

Tunnelduk och dukmembran ur ett brandsäkerhetsperspektiv

-En internationell jämförelse

Henry Sandell | Avdelning för brandteknik | LTH |
LUNDS UNIVERSITET



**Tunnelduk och dukmembran ur ett
brandsäkerhetsperspektiv**
-En internationell jämförelse

Henry Sandell

Lund 2023

Titel: Tunnelduk och dukmembran ur ett brandsäkerhetsperspektiv
-En internationell jämförelse
Title: Tunnel sealing and tunnel membranes from a fire perspective
-An international comparison

Författare/Author: Henry Sandell

Report 5689

ISRN: LUTVDG/TVBB--5689--SE

Antal sidor/Number of pages: 56 (inklusive bilagor/including appendices)

Illustrationer/Illustrations: 29, alla bilder är använda med tillstånd

Sökord: Provningsmetoder, Brand, Tunnelsäkerhet, Dukmembran, Tunnelmembran, Tunnelduk

Keywords: Test Methods, Fire, Tunnel safety, Tunnel membrane, Tunnel sealing

Abstract

Many facilities are designed underground today. There are often requirements for waterproofing. One way to waterproof a construction is to use tunnel sealing or tunnel membranes. However, there is uncertainty as to how the test methods for fire classification and standards differ internationally. In an increasingly globalized world, it is important that the test methods are compared with each other, so that a tunnel membrane or tunnel sealing that has been tested with the American standards can also be used in Sweden.

One of the major problems with a low fire classification on tunnel membranes is that large sections of the membrane are exposed during construction. During the construction of the tunnel, many machines, vehicles, and other objects that can create a fire are used. There are several measures that can be taken to increase fire safety in tunnels. The simplest is to reduce the area of exposed membrane during construction. Other measures can be, for example, not to place fire starters in the vicinity of exposed membrane.

To find information about tunnel membranes and tunnel sealing, literature studies and interviews have been the approaches used in the report work. To investigate the interaction between a fire and tunnel membrane and tunnel fabric, calculations have been carried out. In the calculation part, the software FDS was used. Simple hand calculations have also been done. The two scenarios that have been studied is a fire in an electric cabin in the installation space of the tunnel, and a fire in the research tunnel located in Revinge, Sweden. This thesis show that testing methods differ between countries, in some cases more and in some cases less. In the USA they use ASTM standards, in Sweden and Norway EN and ISO standards are used. The calculations show that a fire in an electrical cabinet gives a maximum incident radiation of about 1.3 kW/m², and a fire in the research tunnel gives a maximum radiation of 5.5 kW/m², which is not enough to ignite PVC, PE or PP.

**© Copyright: Division of Fire Safety Engineering, Faculty of Engineering, Lund University, Lund 2023
Avdelningen för Brandteknik, Lunds tekniska högskola, Lunds universitet, Lund 2023.**

Brandteknik
Lunds tekniska högskola
Lunds universitet
Box 118
221 00 Lund

www.brand.lth.se
Telefon: 046 - 222 73 60

Division of Fire Safety Engineering
Faculty of Engineering
Lund University
P.O. Box 118
SE-221 00 Lund
Sweden

www.brand.lth.se
Telephone: +46 46 222 73 60

Förord

Denna rapport är skriven som mitt examensarbete för Brandingenjörsprogrammet på Lunds tekniska högskola. Rapporten är skriven av Henry Sandell under läsåret 2022/2023. Mina handledare under arbetet har varit Haukur Ingason och Jonatan Gehandler.

Jag vill ge ett stort tack till alla som har hjälpt mig att fullborda rapporten genom intervjuer, idéer och vägledning. Nedan nämns en handfull namn, men det finns även fler personer som har stöttat mig och är värda ett tack.

Haukur Ingason och Jonatan Gehandler - För råd och vägledning genom arbetets gång.

Björn Sandell – För hjälp med FDS-simuleringarna.

Jonathan Wahlqvist – För tips och råd med att skriva input-kod till FDS-simuleringarna.

Jonas Andersson – För inblick och förståelse i Trafikverkets syn på brandsäkerhet i tunnlar.

Magnus Von Feilitzen – För inblick och förståelse om tillverkning och användning av dukmembran och tunnelduk.

Lund 2023

Henry Sandell

Sammanfattning

Många anläggningar projekteras idag under jord. Det gör att det tillkommer krav på vattentätning av berget. Ett sätt att vattentäta en konstruktion är att använda dukmembran eller tunnelduk. Dock råder det oklarheter hur provningsmetoderna för brandklassificering och standarder skiljer sig internationellt. I en alltmer globaliserad värld är det viktigt att provningsmetoderna jämförs med varandra, så att ett dukmembran som har testats i andra länder kan användas även i Sverige.

Byggnadsmetoden för dukmembran och tunnelduk skiljer sig åt. Den stora skillnaden är att dukmembran i regel har en lägre brandklass, vilket kräver att ett lager sprutbetong appliceras på ytan innan tunneln tas i bruk. Dock kan i vissa fall dukmembranet ligga exponerad på andra sidan om trafikutrymmet, det vill säga i installationsutrymmet. Tunnelduken ligger i regel exponerad mot trafikutrymmet, och även exponerad mot installationsutrymmet, utan skydd av sprutbetong.

Ett av de stora problemen med en låg brandklass på dukmembran är att stora sektioner dukmembran ligger exponerat under byggtiden. Under konstruktionsfasen används många maskiner och andra objekt som kan skapa en brand. Det finns flera åtgärder som kan vidtas för att öka brandsäkerheten i tunnlar. Det enklaste är att minska ytan av exponerat dukmembran under byggtid, andra åtgärder kan vara att till exempel inte placera brandstiftare i närheten av exponerat dukmembran.

