

# **BRANDSKYDD AV TUNNELKONSTRUKTIONER**



Johan Häggström

Bo Wahlström

Maria Hjohlman

STIFTELSEN SVENSK BERGTEKNISK FORSKNING  
SWEDISH ROCK ENGINEERING RESEARCH

# **Brandskydd av tunnelkonstruktioner**

## **Fire protection of tunnel structures**

Johan Häggström, Brandskyddslaget  
Bo Wahlström, Brandskyddslaget  
Maria Hjohlman, SP

SveBeFo rapport 82

Stockholm 2007  
ISSN 1104 – 1773  
ISRN SVEBEFO-R—82—SE



## FÖRORD

Den forskning om brandskydd i tunnlar som genomförts i Sverige har främst varit inriktad mot utrymnings säkerhet. Riktlinjer inom området har tagits fram för Sverige och gemensamt för Europa. Motsvarande kunskap finns inte tillgänglig för brandskydd av tunnelkonstruktioner. I byggprojekt har brandskyddet av konstruktionen därför ofta startat med omfattande undersökningar för att formulera egna krav och sedan följts av kostsamma projektspecifika provningar. Behovet av en samlad kunskap från byggprojekt och genomförd forskning för brandskydd av tunnelkonstruktioner är därmed uppenbart och har varit utgångspunkten för detta projekt som drivits i SveBeFos regi och med Vägverket, SL och SKB som huvudfinansiärer.

Projektet har genomförts i samverkan mellan Brandskyddslaget och SP och med Bo Wahlström som projektledare. Rapporten innehåller en sammanställning av utförd forskning, kravnivåer i regelverk och tekniska lösningar med utförda provningar samt jämförelser med lösningar i några aktuella tunnelprojekt, därtill några förslag till fortsatt arbete. Förhoppningen är att rapporten ska ge ett bättre underlag för val av brandskydd i olika fall och även till en utveckling och samordning av aktuella regelverk baserat på den kunskap som finns tillgänglig.

Arbetet har följts av en referensgrupp bestående av Per Boman, SL, Bernt Freiholtz och Kjell Windelhed, VV, Thomas Dalmalm, NCC, Tommy Ellison, Besab, Anders Fredriksson, Golder Associates, Kristina Larsson, LTU, samt undertecknad.

Stockholm i november 2007

*Tomas Franzén*



## **SAMMANFATTNING**

En litteraturstudie har genomförts där den nuvarande kunskapen inom brandskydd av tunnelkonstruktioner har sammanställts. Studien omfattar framför allt erfarenheter från Sverige men även till viss del resultat från internationella studier. Rapporten innehåller en sammanställning av de krav som ställs i olika regelverk vad gäller brandskydd till tunnlar. Vidare har resultat från utförd provning och forskning inom området ställts samman. Detta har jämförts med några praktiska exempel på lösningar som tillämpas i flera nyligen uppförda tunnelkonstruktioner.

Nyckelord: Tunnlar, brand, skydd, konstruktion, regler, provning.

## **SUMMARY**

A literature study has been conducted to summarize the knowledge of fire protection of tunnel lining systems in Sweden of today. The study covers the experience gained in Sweden, but also, to some extent, internationally. The report includes a review of requirements in codes and regulations, a summary of conducted research and testing activities, and examples of technical solutions used in recent tunnel construction projects.

Key words: Tunnel, fire, protection, structure, regulations, testing.



# INNEHÅLLSFÖRTECKNING

<b>1</b>	<b>INLEDNING</b> .....	<b>1</b>
1.1	OMFATTNING OCH SYFTE .....	1
1.2	BAKGRUND .....	1
1.3	OMRÅDESÖVERSIKT .....	1
1.4	RELEVANS .....	2
1.5	GENOMFÖRANDE .....	2
1.6	PROJEKTGRUPP OCH REFERENSGRUPP .....	3
<b>2</b>	<b>REGELVERK</b> .....	<b>5</b>
2.1	LAGAR OCH FÖRESKRIFTER .....	5
2.2	VÄGVERKETS TUNNEL 2004 .....	6
2.3	BANVERKET BV TUNNEL (BVS 585.40) OCH KOMPLEMENT BVK 2007.001 .....	8
2.4	REGLER FÖR ÖVRIGA TUNNLAR .....	10
2.5	ANDRA VÄGLEDANDE DOKUMENT .....	10
2.5.1	<i>Betongföreningen</i> .....	10
2.5.2	<i>Projektspecifika krav Ringen och Yttre tvärleden</i> .....	10
2.5.3	<i>Norska regler</i> .....	11
<b>3</b>	<b>BRANDPROVNINGAR</b> .....	<b>15</b>
3.1	INTRODUKTION .....	15
3.2	PROVNINGSMETODER .....	16
3.3	PROVNING AV BETONGELEMENT .....	18
3.3.1	<i>Provning av betongpelare - SP forskningsprojekt</i> .....	18
3.3.2	<i>Provning av betong - SP forskningsprojekt</i> .....	19
3.3.3	<i>Provning av betong för Hallandsås-projektet</i> .....	21
3.3.4	<i>Småskalig provning av betong för Malmö Citytunnel</i> .....	22
3.3.5	<i>Provning av betong för Malmö Citytunnel</i> .....	23
3.3.6	<i>Provning av betong för Malmö Citytunnel</i> .....	24
3.3.7	<i>Provning av betong för North Downs Tunnel som ingår i Channel Tunnel Rail Link (CTRL), England</i> .....	25
3.3.8	<i>Provning av betongsegment för tåg tunneln "Groene Hart", Holland</i> .....	27
3.3.9	<i>Provning av betongsegment tillverkat av betong innehållande relativt stor mängd PP-fibrer.</i> 27	27
3.4	PROVNING AV SPRUTBETONG .....	28
3.4.1	<i>Provning av sprutbetong för Hallandsåsprojektet</i> .....	28
3.4.2	<i>Provning av sprutbetong</i> .....	30
3.4.3	<i>Skydd av berg vid upprepade fullskalebrandförsök i Repparfjordtunneln</i> .....	31
3.5	PROVNING AV SPRUTBETONG OCH ISOLERMATTA/TÄTSKIKT .....	31
3.5.1	<i>Provning av isolermatta/tätskikt i kombination med sprutbetong för Citybanan</i> .....	31
3.5.2	<i>Småskalig provning av sprutbetongskikt som skydd av PE-matta för Citybanan</i> .....	32
3.5.3	<i>Provning av sprutbetongskikt som skydd av PE-matta för Citytunneln</i> .....	33
3.6	PROVNING AV SPRUTISOLERING .....	35
3.6.1	<i>Småskalig provning av EPS-element, SP forskningsprojekt för SveBeFo</i> .....	35
3.6.2	<i>Fullskaleprovning av EPS-element, SP forskningsprojekt för SveBeFo</i> .....	36
3.7	PROVNING AV SKIVOR.....	36
3.7.1	<i>Provning av kalciumsilikatskivor infästa på betongelement</i> .....	36
3.7.2	<i>Provning av kalciumsilikatskivor och kakel på betongelement</i> .....	36
3.7.3	<i>Provning av kalciumsilikatskivor på betongelement för Westerschelde Tunnel</i> .....	37
3.7.4	<i>Provning av glasfiber-lättbetongskivor</i> .....	38
3.8	PROVNING AV ÖVRIGA PRODUKTER .....	40



3.8.1	<i>Småskalig provning av betongliknande material (Maxit)</i> .....	40
3.8.2	<i>Provning av betongliknande material (Fendolite MII) för Westerschelde Tunnel</i> .....	40
3.9	ÖVRIGA FORSKNINGSPROJEKT .....	41
3.9.1	<i>Runehammarförsöken</i> .....	41
3.9.2	<i>Europaprojekt - FIT</i> .....	42
3.9.3	<i>Europaprojekt - DARTS</i> .....	42
3.10	PÅGÅENDE PROJEKT .....	42
3.10.1	<i>SBUF-projektet</i> .....	42
3.10.2	<i>Statens Vegvesen, Norge</i> .....	43
3.10.3	<i>Formasprojektet</i> .....	43
3.10.4	<i>Vägverksprojektet</i> .....	43
3.10.5	<i>Europaprojekt - Newcon</i> .....	43
3.10.6	<i>Europaprojekt - UPTUN</i> .....	44
3.10.7	<i>Europaprojekt – L-SURF</i> .....	44
3.10.8	<i>RILEM komitté</i> .....	44
3.10.9	<i>Holländskt projekt</i> .....	44
<b>4</b>	<b>EXEMPEL PÅ TEKNISKA LÖSNINGAR OCH REKOMMENDATIONER</b> .....	<b>45</b>
4.1	ALLMÄNT .....	45
4.2	SÖDERLEDSTUNNELN (RENOVERING).....	45
4.2.1	<i>Beskrivning av tunneln</i> .....	45
4.2.2	<i>Dimensioneringskrav</i> .....	45
4.2.3	<i>Betongtunnel med sprutbetong/brandskyddsputs</i> .....	46
4.3	SÖDRA LÄNKEN.....	46
4.3.1	<i>Beskrivning av tunneln</i> .....	46
4.3.2	<i>Dimensioneringskrav</i> .....	46
4.3.3	<i>Betongtunnel med sprutbetong</i> .....	47
4.4	LÖTTINGETUNNELN .....	48
4.4.1	<i>Beskrivning av tunneln</i> .....	48
4.4.2	<i>Dimensioneringskrav</i> .....	48
4.4.3	<i>Betongtunnel med sprutbetong</i> .....	48
4.5	CITYBANAN .....	50
4.5.1	<i>Beskrivning av tunneln</i> .....	50
4.5.2	<i>Dimensioneringskrav</i> .....	50
4.5.3	<i>Acceptanskriterier vid brandprovning</i> .....	52
4.5.4	<i>Exempel på stålfiberarmerad sprutbetong med separat isoleringsskikt</i> .....	52
4.6	ÖVERDÄCKNING SNÖFLINGAN .....	54
4.6.1	<i>Beskrivning av överdäckningen</i> .....	54
4.6.2	<i>Dimensioneringskrav</i> .....	54
4.6.3	<i>Betongtunnel (vägtunneln)</i> .....	54
4.6.4	<i>Betongtunnel (spårtunneln)</i> .....	54
4.7	GÖTATUNNELN .....	55
4.7.1	<i>Beskrivning av tunneln</i> .....	55
4.7.2	<i>Dimensioneringskrav</i> .....	55
4.7.3	<i>Bergtunnel med sprutbetong</i> .....	55
4.7.4	<i>Betongtunnel med brandskyddsskivor</i> .....	56
4.8	HALLANDSÅSTUNNELN .....	56
4.8.1	<i>Dimensioneringskrav</i> .....	56
4.8.2	<i>Betongtunnel</i> .....	57
4.9	BOTNIABANAN.....	57
4.9.1	<i>Dimensioneringskrav</i> .....	57
4.9.2	<i>Betongtunnel med sprutbetong</i> .....	57
4.9.3	<i>Bergtunnel med sprutbetong</i> .....	57
4.10	ÅDALSBANAN .....	58

4.10.1	<i>Beskrivning av tunneln</i> .....	58
4.10.2	<i>Dimensioneringskrav</i> .....	59
4.10.3	<i>Betongtunnel</i> .....	59
4.10.4	<i>Bergtunnel</i> .....	59
4.11	NORRA LÄNKEN .....	59
4.11.1	<i>Beskrivning av tunneln</i> .....	59
4.11.2	<i>Dimensioneringskrav</i> .....	59
4.11.3	<i>Bergtunnel med sprutbetong</i> .....	60
4.12	CITYTUNNELN.....	61
4.12.1	<i>Beskrivning av tunneln</i> .....	61
4.12.2	<i>Dimensioneringskrav</i> .....	61
4.12.3	<i>Betongtunnel</i> .....	61
4.12.4	<i>Erfarenheter av pp-fibrer i betong</i> .....	62
<b>5</b>	<b>SLUTSATSER OCH KOMMENTARER</b> .....	<b>65</b>
<b>6</b>	<b>FORTSATT ARBETE</b> .....	<b>65</b>
<b>7</b>	<b>REFERENSER</b> .....	<b>67</b>

**Bilaga A**      **Betongrecept**

**Bilaga B**      **Resultat från provning BRk6036 och BRk6037**

**Bilaga C**      **Söderledstunneln**



# 1 INLEDNING

## 1.1 Omfattning och syfte

Projektets syfte är att sammanställa resultat från provningar och forskning på olika typer av brandskydd till tunnlar. Vidare skall de krav som ställs i olika regelverk framför allt i Sverige men även till viss del internationellt ställas samman. Detta skall jämföras med några praktiska exempel på lösningar som tillämpats. Slutligen skall förslag på fortsatt forskning ges.

## 1.2 Bakgrund

Den omfattande forskning inom brandskydd i tunnlar som genomförts i Sverige har främst varit inriktad mot utrymningssäkerhet, och riktlinjer inom området har tagits fram för Sverige och gemensamt för Europa. Motsvarande finns inte alls i samma omfattning för brandskydd av tunnelkonstruktioner d.v.s. berg, betong etc. I byggprojekt har brandskyddet av tunnelkonstruktioner därför ofta behövt starta med omfattande undersökningar för att finna egna lämpliga kravnivåer och sedan följts av kostsamma projektspecifika fullskaleprovningar.

Den samlade kunskapen från alla byggprojekt och genomförd forskning för tunnelkonstruktioner finns idag inte samlad och tillgänglig som underlag för framtida byggprojekt och forskning. För att möta framtidens krav med målinriktad forskning, effektivare lösningar av brandskyddet och möjlighet att påverka regelarbetet inom området så har den nuvarande kunskapen sammanställs genom en förstudie/litteraturstudie. Den omfattar tre delar; kravnivå i regelverk, utförd forskning och provning samt exempel på tekniska lösningar.

## 1.3 Områdesöversikt

De regler och riktlinjer som idag används är baserade på empiriska studier, ofta flera decennier gamla. Under senare år har flera experimentella studier genomförts med framför allt självkompakterande betong och betong för tunnelkonstruktioner. Studierna har resulterat i flera oväntade resultat, som exempelvis att konstruktioner belastade i böjning (dragspänningar på den brandbelastade ytan) spjälkar vilket inte var väntat. I vissa fall har den betong som avseende spjälkning bedömts vara bäst spjälkat mer än den betong som bedömts vara sämst. Detta visar att om man experimentellt skall utarbeta riktlinjer för brandbeständig betong krävs det ett mycket omfattande provningsprogram. Det finns många experimentella studier gjorda på skydd som exempelvis betong, sprutbetong, sprutisolering och olika typer av skivprodukter. Ofta är dessa studier gjorda för specifika projekt och inte publicerade.

## 1.4 Relevans

Ett otillräckligt brandskydd av konstruktioner kan leda till förödande konsekvenser. I värsta fall kan en kollaps inträffa. Även om detta inte sker kan samhällets infrastruktur utsättas för allvarlig störning och avbrott under branden, vid efterföljande undersökningar av konstruktioner och vid reparationer. Till detta ska läggas de ekonomiska konsekvenserna vilket inte enbart innefattar reparationskostnader utan även indirekta kostnader för stillestånd.

Vid branden i tunneln under Engelska kanalen spjälkade i princip hela betonginklädnaden bort (400 mm tjock betong). Reparationskostnaden beräknades till SEK 800 miljoner medan kostnader för förlorade intäkter, material (tåg, lastbilar etc.) och dylikt uppgick till SEK 2000 miljoner. Vid branden i Mont Blanc tunneln var dessa kostnader SEK 1750 miljoner respektive SEK 1900 miljoner två år efter branden (och då var tunneln fortfarande stängd för trafik).

## 1.5 Genomförande

Projektet är begränsat till en litteraturstudie, och en sammanställning av resultat. Fokus ligger på svenska studier och projekt, men till viss del har även internationella studier och krav behandlats. Projektet är indelat i tre delar, en som behandlar regler och krav, en som sammanställer utförd provning och forskning, och slutligen en del som behandlar tekniska lösningar som tillämpas idag.

### *Regler och krav*

Regelverken som studeras är framför allt Vägverkets regler och de krav som Banverket ställer på olika projekt inklusive de nya EU-reglerna. I viss utsträckning har även regler i andra länder inkluderats. Krav på provning eller annan verifiering behandlas också.

### *Utförd provning och forskning*

Huvuddelen av arbetet har ägnats åt en genomgång av brandmotståndsprovning av betongkonstruktioner som utförts på SP. Beställarna av relevanta provningar har kontaktats och efter acceptans till publicering från deras sida har provningarna sammanställts. Sammanställningen innehåller beskrivningar av provobjekt och provningsmetod samt en kort sammanfattning av resultat och eventuella slutsatser. I de fall provningen utförts med anledning av ett specifikt tunnelprojekt anges detta. Forskningsaktiviteter inom flera EU projekt har, i den mån de varit tillgängliga, gått igenom och intressanta provningar har inkluderats i sammanställningen. Ett kapitel behandlar kort pågående projekt både inom SP såväl som i Europa.

### *Tekniska lösningar*

När det gäller tekniska lösningar är det intressant att ta några exempel på lösningar från praktiken och jämföra med de krav som finns i regelverken.

## 1.6 Projektgrupp och referensgrupp

Projektgruppens sammansättning är följande:

Bo Wahlström, Brandskyddslaget (projektledare)  
Johan Häggström, Brandskyddslaget  
Lars Boström, SP  
Maria Hjohlman, SP

Brandskyddslaget har arbetat med delarna regelverk och tekniska lösningar medan SP ansvarar för delarna utförd provning och forskning.

En referensgrupp har bidragit med kunskap inom området och med synpunkter på projektets och rapportens innehåll. I referensgruppen ingår följande personer:

Tomas Franzén, SveBeFo  
Per Boman, Golder/SL  
Kjell Windelhed, VV  
Bernt Freiholtz, VV  
Kristina Larsson, LTU  
Tommy Ellison, BESAB  
Anders Fredrikson, Golder  
Thomas Dalmalm; NCC



## 2 REGELVERK

### 2.1 Lagar och föreskrifter

Brandskydd i tunnlar regleras av flera lagstiftningar där de viktigaste är:

- Byggnadsverkslagen, BVL (1994:847)
- Lagen (2006:418) [1] och förordningen (2006:421) [2] om säkerhet i vägtunnlar
- Lagen (2003:778) om skydd mot olyckor
- Järnvägslagen (2004:519) och järnvägsförordningen (2004:526)

Den förstnämnda gäller vid byggnation. Boverket är statlig myndighet med föreskriftsrätt. Föreskrifter finns i form av Boverkets konstruktionsregler, BKR, samt Boverkets byggregler, BBR. Dessutom gäller Eurocodes svenska utgåvor enligt föreskrift från Boverket.

- Eurocode 1: “Actions on structures – Part 1.2: General actions – Actions on structures exposed to fire”
- Eurocode 2: “Design of concrete structures – Part 1.2: General rules – Structural fire design”

Både BKR och Eurocode behandlar materialspecifika konstruktioner, d.v.s. betongkonstruktioner, träkonstruktioner och liknande. I Eurocode finns specifika kapitel för brandfallet. Dessa regler överensstämmer i stort med de regler som tidigare tillämpats nationellt, d.v.s. BKR där hänvisning sker till en publikation från Statens råd för byggnadsforskning, Brandteknisk dimensionering av betongkonstruktioner [3]. Vid dimensionering beräknas temperaturen i betongkonstruktionen varefter bärförmågan kan bestämmas.

Gemensamt för dessa regler är att de endast fungerar i de fall betongen inte spjälkar, d.v.s. att konstruktionens tvärsnitt inte ändras vid brand. I de fall då risk för spjälkning föreligger måste betongen skyddas på något sätt.

Lagen och förordning om säkerhet i vägtunnlar trädde i kraft den 1 juli 2006. Lagen gäller dock endast tunnlar längre än 500 m, och anger minimikrav. För tunnlar utanför det transeuropeiska vägnätet gäller lagen endast tunnlar som projekteras efter lagens ikraftträdande. En föreskrift ligger för närvarande för beslut hos Boverket. I remissutgåvan anges att brandmotstånd ska finnas och som allmänt råd anges att bärförmåga vid brand kan utformas enligt Vägverkets Tunnel 2004.

Lagen om skydd mot olyckor anger endast att skäligen säkerhet ska finnas, vilket ger ett stort tolkningsutrymme. Räddningsverket är en statlig myndighet och har inte utgivit någon föreskrift rörande tunnlar. Kommunen är tillsynsmyndighet.

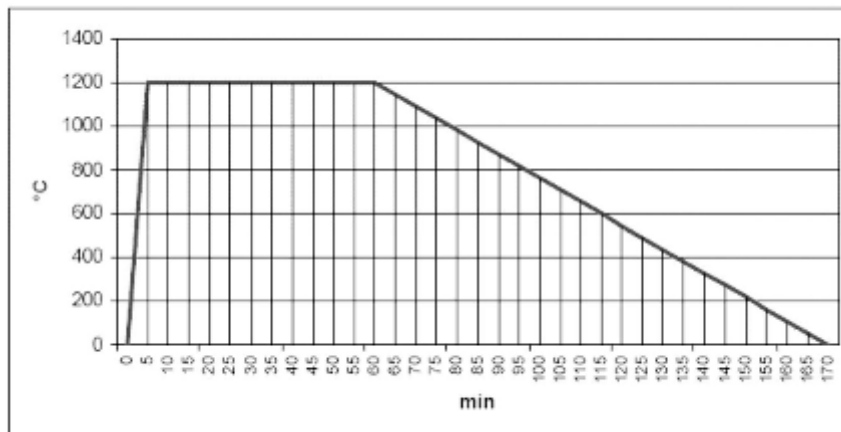
Järnvägslagen och järnvägsförordningen har Järnvägsstyrelsen som statlig myndighet med föreskriftsrätt. En föreskrift som för närvarande ligger för beslut är TSD för



tunnelsäkerhet [4] innehållande de Tekniska Specifikationer för Driftskompatibilitet (TSD) som krävs för att uppfylla direktiv 96/48/EG och 2001/16/EG avseende tunnelsäkerhet. TSD träder i kraft under år 2007 och gäller för tågtonnlar längre än 1 km. I direktivet anges följande:

*“Fire protection requirements for structures*

*This specification applies to all tunnels, irrespective of their length. The integrity of the structure shall be maintained, in the event of fire, for a period of time sufficiently long to permit self-rescue and evacuation of passengers and staff and the intervention of rescue services without the risk of structural collapse. The fire performance of the finished tunnel surface, whether in situ rock or concrete lining, has to be assessed. It shall withstand the temperature of the fire for a particular duration of time. The specified "temperature-time curve" (EUREKA-curve) is given in the following figure. It is to be used for the design of concrete structures only.”*



**Figur 2.1. EUREKA-kurvan**

Vidare anges att material i tunnel ska vara i princip obrännbara.

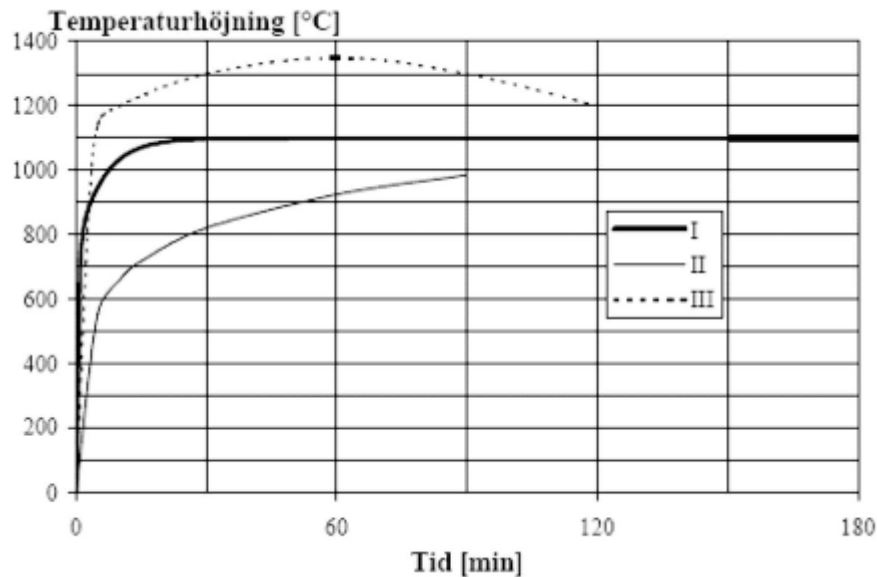
## 2.2 Vägverkets Tunnel 2004

Vägverket har utvecklat egna regler för tunnlar sedan byggandet av Södra Länken på 90-talet. Dessa bygger till stor del på tillgänglig forskning och arbete inom PIARC och Europa.

