 - 8 = 112$  minuter, vilket används för att läsa av kurvan för betong och 6 m takhöjd i Figur 20, varvid en sluttemperatur på ungefär 1220 °C erhålls. Enligt ekvation (4) för betong blir motsvarande värde 1232 °C. Det innebär att felmarginalen jämfört med HC kurvan enligt ekvation (7) är 12 %, vilket överstiger ekvation 6d, som anger gränsen 2.5 % för  $\Delta t > 60$  minuter. Därför måste vi välja en högre kurva än HC kurvan. Vi väljer **HCM120**. Eftersom  $\Delta t$ -värdet blir aningen lägre för en tunnel med 7 m takhöjd (Figur 18) blir resultatet detsamma som för en tunnel med 6 m takhöjd dvs **HC120**.

Det finns ett gränsfall i Tabell 5 som kan undersökas, 6 m takhöjd och 20 MW (Figur 17). Starttiden där 20 MW kurvan skär ISO brandeffektkurvan är vid 19 minuter och sluttiden när den skär igen ISO kurvan är ungefär 53 minuter. Det betyder att  $\Delta t = 53 - 19 = 34$  minuter. Enligt ekvation (4) blir temperaturen lika med 1113 °C som är långt över ISO temperaturen. Eftersom värdet ligger även lite över högsta temperaturen för HC, kan vi applicera kriteriet i ekvation (7), vilket ger 1,4 %. Detta är lägre än 2,5 %, vilket gör att man kan välja HC 120.

**Tabell 8. Sammanställning av jämförelsen mellan de dimensionerande brandeffektkurvorna och de standardiserade tid-temperaturkurvorna i exemplet i avsnitt 7.6 (betongtunnel, dimensionerande brandvaraktighet 120 minuter).**

Tunnelhöjd	Dim. brand	ISO	HC	Val av kurva	Nästa steg
6	NFPA Medium 20 MW	Högre	Lägre	<b>HC 120</b>	Processen avslutas
7		Lägre	Lägre	ISO 120	Processen avslutas
8		Lägre	Lägre	ISO 120	Processen avslutas
6	NFPA Fast 60 MW	Högre	Högre	<b>HCM 120</b>	Processen avslutas
7		Högre	Högre	<b>HCM 120</b>	Processen avslutas
8		Högre	Lägre	HC 120	Processen avslutas

Fördelen med denna metod är att den tar hänsyn till det faktum att de material som använts i tunnelkonstruktionen ger större påverkan för längre brandvaraktigheter än för kortare, vilket framför allt är viktigt vid analys av förflytningsbara bränder. Metoden är grafisk och därför enkel att använda. I situationer där de takhöjder och värden som anges i denna rapport befinns vara otillräckliga hänvisas till tidigare publicerad SP-rapport [1].

## 9. Sammanfattning och slutsatser

En uppsjö lagar och regler styr brandskyddet i järnvägstunnlar och det tillgängliga utrymmet att använda sig av ingenjörsmässiga metoder för branddimensionering är begränsat. Den metod som presenteras i denna rapport möjliggör korrelation mellan en dimensionerande brand och brandeffektkurvor som beräknats baserat på standardiserade tid-temperaturkurvor och för tre olika tunnelhöjder, vilka anses vara representativa för de flesta svenska järnvägstunnlar.

En enkel grafisk metod har tagits fram i syfte att underlätta valet av en standardiserad tid-temperaturkurva baserat på en dimensionerande brand (brandeffekt i MW som en funktion av tiden). Metoden är tänkt att vara lätt att använda och bygger på en teori som presenteras i en tidigare publicerad SP-rapport [1].

I sin mest grundläggande form går metoden ut på att visuellt jämföra den dimensionerande brandeffektkurvan med de i förväg beräknade brandeffektkurvorna, vilka motsvarar olika standardiserade tid-temperaturkurvor och takhöjder. Så länge den dimensionerade branden ger värden som på alla punkter är lägre än åtminstone en av de standardiserade kurvornas kan beslut tas utifrån den grafiska framställningen. Om den dimensionerande brandeffektkurvans värden överstiger HC-kurvans kan en korrigeringsmetod användas för att beräkna maximal temperatur. Den senare metoden bygger även den på jämförelser utifrån en grafisk framställning som utvecklats inom projektet.

Totalt tre vagnar eller en totallängd om 75 m utgör den övre gränsen för att metoden ska kunna användas. Om analysen gäller fler vagnar eller en högre totallängd måste en mer avancerad metod användas för att utföra analysen.