För att hitta information om dukmembran och tunnelduk har litteraturstudier samt intervjuer varit de tillvägagångssätt som använts i rapportarbetet. Resultatet visar att provningsmetoder skiljer sig mellan länder, i vissa fall mer och i vissa fall mindre. Byggnormerna i USA utvecklas främst genom Internationel Code Council (ICC) som jobbar med byggnader och bränder samt av National Fire Protection Association (NFPA) som jobbar med normer för elektronik och människors säkerhet. Provningsmetoderna som tillhör standarderna är utvecklade av företagen, främst av American Society for Testing Materials (ASTM) och NFPA, ASTM utvecklar dock inga normer. Kommittén som hanterar brand inom ASTM är ASTM E05, men även andra kommittéer inom ASTM är med och utvecklar provningsmetoder och standarder. I Sverige och Norge används EU-standarderna EN 13501–1.

För att undersöka interaktionen mellan en brand och dukmembran samt tunnelduk har beräkningar genomförts. De beräkningar som har gjorts för att undersöka exponeringen mellan en realistisk brand i installationsutrymme och brand i dukmembran och tunnelduk visar att en brand i elskåp ger en infallande strålning på cirka $1,3 \text{ kW/m}^2$ med en med brandeffekt på mellan 0–160 kW. I en tunnelmiljö, baserad på den som finns i Revinge, visar beräkningarna på en motsvarande strålning på cirka $5,5 \text{ kW/m}^2$ med en brandeffekt på mellan 30–150 kW. För att PVC, PE eller PP ska självantända krävs betydligt högre strålningsnivåer, i storleksordningen 15–20 kW/m^2 .

Beräkningarna som gjordes för yttemperatur i tunnelmiljö visar att yttemperaturen ger ett maxvärde på runt 107 grader vid handberäkning och i FDS. Det är en temperatur som är tillräckligt hög för att smälta plast.

När E4 Förbifart Stockholm projekterades accepterade Trafikverket ett dukmembran med brandteknisk klass E med tilläggskravet på maximal efterbrinntid på 10 sekunder. Om det tilläggskravet går att likställa med ett dukmembran med brandteknisk klass D-s2,d0 behöver utredas närmare.

Nomenklatur

Terminologi

Tunnelduk	Vattentätytskikt som är godkänt att använda exponerat mot trafikutrymmet
Dukmembran	Vattentätytskikt som inte är godkänt att använda exponerat mot trafikutrymmet
FDS	Fire Dynamics Simulator
CFD	Computational Fluid Dynamics
ICC	International Code Council
NFPA	National Fire Protection Association
ASTM	American Society for Testing Materials
NIST	National Institute of Standards and Technology
ÅDT	Årsdygnstrafik
RISE	Research Institutes of Sweden
LTH	Lunds tekniska högskola
Coontools	Verktyg för prediktering av Euroklass enligt EN 13501-1
Eurocode	Europas gemensamma dimensioneringsregler för bärverk till byggnader och anläggningar
PVC	Polyvinylklorid
PP	Polypropen
PE	Polyeten
D-A-CH	Region som refererar till de tre länderna Tyskland, Österrike och Schweiz
SINTEF	Selskapet for industriell og teknisk forskning ved Norges tekniske høgskole

Använda symboler

D^*	Brandens karakteristiska diameter	(m)
Q^*	Dimensionslös effektutveckling	(-)
\dot{Q}	Effektutveckling	(kW)
L_f	Flamhöjd	(m)
ρ_∞	Densitet på den omgivande luften	(kg/m ³)
c_p	Värmekapacitet för luft	(kJ/kgK)
T_∞	Temperatur på den omgivande luften	(K)
D	Ekvivalent bränslediameter	(m)
g	Gravitationskonstanten	9.81 (m/s ²)
\dot{q}''	Infallande strålning	(kW/m ²)
χ_r	Strålningsfraktionen	(-)
R	Avståndet från brandens centrum till objektet	(m)
ΔT	Skillnaden i temperatur	(K)
T_s	Brandgasens temperatur	(K)
T_i	Den initiala temperaturen	(K)
\dot{q}''_w	Totala värmeflödet mot ytan	(kW/m ²)
t	Tid	(s)
ρ_s	Materialets densitet	(kg/m ³)
δ_s	Materialets tjocklek	(m)

c_s	Materialets värmekapacitet	(kJ/kgK)
ΔT_{max}	Brandgaslagrets maximala temperatur	(K)
H_{eff}	Den effektiva höjden av branden	(m)
h_c	Det konvektiva värmeflödet	(W/m ² K)
h_r	Strålningsvärmeflöde	(W/m ² K)
$T_{g,m}$	Brandgastemperatur	(K)
h_∞	Omgivningens värmeflöde	(W/m ² K)
σ	Stefan-Boltzmanns konstant (5,57*10 ⁻⁸)	(W/m ² K ⁴)
F_{d1-2}	Synfaktor	(-)
ε	Emissionsförmåga	(-)
z	Brandplymens höjd	(m)

Innehållsförteckning

Nomenklatur	6
Terminologi	6
Använda symboler	6
1. Inledning	10
1.1 Bakgrund	10
1.2 Syfte och mål	11
1.3 Avgränsningar och begränsningar	11
2. Metod	12
2.1 Litteraturstudie	12
2.2 Beräkningar och jämförelse	13
2.2.1 De valda scenarierna	13
2.2.2 Forskningstunneln	13
2.2.3 Installationsutrymmet	14
2.2.4 CFD-beräkningar	14
2.2.5 Handberäkningar	16
2.3 Intervjuer	18
3. Byggnadsmetod	20
4. Brandpåverkan av tunnelkonstruktionen	22
4.1 Bärförmåga vid brand	22
4.2 Brandspjälkning	22
4.3 Integritet och isolationsförmåga	22
4.4 Plastmaterial i tunnlar	23
5. Brandskydd under byggnation	25
6. Användningen av dukmembran och tunnelduk i Norden	27
6.1 Sverige	27
6.2 Island	27
6.3 Norge	28
6.4 Färöarna	28
7. Brandklassificering och provningsmetoder	29
7.1 EN 13501–1	29
7.2 Standarder i USA	33
8. Standarder och krav kring brandsäkerhet i tunnlar	35
8.1 Sverige	35