”I Tunnel 2004 [5] föreligger krav som skall gälla vid projektering. Konstruktion, nybyggnad och förbättring av vägtunnlar av betong eller stål vars längd överstiger 100 m och för vägtunnlar i berg oberoende av längd.”

I Tunnel 2004 anges dimensionerande brand för konstruktioner enligt tre tid/temperaturkurvor vilka presenteras i Figur 2.2. Vilken av dessa kurvor som

tillämpas beror på vilka förutsättningar som råder. (Vid transporter av brandfarlig gas i klass 2 krävs särskild utredning).



Figur 2.2. Gastemperatur vid brand.

”Gastemperaturen vid brand skall förutsättas följa kurva I med följande tider:  
 – 180 minuter i tunnlar där alla godstransporter utom farligt gods i klass 2 är tillåtna  
 – 120 minuter i tunnlar där alla godstransporter utom farligt gods i klass 1, 2 och 3 är tillåtna.

”För tunnlar under vatten och tunnlar under byggnader skall det utredas hur anläggningsdelarna påverkas av en avsvalningsfas som motsvarar avsvälning med 600°C/h. Utredningen skall visa att avsvälningen inte kan leda till att tunneln kollapsar.”

Tunnel 2004 anger också att bärförmåga, integritet och isolering mot brand skall verifieras enligt BBR, kapitel 5, och BKR, kapitel 10, med bl.a. nedanstående kompletteringar.

Bärförmåga skall enligt Tunnel 2004 verifieras genom provning eller beräkning eller båda.

*”För tunnlar i berg erfordras verifiering av det bärande huvudsystemets bärförmåga om denna helt eller delvis säkras med en förstärkningskonstruktion. De förutsättningar och metoder för temperaturinträngningsberäkning och dimensionering godtas som anges i ”Brandteknisk dimensionering av betongkonstruktioner” (Byggeforskningsrådet).*

*Vid branddimensionering av tak och väggar kan de principer och beräkningsgångar som finns i ”Branddimensionering av betongtunnlar, anvisningar för Ringen och Yttre Tvärleden” (Vägverket Region Stockholm) användas. Vid branddimensionering med brandlast enligt RWS-kurvan bör särskild utredning utföras. ”*

Krav på spjälkning ställs indirekt genom samma krav som i BV Tunnel. Dock anges kravet till minst 45 minuter ”utan att det uppstår lokala skador, t.ex. i form av nedfall”.

Säkerhet mot betongavspjälkning skall enligt Tunnel 2004 dokumenteras genom provning eller utredning.

”Exempel på metoder att erhålla säkerhet mot betongavspjälkning är:

- förundersökning av betongens brandegenskaper
- tillsats av polypropylenfibrer
- användning av ett obrännbart värmeisolerande skikt ”

Kravet på skydd mot spjälkning genom inblandning av PP-fibrer är mycket tydligt preciserat även om området fortfarande är föremål för stor osäkerhet.

”Anläggningsdelar av betong, vilka utgör inredning och som gränsar mot trafikutrymme, skall i sin helhet innehålla 2 kg/m<sup>3</sup> enfibertrådiga polypropylenfibrer med tjocklek ca 18 µm och längd ca 6 mm. Fibrerna skall vara ytbehandlade för att få en bättre dispergering och ett minskat vattenbehov.”

Kontroller av betongen utgör ett krav vid användande av PP-fibrer:

”Vid användandet av polypropylenfiber skall förundersökning och fortlöpande kontroll utföras enligt kraven för ny betongsammansättning, SS-EN 206-1.”

### **2.3 Banverket BV Tunnel (BVS 585.40) och komplement BVK 2007.001**

Banverket har i många stycken hämtat delar av vad som skrivits i Vägverkets Tunnel 99 och Tunnel 2004. Det ger en möjlighet till samordning då kraven är likartade, men ger också osäkerheter t.ex. när brandkurvor från vägtunnlar används för tågtunnlar.

BV Tunnel [6] är en standard som beskriver de krav som gäller vid nybyggnation av järnvägstunnlar. Denna standard kan även tillämpas för förbättrings- och reparationsarbeten i befintliga tunnlar.

I BV Tunnel anges dimensionerande brand för konstruktioners brandskydd i form av tre brandkurvor enligt Figur 2.2. Normalt används kurva I, men ibland kan riskanalys visa att kurva III bör användas. Detta kan utläsas ur nedanstående citat:

”Gasttemperaturen vid brand ska förutsättas följa kurva I i Figur 2.2 med följande tider: -180 minuter i tunnlar där godstransporter är tillåtna

-120 minuter i tunnlar som enbart trafikeras av persontåg”

”Tunnlar under fri vattenyta och tunnlar under byggnader ska dimensioneras för avsvlningshastigheten 600°C/h. För övriga tunnlar behöver brandlast vid avsvlning normalt inte beaktas.”

*”Om en tunnel under vatten eller en tunnel direkt under en byggnad ska dimensioneras för kurva III i Figur 2.2 ska detta vara angivet i den tekniska beskrivningen.  
Brandgastemperaturen enligt kurva I överensstämmer med hydrokarbonkurvan enligt SS-EN 1363-2. Kurva II är enligt SIS 02 48 20. Kurva III är den så kallade RWS-kurvan.”*

BV Tunnel anger också att bärförmåga, integritet och isolering mot brand ska verifieras enligt BBR, avsnitt 5:1, 5:2 och 5:8, och BKR, kapitel 10 med bl.a. nedanstående kompletteringar.

Anläggningsdel, bestående av bärande huvudsystem, inklädnad och inredning, som gränsar mot trafikerat utrymme ska dimensioneras för brandpåverkan eller förses med brandskyddsåtgärder mot brandpåverkan enligt vald brandkurva så att:

- kollaps inte inträffar
- den inte på grund av nedfall, utgör hinder eller fara vid utrymning under den tid som erfordras för utrymning för passagerare och personal
- räddningsmanskapets säkerhet beaktas med avseende på nedfall.

Bärförmåga ska enligt BV Tunnel verifieras genom provning och/eller beräkning.

*”Förutsättningar och metoder för temperaturinträngningsberäkning och dimensionering som anges i ”Brandteknisk dimensionering av betongkonstruktioner” (Byggeforskningsrådet) godtas.”*

*”Branddimensionering och beräkningsgångar som finns i ”Branddimensionering av betongtunnlar, anvisningar för Ringen och Yttre Tvärleden” (Vägverket Region Stockholm) kan användas, dock med brandlaster enligt 6.3.4.5.”*

Krav på spjälkning ställs indirekt genom kravet:

”Bärande huvudsystem, inklädnad och inredning nödvändiga för säker utrymning och räddningsinsats ska påvisas kunna motstå brandpåverkan under angiven utrymnings- och insatstid utan att det uppstår lokala skador, till exempel i form av nedfall.

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

Skydd mot spjälkning i form av PP-fibrer anges kort som en upplysning:

*”Tillsats av polypropylenfibrer i betongkonstruktioner har i flera studier påvisats ge en ökad säkerhet mot betongspjälkning.”*

I BVK 2007.001 som utgör ett komplement till BV Tunnel finns Banverkets egna inarbetningar av tidigare omnämnd TSD Säkerhet i järnvägstunnlar enligt direktiv 96/48/EG och 2001/16/EG. BVK 2007.001 hänvisar till Eureka-kurvan när det gäller brandskydd av bärande konstruktioner i betong. För bärande konstruktioner i annat material anger BVK att annan tid-temperaturkurva kan användas.

## **2.4 Regler för övriga tunnlar**

Övriga tunnlar i form av tunnelbanan, kabeltunnlar, underjordiska magasin etc. har inga kända regelverk för brandskydd av tunnlar konstruktioner. Flertalet tunnelägare ställer dock krav på tunnelkonstruktionerna och i vissa fall även hur skyddet ska utformas t.ex. om skivmaterial ska nyttjas.

## **2.5 Andra vägledande dokument**

### **2.5.1 Betongföreningen**

Svenska Betongföreningen har tillsatt en grupp för att utarbeta rekommendationer hur betong kan användas i brandfallet. Dessa rekommendationer beräknas finnas klara under 2008. I avvaktan på dessa har preliminära rekommendationer publicerats vilka gäller idag [7].

### **2.5.2 Projektspecifika krav Ringen och Yttre tvärleden**

Inom ramen för vägtunnelprojektet Ringen och Yttre tvärleden togs det fram en särskild anvisning för branddimensionering av betongtunnlar [8]. Denna anvisning skall tillsammans med tillämpliga delar av Vägverkets övriga regelverk, lagar och förordningar gälla som projekteringsförutsättningar för projektet. Anvisningen är aktuell och tillämpas för Norra länken och har tidigare använts för Södra länken. Det finns detaljerade krav och beräkningsexempel i anvisningen för:

- 1) Brandisolering tunnel. Isoleringen har sådan tjocklek att speciell branddimensionering ej erfordras.
- 2) Tunnel utan brandisolering.

Brandkurva som skall användas är HC-kurvan med två timmars upphettningsfas utan avsvlningsfas (se 3.2).

Betong exponerad för mer än 450°C beräknas inte bidra till lastupptagning. Medan betong med lägre temperatur än 450°C bibehåller den hållfasthet som gäller vid rumstemperatur.

Risk för avspjälkning skall beaktas i branddimensioneringen.

Betongtunnel ska vara brandisolerad så att temperaturen vid slakarmering är <300°C eller vid kalldragen spännarmering <150°C och erfordrar då ingen speciell branddimensionering enligt [8].

#### Oisolerade tunnlar utan undertak

Ett extra armeringsnät med armeringsinnehåll minst 3 cm<sup>2</sup>/m<sup>2</sup> inläggs med täcksikt minst 45 mm. Nätet förankras med vertikal upphängningsarmering. Övrig armering inläggs i två extra lager med ungefär samma armeringslängd per lager. Alternativt kan armeringsnätet ersättas med ett tredje armeringslager.

Skarvning av fälтарmeringen skall utföras genom att armeringsstängerna uppbockas i lutningen 1/3.

Erfordelig förankringslängd skall räknas inom den del där betongtemperaturen är mindre än 450 grader.

Det förutsätts att betongen upp till det understa armeringslagret spjälkas bort i ett tidigt skede. Det understa armeringslagret får därför ej medräknas vid branddimensioneringen (Den positiva effekten som pp-fibrer har mot spjälkning beaktas inte).

### **2.5.3 Norska regler**

I Norge finns krav på brandskydd av betongtunnlar vilket redovisas i [9]. Här utgår man ifrån vilken tunnelklass som tunneln tillhör samt den dimensionerande branden, se Tabell 2.1. Tunnelklassen är beroende av tunnelns längd och trafikmängd.

Tabell 2.1. Dimensionerade brand, brandkurva och brandskydd isolering.

Tunnelklass	ÅDT	Dimensionerade brand MW	Brandskydd isolering	
			Brandkurva	Tid(min)
A	0-300	20	ISO 834	60
B	300-4000	20	ISO 834	60
C	4000-8000	50	HC	60
D	8000-12000	100	HC	60
E	12000-15000	50	HC	60
F		100	HC	60

Följande funktionskrav skall uppfyllas av konstruktionen:

- Konstruktionen skall inte bidra aktivt vid en bilbrand, inte bidra till brandspridningen och branden skall inte pågå efter det att bilbranden upphört.
- Konstruktionen skall inte bidra väsentligt till extra rökutveckling eller giftiga gaser
- För vanligt konstruktionsmaterial skall giftigheten kontrolleras och uppfylla acceptans kriterierna enligt Tabell 2.2 nedan

Tabell 2.2. Acceptanskriterier för tunnelklasserna vid test enligt ISO 9705

Kriterier som skall uppfyllas vid brandprovning	Tunnelklass					
	A	B	C	D	E	F
Tid till övertändning [min]	20	20	20	20	20	20
Genomsnittlig maximal värmeavgivning över en 30 sekunds period [kW]	500	500	300	300	300	300
Genomsnittlig värmeavgivning(från produkten) [kW]	100	100	50	50	50	50
Genomsnittlig maximal rökproduktion över en 60 sekunders period [m <sup>2</sup> /s]	2,3 *(8,3)	2,3 *(8,3)	2,3	2,3	2,3	2,3
Genomsnittlig rökproduktion [m <sup>2</sup> /s]	1,4	1,4	0,7	0,7	0,7	0,7

\* = Med brandventilation installerad

I [9] anges följande lösningar som kan användas:

- Betong (gjuten eller sprutad) som innehåller finfördelad pp-fibrer. Typ och halten pp-fibrer skall vara dokumenterad och uppfylla kraven på brandmotstånd för betongmaterialet
- Betong (gjuten eller sprutad) täcks med ett brandskyddade sikt av godkänd termisk stabil lättbetong. Minsta tjocklek för brandskyddets skikt skall vara minst den tjocklek som är dokumenterad att ge tillfredsställande brandskydd och ej mindre än 20 mm.

Lösningarna skall vara godkända av Vegdirektoratet.

Enligt [10] så är standardtillsättningen av pp-fibrer i sprutbetong  $2 \text{ kg/m}^3$ . Pp- fibrer används också med samma mängd i betongelement.





## 3 BRANDPROVNINGAR

### 3.1 Introduktion

Vid bedömning av en konstruktions brandmotstånd kan flera aspekter beaktas. Dessa finns väl beskrivna i olika provningsstandarder. Exempel på funktioner där krav kan ställas är bärförmåga, täthet mot brand och isolationsförmåga. Provning mot standard görs normalt för att kunna certifiera produkten. När det gäller konstruktioner av betong användas dessa provningsstandarder vanligtvis för element som prefabriceras, där det finns anledning att ha ett certifikat eller typgodkännande.

Ofta kan man dimensionera betongkonstruktioner genom beräkningar i brandfallet då det i de flesta fall endast är bärförmågan som är avgörande. Det som då bedöms är hur temperaturen utvecklas på olika djup i konstruktionen, vilket kan göras med relativt enkla modeller. Beräkningar används framför allt på konstruktioner som inte är typgodkända. För att dessa beräkningar skall bli korrekta behövs relevanta materialdata, samt att betongen inte på annat sätt påverkas vid en brand som exempelvis av spjälkning.

Betong som används i tunnlar är ofta tät för att få en god beständighet. En tät betong är dessvärre sämre avseende brand då risken för spjälkning är stor. Om spjälkning sker kan det vara risk att bärförmågan äventyras, dels genom att material går förlorat men även då temperaturen snabbare ökar i konstruktionen och därmed försämrar de mekaniska egenskaperna. Vid dimensionering genom beräkning tar man normalt inte hänsyn till eventuell spjälkning, utan konstruktionens geometri antas vara konstant under brandförloppet.

Det finns olika alternativa lösningar för att säkerställa den bärande funktionen hos betongkonstruktioner. Den enklaste lösningen är att använda en betong som inte spjälkar. Om detta inte är möjligt kan olika typer av skyddssystem användas. Det kan vara inblandning av polypropylenfibrer eller att en skyddande isolering monteras eller sprutas på betongen. Ytterligare en lösning är att använda ett offerskikt, d.v.s. att en viss del av betongen för spjälka bort och att man vid dimensioneringen modellerar detta.

En faktor som genomgående har studerats vid de provningar som redovisas i rapporten är risken för och mängden spjälkning. Att från en provning bedöma risken för spjälkning är relativt enkelt då spjälkning endera sker eller inte. Däremot att på ett provföremål kvantifiera mängden spjälkning är däremot betydligt mer komplicerat. I de tidiga försöken som redovisas har spjälkningen redovisats som viktförlust, d.v.s. provkroppen har vägts innan och efter brandprovning och man har därigenom fått ett mått på viktförlusten. Denna typ av mätning är tveksam då den inte kan skilja på vikten av det avspjälkade materialet och vikten på avdunstat vatten. I senare studierna har man kombinerat mätning av viktförlust och dessutom mätt hur djupt spjälkningen gått i provkroppen. Detta ger en betydligt bättre bild av mängden avspjälkat material. Men

även detta kan vara missvisande då randeffekter och även hur belastning skett påverkar resultaten. De provningsresultat som redovisas skall därför användas med försiktighet vad gäller mängd spjälkning. Jämförelser kan göras på provningar av liknande provkroppar utförda på liknande sätt.

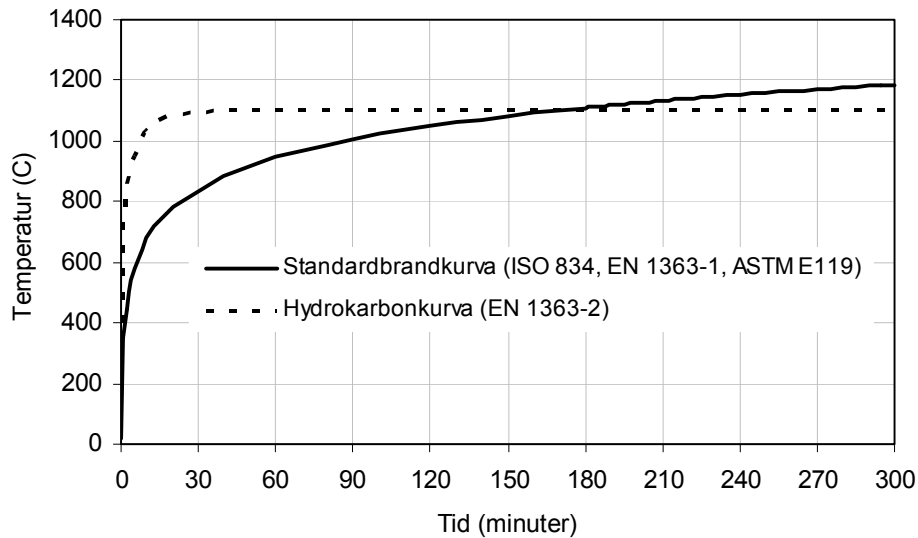
Vid den provning som genomförts har temperaturen oftast mätts på olika djup i betongen. Dessa mätningar görs för att man skall kunna kalibrera sin beräkningsmodell till ett verkligt brandprov. Resultaten från dessa temperaturmätningar redovisas inte i denna rapport, men de finns tillgängliga för den som önskar i de fall inget annat anges i rapporten.

Resultat från provning av olika typer av skyddssystem eller isolerande produkter redovisas. Den huvudsakliga egenskapen som bestäms vid provning av dessa är hur väl de isolerar den bakomliggande konstruktionen. Vanligtvis dimensioneras dessa utefter de krav som ställs på den specifika konstruktionen, d.v.s. man bedömer vilken tjocklek som behövs på det skyddande systemet för att uppfylla de krav som ställs. Alla de produkter som provats och redovisas i rapporten har en god isolerande förmåga. I rapporten redovisas inga temperaturmätningar mer än i något fall. Temperaturdata finns tillgängligt om inget annat anges i rapporten.

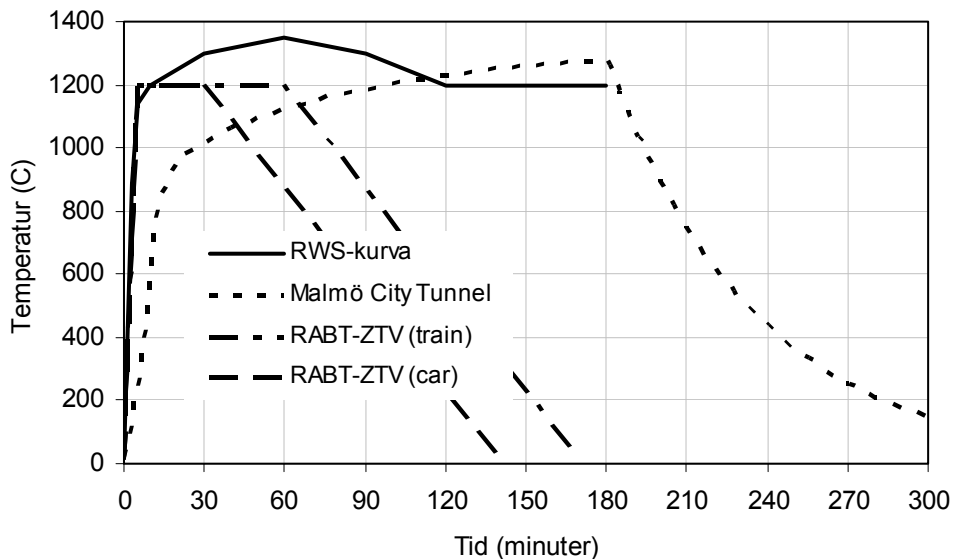
### **3.2 Provningsmetoder**

När det gäller provning av betongkonstruktioner finns det ett antal standardiserade generella provningsmetoder som ofta hänvisas till, exempelvis ASTM E119 [11], ISO 834 [12] och EN 1363-1 [13]. Dessa standarder är generella och beskriver principen för brandmotståndsprovning. I dessa standarder anges även en brandkurva vilken ofta benämns ”standardbrandkurvan” eller ISO 834-kurvan. Själva brandkurvan är i princip lika för dessa standarder och den togs fram i början av 1900-talet för att efterlikna en brand i ett rum som övertänds.

I den Europeiska standarden EN 1363-2 [14] finns andra brandkurvor definierade, bl.a. den så kallade hydrokarbonkurvan, eller HC-kurvan, (en bensinbrand). I figur 4.1 visas ISO 834- och HC-kurvan. Förutom dessa standardiserade brandkurvor finns det ett antal andra, ej standardiserade, brandkurvor som tillämpas för tunnelkonstruktioner. I figur 4.2 visas RWS-kurvan vilken utvecklats i Holland, två olika RABT-ZTV som kommer från Tyskland, samt en brandkurva speciellt framtagen för Malmö City Tunnel (baserad på tåg med persontrafik).



**Figur 3.1. Standardiserade brandkurvor**



**Figur 3.2. Andra brandkurvor**

Förutom de generella brandprovningssmetoderna finns det specifika metoder framtagna. Efnarc (European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems) har tagit fram en metod för provning av passiva skyddssystem hos tunnelinklädningar av armerad och oarmerad betong. Metoden behandlar såväl

sprutade produkter som olika typer av skivor och även integrerat skydd typ inblandning av polypropylenfibrer [15].

### 3.3 Provning av betongelement

#### 3.3.1 Provning av betongpelare - SP forskningsprojekt

Referens:	SP projekt BRk6033 [16]
Beskrivning:	Betongpelare brandprovades för att studera spjälkningsbenägenheten. Pelarna var tillverkade av 12 olika recept på självkompakterande betong samt 4 olika recept på konventionell vibrerad betong.
Provningsmetod:	EN 1363-1
Temperaturkurva:	Standardkurvan eller HC-kurvan, varaktighet 90 minuter.
Provobjekt:	Pelare 200 x 200 x 2000 mm. Pelarna var tillverkade av 12 olika recept på självkompakterande betong samt 4 olika recept på konventionell vibrerad betong. Betongrecepten presenteras i Bilaga A (Tabell A. 1, Tabell A. 2 och Tabell A. 3). Ytterligare studier av betongen finns tillgängligt [17]. I den självkompakterande betongen ingick bl. a. varierande mängder filler (glas eller limestone) och PP-fibrer med diametern 32 µm. Pelarna förspändes med en kraft på 104 till 122 kN med vajrar vid gjutningen. Betongelementen göts ca 6 månader före prov. Betongelement vars beteckning inleds med 40A i Tabell 3.1, förvarades i vatten medan övriga element förvarades i luft. Betongens fukthalt mättes som relativ luftfuktighet i tillslutna hålrum.

#### Resultat:

Temperaturen i betongen uppmättes vid olika djup från den brandexponerade ytan. Spjälkningen mättes som viktninskning med kompensation tagen till uppskattad mängd avdunstat vatten. Resultatet presenteras i Tabell 3.1.

Tabell 3.1. Resultat från provning BRk6033.