Metodens fördelar är att den är enkel att förstå och använda samt att den relaterar till den dimensionerande brand som tas fram inom varje projekt. Metoden kan givetvis vidareutvecklas och dess precision ökas ytterligare. Den kan dock anses utgöra ett stort steg framåt i utvecklingen mot en analytisk metod för branddimensionering av tunnelkonstruktioner.

## 10. Referenser

1. Li, Y.Z. and H. Ingason, *New models for calculation of maximum gas temperatures in large tunnel fires*, in *SP Report 2016:95*. 2016.
2. Åhnberg, N., J. Häggström, and B. Wahlström, *Dimensionerande brandeffektkurvor i persontåg*. 2014, Trafikverket publ.nr: 2014:057.
3. *Fire-resistance tests - Elements of building construction - Part 1: General requirements*. 1999, International Organization for Standardization.
4. *Fire resistance tests - Part 2: Alternative and additional procedures*. 1999, European Committee for Standardization.
5. *Beproeving van het gedrag bij verhitting van twee isolatiematerialen ter bescherming van tunnels bij brand*. 1979, Instituut TNO voor Bouwmaterialen en Bouwconstructies: Delft, The Netherlands.
6. Lönnermark, A. and H. Ingason, *Gas Temperatures in Heavy Goods Vehicle Fires in Tunnels*. *Fire Safety Journal*, 2005. **40**: p. 506-527.
7. Ingason, H., Y.Z. Li, and A. Lönnermark, *Tunnel Fire Dynamics*. 2015: Springer.
8. Li, Y.Z. and H. Ingason, *The maximum ceiling gas temperature in a large tunnel fire*. *Fire Safety Journal*, 2012. **48**: p. 38-48.
9. Lönnermark, A., et al. *Large-scale Commuter Train Tests - Results from the METRO Project*. in *Proceedings from the Fifth International Symposium on Tunnel Safety and Security (ISTSS 2012)*. 2012. New York, USA: SP Technical Research Institute of Sweden.
10. Li, Y.Z., H. Ingason, and A. Lönnermark, *Correlations in different scales of metro carriage fire tests*. 2013, SP Technical Research Institute of Sweden: Borås, Sweden.
11. Lönnermark, A., J. Lindström, and Y.Z. Li, *Model-scale metro car fire tests*. 2011, SP Technical research Institute of Sweden: Borås, Sweden.
12. Åhnberg, N., *Dimensionerande brandeffektkurvor i godståg*. 2016, Trafikverket.
13. Häggström, J., B. Wahlström, and M. Hjolman, *Brandskydd av tunnelkonstruktioner*. 2007, Stiftelsen svensk bergteknisk forskning (SveBEFo).
14. *NFPA 502 - Standard for Road Tunnels, Bridges, and Other Limited Access Highways*. 2014, National Fire Protection Association, 2014 Edition.
15. Lond, H., *Brandpåverkan på betongkonstruktioner*, in *Avdelningen för Konstruktionsteknik, Betongbyggnad 2005*, CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA.
16. *Betonghandbok material, utgåva 2*, ed. S. AB Svensk Byggtjänst och Cementa AB. 1994.

## Bilaga A – Bakgrund: lagar och regler

De lagar och regler som styr arbetet med tunnelsäkerhet för järnvägstrafik hänvisar till standarder som beskriver de metoder som ska användas för att säkerhetskraven uppfylls och är hierarkiska till sin struktur. Högst upp återfinns trafikpolitiska mål, varunder finns EU-direktiv ("TSD Tunnelsäkerhet", där TSD står för Tekniska Specifikationer för Driftskompatibilitet), vilka följs av nationella lagar som plan och bygglagen (PBL), lagen om skydd mot olyckor (LSO), järnvägslagen, lagen om byggande av järnväg, järnvägsförordningen och miljöbalken (MB). Lägst i hierarkin återfinns projektspecifika regelverk. Alla dessa lagar och regler förändras med tiden, vilket betyder att de antingen införlivas i eller ersätts av nya dokument. Nedan ges en kort sammanfattning av de viktigaste förändringarna med avseende på brandmotstånd i järnvägstunnlar. I centrum för de lagar och regler som styr arbetet med tunnelsäkerhet för järnvägstrafik står ett EU-direktiv, TSD Tunnelsäkerhet, vilket införlivades i svensk lag den 1 juli 2007 genom ändringar i järnvägslagen (2004:519) och järnvägsförordningen (2004:526). Den 1 juli 2008 deklarerade Transportstyrelsen, tillsynsmyndigheten inom transportområdet, att det är TSD Tunnelsäkerhet som reglerar vilka minimikrav som gäller (JvSFS 2008:4). Dessa minimikrav ersattes sedan av TSFS 2011:107, *Transportstyrelsens föreskrifter om tekniska specifikationer för driftskompatibilitet vad gäller säkerhet i järnvägstunnlar*. Denna författning upphävdes 1 januari 2015 genom TSFS 2014:132.