8.1.1 Specialfall E4 Förbifart Stockholm.....	35
8.2 Norge	36
8.3 USA	37
8.4 Kommentarer kring standarder och regleringar	37
9. Utförda brandprovningar av dukmembran och tunnelduk.....	39
10. Beräkningsmetoder och analys	40
10.1 Jämförelse och resultat	40
10.1.1 Branden i installationsutrymmet.....	40
10.1.2 Branden i forskningscontainern	41
10.2 Kommentarer kring beräkningar och analys.....	43
10.2.1 Infallande strålning.....	43
10.2.2 Brandgastemperatur	43
10.2.3 Yttemperatur	43
11. Diskussion.....	45
12. Slutsats	46
13. Framtida utredningar	47
Referenser	48
Bilaga 1 FDS-kod för forskningstunneln	50
Bilaga 2 FDS-kod för installationsutrymmet.....	53

1. Inledning

1.1 Bakgrund

Idag projekteras en stor del av trafiken och andra verksamheter som underjordiska anläggningar. Under byggskede använts tunnelduk eller dukmembran för att skydda både trafikområdet samt det inre skalet från underjordiskt vatten, samt att den separerar den bärande strukturen från schaktstödet för att undvika spänningar i konstruktionen (Tunnel, 2022). Dukmembranet fästs med tvärgående rörprofiler bultade i berget och skyddas av ett lager sprutbetong som appliceras efter monteringen mot berget. Tunnelduk monteras på samma sätt som dukmembran, skillnaden är att tunnelduken i regel inte skyddas av ett lager sprutbetong, utan är direkt exponerad mot trafikutrymmet.

Det som svenska tunnelbyggare måste följa vid projektering av tunnlar är Trafikverkets kravställande dokument "TRVINFRA-00233" (Trafikverket, 2021). Enligt det dokumentet ska ytskiktet som är trafikutrymme, räddningsrum samt insatsväg ha en takyta av lägst brandtekniskt klass B-s1,d0 och väggyta av brandteknisk klass C-s2,d0. Vidare står det att utrymmen som inte är trafikutrymme, räddningsrum eller insatsväg, alltså till exempel en installationskorridor, ska var utformade med takyta med lägst brandteknisk klass C-s2,d0 och väggytan med brandteknisk klass D-s2,d0.

Det finns produkter med brandklass B på marknaden men även för duk av lägre klass. Problemet är att en duk med brandklass B har sämre hållfasthet samt hållfastegenskaper vilket är sämre ur ett förvaltningsperspektiv. Bland dukarna av sämre brandklass kan det finnas risker med brandspridning, vilket kommer att provas i framtida brandprov. Som underlag för bättre förståelse av brandproven som görs i liten skala, behöver det utföras ett forskningsarbete som ger grunden till val av brandklass i större skala. Det finns planer att genomföra denna typ av forskning i en forskningstunnel i Revinge som förvaltas av LTH.

Brand i tunnelduk har inträffat tidigare, ett exempel på det är branden i Eiksundstunnel i Norge. En bil krockade och började senare brinna bredvid en annan bil. Bilbranden resulterade i att den B-klassade duken i anslutningen brann upp eller smälte, men branden spreds inte vidare genom tunneln (Ingason & Gehandler, 2018). Den norska tidskriften "Brann & Redning" skrev om händelse som inträffade 2012 där fem personer miste livet (Brenden, 2009). Brandchefen Arnesen säger till tidningen att tunnelduken som tunneln är inklädd i fick minimala skador av branden.

Tunnlar byggs inte bara i Sverige utan i hela världen, främst i länder runt stora bergskedjor som till exempel Skanderna och Alpena. Företag som tillverkar dukmembran och tunnelduk är internationella företag som verkar över hela världen. Exempel på företagen är Sika, Polyguard, Mapei samt W.Giertsen. Tillverkarna har flera olika dukmembran och tunnelduk som är brandklassificerade i sitt sortiment. Genom en enklare marknadsundersökning har de bara hittats dukmembran som uppfyller E-klass, och tunnelduk som uppfyller B-klass. Samtliga av de dukmembran och tunnelduk som hittats har brandklassificerats med provningsmetoden EN 11925-2.

Examensarbetet ska fungera som en förstudie till planerade brandprovningar av dukmembran och tunnelduk i Revinge. För att få en uppfattning om hur dukmembran och tunnelduk påverkas av en brand har beräkningar gjorts. Simuleringar med hjälp av mjukvaran FDS samt handberäkningar har genomförts för att undersöka exponeringen och sätta det i relation till de värden som används i provningsmetoderna.

Detta examensarbete innehåller en litteraturstudie över standarder, provningsmetoder samt beräkningar om hur dukmembran eller tunnelduk kan påverkas av en brand. Detta ska utgöra ett

underlag för framtida tester av småskaliga samt fullskalig brandprovning i tunnel av dukmembran och tunnelduk.

1.2 Syfte och mål

Syftet med arbetet är att kartlägga, analysera och utvärdera dukmembran och tunnelduk som finns i tunnlar. Mer ingående handlar det om att jämföra olika länders provningsmetoder för att brandklassificera dukmembran och tunnelduk samt analyser hur förekommande de olika klassificeringarna är nationellt och internationellt.