Betong beteckning	Temp.-kurva	Belastning (kN)	Betong typ	Cement	Vattencement tal	vattent-pulver tal	Fukthalt Relativ fuktighet	Filler	PP-fibrer kg/m	Antal prov-objekt.	Procentuell viktminskning som resultat av spjälkning		
											Max (%)	Min (%)	Mean (%)
40AK0	HC	112	SKB	CEM I 42,5 BV/SR/LA	0.40	0.29	89 <sup>6</sup>	Lime	-	3	34.2	28.6	31.7
40AK2	HC	112	SKB	CEM I 42,5 BV/SR/LA	0.40	0.28	-	Lime	2	3	15.0	10.9	12.5
40AK4	HC	112	SKB	CEM I 42,5 BV/SR/LA	0.40	0.30	-	Lime	4	2	6.1	5.2	5.7
40AG0	HC	112	SKB	CEM I 42,5 BV/SR/LA	0.40	0.35	89	Glass	-	3	22.9	15.6	18.4
40AR0	HC	112	KVB	CEM I 42,5 BV/SR/LA	0.40	0.40	93	-	-	2	6.9	6.3	6.6
40BK0	Standard	112	SKB	CEM II/A-LL 42,5R	0.40	0.31	73	Lime	-	3	24.7	22.5	23.8
40BR0	Standard	112	KVB	CEM II/A-LL 42,5R	0.40	0.40	-	-	-	2	5.6	3.9	4.8
55BK0	Standard	122	SKB	CEM II/A-LL 42,5R	0.55	0.31	77	Lime	-	2	27.0	26.4	26.7
55BK2	Standard	122	SKB	CEM II/A-LL 42,5R	0.55	0.32	-	Lime	2	2	16.6	14.1	15.4
55BK4	Standard	122	SKB	CEM II/A-LL 42,5R	0.55	0.34	-	Lime	4	2	15.6	12.8	14.2
55BR0	Standard	122	KVB	CEM II/A-LL 42,5R	0.55	0.55	73	-	-	2	18.3	10.1	14.2
70BK0	Standard	104	SKB	CEM II/A-LL 42,5R	0.70	0.41	76	Lime	-	3	21.0	16.2	18.4
70BK2	Standard	104	SKB	CEM II/A-LL 42,5R	0.70	0.40	-	Lime	2	3	3.5	3.3	3.4
70BK4	Standard	104	SKB	CEM II/A-LL 42,5R	0.70	0.39	-	Lime	4	3	15.4	12.7	14.1
70BG0	Standard	104	SKB	CEM II/A-LL 42,5R	0.70	0.56	77	Glass	-	3	15.0	10.0	12.6
70BR0	Standard	104	KVB	CEM II/A-LL 42,5R	0.70	0.73	77	-	-	2	8.2	7.0	7.6

KV = Konventionell vibrerad betong

SKB = Självkompakterande betong

### 3.3.2 Provning av betong - SP forskningsprojekt

Referens:

SP projekt BRk6036 och BRk6037 [18,19]

Beskrivning:

Ändamålet med provningen var att studera betongens spjälkning vid brandpåverkan för olika geometrier och provningsmetoder. Olika recept av både självkompakterande och traditionell vibrerad betong studerades, vissa innehållande PP-fibrer.

Provningsmetod:

- EN 1363-1
- Småskalig ugnsprövning enligt SP brand 119
- Småskalig provning av cylindrar under tryckbelastning och vid en temperatur av 1000 °C i 60 minuter, enligt en metod utvecklad av Technical University of Denmark.

Temperaturkurva: Standardkurvan i 60 minuter eller kundspecifik Citytunneln Malmö-kurva i 300 minuter

Provobjekt:

- KVB: Betongplattor 1800 x 1200 x 400 mm<sup>3</sup> armerade i rutnät med Ø 12 mm armering och med täcksikt 50 mm. Efterspändes med genomgående stag till 2.1 MPa.
- Balkar 3600 x 600 x 200 mm<sup>3</sup>. Armerade.
- Små plattor 500 x 500 x 100 mm<sup>3</sup> av konventionell vibrerad betong. Efterspändes till 2.5 MPa.
- Små plattor 600 x 500 x 200 mm<sup>3</sup> av självkompakterande betong.
- Kuber 150 x 150 x 150 mm<sup>3</sup>
- Cylindrar Ø 150 mm, längd 300 mm
- Cylindrar Ø 150 mm, längd 450 mm

Olika tillsatser av kalkfiller Limus 40 och 25, Silika och PP-fiber provades. Fibrerna var av fabrikat Fibrin och hade diametern 18 µm. Betongrecepten presenteras i Bilaga A, Tabell A. 4 och Tabell A. 5.

All betong hade samma vatten-cementtal på 0.38.

Provkropparna tillverkade i konventionell vibrerad betong konditionerades 3 månader under vatten före provning.

Provkropparna av självkompakterande betong konditionerades i luft 3 månader.

Resultat:

Spjälkning mättes som spjälkningsdjup och som procentuell viktnedgång med kompensation tagen till uppskattad mängd avdunstat vatten. Temperaturen i betongen uppmättes vid olika djup från den brandexponerade ytan. Resultattabeller presenteras i Bilaga B.

Följande slutsatser drogs i projektet:

- Det finns risk för spjälkning även i töjningszonen hos en böjbelastad balk om betongens fukthalt är hög.
- Risken för och storleken på spjälkning minskar kraftigt om PP-fibrer blandas i betongen.
- Tryckbelastade provobjekt spjälkar mer än obelastade.
- Geometrin hos provobjektet påverkar risken och mängden spjälkning.
- I denna studie var resultaten från DTU provningarna ej jämförbara med resultaten från storskalprovingen.
- Små plattor provade i småskalgruppen enligt SP brand 119 uppvisade liknande mängd spjälkning som stora plattor provade i storskalgruppen enligt EN 1363, förutsatt de provades under tryckbelastning.
- Små plattor med mindre tjocklek än fullskalplattorna spjälkade mindre än fullskalplattorna.

- Cylindrarna spjälkade mer än både de stora och de små plattorna.
- En korrekt utformad småskaleprovning kan ge samma resultat som en storskalig ugnsprovning.

### 3.3.3 Provning av betong för Hallandsås-projektet

Referens:	SP projekt P401734 [20]
Beskrivning:	Brandprovning av två typer av konventionell vibrerad betong, K45 och K65, med 1.0 eller 1.5 kg/m <sup>3</sup> PP-fibrer för att studera spjälkningsbenägenhet och isoleringsförmåga hos betongen. Som referens kördes också K65 utan fibrer.
Provningsmetod:	ISO 834
Temperaturkurva:	RWS-kurvan i 120 minuter
Provobjekt:	Betongplattor 1800 x 1200 x 540 mm <sup>3</sup> Två typer av betong, K45 och K65, med 1.0 eller 1.5 kg/m <sup>3</sup> PP-fiber Fibrin Adfil med diameter 18 µm och längd 6 mm. Som referens kördes också K65 utan fibrer. Elementen var obelastade eller efterspändes med genomgående stag till 9.6 MPa. Uppgift om fukthalt saknas i rapporten. Konditionering skedde i luft, täckt av plast. Plattornas ålder är ej angiven i rapporten.

#### Resultat:

Temperaturen i betongen uppmättes vid olika djup från den brandbelastade ytan. Dragkraften i några av de genomgående stagen mättes under provningen. Spjälkningen i form av spjälkningsdjup uppmättes efter provningen i mätpunkter i ett 5 x 7 cm ruttmönster över ytan. Spjälkningsresultaten redovisas i Tabell 3.2.

#### Sammanfattning enligt SP:

Provningsvisade att utan PP fibrer spjälkade K65 betongen våldsamt (K45 provades ej utan fibrer). K45 betong med 1.0 kg/m<sup>3</sup> PP fibrer spjälkade inte, medan fiberhalten i K65 betong behövde uppgå till 1.5 kg/m<sup>3</sup> för att helt undgå spjälkning i både belastade och obelastade element. Spjälkningen för K65 betong med 1.0 kg/m<sup>3</sup> PP fibrer var dock mycket mindre än i fallen utan fibrer.

I de fall spjälkning skedde inträffade det de första 27 minuterna.



Tabell 3.2

Provobjekt	Betong	PP-fibrer (kg/m <sup>3</sup> )	Belastning (MPa)	Spjälkning (mm)	
				Max	Mean
1	K65	0	0	258	131
2	K65	0	0	223	123
3	K65	1.0	0	56	39
4	K65	1.0	0	0	0
5	K65	1.5	0	0	0
6	K65	1.5	0	0	0
7	K45	1.0	0	0	0
8	K45	1.0	0	0	0
9	K65	0	0	220	107
10	K65	0	0	163	75
11	K65	1.0	9.6	81	46
12	K65	1.0	9.6	0	0
13	K65	1.5	9.6	0	0
14	K65	1.5	9.6	0	0
15	K45	1.0	9.6	0	0
16	K45	1.0	9.6	0	0

### 3.3.4 Småskalig provning av betong för Malmö Citytunnel

Referens:	SP projekt P502172 och P601606 [21,22]
Beskrivning:	Småskalig ugnspvning av betongelement tillverkade i konventionell vibrerad betong med PP-fibrer. Kördes som förprovning inför fullskaleprovning.
Provningsmetod:	Småskalig ugnspvning enligt SP brand 119
Temperaturkurva:	Citytunneln Malmö-kurvan under 60 minuter.
Provobjekt:	Provkropparna utgjordes av betongblock av olika typer av konventionell vibrerad betong med dimensionen (bredd x längd x höjd) 500 x 600 x 400 mm. Betongen innehöll 1.0 kg/m <sup>3</sup> PP-fibrer. Provkropparna belastades med en efterspanning på 2.5 MPa. Provkropparna konditionerades i vatten under 1 månad, därefter i luft i 3 veckor före prov. Betongrecepten motsvarade de som användes i fullskaleprovningen i segmenten atA, atB och atC och finns presenterade i Bilaga A (Tabell A. 11, Tabell A. 12 och Tabell A. 13).
Resultat:	

På en provkropp uppkom en liten ytspjälkning på en area av 7 x 5 cm<sup>2</sup> och djupet 5 mm, för övrigt förekom ingen spjälkning.

### 3.3.5 Provning av betong för Malmö Citytunnel

Referens:	SP projekt P502172, P504365 och P601606 [23,24,25,26]
Beskrivning:	Brandprovning av betongelement tillverkade i konventionell vibrerad betong med PP-fibrer, för att bestämma spjälkningsbenägenhet och isoleringsförmåga hos betongen.
Provningsmetod:	EN 1363-1
Temperaturkurva:	Malmö Citytunnel-kurva under 300 minuter.
Provobjekt:	<p><b>Betongsegment aw:</b> Betongplattor 3600 x 1200 x 590 mm<sup>3</sup> gjutna som väggelement. Armeringens täckskikt var 65 mm på huvudarmeringen (47 mm på vissa byglar) på den brandexponerade ytan. Plattorna efterspändes med genomgående stag till ca 11 MPa.</p> <p><b>Betongsegment atA, atB och atC :</b> Betongplattor 1800 x 1200 x 400 mm<sup>3</sup> gjutna som tunnelsegment. Plattorna var tillverkade med olika betongrecept och med olika härdningsförfarande. Beteckningarna A,B och C står för olika varmhärdningssätt. Armeringens täckskikt var 65 mm på den brandexponerade ytan. Plattorna efterspändes med genomgående stag till 2.4-3.5 MPa. Betongen innehöll 1.0 eller 1.5 kg/m<sup>3</sup> PP-fiber PolyloC 6 mm / 2.8 detex med längd 6 mm. Betongrecepten presenteras i Bilaga A (Tabell A. 9, Tabell A. 10, Tabell A. 11, Tabell A. 12 och Tabell A. 13) Provföremålen göts ca 3 månader före provningen och konditionerades i vatten under ca 2 månader.</p>

#### Resultat:

Temperaturen i betongen uppmättes vid olika djup från den brandexponerade ytan. Spjälkningsdjupet uppmättes efter provningen. Vissa spjälkningsvärden visas i Tabell 3.3.

Resultaten sammanfattas enligt följande i SPs provningsrapport:

- Betongen i provkropparna aw delaminerade i 20 - 50 mm tjocka bitar som då och då lossnade och föll ned under provningen.
- Mycket lite accelererad spjälkning förekom under brandförloppet.
- Långsidorna på provkropparna aw drabbades av sprickbildning och stora bitar av betong hade lossnat eller satt löst efter provningen.
- Ingen spjälkning förekom för provkropparna atA och AtB. Mycket begränsad spjälkning förekom för en av provkropparna atC.
- Provkropparna atCs långsidor fick viss sprickbildning. Betongen hängde dock kvar under provningen.

Tabell 3.3.

Provföremål	Mängd PP-fibrer (kg/m <sup>3</sup> )	Fuktkvot (%)	Spjälkning	
			Medel (mm)	Max (mm)
atA 1,0-1	1.0	Uppgift saknas	0	0
atA 1,0-2	1.0	Uppgift saknas	0	0
atB 1,0-1	1.0	Uppgift saknas	0	0
atB 1,0-2	1.0	Uppgift saknas	0	0
aw 1,5-4	1.5	4,7	121	42
aw 1,5-5	1.5	3,2	106	18
aw 1,0-4	1.0	4,2	100	34
aw 1,0-5	1.0	3,0	97	20
atC 1,0-2	1.0	3,1	3	34
atC 1,0-4	1.0	3,3	0	0

### 3.3.6 Provning av betong för Malmö Citytunnel

Referens:	SP projekt P502334 [27]
Beskrivning:	Brandprovning av betongelement innehållande PP-fibrer, för att bestämma spjälkningsbenägenhet och isoleringsförmåga hos betongen.
Provningsmetod:	EN 1363-1
Temperaturkurva:	Malmö Citytunnel-kurva under 300 minuter.
Provobjekt:	Betongplattor 1800 x 1200 x 400 mm <sup>3</sup> , gjutna som väggelement tillverkade med varierande betongsammansättning. Betongrecepten presenteras i Bilaga A (Tabell A. 6). Plattorna efterspändes med genomgående stag till 5.4 MPa. I de fall betongen innehöll PP-fibrer användes Adfil Ignis med dimension (längd x diameter) 6 mm x 18 µm. Provföremålen göts 2.5-3 månader före provningen och konditionerades i vatten under ca 2 månader. Plattornas fuktkvot framgår ej av rapporten.

Resultat:

Temperaturen i betongen uppmättes vid olika djup från den brandexponerade ytan. Spjälkningen uppmättes som spjälkningsdjup och vissa värden redovisas i Tabell 3.4.

Resultaten sammanfattas enligt följande i SPs rapport:

- Samtliga provkroppar spjälkade under provningen.
- Ingen av provkropparna B3(I), B3(II), B4(I) eller B4(II) spjälkade mer än 40 mm i medel eller maximalt 100 mm.
- En ökning av fibrer i betongen resulterar i minskad spjälkning.
- Samtliga provkroppar fick flera vertikala genomgående sprickor under provningen.

Tabell 3.4.

Provföremål	Mängd PP-fibrer (kg/m <sup>3</sup> )	Spjälkning	
		Medel (mm)	Max (mm)
B1-1	0	65	108
B1-2	0	57	102
B2-1	0.75	52	99
B2-2	0.75	50	108
B3-1	1.0	15	45
B3-2	1.0	24	83
B4-1	1.5	19	74
B4-2	1.5	12	44

### 3.3.7 Provning av betong för North Downs Tunnel som ingår i Channel Tunnel Rail Link (CTRL), England

Referens:	Provning utförd hos TNO m.fl. laboratorier [28].
Beskrivning:	Småskalig provning av plattor och fullskaleprovning av betongsegment för att bestämma spjälkningsbenägenhet hos olika betongsammansättningar. Betong innehållande olika typer av ballast och fibrer provades.
Provningsmetod:	Småskale- och fullskaleprovning
Temperaturkurva:	I småskaleprovningen användes standardkurvan i 120 minuter och i fullskaleprovningen RWS-kurvan i 120 minuter.
Provobjekt:	Småskaleprovning: Plattor, dimensionerna anges ej i rapporten. I provningsserie 2 provades plattorna under tryckbelastning. Fullskaleprovning: Betongsegmenten hade en inner-radie på 3575 mm, en bredd på 1350 mm och en tjocklek på 350 mm. Samtliga betongrecept innehöll 30 kg/m <sup>3</sup> stålfibrer och 1.0 kg/m <sup>3</sup> PP-fibrer med diametern 18 eller 32 µm. Segmenten efterspäades till 10 MPa. Provföremålens ålder redovisades ej i rapporten.
Resultat:	

Rapportförfattarens slutsatser var följande:

- Inblandning av 1 kg/m<sup>3</sup> monofilament PP-fiber i de höghållfasthetsbetongrecept som provades minskade drastiskt risken för explosiv spjälkning när betongen utsattes för HC-kurvan.
- Det förefaller inte vara någon betydande skillnad mellan kalksten- och granitballast i provningsresultaten.
- Stålfibrer bidrog inte till att motverka spjälkning när de användes utan PP-fibrer.

- Hållfastheten hos betongen på den brandutsatta sidan enligt HC-kurvan där betongtemperaturen uppgick till 800 °C var efter provning ca 75% av betongens jämförbara kubhållfasthet.

**Tabell 3.5 Resultat av småskaleprovningsserie 1 med standardkurvan.**

Prov	Ballast	Stål-fibrer	Monofilament PP-fibrer	Fibrillated (splitter) PP-fibrer	Observationer under provning
1	Granit	-	-	-	Spjälkning synlig efter 30 minuter
2	Granit	Ja	-	-	Spjälkning synlig efter 20 minuter
3	Granit	Ja	Ja	-	Ingen spjälkning
4	Granit	Ja	-	Ja	Lite synlig spjälkning
5	Granit	-	Ja	-	Ingen spjälkning
6	Kalksten	-	-	-	Spjälkning synlig efter 20 minuter
7	Kalksten	Ja	-	-	Spjälkning synlig efter 20 minuter
8	Kalksten	Ja	Ja	-	Ingen spjälkning
9	Kalksten	Ja	-	Ja	Lite synlig spjälkning
10	Kalksten	-	Ja	-	Ingen spjälkning
11	Lättvikts Lytag	-	-	-	Omfattande våldsamt spjälkning
12	Lättvikts Lytag	Ja	-	-	Omfattande våldsamt spjälkning
13	Lättvikts Lytag	Ja	Ja	-	Ingen spjälkning
14	Lättvikts Lytag	Ja	-	Ja	Omfattande spjälkning
15	Lättvikts Lytag	-	Ja	-	Ingen spjälkning

**Tabell 3.6 Resultat av småskaleprovningsserie 2 med HC-kurvan och tryckbelastning.**

Ballast	Monofilament PP-fibrer	Observationer under provning
Granit	1 kg/m <sup>3</sup> , 18 µm	Ingen spjälkning
Granit	2 kg/m <sup>3</sup> , 18 µm	Ingen spjälkning
Granit	1 kg/m <sup>3</sup> , 32 µm	Ingen spjälkning
Granit	2 kg/m <sup>3</sup> , 32 µm	Ingen spjälkning
Granit	-	Omfattande spjälkning de första 20 minuterna

**Tabell 3.7. Resultat av fullskaleprovning.**

Betong	Cement (kg/m <sup>3</sup> )	Vatten-cementtal	PP-fibrer	Fuktkvot (%)	Spjälkning		
					Medel (mm)	Max (mm)	Min (mm)
C60 granitmix	438	0.35	1 kg/m <sup>3</sup> 18 µm	3.4	6.0	15	0
C60 granitmix	438	0.35	1 kg/m <sup>3</sup> 32 µm	2.9	19.6	60	0
C60 kalkstensmix	400	0.34	1 kg/m <sup>3</sup> 18 µm	3.0	14.3	25	5

### 3.3.8 Provning av betongsegment för tåg tunneln ”Groene Hart”, Holland

Referens:	TNO report 2000-CVB-R00702, TNO report 2000-BT-MK-R0062/01 [29]
Beskrivning:	Brandprovning av betongelement innehållande olika mängd PP-fibrer, för att bestämma spjälkningsbenägenhet hos betongen.
Provningsmetod:	Fullskaleprovning
Temperaturkurva:	RABT-kurvan under 120 minuter
Provobjekt:	Betongplattor med dimensionen 1900 x 2000 x 450 mm <sup>3</sup> . Plattorna efterspändes med genomgående stag till ca 6 MPa. Betongen innehöll olika mängd PP-fiber Confiber (Adfil), monofilament, med längd 12 mm och diameter 18 µm. Betongrecepten är presenterade i Bilaga A (Tabell A. 7). Provföremålet utan PP-fibrer hade åldern 3 månader vid provningstillfället, övriga hade 1 månad.

Resultat:

Temperaturen i provkropparna mättes under provningen. Spjälkningsdjupet uppmättes efter provningen. Resultatet visas i Tabell 3.8.

Tabell 3.8.

PP-fibrer (kg/m <sup>3</sup> )	Fuktkvot (%)	Spjälkning		
		Medel (mm)	Max (mm)	Spjälkad area över 20 mm (%)
0	4.1	95	265	80
1	Uppgift saknas	37	95	75
2	Uppgift saknas	32	90	65
3	Uppgift saknas	7	25	2

### 3.3.9 Provning av betongsegment tillverkat av betong innehållande relativt stor mängd PP-fibrer.

Referens:	Braunschweig University of Technology [30]
Beskrivning:	Brandprovning av tunnelsegment innehållande 4 kg/m <sup>3</sup> PP-fibrer.
Provningsmetod:	Fullskaleprovning av belastat tunnelsegmentet
Temperaturkurva:	RABT_ZTV (train)-kurvan under 180 minuter.
Provobjekt:	Tunnelsegment med kurvatur, 5 m långt, 1.5 m brett och 0.5 m tjockt tillverkat av betong C 55/67 med 4 kg/m <sup>3</sup> PP-fibrer. Fukthalten var 3 %. En yttre pålagd last påfördes med hjälp av 6 vertikala och 2 horisontella hydraulcylindrar. Tryckspänningen uppgick före provning till 24 MPa.
Resultat:	Ingen spjälkning skedde.

## 3.4 Provning av sprutbetong

### 3.4.1 Provning av sprutbetong för Hallandsåsprojektet

Referens:	SP projekt P501398 [31]
Beskrivning:	Provning av stålfiberarmerad sprutbetong, med varierande tjocklek, infästning och mängd PP-fibrer, applicerat på K45 betongelement för att studera vidhäftning och isoleringsförmåga hos sprutbetongen.
Provningsmetod:	ISO 834
Temperaturkurva:	RWS-kurva i 120 minuter
Provobjekt:	Stålfiberarmerad sprutbetong på betongplattor med storlek 1800 x 1200 x 540 mm <sup>3</sup> . Betongplattorna var tillverkade av K45 betong. Sprutbetongens tjocklek och förankring varierade och receptet bestod av varierande mängd PP-fiber Fibrin Adfil med diameter 18 µm och längd 6 mm. I ett prov ingick sprutbetong utan stålfiberarmering. Uppgift om fukthalt saknas i rapporten. Provföremålen konditionerades i luft, deras ålder anges ej i rapporten. Innan sprutbetongen anlades högtrycktvättades betongytan. Olika dimensioner och mängd skruv användes som mekaniskt fäste för sprutbetongen, med eller utan brickor.
Resultat:	

Spjälkningen mättes som spjälkningsdjup i ett rutmönster över ytan med avstånden 0.15 m mellan mätpunkterna. Temperaturen i betongen uppmättes vid olika djup från den brandbelastade ytan. Som ett exempel på temperaturkurva visas i Figur 3.3 medelvärdet hos 4 termoelementen placerade i gränsskiktet mellan betong och sprutbetong. Maximala spjälkningsdjupen presenteras i Tabell 3.9.