Sedan dess har två ändringar gjorts i TSD:n, varav den första enligt kommissionens förordning (EU) nr 1303/2014 (18 nov 2014) och den andra enligt kommissionens förordning (EU) 2016/912 (11 maj 2016). Den senare förordningen är densamma som kommissionens förordning (EU) nr 1303/2014 förutom att artikel 7 (kapitel 7), vilken definierar genomförandestrategin för TSD Tunnelsäkerhet, har utgått.

Efter att den senaste TSD:n (2016/912) publicerats har Transportstyrelsen tillkännagett att följande gäller från och med 1 januari 2017 (vilket rör bl.a. järnvägstunnlar):

TDOK2016:0231 Tunnelbyggande krav, version 1.0 ersätter dokumenten TRVK Tunnel 11 (TRV publikation 2011:087), TDOK 2015:0166 "BVH 585:30-Personsäkerhet i järnvägstunnlar" och BVS 1585.45 – Personssäkerhet i järnvägstunnlar.

I TDOK 2016:0231 anges bland annat de krav rörande brandmotstånd som gäller för järnvägstunnlar i Sverige, i vilket det hänvisas till TSD:n, d.v.s. förordning (EU) 2016/912, vilken är densamma som förordning (EU) nr 1303/2014 förutom att artikel 7 utgått.

I TDOK 2016:0231 anges att en järnvägstunnel ska uppfylla de krav som ställs i TSD Tunnelsäkerhet samt de krav som ställs i avsnitt C.2.2 i TDOK-dokumentet. Kraven i avsnitt C.2.2.2 gäller alla tunnlar som är längre än 100 m såvida inte annan längd anges för kravet i fråga.

EUREKA-kurvan (RABT/ZTV) är borttagen i TDOK 2016:0231 (vilken ersätter TRVK Tunnel 11). De delar av TDOK 2016:0231 som rör brandmotstånd återfinns i kapitel C och lyder som följer:

*§ C2.2.2.2 Inredning som utgör gräns mellan ett trafikutrymme och ett utrymme som ingår i en utrymnings- eller angreppsväg ska uppfylla kraven i brandteknisk klass REI90.*

*En öppning mellan ett trafikutrymme och ett utrymme som ingår i en nödutgång, utrymningsväg eller angreppsväg ska förses med en eller flera dörrar som tillsammans uppfyller kraven för klass EI-C90.*

*Övrig inredning i ett trafikutrymme ska uppfylla kraven i brandteknisk klass R60. Undantag får göras för delar placerade eller utformade så att de om de faller ner inte utgör hinder eller fara vid utrymning och räddningsinsats.*

*För konstruktioner av betong eller sprutbetong i ett trafikutrymme ska risken för spjälkning beaktas. Säkerheten mot betongspjälkning ska verifieras genom provning eller utredning.*

Tabell C.2-1 i dokumentet hänvisas till olika avsnitt i TSD:n gällande säkerhet i järnvägstunnlar, d.v.s. kommissionens förordning (EU) nr 1303/2014 (se kapitel 4.2.1.2 nedan).

I kommissionens förordning (EU) nr 1303/2014, kapitel 4.2.1.2, Brandmotstånd i tunnelkonstruktionen, anges att:

- a) *I händelse av brand ska tunnelns inklädnadssystem motstå brandpåverkan under en tidsperiod som är tillräckligt lång för att medge självräddning, utrymning av passagerare och personal och insats från räddningstjänsten. Denna tidsperiod ska vara i enlighet med de utrymningsscenarioer som beaktas och beskrivs i räddningsplanen.*
- b) *I fråga om sänktunnlar och tunnlar som kan orsaka att betydande närliggande byggnadsverk störtar samman ska tunnelns bärande huvudsystem stå emot brandtemperaturen under en tidsperiod som är tillräcklig för att medge utrymning av de hotade delarna av tunneln och av närliggande byggnadsverk. Denna tidsperiod ska anges i räddningsplanen.*

I kapitel 6.2.7 ges ”ytterligare krav avseende bedömning av specifikationer som gäller infrastrukturförvaltaren”.

### **Kapitel 6.2.7.2 Brandmotstånd i tunnelkonstruktionen**

Det anmälda organet ska bedöma överensstämmelsen med brandsäkerhetskraven för konstruktioner enligt punkt 4.2.1.2 genom att använda resultaten av de beräkningar och/eller provningar som gjorts av den ansökande, eller genom en likvärdig metod.