Målet med arbetet är att skapa en större förståelse om hur dukmembran och tunnelduk brandklassificeras och att arbetet ska användas som ett researcharbete för framtida brandförsök i Revinge.

Problemformuleringarna som det sökes svar på presenteras nedan:

1. Hur skiljer sig provningsmetoder för brandklassificering av dukmembran och tunnelduk internationellt?
2. Hur förekommande är det med dukmembran och tunnelduk med olika brandklass i tunnlar runt om i världen?
3. Finns det kända fall av brandspridning i dukmembran eller tunnelduk?
4. Vad för strålningspåverkan kan brandprovningen i Revinge förväntas ge på dukmembran eller tunnelduk?

Kunskapsutveckling:

Examensarbetet ska ligga till grund för vidare studier och brandprovning av dukmembran och tunnelduk i en forskningstunnel i Revinge samt ge en ökad kunskap om hur provningsmetoder skiljer sig internationellt. Arbetet förväntas också ge kunskap om vilka olika produkter som finns på marknaden och hur de skiljer sig åt med syfte på brandklassificering.

1.3 Avgränsningar och begränsningar

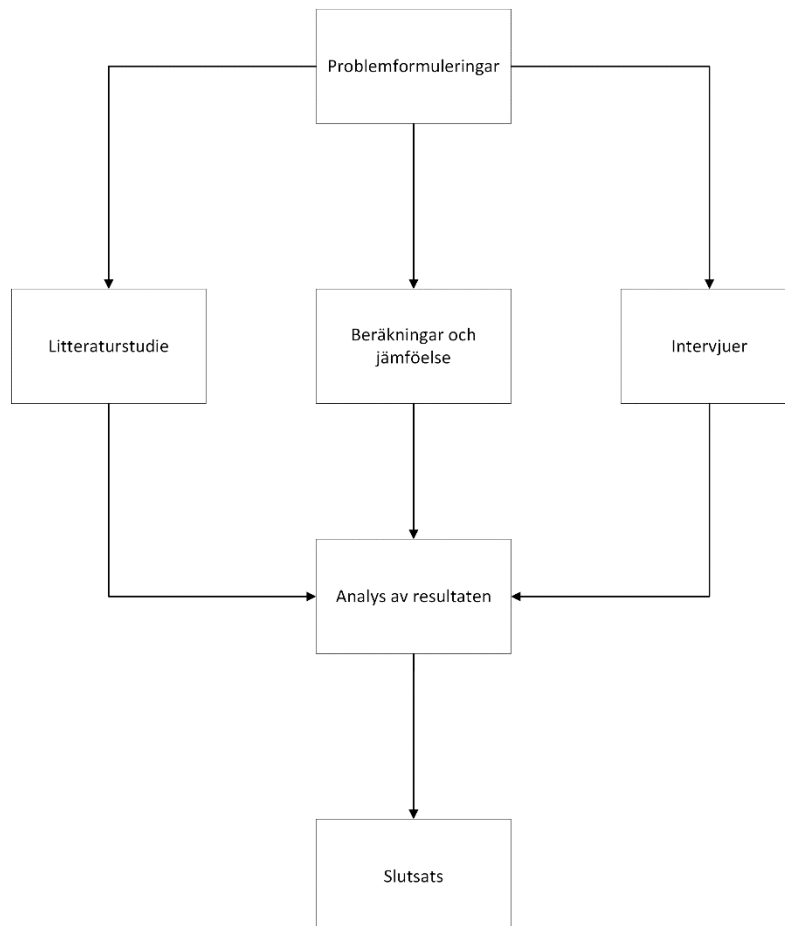
Denna rapport avgränsas till just dukmembran och tunnelduk, och inte andra delar av tunnelkonstruktionen. Omvärldsanalysen är främst begränsad till länderna i Norden samt USA.

Dessa typer av dukmembran och tunneldukar kan även användas i andra typer av underjordiska anläggningar, såsom till exempel garage och underjordiska lager, men denna rapport kommer bara behandla tunnlar.

Examensarbetet fokuserar på insamling av känd information. Några försök ingår inte i arbetet, men arbetet ska vara till stöd för framtida försöksplanering.

2. Metod

I följande kapitel kommer metoderna som använts under arbetet att beskrivas. Genom att dela in arbetet i de tre delmomenten litteraturstudie, beräkningar och jämförelser samt intervjuer har frågeställningarna kunnat besvaras. Arbetsprocessen beskrivs av flödesschemat i figur 1. De tre olika delmomenten beskrivs i avsnitt 2.1–2.3. För att svara på frågeställningarna 1–3 användes litteraturstudier och intervjuer. Frågeställning 4 besvarades genom att använda litteraturstudier och beräkningar.



Figur 1: Flödesschema över arbetsgången

2.1 Litteraturstudie

Litteraturstudien var det första steget i att samla ihop relevant information. Syftet med litteraturstudien var att hitta information om provningsmetoder, regelverk och standarder samt annan relevant information kopplade till frågeställningarna. Den relevanta informationen hittades genom att använda sökmotorn Google, LUBsearch samt rapporter och handlingar skickade av handledarna och de personer som har intervjuats och kontaktats. Litteraturstudien har varit den största delen av arbetet, och det var där mest information hittades. De mest frekventa sökorden har varit *dukmembran*, *tunnelduk*, *tunnelmembran* och *provningmetoder*, på både svenska och engelska. Litteraturen som har använts är på både svenska och engelska.

För att hitta provningsmetoder, regelverk, byggnadsmetod med dukmembran och tunnelduk, marknadsanalys, användningsfrekvens i olika länder. Litteraturstudien har använts för att hitta information kring alla 4 frågeställningar.