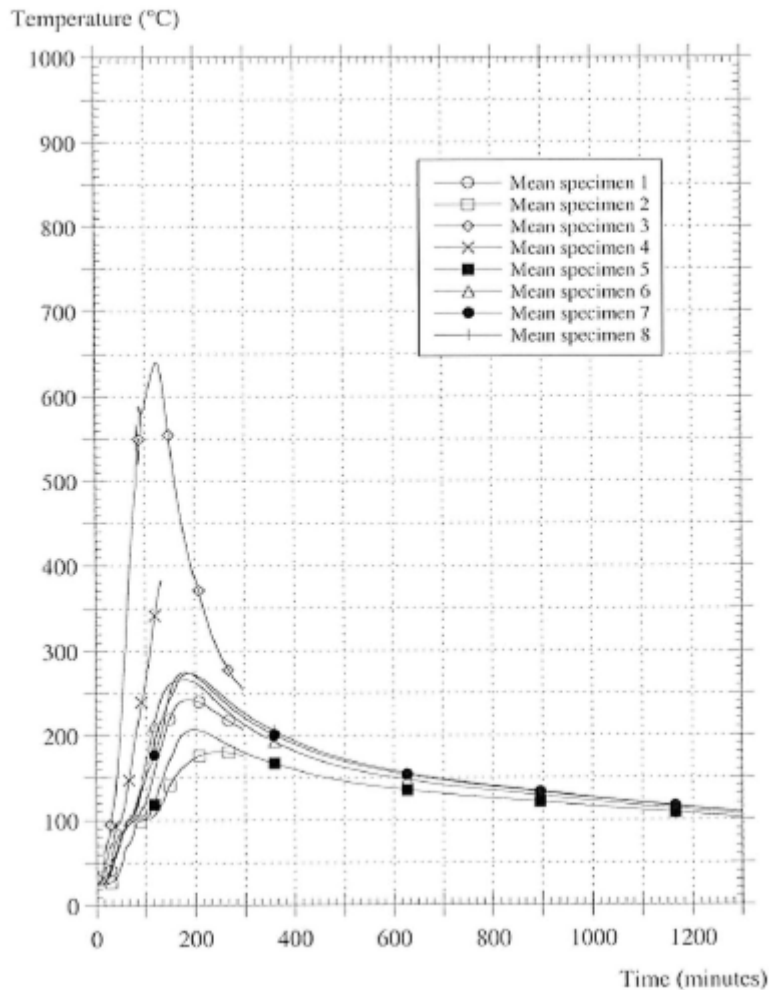
Kommentar från Skanska-Vinci HB:

Kravet på systemet var att begränsa temperaturen i underliggande bärande betong. Spjälkning av sprutbetongen var tillåten, förutsatt att den hängde kvar. Detta uppfylldes med en sprutbetongtjocklek på 90 mm. Tjockleken 60 mm var för tunn för att tillräckligt begränsa temperaturen i underliggande betong. Resultaten visade inte på någon större skillnad mellan 1.0 eller 1.5 kg/m<sup>3</sup> PP fibrer eller på de olika förankringssystem som användes.

Tabell 3.9.

Prov objekt	Stålfiber- armering (kg/m <sup>3</sup> )	PP-fibrer (kg/m <sup>3</sup> )	Tjocklek (mm)	Förankring	Maximalt spjälknings- djup (mm)
1	ja	1.5	90	Ingen	19
2	nej	1.5	90	Expanderbult och stålnät.	19
3	ja	1.0	60	Universalskruv, 4 st/m <sup>2</sup>	<b>109</b>
4	ja	1.5	60	Universalskruv, 4 st/m <sup>2</sup>	<b>99</b>
5	ja	1.0	90	Universalskruv, 4 st/m <sup>2</sup>	0
6	ja	1.5	90	Universalskruv, 4 st/m <sup>2</sup>	40
7	ja	1.5	90	Universalskruv och stjärnbricka, 2 st/m <sup>2</sup>	29
8	ja	1.5	90	Universalskruv och stjärnbricka, 1 st/m <sup>2</sup>	15

Fetstilmarkerat spjälkningsdjup innebär att spjälkningen gått igenom hela sprutbetonglagret.



Figur 3.3. Temperaturer i gränsskiktet mellan betong och sprutbetong (medelvärde av 4 mätpunkter)



### 3.4.2 Provning av sprutbetong

Referens:	SINTEF projekt 103010.37 A-I [32]
Beskrivning:	Småskaligt brandprovning i vertikalugn av element i sprutbetong med varierande mängd PP-fibrer för att studera beteende och isolationsförmåga vid olika brandkurvor. Den exponerade ytan var 1000 x 1000 mm <sup>2</sup> . På oexponerade sidan isolerades provföremålet med en 50 mm rockwoolskiva.
Provningsmetod:	ISO 834
Temperaturkurva:	Standardkurvan i 45 minuter (en provning i 60 minuter) och HC-kurvan i 60 minuter.
Provobjekt:	Betongplattor med storleken 1300 x 1300 x 60 mm <sup>3</sup> . Skillnaden mellan plattorna var mängden PP-fibrer. PP-fibern var av fabrikat Duomix M6-16. Betongrecepten framkom ej av rapporten. Provföremålen ca 3 månader före provningen och konditionerades i vatten under ca 2 månader. Fuktkvot framgår ej av rapporten.

#### Resultat:

Temperaturen mättes i tre punkter på den oexponerade sidan av betongplattorna (mellan betongen och isoleringen). Ingen spjälkning skedde i provkropparna med PP-fibrer, medan provkropparna utan PP-fibrer spjälkade och provningen avbröts p.g.a. genomgående sprickor eller hål. Ett urval av resultaten visas i Tabell 3.10.

Tabell 3.10.

Prov-föremål	Temp.-kurva	Betong	Mängd PP-fibrer (kg/m <sup>3</sup> )	Konditio-nerat i vatten	Provningens varaktighet (minuter)	Medeltemperatur på oexponerade sidan (°C)		Spjälkning
						Vid 45 minuter	Vid provningens slut	
A	ISO	Sprutad	3	Nej	60	93	125	Ingen
B	ISO	Sprutad	0	Nej	18	-	44	Provningen avbröts p.g.a. genomgående sprickor. En del spjälkning.
C	ISO	Gjuten	3	Nej	46	144	146	Ingen
D	ISO	Sprutad	1	Nej	45	94	96	Ingen
E	ISO	Sprutad	2	Nej	46	108	108	Ingen
F	HC	Sprutad	1	Nej	60	122	144	Ingen
G	ISO	Sprutad	3	Ja	46	82	85	Ingen
H	ISO	Sprutad	0	Ja	36	-	88	Provningen avbröts p.g.a. genomgående hål. Mycket spjälkning, vissa områden ingen.
I	HC	Sprutad	2	Nej	60	136	165	Ingen

### 3.4.3 Skydd av berg vid upprepade fullskalebrandförsök i Repparfjordtunneln

För ett Eureka-projekt kördes en serie brandförsök i full skala i bergtunneln Repparfjordtunneln i Finland. I sektionen närmast brandhärden skyddades berget av stålfiberarmerad lätt sprutbetong av fabrikatet Robotic 10, Messrs TICON. På taket och väggarna applicerades sprutbetongen med en tjocklek på 20 cm och 15 cm vardera. Efter sista provningen 1992 konstaterades att ingen spjälkning eller annan skada kunde ses på sprutbetongen trots att den vid upprepade tillfällen utsatts för en temperatur på omkring 1000 °C.

## 3.5 Provning av sprutbetong och isolermatta/tätskikt

### 3.5.1 Provning av isolermatta/tätskikt i kombination med sprutbetong för Citybanan

Referens: SP projekt P504279 [33]  
 Beskrivning: Provning av sprutbetong innehållande PP-fibrer på olika typer av tätskikt eller isolering på betong- ( C20/25, konventionell vibrerad betong) eller bergelement. Olika typer av armering i sprutbetongen användes.  
 Provningsmetod: EN 1363-1

Temperaturkurva:	Standardkurvan under 90 minuter eller HC-kurvan under 180 minuter (förutom i de fall där provningen avbrutits)
Provobjekt:	<p>Provkropparna var tillverkade av sprutbetong, med olika typ av armering och inblandning av PP-fibrer, sprutat i två olika typer av grundstommar av betong (storlek 3600 x 1200 x 280 mm<sup>3</sup> eller 1800 x 1200 x 150 mm<sup>3</sup>) eller på bergelement (storlek 1800 x 1000 x 300 mm<sup>3</sup>). Mellan sprutbetongen och grundstommen fanns i de flesta provkropparna olika typer av tätskikt alternativt isolering placerad.</p> <p>I vissa provkroppar blandades PP-fibrer i betongen, av typen Duomix M6, 18 µm.</p> <p>Konditionering skedde i luft. Provkropparnas ålder framgår ej av rapporten.</p>

Resultat:

Vid provningen fallerade alla sprutsystem förutom ett.

Kommentar av Golder Associates AB:

Vid en efterföljande analys av sprutbetongen konstaterades att receptet inte var tillräckligt anpassat för tillsatsen av PP fibrer vilket bidrog till att det skiktades vid appliceringen och kvalitén blev ojämn. Detta visar vikten av att ha god kontroll på sprutbetongens sammansättning. Recepten ändrades inför de följande provningarna (P602418).

### 3.5.2 Småskalig provning av sprutbetongskikt som skydd av PE-matta för Citybanan

Referens:	SP projekt P602418 [34]
Beskrivning:	Småskalig ugnspvning av sprutbetong applicerat på en 50 mm PE-matta. Kördes som förprovning inför fullskaleförsök.
Provningsmetod:	Småskalig ugnspvning enligt SP brand 119
Temperaturkurva:	HC-kurvan under 60 minuter.
Provobjekt:	<p>Stommen till provkropparna L1 – L6 var tillverkade av sprutbetong sprutad på en skiva stenull, eller en skiva stenull täckt av en 50 mm PE-matta, i ramar uppbyggda av trä. Ramarna hade yttermått (längd x bredd) 600 x 600 mm<sup>2</sup>. Sprutbetongen innehöll stålfibrer och PP-fibrer. PP-fibern bestod av Duomix M6, 18 µm.</p> <p>Provkropparna V3-1 och V3-2 var tillverkade av 50 mm stålfiberarmerad sprutbetong sprutad på undersidan av ett bergelement. Sprutbetongen innehöll PP-fiber Duomix M6, 18 µm.</p> <p>Konditionering skedde i luft. Provkropparnas ålder framgår ej av rapporten.</p>

## Resultat:

Temperaturen uppmättes på den oexponerade sidan av sprutbetongen. Observationer under provningen presenteras i Tabell 3.11.

Provkropparna L1, L3, L5 spjälkade under brandprovningarna. De övriga provkropparna spjälkade inte.

**Tabell 3.11.**

Provkropp	Uppbyggnad (räknat uppifrån)	Mängd stålfibrer	Mängd PP-fibrer	Observation efter prov
L1	Skiva av stenull 50 mm PE-matta 80 mm sprutbetong	50 kg/m <sup>3</sup>	1.5 kg/m <sup>3</sup>	Ytlig spjälkning till ett djup av 1-2 cm.
L2	Skiva av stenull 50 mm PE-matta 80 mm sprutbetong	50 kg/m <sup>3</sup>	2.0 kg/m <sup>3</sup>	Ingen spjälkning
L3	Skiva av stenull 50 mm PE-matta 80 mm sprutbetong	16 kg/m <sup>3</sup>	1.5 kg/m <sup>3</sup>	Ytlig spjälkning till ett djup av 1-3 cm
L4	Skiva av stenull 50 mm PE-matta 80 mm sprutbetong	16 kg/m <sup>3</sup>	2.0 kg/m <sup>3</sup>	Ingen spjälkning
L5	Skiva av stenull 80 mm sprutbetong	50 kg/m <sup>3</sup>	1.5 kg/m <sup>3</sup>	Spjälkning endast längs den ena sidan till ett djup av 0-2 cm
L6	Skiva av stenull 80 mm sprutbetong	50 kg/m <sup>3</sup>	2.0 kg/m <sup>3</sup>	Ingen spjälkning
V3-1	Bergelement 50 mm sprutbetong	Uppgift saknas	1.5 kg/m <sup>3</sup>	Ingen spjälkning, en liten ytlig bit har fallit ner i ugnen
V3-2	Bergelement 50 mm sprutbetong	Uppgift saknas	2.0 kg/m <sup>3</sup>	Ingen spjälkning

### 3.5.3 Provning av sprutbetongskikt som skydd av PE-matta för Citytunneln

Referens:	SP projekt P602418 [34]
Beskrivning:	Provning av sprutbetong applicerat på en 50 mm PE-matta på betong.
Provningsmetod:	EN 1363-1
Temperaturkurva:	HC-kurvan i 180 minuter
Provobjekt:	Provkropparna var tillverkade av sprutbetong i en grundstomme av betong. Grundstommen hade en geometri på 3600 x 1200 x 280 mm <sup>3</sup> . Sprutbetongen innehöll stålfibrer och PP-fibrer. PP-fibern bestod av Duomix M6, 18 µm.

Mellan sprutbetongen och grundstommen fanns en isolering i form av en 50 mm tjock PE-matta. Uppgift om förankring av PE-matta och sprutbetong saknas.

Konditionering skedde i luft. Provkropparnas ålder framgår ej av rapporten.

Resultat:

Temperaturen uppmättes mellan PE-mattan och sprutbetongen. Observationer efter provningen presenteras i Tabell 3.12.

Provkropp P20 spjälkade under brandprovningen. De övriga provkropparna spjälkade inte.

Tabell 3.12.

Prov-kropp	Uppbyggnad (räknat uppifrån)	Mängd stålfiber (kg/m <sup>3</sup> )	Mängd PP-fiber (kg/m <sup>3</sup> )	Fukt-kvot (%)	Observationer efter provning
P20	Grundstomme av betong, 50 mm PE-matta, 80 mm sprutbetong	50	1.5	5.6	Ytan har spjälkat lite, över sprutbetongen finns en 2-5 mm bränd och porös isolering kvar, denna ligger mot betongen. Mot sprutbetongen finns en film av plastliknande material.
P21	Grundstomme av betong, 50 mm PE-matta, 80 mm sprutbetong	50	2.0	4.3	Provkroppen är inte mycket påverkat av branden. Över sprutbetongen finns en 2-5 mm bränd och porös isolering kvar, denna ligger mot betongen. Mot sprutbetongen finns en film av plastliknande material, filmen är något tjockare på den östra sidan.
P22	Grundstomme av betong, 50 mm PE-matta, 80 mm sprutbetong. Efter sprutning sågades ett spår ca 200 mm från kanten så att sprutbetongskalet inte var inspänt i grundstommen. Spåret fogades med brandfogmassa.	50	1.5	6.2	Fogarna är påverkade och är borta på vissa delar, över sprutbetongen finns en 2-5 mm bränd och porös isolering kvar, denna ligger mot betongen. Mot sprutbetongen finns smält isolering längst in mot ytan och smält material på 0 – 5 mm.
P23	Grundstomme av betong, 50 mm PE-matta, 80 mm sprutbetong. Efter sprutning sågades ett spår ca 200 mm från kanten så att sprutbetongskalet inte var inspänt i grundstommen. Spåret fogades med brandfogmassa.	50	2.0	4.8	Fogarna är påverkade och är borta på vissa delar, över sprutbetongen finns en 2-3 mm bränd och porös isolering kvar, denna ligger mot betongen. Ingen annan isolering finns kvar förutom längst ut på den östra sidan där lite isolering finns kvar.

## 3.6 Provning av sprutisolering

### 3.6.1 Småskalig provning av EPS-element, SP forskningsprojekt för SveBeFo

Referens:	SP projekt BRk6067 [35]
Beskrivning:	Småskalig ugnspvning av brandmotstånd och isoleringsförmåga hos EPSCement.
Provningsmetod:	SP Brand 119
Temperaturkurva:	ISO 834-kurvan i 60 minuter
Provobjekt:	Plattor, 600 x 500 mm <sup>2</sup> , av EPSCement, med och utan skydd av 20 mm sprutbetong med PP-fibrer. På den icke brandexponerade sidan av EPS cement plattan fanns ett tätande skikt av två olika typer (PE-skum eller LLPDE). Konditionering skedde i luft. Provkropparnas ålder framgår ej av rapporten.

Resultat:

Temperaturen mättes vid olika djup från den brandexponerade ytan. Provparametrarna redovisas i Tabell 3.13.

Inget av de provade föremålen spjälkade vid brandprovningen. Efter provningarna var den brandpåverkade EPSCementytan något krackelerad, men inget material hade skalats av.

Tabell 3.13.

Beteckning	Tätande skikt	EPS Cement	Ytskikt (brandutsatt yta)
Prov-1	35 mm PE-skum	60 mm	-
Prov-2	1.5 mm LLPDE (flossad)	60 mm	-
Prov-3	1.5 mm LLPDE (flossad)	60 mm, armerad (6x150x150 mm)	-
Prov-4	1.5 mm LLPDE (flossad)	120 mm, armerad (6x150x150 mm)	-
Prov-5	1.5 mm LLPDE (flossad)	60 mm, armerad (6x150x150 mm)	20 mm sprutbetong med inblandning av 2 kg/m <sup>3</sup> PP-fibrer
Prov-6	1.5 mm LLPDE (flossad)	120 mm, armerad (6x150x150 mm)	20 mm sprutbetong med inblandning av 2 kg/m <sup>3</sup> PP-fibrer

### 3.6.2 Fullskaleprovning av EPS-element, SP forskningsprojekt för SveBeFo

Referens:	SP forskningsprojekt BRk6067 [36]
Beskrivning:	Fullskalig ugnsprövning av brandmotstånd och isoleringsförmåga hos EPS Cement.
Provningsmetod:	EN 1363-1
Temperaturkurva:	HC-kurvan under 120 minuter.
Provobjekt:	EPS Cement sprutat i en grundstomme av betong. Grundstommen hade en geometri på 3600 x 1200 x 280 mm <sup>3</sup> . Två element provades med EPS Cementtjocklek 70 respektive 120 mm. Elementen konditionerades i rumsklimat.

#### Resultat:

Projektet pågår och slutlig rapport är ej klar ännu. SP kommenterar de preliminära resultaten enligt följande:

En begränsad avskalning skedde på de båda provade elementen. Denna avskalning skedde som en delaminering, d.v.s. en skiktning i ytan. Detta kan bero på att elementen sprutades och att denna delaminering beror på hur sprutningen gjorts. I övrigt fanns inga tecken på explosiv spjälkning hos elementen. Efter 120 minuters exponering var temperaturstegringen på 70 mm djup mindre än 20 °C.

## 3.7 Provning av skivor

### 3.7.1 Provning av kalciumsilikatskivor infästa på betongelement

Referens:	SP projekt P404443 [37]
Beskrivning:	Provning av brandmotstånd och isoleringsförmåga hos kalciumsilikatskivor.
Provningsmetod:	EN 1363-1
Temperaturkurva:	RWS-kurvan under 0-120 minuter, därefter Citytunneln Malmö-kurvan under 120-300 minuter
Provobjekt:	Betongelement, 3400 x 1200 x 600 mm <sup>3</sup> , täckta av kalciumsilikatskivor Promatec-T, 1250 x 1200 x 30 mm <sup>3</sup> Skivorna var målade med plastfilm på ytan mot betongen. Betongelementen var förspända med vajrar vid gjutningen till 6.2 MPa.

#### Resultat:

Provningsvisade att den isolerande förmågan hos skivorna begränsade temperaturen mellan skivor och betong till maximalt 340 °C (SP kommentar).

### 3.7.2 Provning av kalciumsilikatskivor och kakel på betongelement

Referens:	TNO report 2001-CVB-R03264 [29]
-----------	---------------------------------

Beskrivning:	Fullskalebrandprovning av förmågan hos kalciumsilikatskiva och kakel att skydda underliggande betong.
Provningsmetod:	Fullskaleprovning
Temperaturkurva:	RWS-kurvan
Provobjekt:	På ett betongelement med dimensionen 2000 x 2000 x 800 mm <sup>3</sup> var en yta av 700 x 2000 mm <sup>2</sup> täckt med Promatect H-skivor, tjocklek 27 mm, och en yta av 1200 x 2000 mm <sup>2</sup> täckt med kakel. Plattorna efterspändes med genomgående stag till ca 10 MPa. Provföremålen var 35 dagar vid tidpunkten för provningen.
Resultat:	

Betongen bakom skivan var opåverkad efter provningen. Däremot lossnade all kakel under första minuten och underliggande betong uppnådde en temperatur på mer än 250°C till ett djup på ca 100 mm.

### 3.7.3 Provning av kalciumsilikatskivor på betongelement för Westerschelde Tunnel

Referens:	TNO-report 99-CVB-R001(Rev.1) [29]
Beskrivning:	Fullskalebrandprovning av kalciumsilikatskivor fäst på betongelement för att fastställa viken tjocklek hos skivan som krävs för att undvika spjälkning hos underliggande betong.
Provningsmetod:	Fullskaleprovning
Temperaturkurva:	RWS-kurvan
Provobjekt:	På betongelement med dimensionen 4800 x 2000 x 450 mm <sup>3</sup> fästes Promatect H-skivor med tjocklek 23, 27 eller 44 mm. Betongsammansättningen är presenterad i Bilaga A (Tabell A. 8). I fallet med tjockleken 44 mm monterades två lager med skivor, 19 respektive 25 mm tjocka. Skivornas fukthalt var ca 3%. Betongkropparna efterspändes med genomgående stag till 12 MPa. Provföremålen var ca 30 dagar vid tidpunkten för provningen.
Resultat:	

Betongen som användes i betongelementen visade sig spjälka (små bitar) vid 100 °C och uppåt. Vid 200-250 °C och med temperaturstegringshastigheten 3-5 °C/min skedde spjälkning av större stycken. Vikten av den lösa betongen ökade belastningen på skivorna tills de slutligen föll ner.



Tabell 3.14.

Beteckning	Tjocklek (mm)	Provningens längd (min)	Resultat
Prov 1	23	52	Betongen spjälkade. Provningen avbröts vid 52 minuter p.g.a. våldsam spjälkning
Prov 2	27	60	Betongen spjälkade. Provningen avbröts vid 60 minuter p.g.a. att spjälkningen orsakat att skivor lossnat.
Prov 3	19+25	119	Betongen spjälkade. Provningen avbröts vid 119 minuter p.g.a. att spjälkningen orsakat att skivor lossnat.

### 3.7.4 Provning av glasfiber-lättbetongskivor

Referens:	MPA Materialprüfanstalt für das Bauwesen, Braunschweig [38]
Beskrivning:	Småskalig brandprovning av glasfiber-lättbetongskivor med olika tjocklek och infästning i betongelement.
Provningemetod:	DIN 4102-2
Temperaturkurva:	Temperatur enligt RWS- eller modifierad HC- eller ZTV-kurva. Vid användandet av HC- och ZTV-kurvan hölls temperaturen, efter en uppgång enligt respektive kurva, konstant på 1200 °C.
Provobjekt:	På betongelement fästes Aestuver ”dicon tu” glasfiber-lättbetongskivor med tjocklek 20, 25 eller 30 mm. Skivorna hade längden 740-1200 mm och bredden 435–585 mm. Infästningen i betongelementen varierade.
Resultat:	

En sammanfattning av resultaten enligt rapporten presenteras i Tabell 3.15.

Tabell 3.15.

Beteckning	Temperaturkurva	Provobjekt	Provningens längd (minuter)	Resultat
Prov 1	HC	Skivor med tjocklek 20 och 30 mm. Både utan och med mekanisk förankring bestående av Spax skruv och direkt infästning i betongelementet.	125	Utan mekanisk förankring: Skivorna lossnade mellan 32 och 43 minuter. Med mekanisk förankring: Max temperatur ca 350 °C mellan 2 cm-skivan och betongen och ca 100 °C på djupet 2 cm i betongen.
Prov 2	ZTV	Skivor med tjocklek 20 mm. 20 mm lister och 20 mm luftspalt.	32	Provningen avbröts p.g.a. att samtliga skivor lossnat.
Prov 4	RWS	Skivor med tjocklek 20 och 30 mm. Både utan och med mekanisk förankring bestående av 5 Spax skruv och direkt infästning i betongelementet.	120	Mellan 40 och 65 minuter lossnade alla skivor i områden där spjälkning skett.
Prov 5	ZTV	Skivor med tjocklek 20 och 30 mm med 20 mm respektive 10 mm luftspalt + bakomliggande lister av Aestuver.	125	Max temperaturen efter 125 minuter ca 370 °C mellan 2 cm-skivan och betongen och ca 135 °C på djupet 2 cm i betongen.
Prov 6	ZTV	Skivor med tjocklek 20 mm utan mekanisk infästning (skivorna låg i formarna vid gjutningen av betongen.	38	Spjälkning i betongen. Provningen avbröts p.g.a. att samtliga skivor föll ner.
Prov 7	ZTV		27	Vid en minut lossnade skivorna, vid 22 minuter spjälkade betong.
Prov 8	ZTV		75	Vid 63 – 74 minuter lossnade skivorna.
Prov 9	ZTV	Skivor med tjocklek 20 mm. Både utan och med mekanisk förankring bestående av ”Stossfugenhinterlegung”	84	Vid 60 minuter lossnade skivor
Prov 610	ZTV	Skivor med tjocklek 20 mm. Både utan och med mekanisk förankring bestående av ”Stossfugenhinterlegung”	150	Max temperaturen var ungefär 230 °C mellan skiva och betong och ungefär 140 °C på djupet 3 cm i betongen.

### 3.8 Provning av övriga produkter

#### 3.8.1 Småskalig provning av betongliknande material (Maxit)

Referens:	SP projekt P700779 [39]
Beskrivning:	Småskalig ugnspvning av brandmotstånd och isoleringsförmåga hos plattor tillverkade av Maxit.
Provningsmetod:	SP Brand 119
Temperaturkurva:	ISO 834-kurvan i 60 minuter
Provobjekt:	Plattor, 600 x 500 mm <sup>2</sup> , av varierande sammansättning och tjocklek av Maxit material. Uppgift om konditionering saknas.