1. För att påvisa att motståndskraften hos tunnelns inklädnadssystem upprätthålls under en tidsperiod som är tillräckligt lång för att medge självräddning, utrymning av passagerare och personal och insats från räddningstjänsten är det tillräckligt att påvisa att tunnelns inklädnadssystem kan stå emot en temperatur av 450 °C vid takhöjd under denna tidsperiod.
2. Utvärdering av motståndskraften hos sänktunnlar och tunnlar som kan orsaka att betydande närliggande byggnadsverk störtar samman ska utföras enligt en lämplig temperatur-tid-kurva som väljs ut av den ansökande.

Denna kontroll krävs inte för bergtunnlar som saknar kompletterande stödkonstruktioner.

TDOK 2016:0232 (tunnelbyggande råd) har ersatt TRVR tunnel (råd).

Det finns även standarder som rör tunnelkonstruktioner. En typ av sådana är eurokoder (EN), vilket är samlingsnamnet på EU:s standarder gällande beräkningsregler för dimensionering av bärverk i byggnadsverk såsom broar och hus. I branddelen av EN 1991-1-2 finns HC-kurvan beskriven. Det är oklart om standarden gäller för tunnlar eftersom tunnlar inte klassas som byggnader, trots att bärverk ingår i dessa byggnadsverk. EN 1992-1-2 är dock värdefull för tunnlar och då särskilt EN 1992-2, som innehåller stora mängder information gällande grundläggande materialteknik och termodynamik vilken är viktig när man beräknar den termiska belastningen på konstruktionen.

SS-EN 1363-1 (allmänna krav) och SS-EN 1363-2, i vilka provningsmetoden för byggnadskonstruktioner som utsätts för brand (HC-kurvan finns beskriven i kapitel 4) upp till 2 timmar beskrivs, är också viktig i detta sammanhang.

## Bilaga B – Brandskydd i tunnelkonstruktioner

Tekniska lösningar som avser brandskyddet i tunnelkonstruktioner, med avseende på att förhindra ras och avspjälkning, kan utformas på en rad olika sätt. Informationen i denna bilaga bygger på en rapport utgiven av SveBeFo [13] och har återgivits i syfte att presentera den information som är viktig för förståelsen av hur tunnelkonstruktioner dimensioneras utifrån valet av tid-temperaturkurva och hur detta påverkar olika tekniska brandskyddslösningar. Vid dimensionering används följande procedur för betongkonstruktioner [13]:

- 1) Förundersökning av betongens brandegenskaper – d.v.s. kan vald betong visa sig vara acceptabel.
- 2) Tillsats av polypropylen (PP) fibrer i sprutbetong som läggs som ett täcksikt över betongkonstruktionen som skall skyddas.
- 3) Tillsatser av PP fibrer blandas in i de bärande betongelementen.
- 4) Brandskyddsputs sprutas som ett täcksikt över betongkonstruktionen.
- 5) Ett obrännbart värmeisolerande skikt av plattor t.ex. Promatect, hård stenull glasfiberduk eller PE-skum.

Det är inte tydligt vad som menas med ”förundersökning”, men det rör sig förmodligen om någon typ av provning eller utredning av egenskaperna i betongens sammansättning. I SveBeFo-rapporten [13] anges vidare att:

Avspjälkning av betong i betongkonstruktioner kan starta när 200°C isotermin har nått ett djup motsvarande två centimeter. Uppvärmningshastighet, betongens fukthalt och täthet, inspänningsförhållanden och tvärsnittsutformning har även stor betydelse för spjälkning.

Information av denna typ gällande temperaturer i betongen är en förenkling av den verkliga orsaken för spjälkningen, men är enkel att använda för konstruktörer som behöver värdera risken för spjälkning. Genom att tillsätta PP-fibrer i betongen, antingen 1 eller 2 kg/m<sup>3</sup>, ges ett ökat skydd mot spjälkning. Genom att dessutom lägga på ett värmeisolerande skikt byggs en barriär upp som sänker temperaturen i betongen, vilket därmed ytterligare minskar risken för spjälkning. Det vanligaste sättet att uppnå det sistnämnda är med hjälp av isolerande skivor, t.ex. Promatect, eller genom att lägga på ett extra skikt sprutbetong. I det fall en betongkonstruktion skyddas av isolerande skivor kan en uppskattning av brandpåverkan på bärförmågan göras med hjälp av ett krav i NFPA 502 [14], där det anges att temperaturen i betongen och armeringen bakom ett isolerande skiktet med en tjocklek om minst 25 mm (t.ex. en isoleringsskiva) inte får överstiga 380 respektive 250 °C. Det är därför först och främst i tunnelkonstruktioner som uppfyller kritiska funktioner (överdäckning, höghus direkt ovanpå, under vatten, osv.) som denna typ av skydd ska användas.