2.2 Beräkningar och jämförelse

För att få en bild av hur en brand i en tunnel ser ut, samt hur branden påverkar tunnels ytskikt har beräkningar gjorts i FDS, som sedan jämförts med handberäkningar. Syftet med resultaten kommer sedan jämföras med de planerade experimenten i forskningstunneln i Revinge. Dukmembran och tunneldukar har sedan tidigare en fastställd brandteknisk klass, men hur de olika dukarna påverkas och hur stor skillnad det är mellan dem kan bättre utvärderas i en större brand. Resultaten kommer att ge en bild av hur duken kan komma att påverkas, sett till bland annat smältning och självantändning.

Genom att genomföra experiment i försökstunneln kan tunnelbyggare och Trafikverket ställa rimliga krav på dukar, och eventuellt utveckla de krav och provningsmetoder enligt Eurocode som finns idag. Lärdomarna som fås genom att brandprova dukarna i en mer realistisk miljö kan användas till just detta.

I detta avsnitt presenteras förutsättningarna och teorin bakom beräkningen som ska ligga till grund för de planerade brandprovningarna i Revinge.

2.2.1 De valda scenarierna

Inför beräkningarna har två olika huvudscenarier valts, ett av dem är en brand i forskningscontainern i Revinge, och det andra är en brand i ett elskåp placerat i ett installationsutrymme. Förutsättningarna för dessa scenarier presenteras nedan.

2.2.2 Forskningstunneln

Forsknings-tunneln i Revinge är konstruerad av fraktcontainer. En standardiserad fraktcontainer har måtten 12x2x2,5 meter, och det är också den geometrin som har används i beräkningarna. Forskningscontainern kan i grundutförande genomföra försökt med en brandeffekt på upp till 1MW. I tunneln finns flera olika mätinstallationer. Det finns möjlighet att bland annat använda:

- Gashastighetsmätare för mätning av luftflöden.
- Lasermätare för mätning av brandgasernas optiska dämpning.
- Termoelement för mätning av temperatur vid olika platser.

Brandkällan som använts i beräkningarna är en propanbrännare. De fem scenarierna har samma geometri, men de effekten skiljer sig med steg om 30 kW. Det vill säga 30, 60, 90, 120, 150 kW. I dessa beräkningar har måtten 0,07 m² och 0,32 meter använts för brandkällan. Beräkningar har gjorts för brandgastemperatur, yttemperatur samt infallande strålning mot väggen.

För att simulera en inklädnad med dukmembran eller tunnelsemembran har beräkningsmodellens ytskikt samma egenskaper som PVC. Dessa egenskaper presenteras i tabell 1.

Tabell 1: Egenskaper för plastinklädnaden.

Egenskap	Värde
Konduktivitet	0,2 (W/mK)
Specifik värmekapacitet	1,05 (kJ/kgK)
Densitet	1400 (kg/m ³)
Tjocklek	0,002 (m)

En mer detaljerad beskrivning av domänen för forskningscontainern ges i bilaga 1.

2.2.3 Installationsutrymmet

Geometrin av installationsutrymmets domän grundar sig på figur 6 och har måtten 15x3,3x5,1 meter. En av väggarna är konstruerad av betong, motstående vägg av dukmembran och taket av betong. Elskåpet är placerat i mitten av domänen, dikt ann betongväggen, på samma sätt som kablagen är placerad i figur 6. Objektet som branden är placerad på har geometrin 1x1x1 meter, och är innesluten i en ställåda. Branden är placerad på den sidan av ställådan som vetter mot motstående vägg. På motstående sida av elskåpet finns anordningar som mäter den infallande strålningen.

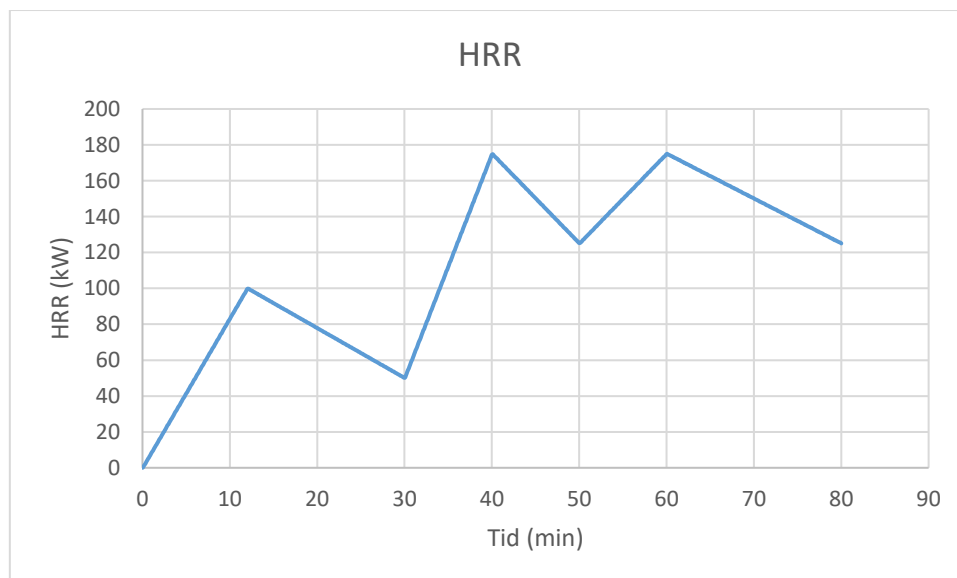
Betongens samt stålets egenskaper presenteras i tabell 2.

Tabell 2: Redovisning av materialens egenskaper.

Typ av material	Konduktivitet (W/m*K)	Emissivitet (-)	Specifik värmekapacitet (kJ/kg/K)	Densitet (kg/m ³)
Betong	1,1	0,85	0,88	2100
Stål	45	0,85	0,46	7820

En mer detaljerad beskrivning av domänen ges i bilaga 2.