Resultat:

Temperaturen mättes vid olika djup från den brandexponerade ytan. Maxvärden vid två djup presenteras i Tabell 3.16.

Inget av provföremålen spjälkade.

**Tabell 3.16.**

Beteckning	Tjocklek (mm)	Djup till termoelement #1 (mm)	Temperaturstegring vid termoelement #1 (°C)	Djup till termoelement #2 (mm)	Temperaturstegring vid termoelement #2 (°C)
1.PCP - 061101	75	15	249	65	71
2.PC - 061106	52	12	430	42	124
3.AC - 061106	50-60	10-20	388	40-50	88
4.G - 061107	52	22	248	42	75
5.K - 061109	52	22	400	42	275
6.H - 061101	52	22	211	42	79

#### 3.8.2 Provning av betongliknande material (Fendolite MII) för Westerschelde Tunnel

Referens:	TNO-report 2000-CVB-R01967 [29]
Beskrivning:	Fullskalebrandprovning av förmågan hos materialet Fendolite att skydda underliggande betong.
Provningsmetod:	Fullskaleprovning
Temperaturkurva:	RWS-kurvan, förlängd på temperaturnivån 1200 °C till en total tid på 180 minuter
Provobjekt:	Fendolite MII material applicerat i två lager på betongplattor med dimensionen 4800 x 2000 x 450 mm <sup>3</sup> . Betongsammansättningen är presenterad i bilaga A. Förankringen bestod av rostfritt stål nät (40 x 50 x 1.5 mm <sup>3</sup> ) med fästen.

Plattorna efterspändes med genomgående stag till ca 12 MPa.

Provföremålen var 8-11 månader vid tidpunkten för provningen.

Resultat:

En sammanfattning av resultaten enligt rapporten presenteras i Tabell 3.17.

**Tabell 3.17.**

Tjocklek (mm)	Fukthalt hos brandskyddsmaterialet	Vid 120 minuter			Vid 180 minuter			Spjälkning
		Medel (°C)	Min (°C)	Max (°C)	Medel (°C)	Min (°C)	Max (°C)	
45	4.3	240	206	275	276	250	308	0
42	3.9	240	179	313	262	220	405	5-8 cm på en area av 1 x 1 m <sup>2</sup>
45	4.6	185	131	244	225	171	278	0

## 3.9 Övriga forskningsprojekt

### 3.9.1 Runehammarförsöken

SP, i samarbete med TNO i Holland och SINTEF i Norge, genomförde fyra brandförsök i Runehammartunneln utanför Åndalsnes i Norge. Projektet finansierades av Vägverket, Banverket, Räddningsverket, BRANDFORSK och EU. Försöken genomfördes i en 1600 m lång övergiven vägtunnel. I tunneln byggdes en simulerad långtradartrailer med olika typer av gods. De olika uppsättningarna av gods valdes för att representera olika typer av vanliga gods och även studera skillnader i brandeffektutveckling.

Brandeffekten med träpallar och plastpallar blev ungefär 200 MW, d v s ungefär lika stor som brandeffekten från en tankbilsbrand. För tre av de genomförda försöken var effekten högre än 120 MW. Det anmärkningsvärda är att det handlar om en blandning av trä och plast, ett långt ifrån ovanligt gods på våra vägar. Dessutom var lasten inte på något vis extremt stor eftersom långtradar både kan vara längre och transportera mer last.

Gastemperaturer mättes nära taket i närheten av godset. I det första försöket nådde de en bra bit över 1300 °C och även i de övriga försöken nådde gastemperaturerna upp till mellan 1250 °C och 1300 °C. Detta ligger över vad vi förväntade och långt över de 1100 °C, som anges som maximal temperatur enligt den s.k. HC-kurvan, en temperatur-tid-kurva som ofta används vid dimensionering av tunnlar.

I försöken studerades även strålningspåverkan på eventuell räddningspersonal uppströms av branden respektive brandspridningen nedströms branden. Målet är att resultaten skall öka kunskapen om vilka bränder som kan uppstå i tunnlar. Detta kan sedan ligga till grund för framtagande av riktlinjer för säkrare tunnlar och säkrare räddningsinsatser.

### **3.9.2 Europaprojekt - FIT**

Projektet FIT, European Thematic Network on Fires in Tunnels, hade som en uppgift att ta fram rekommendationer vad gäller säkra konstruktionslösningar. Projektet skall nu vara avslutat och dokumentation finns tillgänglig att köpa via projektets hemsida [40]. Inom ramen för detta projekt har inga provningar utförts.

### **3.9.3 Europaprojekt - DARTS**

Projektet DARTS, Durable and Reliable Tunnel Structures, hade som syfte att utveckla hjälpmedel för drift och konstruktion av tunnlar. Projektet skall nu vara avslutat och dokumentation finns tillgänglig att köpa via projektets hemsida. Inom ramen för detta projekt har inga provningar utförts [41].

## **3.10 Pågående projekt**

### **3.10.1 SBUF-projektet**

SP driver för närvarande ett projekt "Innovative self-compacting concrete with good fire spalling properties" där spjälkning hos självkompakterande betong studeras. Betongplattor med storleken 600x500x200 mm<sup>3</sup> provas i en liten ugn vid olika belastning, temperaturkurvor och ålder. Betongkvalitéerna varierar bl.a. med avseende på mängd filler, vatten-cementtal, och mängd, typ och geometri hos polypropylen-fibrer. Plattor med 60 olika betongkvalitéer har tillverkats.

För närvarande har 39 småskalebrandprovningar körts och resultaten som framkommit hittills indikerar följande:

- Sannolikheten är stor att självkompakterande betong spjälkar när den utsätts för brandpåverkan.
- Spjälkningen ökar när betongen utsätts för en tryckbelastning.
- Nivån hos tryckbelastningen hade ingen signifikant påverkan på spjälkningen.
- Mängden filler kan påverka spjälkningen. Med ökande mängd filler ökar spjälkningen.
- PP-fibrer minskar drastiskt risken för spjälkning.
- Polypropylenfiller påverkar inte sannolikheten för spjälkning, åtminstone inte om 10 kg/m<sup>3</sup> eller mindre används.

- När 1-2 kg/m<sup>3</sup> PP-fibrer används kunde ingen skillnad i effekt beroende av fiberdiameter (18 µm eller 32 µm) eller fiberlängd (6 mm eller 12 mm) påvisas.
- Med 0.5 kg/m<sup>3</sup> PP-fibrer observerades ingen spjälkning i de flesta prov. Undantaget var en betongkvalitet som spjälkade både när mängden 0.5 and 1.0 kg/m<sup>3</sup> fibrer användes.

Projektet är finansierat av Banverket, Brandforsk, CBI, Cementa, Nordkalk, SBUF, Sika, Skanska Asfalt och Betong, Skanska Prefab, Statens Vegvesen (Norge) och Vägverket.

### **3.10.2 Statens Vegvesen, Norge**

Norska Statens Vegvesen har utfört flera fullskaleprovningar. De har provat PE skum skyddat av 80 mm nätarmerad sprutbetong med 2 kg/m<sup>3</sup> polypropylen-fibrer i en 100 MW brand. Temperaturkurvan ligger mellan HC- och RWS-kurvan i över en timme. Hela brandtestet varade i ca 4 timmar. Sprutbetongen hade ingen spjälkning och konstruktionen var intakt efter branden. PE-skummet visade några små tecken på smältning bakom skyddet.

Rapporten beräknas vara klar i början på juni 2007.

### **3.10.3 Formasprojektet**

På SP och Lunds Tekniska Högskola pågår ett doktorandprojekt, ”Metod för riskbedömning av brandspjälkning hos betong”, finansierat av Formas. Huvudsyftet med projektet är att utveckla teoretiska metoder för att bedöma risken för spjälkning hos betong. Det finns redan flera olika modeller utvecklade vilka kan användas. Det som framför allt saknas är materialdata. Det huvudsakliga arbetet inom ramen för projektet är därför att experimentellt bestämma relevanta materialdata vilka sedan skall användas i de modeller som finns. Alla provkroppar finns tillverkade och under hösten 2007 kommer provningarna att genomföras.

### **3.10.4 Vägverksprojektet**

Nyligen startade projektet ”Spjälkning av betong vid brand” som drivs av SP och är finansierat av Vägverket. Spjälkningsrisken hos anläggningsbetong skall undersökas genom fullskale- och småskaleprovning. Ett antal olika fiberinblandningar ingår i testserien som även skall jämföra olika brandkurvornas inverkan (ISO 834 och RWS). Alla provkroppar är tillverkade och brandprovningen beräknas starta hösten 2007.

### **3.10.5 Europaprojekt - Newcon**

Viktiga frågor i Newcon projektet är att undersöka hur PP-fibrer fungerar och hur de olika brandspjälkningsmekanismerna hänger ihop [42]. En del av projektet består av modelleringsarbete som sker vid universitetet i Padua, och av att ta fram materialdata till denna modell. Den matematiska modell som används är en vidareutveckling av programpaketet HITECOSP som utvecklades i ett tidigare europeiskt projekt. För att

separera de faktorer som påverkar brandspjälkningen kommer ett antal storskaliga tester att göras [43]. Materialtestningen och modelleringsarbetet är planerat att slutföras under våren 2007. För närvarande ser det dock ut som om det kommer att dra ut på tiden.

### **3.10.6 Europaprojekt - UPTUN**

Uppgifter och resultat som tagits fram som berör brandskydd i tunnelkonstruktioner anges i WP4 [44]. Det finns ingen slutdokumentation av WP4. De provningar och resultat vad gäller skydd av tunnlar som hittills redovisats ingår i denna sammanställning (kapitel 3.3.8, 3.7.2, 3.7.3, 3.8.2)

### **3.10.7 Europaprojekt – L-SURF**

SP Brandteknik deltar i EU-projektet L-SURF, Large Scale Underground Research Facility. Målsättningen är att utveckla samarbetet inom tunnelforskningen i Europa och undersöka behovet av och förutsättningarna för att bygga upp en europeisk organisation och anläggning för forskning och utbildning inom området säkerhet i tunnlar och andra undermarksanläggningar. Inom ramen för detta projekt har inga provningar utförts [45].

### **3.10.8 RILEM komité**

Under året kommer det att bildas en ny RILEM (International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures) kommitté som skall ta fram provningsmetoder för temperaturberoende materialdata. Den nya kommittén under ledning av professor Schneider är en fortsättning på den gamla Technical Committee 200-HTC ”Mechanical concrete properties at high temperature - Modelling and applications”. I det nya kommittéarbetet kommer t.ex. mätmetoder för att mäta den temperaturberoende termiska konduktiviteten, permeabiliteten och portrycket att tas fram. Robert Jansson, SP, kommer att bli sekreterare i den nya kommittén.

### **3.10.9 Holländskt projekt**

Nyligen startade Professor Eddy Koenders på Delft University of Technology projektet ”Explosive spalling: Towards a model for fire resistant concrete elements”. Tre doktorander ska studera spjälkningsproblematiken från betong på mikronivå till FEA modellering av betongelement.

## 4 EXEMPEL PÅ TEKNISKA LÖSNINGAR OCH REKOMMENDATIONER

### 4.1 Allmänt

Tekniska lösningar som avser brandskyddet, med avseende på att förhindra ras och avspjälkning, för tunnelkonstruktioner kan utformas på en rad olika sätt nämligen:

- 1) Förundersökning av betongens brandegenskaper – d.v.s. vald betong kan visa sig vara acceptabel.
- 2) Tillsats av polypropylen fibrer i sprutbetong som läggs som ett täcksikt över betongkonstruktionen som skall skyddas. Vid brand smälter plastfibrerna av polypropylen och bildar ett finmaskigt hålrumsnät som tillåter det förångade vattnet att ledas ut ur betongen utan att orsaka spjälkning.
- 3) Tillsatser av polypropylen 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

Många befintliga tunnlar har en brandtekniskt lösningar enligt 2 men utan tillsatser av polypropylenfibrer vilket innebär att avspjälkningsproblemet i många fall kvarstår.

### 4.2 Söderledstunneln (reovering)

#### 4.2.1 Beskrivning av tunneln

Söderledstunneln genomgår för närvarande en omfattande reovering, då stora skador på bärande konstruktioner observerats i flera partier av tunneln.

Söderledstunneln är en vägtunnel som sträcker sig under hela Södermalm i nord-sydlig riktning, mellan Centralbron och Johanneshovsbron. Söderledstunneln består av två tunnlar med två körfält i vardera tunnel. Längden på dessa är ca 1 600 m. Dagligen passerar ca 85 000 personbilar genom Söderledstunneln.

#### 4.2.2 Dimensioneringskrav

Reoveringen medförde en förlängning av tunnelns livslängd vilket gjorde att följande regelverk följdes för de publika delarna (tunneln) [46]:

Lag (1994:847) om tekniska egenskapskrav på byggnadsverk m.m. BVL med tillhörande Förordning (1994:1215) om tekniska egenskapskrav på byggnadsverk, m.m. (BVF).

Konstruktionen har dimensionerats för att klara ett brandförlopp enligt RABT60 (RABT-ZTV(train)) med avsvälningfas. Åtgärder har införts för att förhindra spjälkning i de delar av tunneln där konsekvensen av en kollaps är stor för



personsäkerheten. Den bärande funktionen har kontrollerats via beräkningar på brand [46] d.v.s. inga brandprover genomfördes.

De preliminära rekommendationerna i brandskyddsbeskrivningen innebär att tunneltak i ca 80 % av tunnelns längd skyddas med brandskyddsputs (Fireshield eller likvärdig). På södermalmsavfarten kompletteras befintligt undertak med brandskyddsskivor (Isover Fireprotect 150 eller likvärdig), för att uppnå tillräcklig bärförmåga vid brandfallen.

Åtgärder för skydd mot spjälkning av övriga takkonstruktioner samt avskiljande vägg ansågs inte vara nödvändig om en låg till måttlig spjälkningssannolikhet accepterades i delar med måttlig konsekvens (personrisker) i enlighet med genomförd konsekvensutredning [47].

### **4.2.3 Betongtunnel med sprutbetong/brandskyddsputs**

Brandskyddsputs i tak och 0,5 m ner på väggarna. Ingen sprutbetong på mittväggen då den inte är bärande. Tjockleken på brandskyddsputsen rekommenderas vara mellan 25-35 mm av typen FS 1350 och i väggar 60 mm, se Bilaga C.

## **4.3 Södra länken**

### **4.3.1 Beskrivning av tunneln**

Södra länken är en 6 km lång trafikled som binder ihop Essingeleden med Värmdöleden i Stockholm. Länken har även anslutningar till Nynäsvägen och Huddingevägen. 4,5 km av Södra länken går i tunnlar. Dessa utgör ett komplett underjordiskt vägsystem uppbyggt av enkelriktade parallella tunnlar samt underjordiska trafikplatser.

### **4.3.2 Dimensioneringskrav**

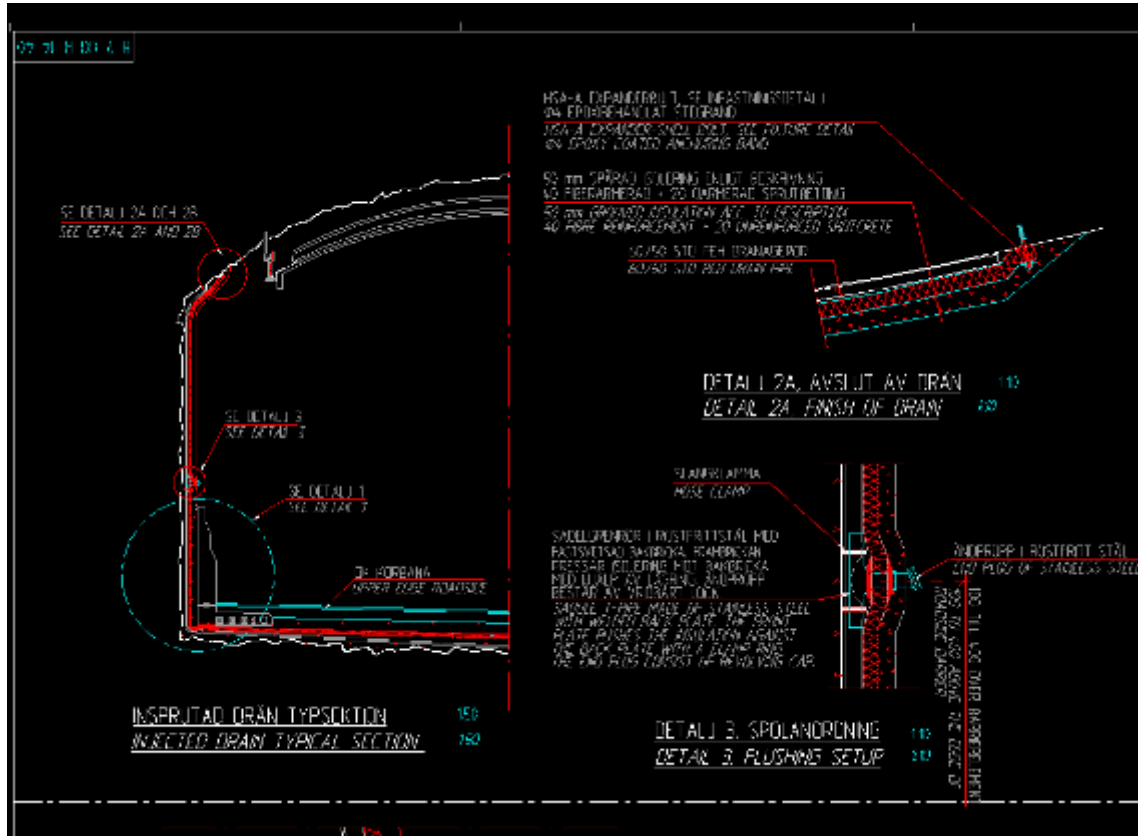
Dimensioneringskrav som använts i Södra länkens betongtunnlar anges i [8], se kapitel 2.5.2 d.v.s. HC-kurvan med 2 timmars upphettningssfas, utan avsvälning.

I Södra länken har man använt sig av täcksikt av sprutbetong utan tillsatser av polypropylen. Det skall noteras att i Södra länkens tunnlar så finns det ett undertak som får medräknas vid branddimensioneringen enligt [8].

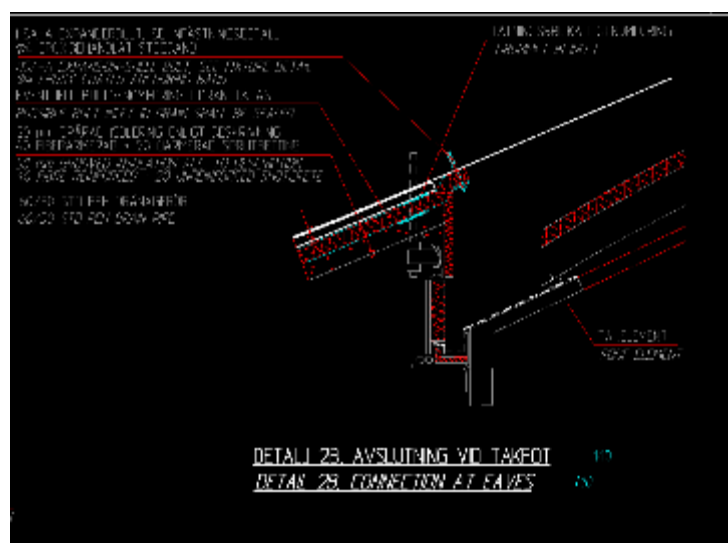
Det självbärande undertaket i Södra länkens trafiktunnlar är dimensionerat för att klara en brand under minst en timme (REI60).

### 4.3.3 Betongtunnel med sprutbetong

Konstruktionslösningen visas i Figur 4.1 och Figur 4.2.



Figur 4.1. Konstruktionslösning Södra länken



Figur 4.2. Konstruktionslösning Södra länken

## 4.4 Löttingetunneln

### 4.4.1 Beskrivning av tunneln

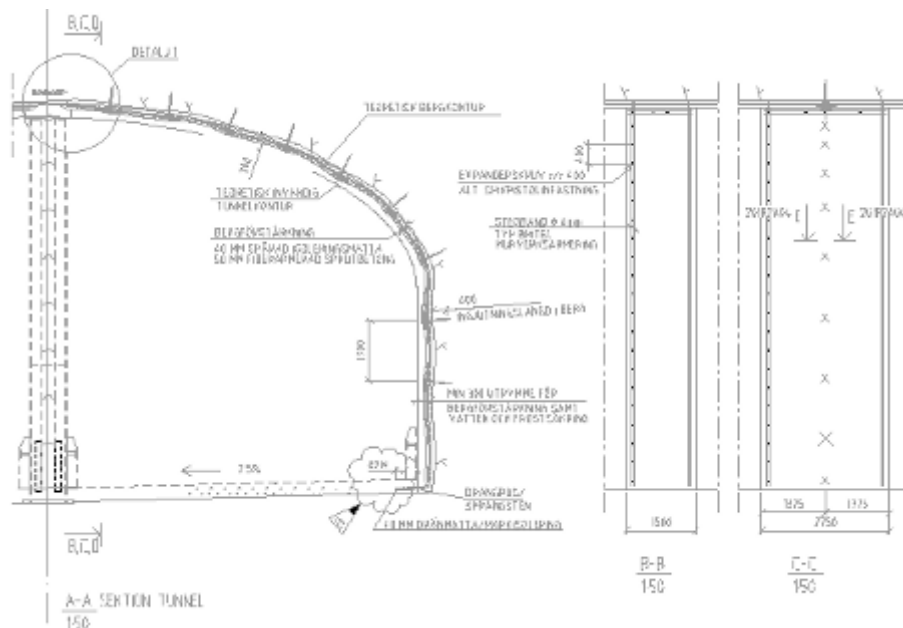
Löttingetunneln är en 1,1 km lång vägtrafiktunnel, vilken utgör en del av Norrortsleden mellan Täby Kyrkby och Rosenkälla. Tunneln består av två körfält, ett i vardera riktningen, som delas med en skiljevägg.

### 4.4.2 Dimensioneringskrav

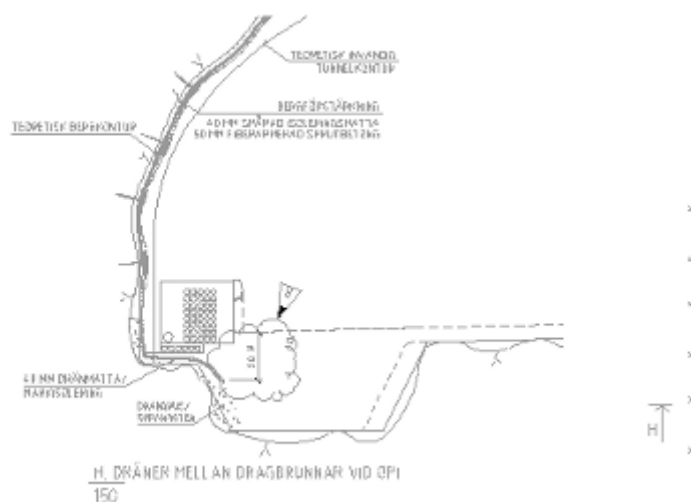
Löttingetunnelns projektering är gjord enligt Tunnel 99, med tillägget att säkerhet mot betongavspjälkning vid brand enligt Tunnel 2004 skall beaktas.

### 4.4.3 Betongtunnel med sprutbetong

För Löttingetunneln gäller inblandning av polypropylenfibrer i sprutbetongen kompletterat med en utredning. Enligt förfrågningsunderlaget för Löttingetunneln skall den betong som gränsar till tunneln innehålla  $2 \text{ kg/m}^3$  polypropylenfibrer. Sprutbetongens tjocklek är 30 mm på vägg och 35, 70, 100 eller 150 mm med armering beroende på bergklass i tak och anfang [48].