De flesta järnvägstunnlar i Sverige är sprängda bergstunnlar vilka belagts med sprutbetong av varierande tjocklek och med tillsats av stål eller plastfibrer. Hur tid-temperaturkurvor används i branddimensioneringen av denna typ av tunnlar varierar.

BVK 2007.001 är ett komplement till BV Tunnel och innehöll tidigare Banverkets egna omarbetningar av TSD:n gällande säkerhet i järnvägstunnlar enligt direktiven



96/48/EG och 2001/16/EG. I detta dokument hänvisades till EUREKA-kurvan gällande brandskydd av bärande konstruktioner i betong, vilket det nuvarande dokumentet inte gör. För bärande konstruktioner i annat material angav BVK att andra tid-temperaturkurvor kunde användas. Den brandkurva som skulle användas var HC-kurvan med två timmars upphettningsfas och utan avsvlningsfas. Transportstyrelsen föreslog 2016 att denna kurva skulle användas för branddimensioneringen av Stockholms tunnelbana.

Det finns olika sätt att ta hänsyn till temperaturpåverkan på betongens hållfasthet. Betong som utsätts för temperaturer över 450 °C beräknas inte bidra till lastupptagning [13]. Betong med lägre temperatur än 450 °C bibehåller den hållfasthet som gäller vid rumstemperatur. När betong utsätts för höga temperaturer genomgår cementpasta och ballast både fysikalisk och kemisk nedbrytning. Vid 100 °C börjar det kemiskt bundna vattnet att förångas. Cementpastan ökar något i volym upp till 200 °C, varefter den vid högre temperaturer i stället minskar i volym. Det förångade vattnet bygger upp ett tryck inuti betongen och redan vid 300–400 °C sker en explosiv spjälkning av betongens täckskikt. Vid ca 600 °C sker den kraftigaste nedbrytningen av cementpastan då den bryts ner till fritt kalk och vatten (det senare förångas). Ballastvolymen ökar kontinuerligt med temperaturen. Vid temperaturer i spannet 1 200–1 350 °C börjar betongen smälta [15].

Gällande armerad betong så är det temperaturen i armeringstångerna inne i betongen som är avgörande för dess hållfasthet eftersom denna minskar avsevärt vid höga temperaturer. Därför är det oftast armeringens egenskaper som avgör armerad betongs bärförmåga vid brandpåverkan: Redan vid ca 550 °C har armeringens hållfasthet halverats och vid 700 °C har den förlorat nästan all hållfasthet. Kallbearbetad armering och höghållfasta stål är känsligare för upphettning än varmvalsade: Vid 400 °C har sträckgränsen och brottgränsen minskat till samma nivå som för varmbearbetad armering p.g.a. det är vid denna temperatur som de positiva effekterna av efterarbetningen av det kallbearbetade stålet går förlorade [15, 16].

Andra krav att beakta vid dimensionering är att en betongtunnel ska vara brandisolerad så att temperaturen vid slakarmering är < 300 °C eller vid kalldragen spännarmering < 150 °C, varvid ingen särskild branddimensionering erfordras [13].

Det finns många typer av brandprov som visar både temperaturutvecklingen för olika standardiserade tid-temperaturkurvor och konsekvenserna av spjälkning [13].

Vid ett brandprov där betongplattor vilka belagts med 90 respektive 60 mm tjock stålfiberarmerad sprutbetong exponerades för temperaturer enligt RWS-kurvan i 120 minuter uppmättes som högst temperaturer i spannet 180–270 °C på 90 mm djup för plattan med den 90 mm tjocka sprutbetongbeläggningen en viss tid efter avslutning av provet. För betongplattan med den 60 mm tjocka sprutbetongbeläggningen uppmättes betydligt högre temperaturer, uppemot 640 °C på 60 mm djup, och den spjälkades kraftigt. För plattan med den 90 mm tjocka sprutbetongbeläggningen blev spjälkningens omfattning begränsad [13].

Försök har därefter genomförts med värmeexponering enligt RWS-kurvan i upp till 120 minuter samt enligt Malmö-kurvan (en kurva speciellt framtagen för Citytunneln i Malmö) under en period av 120–300 minuter. Liknande försök med betongelement

skyddade av 30 mm tjocka Promatect-T-skivor visade att isoleringsskivorna begränsade temperaturen mellan skivor och betong till maximalt 340°C. Betongen bakom skivorna befanns vara opåverkad efter provningen – däremot lossnade allt kakel under första minuten och underliggande betong uppnådde en temperatur på mer än 250°C på ett djup av ca 100 mm [13]. Dessa temperaturer överensstämmer bra med de värden som anges i NFPA 502 [14].