Förutsättningarna för beräkningarna grundar sig på rapporten "Full scale fire experiments on electronic cabinets II" skriven av Mangs och Keski-Rahkonen (Mangs & Keski-Rahkonen, 1996). Den uppmätta brandeffekten från ett av de presenterade experiment i deras rapport har använts som brandeffektkurva i denna rapport, se figur 2.



Figur 2: Brandeffektkurvan för scenario installationsutrymme över tid.

2.2.4 CFD-beräkningar

Mjukvaran som används för att genomföra simuleringsberäkningarna heter Fire Dynamics Simulator (FDS) som är en CFD-modell utvecklad för att beräkna fluiders rörelse i brandscenarion. FDS löser numeriska Navier-Stokes-ekvationer, tillämpbara för värmedrivna, långsamma flöden ($Ma < 0.3$) med inriktning på rök och värmetransport från bränder. Mjukvara har utvecklats av den amerikanska avdelningen National Institute of Standards and Technology (NIST) som är en del av amerikanska

staten. Programmet är kostnadsfritt och tillgängligt för alla. Det är vida spritt inom brandbranschen, och således något som kontinuerligt utvecklas och ständigt valideras.

FDS kan användas för att beräkna många olika parametrar. I dessa simuleringar presenteras strålningen som infaller på sidan mitt emot betongväggen samt olika temperaturer. Beräkningarna som utförts har gjort med en cellstorlek på 10 cm i FDS-version 6.7.9, och bilderna är från Smokeview 6.7.21.

För att veta vilken storlek som ska användas på cellerna finns en formel som ger en rekommendation. Formeln ger ett mått på hur väl flödesfältet är upplöst, det ges av det dimensionslösa uttrycket D^*/dx , där D^* är den karakteristiska branddiametern. Det är eftersträvänsvärt att värdet av D^*/dx ska ligga mellan 4 och 16. För att beräkna vilken storlek som krävs för att uppnå det kriteriet användes ekvation (1).

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_{\infty} c_p T_{\infty} \sqrt{g}} \right)^{2/5} \quad (1)$$

Då de olika scenarierna har olika effektutvecklingar skiljer sig värdena för D^* . Värdena presenteras i Tabell 3 för forskningscontainern och figur 3 för installationsutrymmet.

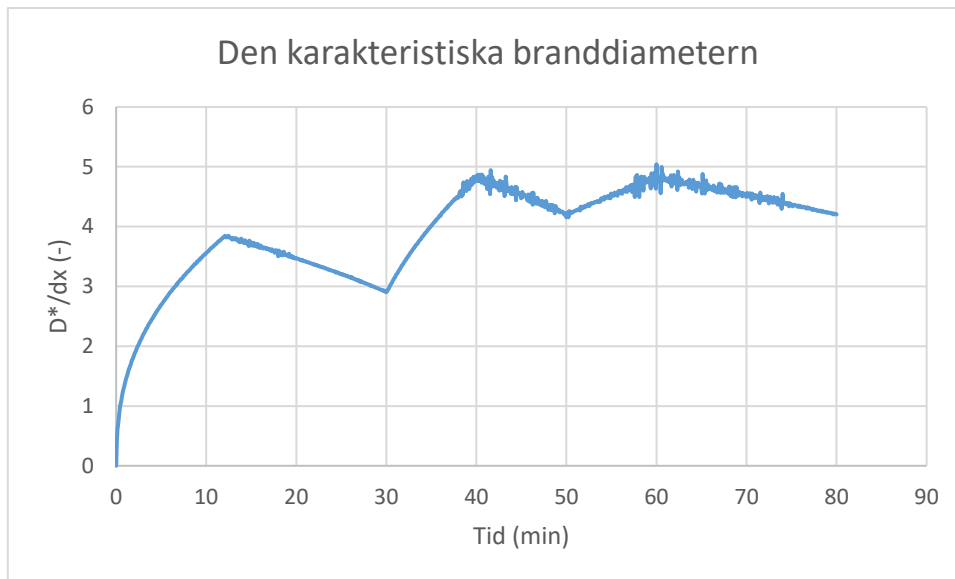
CFD-modellerna är bundna av en rätt beskrivning av de kemiska och fysiska processerna för problemet. För att korrekt återge branden karaktär krävs därför att brandkällans storlek vara i rätt förhållande till brandens angivna effektutveckling. En brand med en dimensionslös effektutveckling med ett värde på över 2,5 har en tydlig struktur och är momentumstyrda, till exempel en jetflamma. En brand med ett värde på under 2,5 beskriver bränder som styrs av luftflöden och turbulens. Den dimensionslösa effektutvecklingen ska ligga på intervallet $0,3 < Q^* < 2,5$ då branden befinner sig i till exempel en byggnad för att få en realistisk bild (Malmberg & Andersson, 2020).

De brandscenarion som har valts har alla en angiven maxeffekt. För att beräkna den dimensionslösa effektutvecklingen användes ekvation (2) som återfinns nedan (Karlsson & Quintiere, 1999). Värdena presenteras i tabell 3 för forskningscontainern och figur 4 för installationsutrymmet.