Figur 4.3. Konstruktionslösning Löttingetunneln



**Figur 4.4. Konstruktionslösning Löttingetunneln**

**Tabell 4.1. Teknisk lösning för brandskydd av Löttingetunneln**

<b>Benämning</b>	<b>Krav</b>
Ingjutningsbultar, brickor	Typ kamstål med diameter 12 mm Frambricka och bakbricka med gummiring samt mutter anpassad till kamstålsbult, korrosivitetsklass R3 (Duplex enligt krav i teknisk beskrivning)
Muttrar	Korrosivitetsklass R2
Sprutbetongbricka	Armeringsjärnen; diameter 10 mm, längd 200 mm Kamstål; stålqualität B500BT Mutter 8.8 Platta S235JO Korrosivitetsklass R2
Ingjutning	Fullt ingjuten med polyesterpatroner
Fiberarmerad sprutbetong	B1GI, std. P, lägst C30/37 (R10,30/100)xf >2,9MPa fs >4,0 MPa
Exponeringsklass XD3/XF4	Stålfiber ska uppfylla krav enligt SS 14 21 65 2,0 kg polypropylenfibrer skall inblandas per m <sup>3</sup> sprutbetong Sprutbetongens delkomponenter och efterhärdningstid ska väljas så att den fria krympningen understiger 0,1 % efter 60 dagar.
Vatten och frostsäkring	Isolering/PE-matta skall utföras med längsgående och tvärgående kjolar enligt ritning L-profil av plast för utförande av dilatationsfog

## 4.5 Citybanan

### 4.5.1 Beskrivning av tunneln

Citybanan kommer att utgöras av en tvåspårig järnväg i en ca 6 km lång berg- och betongtunnel. Citybanan sträcker sig mellan Stockholm Södra och Tomtebodan och innefattar två stationer; City och Odenplan. Citybanan förväntas stå färdig och öppnas för pendeltågtrafiken någon gång mellan år 2013 och 2016.

### 4.5.2 Dimensioneringskrav

Dimensionerade brand för bärande konstruktioner har utgått ifrån kraven i BV tunnel som sedan objektanpassats för Citybanan vilket har resulterat i följande brandkurvor

- Dimensionerade brand för bärande konstruktioner ovan och invid spårområdet i tunnlar enligt HC-kurvan under minst 180 min samt en avsvalningsfas på 600 C/h. Detta gäller för alla tågtunnlar inklusive betongtunneln under Söderström
- Dimensionerade brand för bärande konstruktioner ovan och invid spårområde på station enligt HC-kurvan under minst 120 min, utan avsvalningsfas. Detta gäller (förslag) även 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.

Strategin för att uppfylla kraven på verifiering av brandmotstånd baseras på att Citybanans bergtunnlar delas in i två brandskyddskategorier med avseende på dimensionering och utformning av de bärande huvudsystemen bärförmåga:

#### Brandskyddskategori 1

Tunnelavsnitt där brandpåverkan inte riskerar att leda till kollaps i det bärande huvudsystemet, fortskridande ras eller omfattande bergutfall om bärförmågan hos installerat förstärkningssystem blir nedsatt eller går förlorad

#### Brandskyddskategori 2

Tunnelavsnitt där brandpåverkan riskerar att leda till kollaps i det bärande huvudsystemet, fortskridande ras eller brott i det bärande huvudsystemet, fortskridande ras eller brott med omfattande bergutfall om bärförmågan hos installerat förstärkningssystem blir nedsatt eller går förlorat.

För Citybanan föreslås att tunnelsträckor ska hänföras till brandskyddskategori 1 om samtliga nedanstående villkor är uppfyllda:

- $RMR \geq 50$  (d.v.s tunnlar i bergtyp A och B)
- Spännvidd,  $B \leq 20$  m
- Avståndet upp till bergytan (bergtäckning),  $BT \geq B$  (spännvidden)
- Avståndet till ovanförliggande tunnel i berg,  $BT_{\text{tunnel}} \geq B^{\text{max}}$ , där  $B^{\text{max}}$  är spännvidden för den tunnel som har den största spännvidden

Om något av ovan nämnda villkor inte är uppfyllda ska tunnelsträckan hänföras till Brandskyddskategori 2. Bergförstärkande konstruktioner i Brandskyddskategori 2 skall betraktas som ”bärande konstruktioner”.

Bärande huvudsystem för tunnlar i Brandskyddskategori 1 bedöms inte kollapsa i samband med brandpåverkan enligt dimensionerande brandbelastning. Därför behövs ingen brandtekniskt dimensionering eller utformning av brandskyddande åtgärd med hänsyn till kollaps på dessa tunnelsträckor. Brandskyddande åtgärder med hänsyn till nedfall i samband med utrymning och räddningsinsats behöver heller inte göras.

Tunnelsträckor i Brandskyddskategori 2 kan förväntas bli permanent bergförsträta med antingen en platsgjuten betongkonstruktion, en stålfiberarmerad sprutbetongkonstruktion eller med en kombination av bergbultar och stålfiberarmerad sprutbetong i samverkan.

Exempel på betong- och sprutbetongkonstruktioner i brandskyddskategori 2:

- Armerad platsgjuten betongkonstruktion med separat isoleringsskikt
- Oarmerad platsgjuten betongkonstruktion med separat isoleringsskikt
- Armerad platsgjuten betongkonstruktion utan separat isoleringsskikt
- Oarmerad platsgjuten betongkonstruktion utan separat isoleringsskikt
- Stålfiberarmerad sprutbetongkonstruktion med separat isoleringsskikt
- Stålfiberarmerad sprutbetongkonstruktion utan separat isoleringsskikt
- Bultar och stålfiberarmerad sprutbetong i samverkan med separat isoleringsskikt
- Bultar och stålfiberarmerad sprutbetong i samverkan utan separat isoleringsskikt

Vid utförande av brandskydd med separat isoleringsskikt behövs inte den bakomliggande betong- eller sprutbetongkonstruktionen innehålla pp-fibrer. Då brandskyddet integreras i konstruktionen ska betong/sprutbetongen innehålla pp-fibrer.

Halten pp-fibrer i betong- och sprutbetongkonstruktionen utan separat isoleringsskikt, samt i separat isoleringsskikt av sprutbetong bestäms i samband med provning.

Isoleringsskikt av EPS-cement och isoleringsskiva ska vara förankrat i bakomliggande konstruktion avsett typ av bakomliggande konstruktion.

Isoleringskikt av sprutbetong ska förankras om den bakomliggande konstruktionen utgörs av platsgjuten betong. Om den bakomliggande konstruktionen utgörs av sprutbetong behövs ingen särskild förankring utföras.

Förankring ska dimensioneras med hänsyn till tryck- och sugkrafter p.g.a. tågrörelser.

Provning av motståndsförmåga mot spjälkning ska utföras både som förprovning och fortlöpande provning. Infästningsanordningars funktion ska verifieras genom provning.

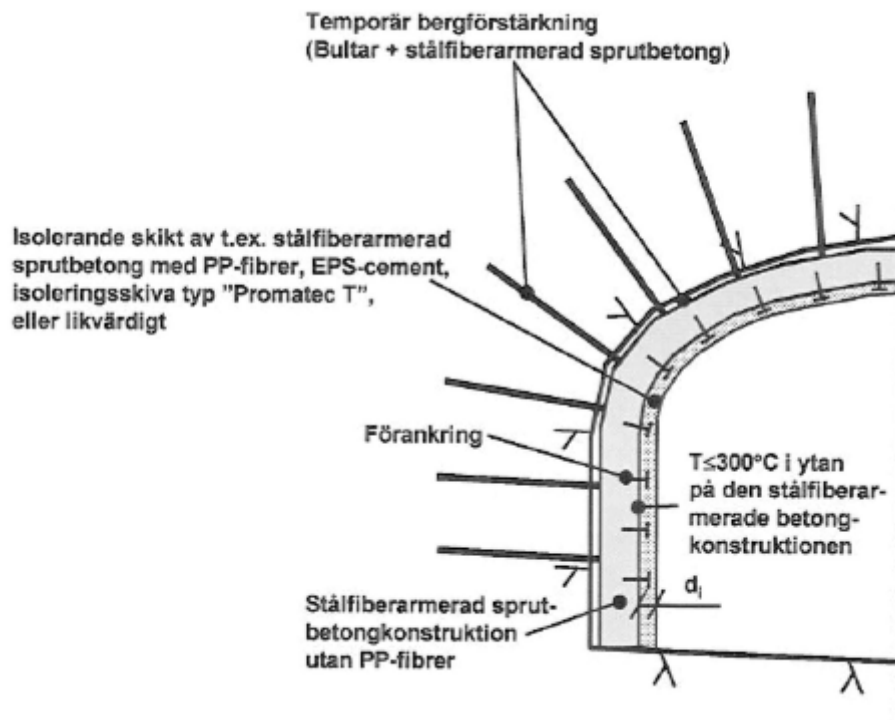
#### **4.5.3 Acceptanskriterier vid brandprovning**

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 ej ramla ned p.g.a. brandpåverkan på infästningsanordningen

#### **4.5.4 Exempel på stålfiberarmerad sprutbetong med separat isoleringskikt**

Citybanan tillämpar flera konstruktionslösningar för att uppfylla dimensioneringskraven. Nedan följer ett exempel på konstruktionslösning bestående av stålfiberarmerad sprutbetong med separat isoleringskikt för brandskyddskategori 2.



**Figur 4.5. Citybanan –Princip för dimensionering och utformning av stålfiberarmerad sprutbetong med separat isoleringsskikt**

Vid utformning av en sprutbetongkonstruktion med isoleringsskikt, se Figur 4.5, läggs ett isoleringssikt utanpå den stålfiberarmerade sprutbetongkonstruktionen. Den stålfiberarmerade sprutbetongen behöver inte innehålla pp-fibrer för att förhindra spjälkning om temperaturen i sprutbetongytan är lägre än den som orsakar spjälkning (ca 700 grader enligt prover utförda inom Citybanan). Eftersom sprutbetongen innehåller stål fibrer vilka kan förväntas vara jämnt fördelade i tvärsnittet, dimensioneras tjockleken på isoleringssiktet så att temperaturen i sprutbetongytan är  $\leq 300$  grader. Detta innebär dels att temperaturvillkoret (400 grader) då sprutbetongen anses förlora sin bärförmåga är uppfylld, dels att marginalen för spjälkning i det underliggande sprutbetongen kan anses vara god.

Isoleringskiktet kan utgöras av olika typer material.

Tjockleken på det isolerande skiktet dimensioneras med hjälp av värmeinträngningsberäkningar

Om isolerande sikt av sprutbetong väljs ska hänsyn tas till fuktkvoten i beräkningarna. Den totala tjockleken på isoleringssiktet beräknas med hänsyn till en spjälkningmån på 20 mm enligt Ekvaktion 1. Spjälkningsmånen får inte tillgodoräknas vid temperaturinträngningsberäkningar. Det isolerande skiktet får inte inräknas i sprutbetongkonstruktionens bärförmåga. Halten pp-fibrer i den isolerande sprutbetongen, för att innehålla en spjälkningmån på 20 mm, bestäms i samband med provning [52].



$$d_{\text{tot}} = d_i + d_{\text{spjälk}} \quad [ \text{Ekvation 1} ]$$

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

$d_i$  = isoleringstjocklek

$d_{\text{spjälk}} = 20 \text{ mm}$

## 4.6 Överdäckning Snöflingan

### 4.6.1 Beskrivning av överdäckningen

Projektet Snöflingan innebär att Lindhagensplan och Mariebergsgatan i Stockholm sammanbinds med en esplanad. Denna esplanad innebär en ca 240 m lång överdäckning av Drottningholmsvägen och tunnelbanan vid Fridhemsplan. Hotell och bostäder bygg på sidan om överdäckningen. Överdäckningen förväntas stå klar sommaren 2009.

### 4.6.2 Dimensioneringskrav

Kommunens krav vilka hänvisar till tunnel 2004. Det innebär att HC-kurvan skall användas för vägtunneln. För spårtunneln finns det ingen brandkurva framtagen utan här föreskriver SL en teknisk lösning för brandskyddet.

### 4.6.3 Betongtunnel (vägtunneln)

Befintliga konstruktioner vid Mariebergsgatan kommer sannolikt att skyddas i tak och 0,5 m ned på väggar med brandskyddsputs eller sprutbetong d.v.s. liknande lösning som i Söderledstunneln som använt brandskyddsputs.

Nya betongkonstruktioner kommer att innehålla polypropylen-fibrer i enlighet med tunnel 2004. Brandprovning för att kontrollera skyddet mot betongavspälkning utfördes under sommaren 2007 hos SP. Efter genomförda prover togs ett förslag fram som senare godkändes av staden på en inblandning på 1 kg/m<sup>3</sup> pp-fibrer i de nya betongkonstruktionerna.

### 4.6.4 Betongtunnel (spårtunneln)

SL:s anvisningar anger att brandskyddet av de bärande konstruktionerna (tunneltaket i den nya konstruktionen) i spårtunneln ska utföras med horisontellt monterade brandisoleringsskivor, se nedan:

- Täckande betongskikt enligt Bronorm 2004
- 20 mm luftspalt
- 20 mm brandskiva Promatec eller likvärdigt

## 4.7 Götatunneln

### 4.7.1 Beskrivning av tunneln

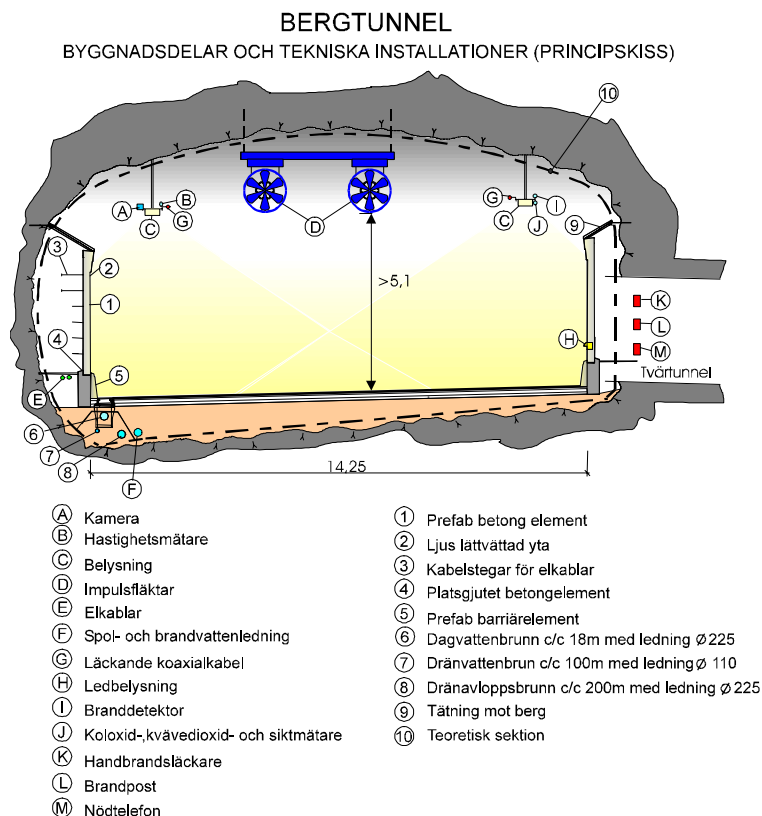
Götatunneln som är en vägtunneln och ligger i Göteborg består av ca 1000 m bergstunnel, två betongtunnelrör á 210 m vid Lilla Bommen samt två betongtunnelrör á 360 m vid Järntorget d.v.s. total tunnallengd är ca 1,6 km.

### 4.7.2 Dimensioneringskrav

Projektering enligt tunnel 1999 med tillkommande krav på brandskyddet avseende skydd mot avspäлкning i paritet med tunnel 2004. Vid dimensionering av tunnelkonstruktioner användes HC-kurvan.

### 4.7.3 Bergtunnel med sprutbetong

Vid dräner och isoleringsskivor används täckskikt av fiberarmerad sprutbetong, innehålland polypropylene-fibrer  $2,0 \text{ kg/m}^3$  och stålfiberarmering  $55 \text{ kg/m}^3$  (som i övrig tunnel), fiberlängden var 6 mm och tjockleken  $18 \mu\text{m}$ . Ungefär 40 % av bergtunnlarna i Götatunneln har dräner- och isoleringsskivor för vatten och frost. Bergtunneln visas i Figur 4.6.

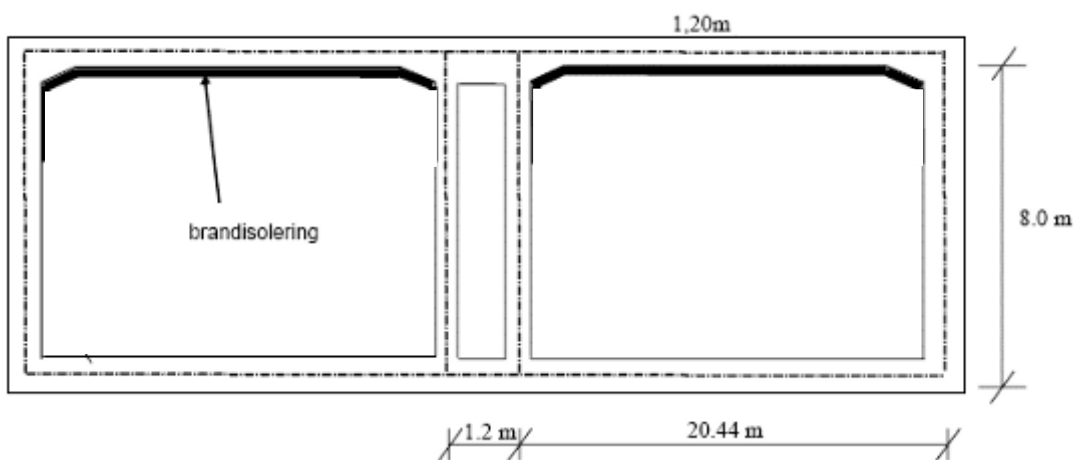


Figur 4.6. Bergtunneldelen av Götatunneln

#### 4.7.4 Betongtunnel med brandskyddsskivor

Götatunneln har använt både Promatec och Aestuver skivor i betongtunnelnarnas tak och voterna (övergång mellan tak och vägg) men inte i väggar, se Figur 4.7.

- Projektet noterade vid byggnationen att Aestuver skivorna jämfört med Promatec har en slätare yta d.v.s. lättare att göra rent samt att de är också mera lättarbetade än Promatec-skivorna.
- Skivorna lades in i gjutformen innan gjutning vilket gjorde att det gick snabbare att få skivorna på plats.
- Tjocklek på skivor var ca 28-30 mm.



Figur 4.7. Sektion av Götatunneln

## 4.8 Hallandsåstunneln

Hallandsåstunneln ska bli en ca 8,6 km lång järnvägstunnel under Hallandsåsen och utgöra del av Väst kustbanan mellan Göteborg och Malmö. Tunneln ska utformas som två enkelspåriga tunnlar. Hallandsåstunneln började byggas 1992, men bygget avbröts 1997 på grund av miljöproblem. År 2004 återupptogs projektet och idag står ca 45 % av tunneln färdig. Hallandsåstunneln planeras att stå färdigt år 2012 och förväntas då trafikeras av både persontåg, i form av Öresundståg, Pågatåg, X 2000 och nattåg med sovvagnar, samt godståg, vilket även inkluderar farligt gods.

### 4.8.1 Dimensioneringskrav

RWS-kurvan enligt BV-tunnel (kurva III) utan avsvainingsfas.

De prefabricerade tunnelementen samt återstående platsgjutna konstruktionerna skall brandskyddas genom inblandning av polypropylenfibrer vid tillverkning

De redan utförda platsgjutna betongkonstruktionerna och betongsprutade sektionerna (1990-talet) ska brandskyddas genom sprutad termisk isolering.

#### **4.8.2 Betongtunnel**

Stålfiberarmerad sprutbetong innehållande 1 kg/m<sup>3</sup> polypropylenfibrer. Tjockleken får variera mellan 70 och 110 mm. Planeras med pp-fibrer i tak och väggar. Sprutbetongen säkras mot den bakomvarande betongen med universalskruv i rutnät c/c 650 mm. Varje skruv är försedd med en stjärnbricka 100×100×3 mm.

För den platsgjutna betongen valdes en fiberinblandning på 1 kg/m<sup>3</sup>.

### **4.9 Botniabanan**

Botniabanan är en 19 mil lång kustbana som går mellan Kramfors och Umeå. Banan passerar totalt genom 16 tunnlar längre än 200 m. Tunnellängden varierar mellan 234 och 5985 m. Tunnelarna är enkelspåriga med både person- och godstrafik, vilket även inkluderar transporter med farligt gods

#### **4.9.1 Dimensioneringskrav**

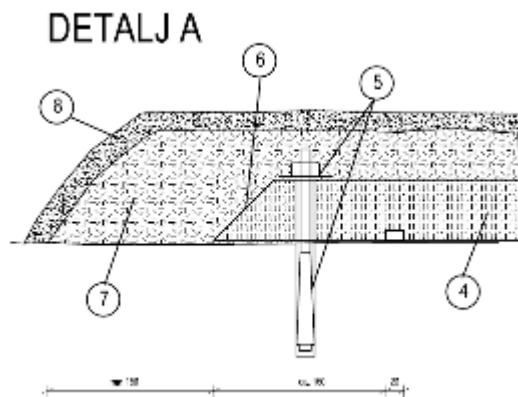
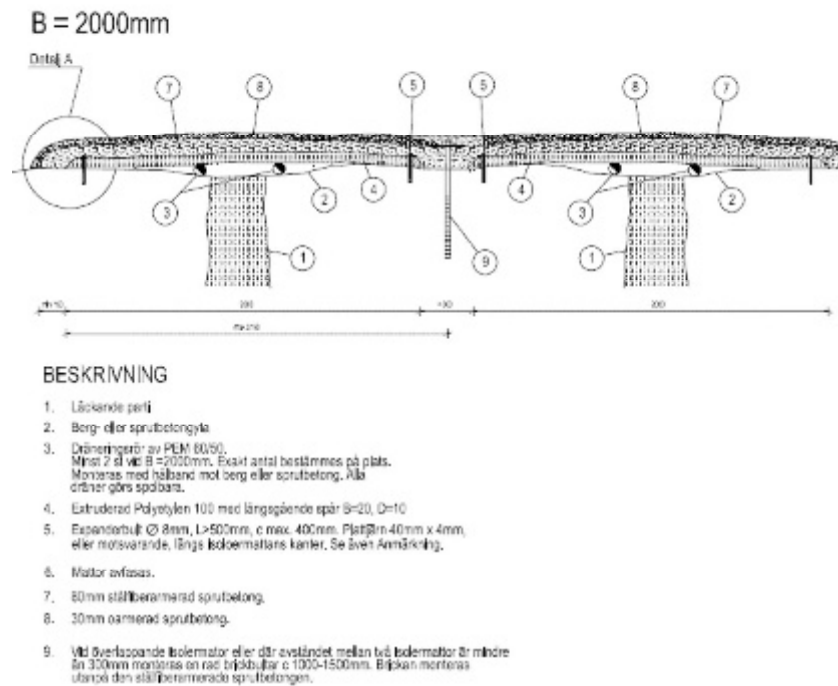
Eventuell betongtunnel skall konstrueras så risken för kollaps begränsas under påverkan av dimensionerande brand. Lokala skador i betongens ytskikt kan dock accepteras. Dimensionerande brandgastemperatur för betongtunnelarna skall vara enligt hydrocarbonkurvan (HC-kurvan) enligt SS-EN 1363, se kurva I i Figur 2.2 (det är oklart om detta verkligen följts). Något särskilt skydd för att förhindra avspjälkning vid brand finns inte i Botniabanans betongtunnlar.

#### **4.9.2 Betongtunnel med sprutbetong**

Betongtunnelarna har inte någon särskild lösning för att skydda betongen mot spjälkningsproblematiken vid brand.

#### **4.9.3 Bergtunnel med sprutbetong**

Dräner av polyetylen (100 mm tjock) skyddas med 30 mm oarmerad sprutbetong och 80 mm stålfiberarmerad sprutbetong. Det finns även platser med oskyddade dräner. Dränkonstruktion, se Figur 4.8. Skyddet är inte särskilt till 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 ytskiktclass obrännbart material klass 1 enligt BBR 94.



Figur 4.8. Dränkonstruktion

## 4.10 Ådalsbanan

### 4.10.1 Beskrivning av tunneln

Ådalsbanan sträcker sig mellan Sundsvall och Långsele. Det är tänkt att banan ska bli en framtida länk mellan Ostkustbanan och Botniabanan. Ådalsbanan består av två upprustningsträckor samt två nybyggnadsträckor. Nybyggnadssträckorna består av en 21 km lång bana mellan Härnösand och Veda och en åtta km lång bana mellan Bollstabruk och N Nyland. Då nybyggnadssträckorna kommer att dras genom kuperad terräng kommer detta innebära att banan kommer att passera genom sex tunnlar mellan Härnösand och Veda och ytterligare två tunnlar på väg mellan Bollstabruk och N

Nyland. Tunnelarna ska byggas som enkelspårstunnelar och längden på dessa kommer att variera mellan 165 och 4540 m. Trafiken förväntas bestå av blandad person- och godstrafik, vilken även inkluderar farligt gods.