Under andra försök fästes Promatect-H-skivor med tjocklekar på 23, 27 och 44 mm på betongelement med dimensionen 4800 x 2000 x 450 mm<sup>3</sup>. Vid temperaturer över 100 °C uppstod spjälkning av mindre bitar av betongen i betongelementen och vid 200–250 °C (efter en temperaturstegring om 3–5 °C/min) uppstod spjälkning av större stycken. Den lösa betongens vikt ökade belastningen på skivorna tills de slutligen föll ner [13].

Norska Statens vegvesen har utfört flera brandprovningar i full skala, däribland en för PE-skum skyddat av 80 mm tjock nätarmerad sprutbetong med en tillsats av PP-fibrer (2 kg/m<sup>3</sup>). Denna exponerades för en 100 MW-brand i ett brandtest som varade i cirka fyra timmar, varav temperaturkurvan låg på nivåer som motsvarade spannet mellan HC- och RWS-kurvornas i mer än en timme. Sprutbetongen uppvisade ingen spjälkning och konstruktionen befanns vara intakt efter branden. PE-skummet uppvisade mindre tecken på smältning på några ställen bakom skyddet [13].

### **Exempel på tid-temperaturkurvor som använts i svenska tunnelprojekt [13]**

**Söderledstunneln:** RABT-ZTV-kurva (tåg) för en brandvaraktighet om 60 minuter inklusive avsvafningsfas. Brandskyddsputs (Fireshield eller likvärdig) i tak och 0,5 m ner på väggarna.

**Södra länken:** HC-kurva med 2 timmars upphettningssfas. Täcksikt av sprutbetong utan tillsatser av PP-fibrer. Det skall noteras att i Södra länkens tunnlar gäller:

- Dimensionerade brand för bärande konstruktioner ovan och invid spårområdet i tunnlar enligt HC-kurva under minst 180 min samt en avsvafningsfas på 600 °C/h. Detta inbegriper alla tågtunnlar inklusive betongtunneln under Söderström.
- Dimensionerade brand för bärande konstruktioner ovan och invid spårområde på station enligt HC-kurva under minst 120 min, utan avsvafningsfas. Detta har även föreslagits för Järvabanans passage över Citybanan.
- Bärande konstruktioner för stationer, andra byggnader och bärande byggnadsdelar som inte är över eller invid spårområdet ska dimensioneras enligt Boverkets konstruktionsregler (BKR).

#### *Brandskyddskategori 1*

Tunnelavsnitt där brandpåverkan inte riskerar att leda till kollaps i det bärande huvudsystemet, fortskridande ras eller omfattande bergutfall på grund av att bärförmågan hos installerat förstärkningssystem blir nedsatt eller går förlorat.

#### *Brandskyddskategori 2*

Tunnelavsnitt där brandpåverkan riskerar att leda till 1) kollaps i det bärande huvudsystemet följt av fortskridande ras, 2) brott i det bärande huvudsystemet följt av fortskridande ras, eller 3) brott med omfattande bergutfall på grund av att bärförmågan hos installerat förstärkningssystem blir nedsatt eller går förlorat.

Vid utformning av en sprutbetongkonstruktion med isoleringsskikt läggs isoleringsskiktet utanpå den stålfiberarmerade sprutbetongkonstruktionen. Den stålfiberarmerade sprutbetongen behöver inte innehålla PP-fibrer för att förhindra spjälkning om temperaturen i sprutbetongytan beräknas bli lägre än den temperatur vid vilken spjälkning uppkommer, d.v.s. ca 700 °C enligt prover utförda vid Citybanan. Eftersom sprutbetongen innehåller stålfibrer, vilka kan förväntas vara jämnt fördelade över tvärsnittet, ska tjockleken på isoleringsskiktet dimensioneras så att temperaturen i sprutbetongytan beräknas bli  $\leq 300$  °C. Detta innebär dels att temperaturvillkoret då sprutbetongen anses förlora sin bärförmåga är uppfyllt (400 °C) och dels att marginalen för spjälkning i den underliggande sprutbetongen kan anses vara god [13].

Isoleringsskiktet kan utgöras av olika typer material.

Tjockleken på det isolerande skiktet dimensioneras med hjälp av värmeinträngningsberäkningar.

I det fall ett isolerande skikt av sprutbetong väljs ska beräkningarna ta hänsyn tas till fuktkvoten.