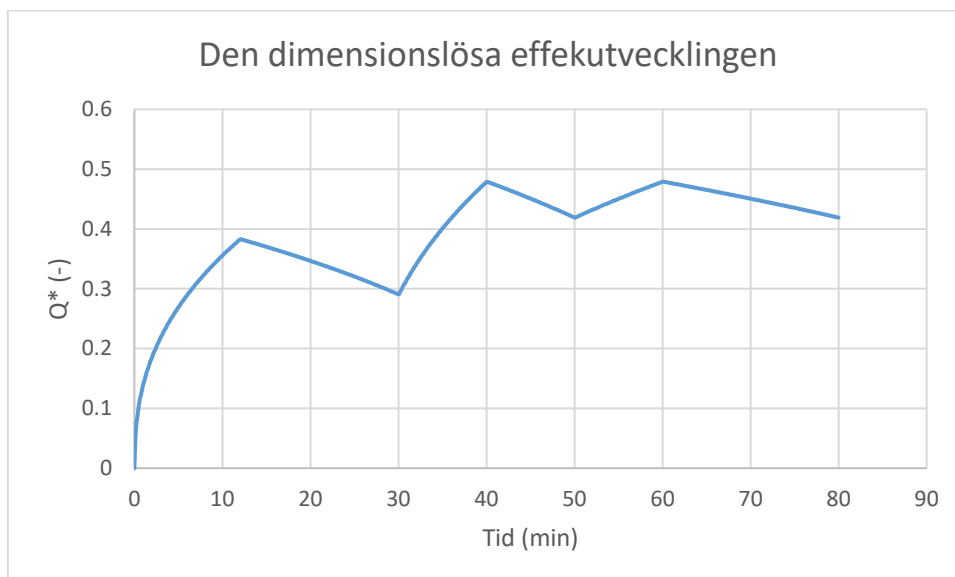
$$Q^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_{\infty} c_p T_{\infty} D^2 \sqrt{gD}} \right)^{2/5} \quad (2)$$

Tabell 3: Värdena för den karakteristiska branddiametern, den dimensionslösa effektutvecklingen samt cellstorleken för de olika scenarierna i forskningscontainern.

Effektutveckling (kW)	D^*/dx (-)	Q^* (-)	Cellstorlek (cm)
150	4,50	1,61	10
120	4,12	1,47	10
90	3,67	1,31	10
60	3,12	1,10	10
30	2,36	0,85	10



Figur 3: Värdena för D^*/dx över tiden för installationsutrymmesscenariot.



Figur 4: Värdena för Q^* över tiden för installationsutrymmesscenariot.

2.2.5 Handberäkningar

I detta avsnitt presenteras de handberäkningar som genomförts för installationsutrymmet samt för branden i forskningscontainern. Ett sätt att jämföra beräkningarna från FDS-simulationen är att jämföra dem med handberäkningar. Samtliga symboler är förklarade under avsnittet nomenklatur.

För att beräkna den infallande strålningen används ekvation (3), som presenteras nedan.

$$q'' = \frac{x_r \dot{Q}}{4\pi R_0^2} \quad (3)$$

Enligt Ingason, Li och Lönnemark (Ingason, Li, & Lönnemark, 2015), är denna ekvation bara giltig då den effektiva flamhöjden är kortare än tunnelns höjd. Det krävs alltså att flamhöjden adderat med brandens effektiva höjd ska vara kortare än tunnelns höjd. Detta säkerhetsställs med ekvation (4) som presenteras nedan.

$$L_f = 0.235\dot{Q}^{2/5} - 1.02D \quad (4)$$

Resultaten presenteras i tabell 4.

Tabell 4: Den effektiva flammhöjden vid olika effektutvecklingar i forskningscontainern.

Effektutveckling (kW)	$L_f + H_{eff}$ (m)
150	1,8
120	1,7
90	1,5
60	1,3
30	1,0

Ett annat sätt att beräkna den infallande strålningen på är med hjälp av synfaktorn. Enligt avsnittet "Modelling the thermal radiation from kitchen hob fires" i journalen "Journal of Fire Sciences" (Spearpoint, Hopkins, & Hopkins, 2020) förlitar sig punktkällsekvationen inte på en beräkning av synfaktorn. Vid beräkning av infallande strålning med hjälp av cylinder- och parallellplansmetoden beräknas strålningen till ytan med hjälp av en synfaktor som är relaterad till källans dimensioner. Ekvationen med som använder synfaktor presenteras nedan.

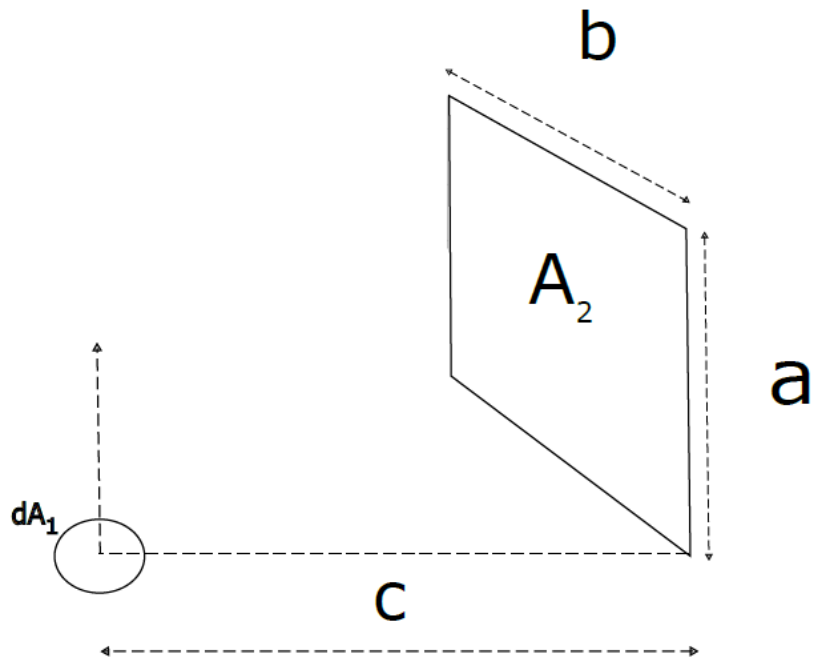
$$\dot{q}'' = \sigma T_f^4 \varepsilon F_{d1-2} \quad (5)$$