Sträckor med betongtunnelar finns inte i Ådalsbanan utan det är bergtunnelar med portaler, vägbroar och förstärkningar av bergtunneln i betong.

#### **4.10.2 Dimensioneringskrav**

Brandkurvan i Citytunneln, se Figur 3.2, har använts vid dimensionering av brandskyddet för en vägbro av betong i Murbergstunneln. För övriga delar så kommer projektet att utreda riskerna för kollaps och därefter bestämma om de skall öka skyddet.

#### **4.10.3 Betongtunnel**

Murbergstunnelns vägbro (Hamnleden(bilväg) passerar ovanför Murbergstunneln) av betong kommer att skyddas med brandskyddsskivor. Skivorna som är av Promatec eller liknande sort är 25 mm tjocka fäst i taket, voterna och på väggarna ända ner till marken. Skivorna kommer att fästas med hjälp av expanders.

#### **4.10.4 Bergtunnel**

För bergtunnelar med dräner kommer en liknade lösning användas som i Botniabanan, se Figur 4.8. Oskyddade dräner är inte tillåtet i Ådalsbanan. Skyddet av dränerna är till för att uppfylla brandkraven på ytskikten och hålla dränerna på plats.

### **4.11 Norra länken**

#### **4.11.1 Beskrivning av tunneln**

Norra länken ska bli en ca 5 km lång trafikled som ska sträcka sig mellan Essingeleden vid Norrtull till Lidingövägen vid Värtan. Länken är planerad för att avlasta innerstadsgatorna från såväl person- som tung trafik.

#### **4.11.2 Dimensioneringskrav**

Enligt tunnel 2004 som Norra länken följer avseende dimensionerade brand för konstruktioner så dimensioneras brandskyddet av bärande konstruktioner med HC-kurvan med tre timmars upphettningsfas utan avsvalningsfas. Som tillägg till tunneln 2004 anges i den tekniska beskrivning som använts vid upphandling av Norra länken följande krav:

*Bergtunneln – inklädnad och kulvertvägg*

Inklädnaden endast skall dimensioneras för R60 men där entreprenören skall visa att ingen spjälkning förekommer vid brand.

Spjälkning redovisas för kurva II enligt Tunnel 2004 under 60 min (SS-EN 1363-1).

Spjälkningen räknas i två faser, utrymningsfasen under de första 10 minuterna där det inte accepteras någon spjälkning alls och insatsfasen, de efterföljande 50 minuterna, där

spjälkning i mindre omfattning kan accepteras. Verifiering av spjälkningskydd kan slopas vid inblandning av 2 kg polypropylenfibrer enligt Tunnel 2004

Förutsättning är att tätmembranen består av material med begränsad brännbarhet som skall redovisas enligt ISO 9705 med följande minimikrav:

- Tid till övertändning: 20 min
- Genomsnittlig maximal värmeavgång under 30 s: 300 kW
- Genomsnittlig värmeavgång från produkten: 50 kW
- Genomsnittlig maximal rökproduktion under 60 s: 2,3 m<sup>2</sup>/s
- Genomsnittlig rökproduktion: 0,7 m<sup>2</sup>/s

#### *Betongtunnel*

Samtliga ytskikt i trafiktunnel utförs på sådant sätt att spjälkning i ytskikt inte stör utrymning eller förhindrar insats från räddningstjänsten. Under brandens första tio minuter accepteras ingen betongspjälkning. Under räddningstjänstens insats, vilken omfattar de efterföljande femtio minuterna accepteras 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 eller brandförsök. Program för brandförsök 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 i brandförsök.

#### *Betongtunnel- inredning(text kulvertvägg)*

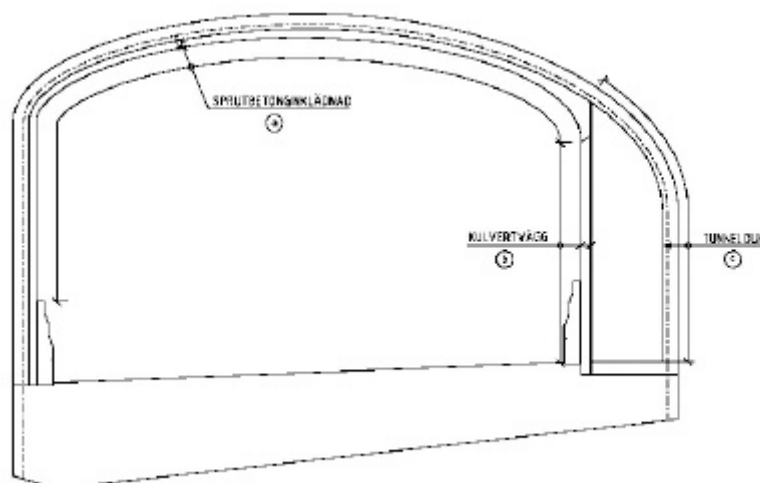
Om Entreprenören kan påvisa med brandförsök eller utredning att en mindre inblandning av polypropylenfibrer än 2 kg/m<sup>3</sup> är tillräckligt för att förhindra spjälkning i händelse av brand får detta värde reduceras.

### **4.11.3 Bergtunnel med sprutbetong**

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

Sprutbetongkonstruktionen skall förankras till bakomliggande berg varvid genomföringar genom membranet skall uppfylla samma täthetskrav själva membranet.

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



Figur 4.9. Konstruktionslösning Norra länken

## 4.12 Citytunneln

### 4.12.1 Beskrivning av tunneln

Projektet Citytunneln ska knyta ihop järnvägen norr om Malmö med järnvägen mot Ystad, Trelleborg och Köpenhamn. Av den totalt 17 km långa järnvägen som ska byggas till kommer 6 km att utgöras av två parallella, enkelspåriga tunnlar och två undermarksstationer. Tunnelarna kommer att sträcka sig från Malmö C till stadsdelen Hyllievång. Citytunneln förväntas stå klar år 2011.

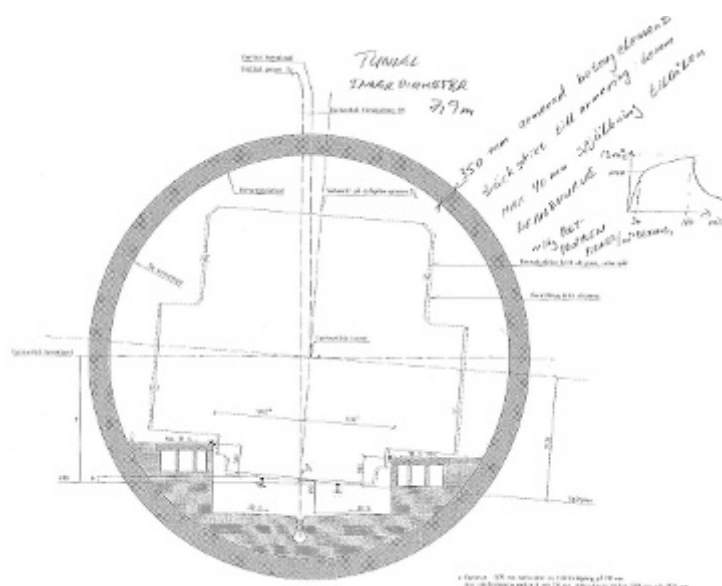
### 4.12.2 Dimensioneringskrav

Konstruktionslösningarna för tunnelarna är likartade de i Hallandsåstunneln men den dimensionerade brandkurvan för konstruktioner skiljer sig åt då Citytunneln endast är för persontrafik och inte trafik med farligt gods. Inom ramen för projektet togs en egen brandkurva fram, se Figur 3.2. Brandkurvan anges som en brandeffekt/temperatur som bygger på att ett fem-vagnars persontåg fullständigt bränns ur. Brandkurvan är ett avsteg ifrån Banverkets kravspecifikation för Citytunneln. Avsteget är dock godkänt.

### 4.12.3 Betongtunnel

Armerade cirkulära betongelementen som är 350 mm tjocka och innehåller  $1.0 \text{ kg/m}^3$  PP-fibrer, se Täcksiktet till armeringen är 60 mm.





Figur 4.10. Konstruktionslösning Citytunneln

#### 4.12.4 Erfarenheter av pp-fibrer i betong

Det är sedan tidigare känt att polypropylenfibrer kan påverka luftporbildningen. I Hallandsåsprojektet hade polypropylenfibrer börjat användas i segmenttillverkning, i platsgjuten betong, samt i sprutbetong under 2004. Därifrån fanns erfarenheter av att fibern kunde orsaka svårkontrollerad ökning av lufthalten i betongen.

Produktionsprocessen av pp-fibrer innehåller ett moment när man belägger fibrerna med en s.k. ”spin finish” för att få dem att hålla ihop under hantering men även låta sig blandas ut i betongen när fibrerna kommer i kontakt med vatten. Vad ”spin finishen” består av är sekretessbelagt. Utan att det är belagt anses valet av ”spin finish” kunna påverka pp-fibers luftindragande förmåga.

En förundersökning av den pp-fiberinblandade betongen ledde, både hos MCG och NCC/Sydsten, till att pastamängden och tillsatsmedelmängden fick ökas för att kunna bibehålla arbetbarheten i betongen. Utöver detta fick man lägga avsevärd tid på att få stabila lufthalter, d.v.s. förhindra att lufthalten ökar under transport och pumpning. Den viktigaste faktorn för att nå stabila lufthalter var att blandningstiden måste förlängas avsevärt jämfört med vanlig luftinblandad ”brobetong”. Konsekvensen är att betongstationens leveranskapacitet sjunker. Man fick också arbeta med att förbättra den automatiska doseringsutrustningen för att kunna väga pp-fibern med tillräckligt små avvikelser.

Resultatet av brandprovningarna bekräftade att ca  $1.0 \text{ kg/m}^3$  pp-fibrer var tillräckligt för att klara brandspjälkningskravet med de valda betongsammansättningarna, så som det formulerats i Citytunnelprojektet. I de fall där brandspjälkning uppstått har detta skett inom en första halvtimmen av branden.

I samband med förundersökningen av övriga egenskaper har beständighetsegenskaper som frostavskalning enligt SS 13 72 44 ("Boråsmetoden") samt kloriddiffusionsmotstånd enligt NT Build 492 provats. Det har inte noterats någon signifikant skillnad i egenskaper mellan pp-fiberinblandad betong och den icke-fiberinblandade betongen. Frostavskalningen har normalt varit ca 0.1 kg/m<sup>2</sup> och kloriddiffusionskoefficienten vid 90 dygns ålder  $2-7 \times 10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s.

En produktionsteknisk erfarenhet som gjorts vid gjutningarna av de hårt armerade 10 m höga väggarna på Malmö C nedre är att pp-fiberbetongen kräver ett signifikant ca 30 mm högre sättmått än icke-fiberinblandad betong för att kunna vibreras på konventionellt sätt. Om sättmättet är för lågt blir verkningsradien på vibratorstavarna för liten för att vara praktiskt fungerande. [50]



## 5 SLUTSATSER OCH KOMMENTARER

- I de flesta större tunnelbyggprojekt som pågår för närvarande kommer PP-fibrer att tillsättas betongen i någon del.
- I flera större tunnelprojekt har kraven i Tunnel 2004 eller BV-tunnel förtydligats eller kompletterats med projektspecifika krav.
- I BV-tunnel är kravet mot att förhindra kollaps inte tidsbestämt såsom i BBR.
- Risken för spjälkning är stor hos många betongkvaliteter, speciellt för tät betong såsom självkompakterande och högpresterande betong.
- Inblandning av relativt små mängder PP-fibrer ger ett 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, med stora konsekvenser för funktionen hos skyddssystemet som följd.
- Skyddssystem är provade och godkända för olika brandkurvor för en begränsad tid, exempelvis ISO834 under 60 minuter. Vid en verklig brand kan brandförloppet vara helt annorlunda, vilket innebär att påverkan på skyddssystemet inte överensstämmer med det som provats. Det finns exempelvis skivor och sprutsystem vars skydd baseras på att i materialet bundet vatten eller andra ämnen ska förångas eller omvandlas och därmed kyler bakomvarande konstruktion. Vid en långvarig brand är deras funktion okänd.
- NCC har erfarenhet av att PP-fibrer i betong inverkar menligt på arbetbarheten, den blir "död" redan efter 30-45 minuter.
- Golder Associates AB har erfarit att det är viktigt att ha god kontroll på sprutbetongens sammansättning och att anpassa denna vid en eventuell tillsats av PP-fibrer. Det råder annars stor risk för att sprutbetongen skiktas vid appliceringen och att kvalitén bli ojämn.
- Betong med pp-fibrer kräver större sättmått än icke-inblandad betong för att kunna vibreras på konventionellt sätt.

## 6 FORTSATT ARBETE

- Analysera resultaten från sammanställningen av utförd provning.
- Studera behovet av renovering av betong innehållande PP-fibrer efter en brandexponering. Frågan är om renovering är nödvändig.
- Studera funktionen hos olika skyddssystem vid långvarig brand.



## 7 REFERENSER

- [1] *Lagen om säkerhet i vägtunnlar* (SFS 2006:418)
- [2] *Förordning om säkerhet i vägtunnlar* (SFS 2006:421)
- [3] *Brandteknisk dimensionering av betongkonstruktioner*, Statens råd för byggnadsforskning, T13:1992
- [4] TSI-SRT (TSD tunnelsäkerhet), 01/16-ST06 part 2, 05.07.2006
- [5] *Tunnel 2004*, VV Publ 2004:124, Vägverket
- [6] *BV tunnel* (BVS 585.30), Banverkets föreskrift 2005-07
- [7] *Preliminära riktlinjer*, Svenska Betongföreningens kommitté för betong och brand, April 2004
- [8] *Branddimensionering av betongtunnar. Ringen och yttre tvärleden*, ANV 0162, 1995
- [9] *Vann- og frostsikring i tunneler*, Håndbok 163, Statens Vegvesen, Norge, 2006
- [10] Samtal med Håkan Burvik, Statens Vegvesen, Norge.
- [11] ASTM E119 Standard Test methods for Fire Tests of Building Materials
- [12] ISO 834-1 Fire-resistance tests – Elements of building construction- Part 1: General requirements
- [13] EN 1363-1 Fire resistance tests – Part 1: General requirements
- [14] EN 1363-2 Fire resistance tests – Part 2: Alternative and additional procedures
- [15] Specification and Guidelines for Testing of Passive Fire Protection for Concrete Tunnels Linings, March 2006, EFNARC
- [16] Boström Lars, *The performance of some self compacting concretes when exposed to fire*, SP Report 2002:23, project BRk6033, 2002
- [17] Persson Bertil, *Self Compacting Concrete at Fire Temperatures*, TVBH-3110, LTH Byggnadsmaterial, Lund 2003.
- [18] Boström Lars, *Brandprovning av betong*, projekt BRk6036, SP, 2003
- [19] Boström Lars, *Innovativeself-compacting concrete – Development of test methodology for determination of fire spalling*, SP Report 2004:06, project BRk6037, 2004
- [20] Boström Lars, *Fire test of concrete*, projekt P401734, SP, 2004
- [21] Johansson Pär, *Orienterande provningar av betong i liten skala*, rapport P502172B, SP, 2005
- [22] Johansson Pär, *Orienterande provningar av betong i liten skala*, rapport P601606B, SP, 2006
- [23] Johansson Pär, *Brandprovning av betong*, rapport P504365A, SP, 2006
- [24] Johansson Pär, *Brandprovning av betong*, rapport P504365C, SP, 2006
- [25] Johansson Pär, *Brandprovning av betong*, rapport P502172A, SP, 2005
- [26] Johansson Pär, *Brandprovning av betong*, rapport P601606A, SP, 2006
- [27] Johansson Pär, *Brandprovning av betong*, rapport P502334A, SP, 2005
- [28] Shuttleworth, P, *Fire Protection of Concrete Tunnel Linings*, <http://www.ugc.basf.com/DCCUGC/EN/downloads/reports/>
- [29] Hemelop D. W. *Summary of fire tests*, Appendix 1 i publikationen *Spalling review: Type, Assessment and Prevention*, Autor: Khoury, UPTUN, 2005

- [30] Richter R, *Fire Test on Single-Shell Tunnel Segments Made of a New High-Performance Fireproof Concrete*, fib Task Group 4.3 Workshop, December 2-3, 2004
- [31] Cedering Magdalena, *Firetesting of concrete slabs isolated with shotcrete*, project P501398, SP, 2005
- [32] Andersson E., Danielsen U., SINTEF-rapport 103010.37 A-I, 2003
- [33] Cedering Magdalena, *Brandprovning av betong*, projekt P504279, SP, 2006
- [34] Cedering Magdalena, *Utvecklingsprovningar av betongelement*, project P602418, SP, 2006
- [35] Johansson Gert-Olof, *Provning av sprutbetong med EPSCement*, projekt BRk6067, SP, 2005
- [36] SP rapport för projekt BRk6067. Arbete pågår, rapport ej publicerad.
- [37] Cedering Magdalena, *Firetest of insulated concrete elements with RWS and X2000 fire exposure*, project P404443, SP, 2005
- [38] MPA Materialprüfanstalt für das Bauwesen, Braunschweig, NR. 3190/1908-Nau, 26.01.1998
- [39] Boström Lars, *Brandprov av gjutna plattor*, projekt P700779, SP, 2007
- [40] Khoury G. A. Power point presentation: *Tunnel safety* – ICE London Oct 06
- [41] Khoury G. A. *Tunnel concrete under fires: Part 1 – explosive spalling*, CONCRETE, november 2006
- [42] <http://www.etnfit.net/index.html>
- [43] <http://www.dartsproject.net>
- [44] <http://www.uptun.net>
- [45] <http://www.l-surf.org>
- [46] Jeansson Sebastian, *Utredning av brandskydd av den bärande konstruktionen*, FSD, 2004
- [47] *Konsekvensutredning Söderledstunneln*, WSP, 2004
- [48] M. Kontturi, *Arbetshandling Norrortsleden, Säkerhet mot betongavspälkning vid brand genom användandet av polypropylenfiber*, NCC AB, 20060130.
- [49] Lond Helena, *Brandpåverkan på betongkonstruktioner*, Examensarbete inom civilingenjörsprogrammet Väg- och Vattenbyggnad, Chalmers Tekniska Högskola, 2005
- [50] Ulf Jönsson, *Citytunneln.20071005*
- [51] Rosengren Lars, *Citybanan i Stockholm, Riktlinjer för dimensionering och utformning av brandskyddet i bergtunnlar –underlag för projektering av bygghandling*, 9564-13-025-011, WSP Sverige, 2007-06-04

**Bilaga A****Tabell A. 1. Betongsammansättningen i projekt BRk6033. Betongrecept med Degerhamn Standard cement, CEM I 42,5 BV/SR/LA**

<b>Concrete</b>	<b>40AG0</b>	<b>40AK0</b>	<b>40AK2</b>	<b>40AK4</b>	<b>40AR0</b>
Crushed 12-16	624	595	572	-	857
Crushed 8-11	-	-	-	326	-
Crushed 0-8	1043	1040	998	1176	758
Glass filler	62	-	-	-	-
Limestone powder	-	149	181	171	-
Cement	430	411	433	487	518
Cementa 88L	-	-	-	-	0.161
Microair				0.188	
Sikaair HPV	0.235	-	-	-	-
Sikaair 15B	-	0.130	0.132	-	-
Water	172	164	173	195	206
Glenium (wet)	-	-	-	10.67	-
Peramin F	-	-	-	-	10.4
Sikament 56	4.05	4.82	8.20	-	-
Plastic fibre	-	-	2	4	-
Flytmedel (%)	1.0	1.2	1.85	1.7	2.0
Prestress (kN)	112	112	112	112	112
Density (kg/m <sup>3</sup> )	2330	2360	2360	2370	2350
Air content (%)	5.0	5.1	2.5	2.8	4.0

**Tabell A. 2. Betongsammansättningen i projekt BRk6033. Betongrecept med Skövde Bygg cement, CEM II/A-LL 42,5R**

<b>Concrete</b>	<b>40BK0</b>	<b>40BR0</b>	<b>55BK0</b>	<b>55BK2</b>	<b>55BK4</b>	<b>55BR0</b>
Crushed 12-16	602	1004	234	119	-	452
Crushed 8-11	-	-	362	244	316	360
Crushed 0-8	1052	742	1049	1140	1198	1029
Limestone powder	130	-	242	241	233	-
Cement	447	436	308	344	382	346
Water	179	175	170	189	210	191
Glenium (wet)	-	-	-	-	12.14	-
Peramin F	-	2.73	-	-	-	2.09
Sikament 56	9.78	-	8.16	10.14	-	-
Plastic fibre	-	-	-	2	4	-
Flytmedel (%)	2.2	0.6	1.5	1.75	2.0	0.57
Prestress (kN)	112	112	112	112	104	122
Density (kg/m <sup>3</sup> )	2420	2360	2380	2390	2350	2380
Air content (%)	-	-	1.3	1.1	-	1.5



**Tabell A. 3. Betongsammansättningen i projekt BRk6033. Betongrecept med Skövde Bygg cement, CEM II/A-LL 42,5R**

Concrete	70BG0	70BK0	70BK2	70BK4	70BR0
Crushed 12-16	551	631	583	-	356
Crushed 8-11	-	-	-	220	351
Crushed 0-8	1166	1109	1015	1241	1088
Glass filler	79	-	-	-	-
Limestone powder	-	189	226	256	-
Cement	316	268	294	312	267
Water	222	188	207	219	195
Glenium (wet)	-	-	-	11.1	-
Sikament 56	5.30	9.41	4.89	-	-
Plastic fibre	-	-	2	4	-
Flytmedel (%)	1.65	3.50	1.64	2.00	-
Prestress (kN)	104	104	104	104	104
Density (kg/m <sup>3</sup> )	2340	2390	2330	2320	2250
Air content (%)	1.7	2.6	-	-	5.0

**Tabell A. 4. Betongsammansättningen i projekt BRk6036 och BRk6037**

	Recept A	Recept B	Recept C	Recept D	Recept E	Recept F
Cement (kg/m <sup>3</sup> )	420	450	405	425	445	470
Silica (kg/m <sup>3</sup> )	-	-	25	25	-	-
0-8 mm (kg/m <sup>3</sup> )	965	940	943	919	900	869
8-16 (kg/m <sup>3</sup> )	174	170	170	165	144	140
16-32 (kg/m <sup>3</sup> )	682	664	667	650	644	625
Glenium 51 (kg/m <sup>3</sup> )	2.0	2.0	2.0	2.0	2.3	2.0
Peramin F (kg/m <sup>3</sup> )	1.0	1.0	0.75	1.0	0.75	1.0
Limus 40 (kg/m <sup>3</sup> )	-	-	-	-	100	100
Fibrin (kg/m <sup>3</sup> )	-	2.0	-	2.0	-	2.0
Vatten (kg/m <sup>3</sup> )	159	171	171	180	171	180

Tabell A. 5. Betongsammansättningen i projekt BRk6036 och BRk6037

Recipe code		w/p 0.30	w/p 0.40	w/p 0.40 fib	w/p 0.55
<b>Dry materials (kg/m<sup>3</sup>)</b>					
Cement	Slite (CEM I)	439.32	381.57	380.76	301.51
Limestone filler	Limus 25	126.38	118.68	119.24	77.39
Fine gravel	0-8 Sätertorp	1027.33	1016.95	899.96	941.66
Coarse gravel	8-16 Sätertorp	591.65	602.69	721.90	754.52
Plasticizer*	CemFlux Prefab	8.76	5.24	5.73	0
Plasticizer*	CemFlux PrefabS	0	0	0	3.26
Plasticizer	(% of C+F)	1.55%	1.05%	1.15%	0.86%
Fibres	Fibrin 18µm	0	0	1.0	0
<b>Water/moisture (kg/m<sup>3</sup>)</b>					
Water		122.37	141.21	149.69	163.82
Dilution water		10.03	10.01	10.02	9.05
Moisture in material		43.00	46.34	37.54	37.08
w/c-ratio		0.399	0.518	0.518	0.696
w/p-ratio		0.310	0.395	0.395	0.554
Slump flow	mm	750	700	640	630
Slump flow 500 mm	s	4	3	4	2