Den totala tjockleken på isoleringsskiktet ska beräknas med hänsyn till en spjälkningsmån om 20 mm enligt ekvation 1. Spjälkningsmånen får inte tillgodoräknas vid temperaturinträngningsberäkningar.

Det isolerande skiktet får inte tas med i beräkningar av sprutbetongkonstruktionens bärförmåga. Halten av PP-fibrer i den isolerande sprutbetongen bestäms i samband med provning i syfte att säkerställa en spjälkningsmån om 20 mm.

$$d_{\text{tot}} = d_i + d_{\text{spjälk}}$$

där  $d_{\text{tot}}$  = tjockleken på det isolerande skiktet

$d_i$  = isoleringstjocklek

$$d_{\text{spjälk}} = 20 \text{ mm}$$

Brandprovning utfördes under sommaren 2007 vid SP i syfte att studera skydd mot betongavspjälkning. Efter genomförda prover togs ett förslag fram (som senare godkändes av Stockholms stad) vilket innebar tillsats av 1 kg/m<sup>3</sup> PP-fibrer i de nya betongkonstruktionerna.

Vid brandprovning skall följande acceptanskriterier gälla:

- Spjälkning får i medeltal uppgå till högst 20 mm.
- Spjälkningen i enskilda mätpunkter får uppgå till högst 40 mm.

- Infästningsanordningen ska uppvisa funktionalitet under hela provningsförloppet, d.v.s. det material som ska förankras får inte falla ned p.g.a. brandpåverkan på infästningsanordningen.

**Hallandsåstunneln:** RWS-kurva enligt BV Tunnel (kurva III) utan avsvalningsfas.

De prefabricerade tunnelelementen samt de återstående platsgjutna konstruktionerna skall brandskyddas genom inblandning av PP-fibrer vid tillverkning av betongtunnel: Stålfiberarmerad sprutbetong innehållande 1 kg/m<sup>3</sup> PP-fibrer ska användas och tjockleken tillåts variera mellan 70 och 110 mm. Tillsats av PP-fibrer planeras i tak och väggar. Sprutbetongen säkras mot den bakomvarande betongen med universalskruv i rutnät (c/c 650 mm). För den platsgjutna betongen valdes en fiberinblandning på 1 kg/m<sup>3</sup>.

### **Botniabanan:**

Eventuell betongtunnel skall konstrueras så att risken för kollaps begränsas under påverkan av dimensionerande brand. Lokala skador i betongens ytskikt kan dock accepteras. Dimensionerande brandgastemperatur för betongtunnlarna skall följa HC-kurvan enligt SS-EN 1363 – det är dock oklart om detta verkligen efterlevts. Något särskilt skydd för att förhindra avspjälkning vid brand finns inte i Botniabanans betongtunnlar. Betongtunnlarna har inte heller någon särskild lösning för att skydda betongen mot spjälkningsrelaterad problematik vid brand.

### **Bergtunnel med sprutbetong**

Dräner av polyeten i dimensionen 100 mm skyddas med 30 mm oarmerad sprutbetong och 80 mm stålfiberarmerad sprutbetong. Det finns även platser med oskyddade dräner. Dränkonstruktion. Skyddet är inte anpassat för att uppfylla kraven på brandskydd i tunnlar utan för att hålla dränerna på plats vid de tryckstötter som uppstår i tunnlar till följd av tågtrafikens höga hastigheter, samt för att uppfylla ytskiktklass obrännbart material klass 1 enligt BBR 94.

### **Norra länken**

Enligt Tunnel 2004, vilket är det regelverk Norra länken följer med avseende på dimensionerade brand för konstruktioner, så ska brandskyddet av bärande konstruktioner dimensioneras enligt en HC-kurva med tre timmars upphettningssfas och utan avsvalningsfas. Som tillägg till kraven i Tunnel 2004 anges i den tekniska beskrivning som använts vid upphandling av Norra länken följande krav:

### **Bergtunneln – inklädnad och kulvertvägg**

Inklädnaden skall endast dimensioneras för R60, dock skall entreprenören kunna visa att ingen spjälkning uppstår vid brand.

Spjälkning redovisas enligt kurva II i Tunnel 2004 för en brandvaraktighet om 60 min (SS-EN 1363-1).

Spjälkningen skall beräknas för två faser: utrymningsfasen, vilken innefattar de första 10 minuterna och under vilken ingen spjälkning får ske, och insatsfasen, vilket är de

efterföljande 50 minuterna, där spjälkning i mindre omfattning kan tillåtas. Verifiering av spjälkningsskydd kan utgå vid inblandning av 2 kg PP-fibrer enligt Tunnel 2004.

### **Betongtunnel**

Samtliga ytskikt i trafikunnel utförs på sådant sätt att spjälkning i ytskikt varken stör utrymning eller förhindrar insats från räddningstjänsten. Under brandens första tio minuter får ingen betongspjälkning ske. Under räddningstjänstens insats, vilken omfattar de efterföljande femtio minuterna, tillåts betongspjälkning i mindre omfattning i anslutning till brandhärden. Brottstycke får inte vara mer än centimeterstort.

Valt koncept för förbättring av brandmotstånd och spjälksäkerhet skall verifieras med utredningar alternativt brandprovning. Program för brandprovning upprättas av entreprenören för beställarens godkännande. Om brandisolering utnyttjas och denna dimensioneras så att betongens yttemperatur är  $\leq 300$  °C anses konstruktionen ha samma bärförmåga som i rumstemperatur. Brandskyddsisoleringens infästning i konstruktionsbetongen skall verifieras genom brandprovning.

### **Bergtunnel med sprutbetong**

Bergtunneln utförs med sprutning mot ett bakomliggande tätt membran. Tillgängligt utrymme för sprutbetongskonstruktionen är 150 mm med minimitjocklek 100 mm.

Sprutbetongskonstruktionen skall förankras till bakomliggande berg, varvid genomföringar genom membranet skall uppfylla samma täthetskrav som själva membranet.

Minsta täckande betongskikt är 30 mm mellan armering och bakomliggande tunnelduk och 45 mm mellan armering och trafikutrymme.

### **Dimensioneringskrav [13]**

Konstruktionslösningarna för tunnlarna är likartade de som använts i Hallandsåstunneln, med den skillnaden att den dimensionerade brandkurvan för konstruktioner är en annan då Citytunneln endast är till för persontrafik och farligt gods inte transporteras i tunneln. Inom ramen för projektet togs en egen brandkurva (brandeffekt/temperatur) fram vilken baseras på ett scenario där ett fem vagnars långt persontåg fullständigt bränns ur. Brandkurvan är ett av Banverket godkänt avsteg från verkets kravspecifikation för Citytunneln.

### **Betongtunnel**

Armerade cirkulära betongelementen som är 350 mm tjocka och innehåller 1 kg/m<sup>3</sup> PP-fibrer. Täcksiktet utanpå armeringen är av en tjocklek på 60 mm.

## Sammanfattning [13]

- I de flesta större tunnelbyggprojekt som pågår för närvarande kommer tillsats av PP-fibrer till betongen att göras för någon del av tunnelkonstruktionen.
- I flera större tunnelprojekt har kraven i Tunnel 2004 eller BV Tunnel förtydligats alternativt kompletterats med projektspecifika krav.
- I BV Tunnel är kravet att förhindra kollaps inte tidsbestämt, vilket det är i BBR.
- Risken för spjälkning är stor för många betongkvaliteter, särskilt gällande tät betong såsom självkompakterande och högpresterande.
- Inblandning av relativt små mängder PP-fibrer ger bra skydd mot spjälkning i alla typer av betong.
- För sprutade system och skivor är det viktigt att den mekaniska infästningen är utprovad och kontrollerad. Risken för vidhäftningsbrott och nedfall vid en brand är stor, vilket skulle innebära en kraftig nedsättning av säkerheten i tunneln vid brand.
- Skyddssystem är utprovade och godkända för olika brandkurvor under en begränsad tid, t.ex. 60 minuter för ISO 834. Vid en verklig brand kan brandförloppet avvika kraftigt från de tänkta scenarierna, vilket kan innebära att påverkan på skyddssystemet inte överensstämmer med den för vilken det utprovats. Exempelvis finns det skivor och sprutsystem vars skyddsegenskaper baseras på att det finns vatten eller andra ämnen bundet i materialet som när de förångas eller omvandlas har en kylande effekt på den bakomvarande konstruktionen, men vars funktion vid en långvarig brand är okänd.
- NCC har erfarenhet av att PP-fibrer i betong inverkar menligt på arbetsbarheten: den blir "död" redan efter 30–45 minuter.
- Golder Associates AB har erfarit att det är viktigt att ha god kontroll över sprutbetongens sammansättning på så sätt att den anpassas vid tillsats av PP-fibrer. Det föreligger annars stor risk för att sprutbetongen skiktas vid applicering och det skyddande lagrets kvalitet blir ojämnt.
- Betong med inblandning av PP-fibrer kräver större sättmått än icke-inblandad betong för att det ska kunna vibreras på konventionellt sätt.



Trafikverket, 781 89 Borlänge. Besöksadress: Röda Vägen 1  
Telefon: 0771-921 921, Texttelefon: 0243- 750 90

[www.trafikverket.se](http://www.trafikverket.se)