Tabell A. 6. Betongsammansättningen i projekt P502334

	B1	B2	B3	B4
Anläggningscement (kg/m <sup>3</sup> )	368	377	379	380
Makadam 16-25 (kg/m <sup>3</sup> )	588	615	612	613
Makadam 11-16	338	343	340	343
Makadam 4-8	218	223	223	223
Peramin HPA (kg/m <sup>3</sup> )	1.12	0.67	0.72	0.70
Filler 0-2 (kg/m <sup>3</sup> )	698	655	651	648
Peramin F (kg/m <sup>3</sup> )	5.19	6.28	5.70	6.65
Silicaslurry (kg/kbm)	25	30	30	30
PP-fiber (kg/m <sup>3</sup> )	0	0.75	1.0	1.5
Spädvatten	5	5	7	9
Totalvatten (kg/m <sup>3</sup> )	144	142	143	145
Vatten i 16-25	-3	-3	-2	-3
Vatten i 11-16			-1	
Vatten i HPA	0.66	0.66	0.71	0.68
Vatten i filler 0-2	25.00	25.00	19.33	22.33
Vatten i Per.F	4.08	4.08	3.70	4.32

**Tabell A. 7. Betongsammansättningen i projektet "Groene Hart" tunneln**

Cement CEM 1 42,5 R	310 kg/m <sup>3</sup>
Fly ash	80 kg/m <sup>3</sup>
Aggregates:	
-rounded gravel 0-2 mm	681 kg/m <sup>3</sup>
-rounded gravel 2-8 mm	453 kg/m <sup>3</sup>
-rounded gravel 8-16 mm	756 kg/m <sup>3</sup>
Water	118 kg/m <sup>3</sup>
w/c ratio	0,36
Additions	
- plasticicer Woerman FM 26	2.0 %
Polypropylene fibres Confiber (Adfil) monofilament diameter 18µm, length 12 mm	0,1,2 and 3 kg/m <sup>3</sup>

**Tabell A. 8. Betongsammansättningen i projektet Westerschelde tunneln**

Cement CEM 1 42,5 R	310 kg /m <sup>3</sup>
Fly ash	80 kg /m <sup>3</sup>
Aggregates:	
-rounded gravel 0-2 mm	681 kg /m <sup>3</sup>
-rounded gravel 2-8 mm	453 kg /m <sup>3</sup>
-rounded gravel 8-16 mm	756 kg /m <sup>3</sup>
Water	118 kg /m <sup>3</sup>
w/c ratio	0.36
Additions	
- plasticicer Woerman FM 26	2.0 %

**Tabell A. 9. Betongsammansättning för projekt P504365, aw1.0-4, aw1.0-5**

<b>Mix design C1Ffib in-situ, 1.0 kg PP fibres/m<sup>3</sup></b>	
Anläggningscement	340 kg /m <sup>3</sup>
Silica Slurry (50/50)	23 kg /m <sup>3</sup>
Sand 0-2 mm	644 kg /m <sup>3</sup>
Stone 4-8 mm	358 kg /m <sup>3</sup>
Stone 8-16 mm	546 kg /m <sup>3</sup>
Stone 16-22 mm	320 kg /m <sup>3</sup>
Sika EVO 26 M	2.04 kg /m <sup>3</sup>
Micro Air G	0.31 kg /m <sup>3</sup>
PP fibre	1.00 kg /m <sup>3</sup>
Water	133.5 kg /m <sup>3</sup>
W/C ratio	0.37
Air content	approx. 6.5 % vol
28 days cube strength	73.2 MPa

**Tabell A. 10. Betongsammansättning för projekt P504365, aw1.5-4, aw1.5-5**

<b>Mix design C1Ffib in-situ, 1.5 kg PP fibres/m<sup>3</sup></b>	
--	--

Anläggningscement	340 kg /m <sup>3</sup>
Silica Slurry (50/50)	23 kg /m <sup>3</sup>
Sand 0-2 mm	644 kg /m <sup>3</sup>
Stone 4-8 mm	358 kg /m <sup>3</sup>
Stone 8-16 mm	546 kg /m <sup>3</sup>
Stone 16-22 mm	320 kg /m <sup>3</sup>
Sika EVO 26 M	2.38 kg /m <sup>3</sup>
Micro Air G	0.34 kg /m <sup>3</sup>
PP fibre	1.50 kg /m <sup>3</sup>
Water	133.5 kg /m <sup>3</sup>
W/C ratio	0.37
Air content	approx. 6.5 % vol
28 days cobe strength	77.0 MPa

**Tabell A. 11. Betongsammansättning för projekt P502172, aTA, aTB**

<b>C1Fib segment -1.0</b>	
Cement	335 kg /m <sup>3</sup>
Slurry	22 kg /m <sup>3</sup>
Water	115 kg /m <sup>3</sup>
Super-Plast.	2.01 kg /m <sup>3</sup>
Plast	0.00 kg /m <sup>3</sup>
Retarder	0.00 kg /m <sup>3</sup>
Air entrainer	0.436 kg /m <sup>3</sup>
Sand 0-4	563 kg /m <sup>3</sup>
Ballast 4-8	387 kg /m <sup>3</sup>
Ballast 8-16	484 kg /m <sup>3</sup>
Ballast 16-25	484 kg /m <sup>3</sup>
Fibres	1.00 kg /m <sup>3</sup>
W/C ratio	0.36

**Tabell A. 12. Betongsammansättning för projekt P601606, atC 1.0-2**

<b>C1Ffib segment</b>	
C1	406 kg /m <sup>3</sup>
-22 mm	485 kg /m <sup>3</sup>
8-16 mm	540 kg /m <sup>3</sup>
0-2 mm	750 kg /m <sup>3</sup>
4-8 mm	555 kg /m <sup>3</sup>
Sika/2320HEX	4.080 kg /m <sup>3</sup>
Micro Air 50	1.320 kg /m <sup>3</sup>
Soft Fibres	1.24 kg /m <sup>3</sup>
Tillsatt vatten	94.40 kg /m <sup>3</sup>
V/C	0.352
Totalt vatten/pulver-tal	0.360

**Tabell A. 13. Betongsammansättning för projekt P601606, atC 1.0-4**

<b>C1Ffib segment</b>	
Silika	26.9 kg /m <sup>3</sup>
C1	405 kg /m <sup>3</sup>
-22 mm	475 kg /m <sup>3</sup>
8-16 mm	520 kg /m <sup>3</sup>
0-2 mm	745 kg /m <sup>3</sup>
4-8 mm	565 kg /m <sup>3</sup>
Sika/2320HEX	4.070 kg /m <sup>3</sup>
Micro Air 50	1.240 kg /m <sup>3</sup>
Soft Fibres	1.22 kg /m <sup>3</sup>
Tillsatt vatten	93.40 kg /m <sup>3</sup>
V/C	0.352
Totalt vatten/pulver-tal	0.360

Tabell B. 1. Provning enl. EN1367-1 av stora betongplattor

Prov-objekt	Storlek (mm)	Temperaturkurva	Belastning (MPa)	Betongtyp	Vatten-cementtal	Vatten-pulvertal	Fuktivot (%)	Fyller (kg/m <sup>3</sup> )	PP-fiber kg/m <sup>3</sup>	Number of spec.	Spjälkning (vid flera provobjekt redovisas medelvärdet för dessa)		Vikt-minskning (%)
											Medel (mm)	Max (mm)	
Plattor	1800x1200x400	Citytunneln Malmö	2.1**	KVB A	0.38		3.7	0	0	2	144	271	19.4
Plattor	1800x1200x400	Citytunneln Malmö	2.1**	KVB B	0.38		4.2	0	2	2	15	38	2.9
Plattor	1800x1200x400	Citytunneln Malmö	2.1**	KVB C	0.38		4.0	25 kg/m <sup>3</sup> Silica	0	2	58	78	9.0
Plattor	1800x1200x400	Citytunneln Malmö	2.1**	KVB D	0.38		4.9	25 kg/m <sup>3</sup> Silica	2	2	0	19	0.3
Plattor	1800x1200x400	Citytunneln Malmö	2.1**	KVB E	0.38		4.2	100 kg/m <sup>3</sup> kalkstensfiller Limus 40	0	2	133	245	18.2
Plattor	1800x1200x400	Citytunneln Malmö	2.1**	KVB F	0.38		4.8	100 kg/m <sup>3</sup> kalkstensfiller Limus 40	2	2	36	62	5.9
Plattor	1800x1200x200	Standard EN1363	8.8*	SKB w/p 0.30		0.31	4.9	126 kg/m <sup>3</sup> kalkstensfiller Limus 25	0	1	45	65	15.8
Plattor	1800x1200x200	Standard EN1363	8.8*	SKB w/p 0.40		0.40	5.1	119 kg/m <sup>3</sup> kalkstensfiller Limus 25	0	1	45	67	18.7
Plattor	1800x1200x200	Standard EN1363	8.8*	SKB w/p 0.40 fib		0.40	4.8	119 kg/m <sup>3</sup> kalkstensfiller Limus 25	1	1	0	0	0.0
Plattor	1800x1200x200	Standard EN1363	8.8*	SKB w/p 0.55		0.55	5.2	77 kg/m <sup>3</sup> kalkstensfiller Limus 25	0	1	48	68	15.3

KVB = Konventionell vibrerad betong

SKB = Självkompakterande betong

\* Försäpades med vajrar vid gjutning.

\*\* Efterspäpades med genomgående stag.

Tabell B. 2. Småskalig ugnsprövning av små betongplattor

Prov-objekt	Storlek (mm)	Temperaturkurva	Belastning (MPa)	Betongtyp	Vatten-cementtal	Vatten-pulvertal	Fuktkvot (%)	Fyller (kg/m <sup>3</sup> )	PP-fiber kg/m <sup>3</sup>	Number of spec.	Spjälkning (vid flera provobjekt redovisas medvärdet för dessa)		
											Medel (mm)	Max (mm)	Vikt-minskning (%)
Plattor	500x500x100	Standard EN1363	2.5**	KVB A	0.38		3.7	0	0	1	18	35	12.5
Plattor	500x500x100	Standard EN1363	2.5**	KVB B	0.38		4.2	0	2	1	0	0	0.2
Plattor	500x500x100	Standard EN1363	2.5**	KVB C	0.38		4.0	25 kg/m <sup>3</sup> Silica	0	1	13	23	9.4
Plattor	500x500x100	Standard EN1363	2.5**	KVB D	0.38		4.9	25 kg/m <sup>3</sup> Silica	2	2	0	0	1.3
Plattor	500x500x100	Standard EN1363	2.5**	KVB E	0.38		4.2	100 kg/m <sup>3</sup> Limus 40	0	2	24	40	16.6
Plattor	500x500x100	Standard EN1363	2.5**	KVB F	0.38		4.8	100 kg/m <sup>3</sup> Limus 40	2	2	0	0	0.3
Plattor	500x600x200	Standard EN1363	0	SKB w/p 0.30		0.31	4.9	126 kg/m <sup>3</sup> kalkstensfyller Limus 25	0	2	34	51.5	10.0
Plattor	500x600x200	Standard EN1363	0	SKB w/p 0.40		0.40	5.1	119 kg/m <sup>3</sup> kalkstensfyller Limus 25	0	2	27.5	40.5	8.5
Plattor	500x600x200	Standard EN1363	0	SKB w/p 0.40 fib		0.40	4.8	119 kg/m <sup>3</sup> kalkstensfyller Limus 25	1	2	0	0	0.1
Plattor	500x600x200	Standard EN1363	0	SKB w/p 0.55		0.55	5.2	77 kg/m <sup>3</sup> kalkstensfyller Limus 25	0	2	17.5	32	4.95
Plattor	500x600x200	Standard EN1363	2.5**	SKB w/p 0.30		0.31	4.9	126 kg/m <sup>3</sup> kalkstensfyller Limus 25	0	2	85.5	134.5	25.6
Plattor	500x600x200	Standard EN1363	2.5**	SKB w/p 0.40		0.40	5.1	119 kg/m <sup>3</sup> kalkstensfyller Limus 25	0	2	102	173.5	30
Plattor	500x600x200	Standard EN1363	2.5**	SKB w/p 0.40 fib		0.40	4.8	119 kg/m <sup>3</sup> kalkstensfyller Limus 25	1	2	0	0	0.05
Plattor	500x600x200	Standard EN1363	2.5**	SKB w/p 0.55		0.55	5.2	77 kg/m <sup>3</sup> kalkstensfyller Limus 25	0	2	66.5	119	21.75

\*\* Efterspändes med genomgående stag.

Tabell B. 3. Provning enl. EN1367-1 av balkar 3600 x 600 x 200 mm

Prov-objekt	Temperaturkurva	Belastning (MPa)	Betongtyp	Vatten-cementtal	Vatten-pulvertal	Fuktkvot (%)	Fyller (kg/m <sup>3</sup> )	PP-fiber kg/m <sup>3</sup>	Projekt	Number of spec.	Spjälkning (vid flera provobjekt redovisas medvärdet för dessa)		
											Medel (mm)	Max (mm)	Vikt-minskning (%)
Balk	Standard EN1363	7.7***	SKB w/p 0.40		0.40	5.1	119 kg/m <sup>3</sup> kalkstensfiller Limus 25	0	BRk6037	1	8	40	3.1
Balk	Standard EN1363	7.7***	SKB w/p 0.40 fib		0.40	4.8	119 kg/m <sup>3</sup> kalkstensfiller Limus 25	1	BRk6037	1	0	0	0.0

\*\*\* Belastades i böjning. Spänningsnivån anger maximala dragspänningen på balkens undersida.

Tabell B. 4. Resultat från DTU-provning.

Provobjekt	Betongtyp	Spjälkning (gram)	Spjälkningsarea relativt exponerad yta
A20	KVB A	0	-
B20	KVB B	0	-
C20	KVB C	191	95 %
D20	KVB D	0	-
E20	KVB E	69	80 %
F20	KVB F	0	-



**Tabell B. 5. Småskalig ugnspovning av cylindrar med diameter 150 och längd=450**

Prov-objekt	Temperaturkurva	Belastning (MPa)	Betongtyp	Vatten-cementtal	Vatten-pulvertal	Fuktkvot (%)	Filler (kg/m <sup>3</sup> )	PP-fiber kg/m <sup>3</sup>	Number of spec.	Spjälkning (vid flera provobjekt redovisas medvärdet för dessa)
										Vikt-minskning (%)
Cylindrar	Standard EN1363	0	SKB w/p 0.30		0.31	4.9	126 kg/m <sup>3</sup> kalkstensfiller Limus 25	0	2	1.9
Cylindrar	Standard EN1363	0	SKB w/p 0.40		0.40	5.1	119 kg/m <sup>3</sup> kalkstensfiller Limus 25	0	2	3.4
Cylindrar	Standard EN1363	0	SKB w/p 0.40		0.40	4.8	119 kg/m <sup>3</sup> kalkstensfiller Limus 25	1	2	1.8
Cylindrar	Standard EN1363	0	SKB w/p 0.55		0.55	5.2	77 kg/m <sup>3</sup> kalkstensfiller Limus 25	0	2	2.8
Cylindrar	Standard EN1363	5.3**	SKB. w/p 0.30		0.31	4.9	126 kg/m <sup>3</sup> kalkstensfiller Limus 25	0	2	18.6
Cylindrar	Standard EN1363	5.3**	SKB. w/p 0.40		0.40	5.1	119 kg/m <sup>3</sup> kalkstensfiller Limus 25	0	2	22.4
Cylindrar	Standard EN1363	5.3**	SKB w/p 0.40		0.40	4.8	119 kg/m <sup>3</sup> kalkstensfiller Limus 25	1	2	0.2
Cylindrar	Standard EN1363	5.3**	SKB w/p 0.55		0.55	5.2	77 kg/m <sup>3</sup> kalkstensfiller Limus 25	0	2	17.0

\*\* Efterspändes med genomgående stag.

**Tabell B. 6. Jämförelse av provningsmetoder. Spjälkning hos stora och små element. – Självkompakterande betong**

Method	Weight loss (%)	Mean spalling (mm)	Maximal spalling (mm)	Characteristic spalling (mm)
<i>Concrete: w/p=0.30</i>				
Large slabs	15.8	45	65	57
Small slabs unloaded	10.0	34	52	49
Small slabs loaded	32.1	102	175	186
Long cylinders unloaded	1.9	-	-	-
Long cylinders loaded	18.6	-	-	-
<i>Concrete: w/p=0.40 without fibres</i>				
Large slabs	18.7	45	67	56
Large beam	3.1	8	40	21
Small slabs unloaded	8.5	28	40	44
Small slabs loaded	30.0	102	174	182
Long cylinders unloaded	3.4	-	-	-
Long cylinders loaded	22.4	-	-	-
<i>Concrete: w/p=0.40 with 1 kg/m<sup>3</sup> fibres</i>				
Large slabs	0.0	0	0	0
Large beam	0.0	0	0	0
Small slabs unloaded	0.1	0	0	0
Small slabs loaded	0.1	0	0	0
Long cylinders unloaded	1.8	-	-	-
Long cylinders loaded	0.2	-	-	-
<i>Concrete: w/p=0.55</i>				
Large slabs	15.3	48	68	62
Small slabs unloaded	5.0	17	32	32
Small slabs loaded	21.7	66	119	124
Long cylinders unloaded	2.8	-	-	-
Long cylinders loaded	17.0	-	-	-

**Tabell B. 7. Jämförelse av provningsmetoder. Spjälkning hos stora och små plattor. - Konventionell vibrerad betong**

Method	Weight loss (%)	Mean spalling (% of thickness)	Maximal spalling (% of thickness)	Characteristic spalling (% of thickness)
<i>Concrete recipe A</i>				
Large slabs	19.4	36	68	61
Small slabs	12.5	18	35	10
<i>Concrete recipe B</i>				
Large slabs	2.9	4	10	8
Small slabs	0.2	0	0	0
<i>Concrete recipe C</i>				
Large slabs	9.0	14	20	20
Small slabs	9.4	13	23	9
<i>Concrete recipe D</i>				
Large slabs	0.3	0	5	1
Small slabs	1.3	0	0	0
<i>Concrete recipe E</i>				
Large slabs	18.2	33	61	53
Small slabs	16.6	24	40	10
<i>Concrete recipe F</i>				
Large slabs	5.9	9	16	14
Small slabs	0.3	0	0	0

**Tabell B. 8. Jämförelse av provningsmetoder. DTU-provning och stora plattor.**

Concrete	Tests made at DTU		Tests on large slabs	
	Amount of spalling (gram)	Area of spalling (% of surface)	Weight loss (%)	Mean spalling (% of thickness)
A	0	0	19.4	36
B	0	0	2.9	4
C	191	95	9.0	14
D	0	0	0.3	0
E	69	80	18.2	33
F	0	0	5.9	9

Tabell C. 1. Sammanställning av åtgärder i olika tunneldelar för Söderledstunneln

Del	Benämning	Monoliter	Typ av takkonstruktion	Ungefärlig ursprunglig klass enligt ISO 834	Rekomenderade åtgärder takkonstruktion (maxutnyttjad armering för oskyddad konstruktion angivet)	Täckande betongskikt i		
						takkonstruktion	yttervägg	mittvägg
1	Hotel Clarion		TT-kassetter	R90	TT-ben: 60 mm FS1350 TT-platta: 35 mm FS1350	NA		
			HDF-bjälklag	R90	HDF: 35 mm FS1350	NA		
			balkar	R?	Balkar: Skydd för RABT-60 (Promatec eller puts)			
2	Ringvägen	R1,R2	Slakarmerad platta	R120	Platta R1-R2: Ingen åtgärd	45 mm (50 mm)	35 mm	30 mm
3	Del mellan Ringvägen och Dalslandsgatan	RE1-RE7	RE1, spännarmerad platta	R90	Platta RE1: 35 mm FS1350	30 mm (28 mm)	30-35 mm	25-30 mm
			RE2-RE5 slakarmerad platta	R120	Platta RE2-RE5: Ingen åtgärd	45 mm (48 mm)	30-35 mm	25-30 mm
			RE6 slakarmerad platta	R120	Platta RE6: 35 mm FS1350	45 mm (48 mm)	30-35 mm	25-30 mm
			RE7 spännarmerad platta	R90	Platta RE7: 35 mm FS1350	30 mm (28 mm)	30-35 mm	25-30 mm
4	Bergtunnel under Allhelgonahöjden	BT1-BT5, BL1-BL3	BT1-BT5, bergtunnel med sprutbetongbågar	>R120	BT1-BT5: 35 mm FS1350 sprutbetongbågar	45-50 mm	-----	30 mm
			BL1-BL3, slakarmerad platta	R120	Platta BL1: Ingen åtgärd Platta BL2-BL3: 35 mm FS1350	45 mm	25 mm	20-25 mm
5	Del under Åsö gymnasium, Kv Gamen	GA7	Platsgjutet TT-bjälklag (efterspända balkar)	R30	TT-ben GA7: 60 mm FS1350	30 mm	25-30 mm	30 mm
					TT-platta GA7: 35 mm FS1350			
					TT Åsö Torg: 30 mm FS1350			
6	Del mellan Åsö torg och Åsögatan	GA1-GA6, ÅS	Slakarmerad platta	R120	Platta GA1: 35 mm FS1350	45 mm	30 mm (GA),	45 mm
					Platta GA2-GA6: Ingen åtgärd		45 mm (ÅS)	
					Platta ÅS: 35 mm FS1350			
7	Kv Ölbryggaren	ÖL1-ÖL10	ÖL1, Slakarmerad platta	R90	Undertak av 90 mm armerad betong + 170 mm markskiva, ÖL1: 35 mm FS1350	30 mm	30-45 mm	30 mm
			ÖL2-ÖL10, slakarmerad platta	R120	Platta ÖL2: Ingen åtgärd	45 mm	30 mm	30 mm
					Platta ÖL3-ÖL9: 35 mm FS1350			
Platta ÖL10: Ingen åtgärd								
8	Medborgarplatsen	Me1-Me6, Fo	Me1-Me3, Slakarmerad platta/pelardäck	R90	Platta Me1-Me3: Ingen åtgärd (59%) Pelare Me1-Me3: Ingen åtgärd	30 mm	20-30 mm	30 mm
			Me4-Me6, balkar 3,5 m breda med platta ovanpå	R30 resp. R60	Platta Me4-Me6: 25 mm FS1350	30 mm för balk och 20 mm för platta	30 mm	30 mm
					Balkar Me4-Me6: 30 mm FS1350			
Fo, slakarmerad platta	R90	Platta Fo: Ingen åtgärd (59%)	30 mm	30 mm	30 mm			

Del	Benämning	Monoliter	Typ av takkonstruktion	Ungefärlig ursprunglig klass enligt ISO 834	Rekomenderade åtgärder takkonstruktion (maxutnyttjad armering för oskyddad konstruktion angivet)	Täckande betongskikt i		
						takkonstruktion	ytervägg	mittvägg
9	Kv Göta Ark	Göta Ark Mon.1, Göta Ark Mon.4	Slakarmerad platta	R90	Platta Göta Ark Mon.1-3: 35 mm FS1350 Platta Göta Ark Mon.4: Ingen åtgärd (59%)	30 mm	20 mm	20 mm
10	Kv Noe Ark, Kv Skaraborg, Kv Saturnus och Kv Jupiter	Mon1-Mon14	Mon.1-Mon.9, förspända TT-kassetter	R120 resp. R90	TT-ben Mon.1-4: 60 mm FS1350 TT-platta Mon.1-4: 35 mm FS1350 TT-ben Mon.5: 30 mm FS1350 (62%) TT-platta Mon.5: 30 mm FS1350 TT-ben Mon.6-9: 60 mm FS1350 TT-platta Mon.6-9: 35 mm FS1350	35 mm för plattdelen och 45 mm för spännarmeringen	35 mm	ca 30 mm
		Mon.10-Mon.14, förspända TT-kassetter	R120	TT-platta Mon.10: 25 mm FS1350 TT-platta Mon.11-14: 35 mm FS1350				
11	Hornsgatsviadukten och Kv Överkikaren	Mon. Kv Överkikaren 1-3	Slakarmerad platta/pelardäck	R60	Hornsgatsviadukten: Skarvning av undertak Platta Kv Överkikaren 1-3: 35 mm FS1350	20 mm (20 mm)	30 mm	30 mm

SveBeFo

Box 47047  
SE-100 74 Stockholm

Telefon 08-692 22 80 • [info@svebefo.se](mailto:info@svebefo.se)  
Besöksadress: Mejerivägen 4

ISSN 1104 - 1773 • SVEBEFO-R--82--SE

tblk.