För att få en uppskattning om flammans temperatur används en ekvation (6) ur boken "Enclosure fire dynamics" (Karlsson & Quintiere, 1999). Denna ekvation presenteras nedan.

$$\Delta T_0 = 22.3 \left(\frac{\dot{Q}^{2/5}}{z} \right)^{5/2} \quad (6)$$

För att beräkna synfaktor F_{d1-2} ekvation (7) där $X=a/b$ och $Y=c/b$.

$$F_{d1-2} = \frac{1}{2\pi} \left[\tan^{-1} \left(\frac{1}{Y} \right) - \frac{Y}{\sqrt{X^2+Y^2}} \tan^{-1} \left(\frac{1}{\sqrt{X^2+Y^2}} \right) \right] \quad (7)$$



Figur 5: Schematisk bild över i vilket scenario synfaktorn har uppskattats se ut.

För att beräkna yttemperaturen samt brandgastemperaturen används ekvation (8), ekvation (9) samt ekvation (10), tagen från boken "Tunnel fire dynamcis" (Ingason, Li, & Lönnemark, 2015).

$$\Delta T = T_s - T_i = \frac{q''_w t}{\rho_s \delta_s c_s} \quad (8)$$

$$\Delta T_{max} = 17.5 \frac{\dot{Q}^{2/3}}{H_{eff}^{5/3}} \quad (9)$$

$$T_{s,m} = \frac{(h_c + h_r) T_{g,m} + h_\infty T_\infty}{(h_c + h_r + h_\infty)} \quad (10)$$

Ekvation (8), som är beroende av tiden, kommer gå mot oändligheten. Ekvation (9) ger brandgasens maximala temperatur och ekvation (10) visar när yttemperaturen har nått ett jämviktsläge, och således inte fortsätter gå upp. Jämviktstemperaturen nås vid cirka 90 sekunder vid samtliga fem olika effekter.

2.3 Intervjuer

För att få en bättre inblick i hur diskussionerna och arbetet kring dukmembran och tunnelduk ser ut idag har intervjuer utförts. Alla intervjuer skedde över kommunikationsplattformen Microsoft Teams. Totalt genomfördes fyra intervjuer med personer, både statligt anställda och personer inom näringslivet.

Innan intervjun påbörjades skickades mejl ut till de personer som kan vara intressanta att intervjua. I mejlet presenterades intervjuaren, vad för typ av frågor som kommer ställas under intervjun samt i vilket syften intervjun sker.

Intervjutekniken bygger på Håkan Jonsson rapport "Praktiskt intervjuteknik" (Jonsson, 2009). I den rapporten beskrivs vad som är viktigt att tänka på när man intervjuar respondenter. Genom att planera intervjun samt kombinera det med improvisation och lyhördhet för hur intervjun utvecklar sig fås ett bra resultat. Intervjuerna skedde med öppenriktad karaktär, där respondenterna fick svara

på generella frågor kring dukmembran och tunnelduk, provningsmetoder och brandsäkerhet under byggnationsprocessen. Respondenterna fick prata fritt och öppet kring ämnena. Svaren som gav skrevs ner löpande under intervjuskedet.

Hur en intervju gick till kan beskrivas i fyra delar, dessa presenteras nedan.

1. Intervjuaren och respondenten ses över kommunikationsplattformen Microsoft teams.
2. intervjuaren ställer sina frågor utifrån sin planerade intervjuplan.
3. Respondenten svarar fritt på frågorna, som sedan också svarar på eventuella kompletterade och improviserade följdfrågor.
4. Intervjun avslutas.

Även mailkontakt med flera olika personer har gjorts, både med personer nationellt och internationellt. Syfte med det var att få tillgång till relevant information och handlingar samt att få vägledning kring vart problemen ligger i praktiken. Intervjuerna har använts för att få svar och information kring frågeställningar 1–3. Resultatet av intervjuerna var att tillgången på relevant material och relevanta punkter att ha med i rapporten ökade.

3. Byggnadsmetod

Den vanligaste metoden för tunneldrivning i Sverige är konventionell tunneldrivning. Nackdelen med denna typ av tunneldrivning är att det kan uppstå buller, tryckvågor, stenkast och vibrationer vilket påverkar omgivningen. Metoden upprepas cykliskt och består av sju delmoment (Davidsson, 2012). Detta arbete fokuserar på dukmembran och tunnelmembran, som sker i slutskedet, således kommer bara den delen av byggnationen förklaras nedan. Norra länken är projekterad och uppförd med en inklädnad av dukmembran och kulvertvägg. Nedan beskrivs byggnadsprocessen för kulvertväggen och inklädnaden.



Figur 6: Bild på installationskorridoren, med dukmembran på vänster sida och kulvertvägg av betong till höger (RISE).

När norra länken byggdes skrevs en rapport om hur tunneln uppfördes med dukmembran (Furuli, Marino, & Veidekke, 2012). Denna rapport sammanfattas enkelt nedan.

För att kunna montera dukmembranet krävs det att bultar borrar in i berget, dessa används för att hänga upp duken. När bultarna var på plats monterades dukmembranet upp med hjälp av en monteringsmaskin. När dukmembranet var på plats sattes ett filigranelement in, som är en typ av betongbjälklag, som utgör kulvertväggen. Vidare täcktes dukmembranet av ett nätformat armeringsjärn som sedan i sin tur täcktes med sprutbetong. För att klara Trafikverkets krav på brandklass av ytskiktet användes sprutbetong med pp-fiber i.

Den norska myndigheten Statens vegvesen har i en av sina rapporter (Buvik, 2007) presenterat hur tunnelduk monteras. Detta sammanfattas nedan.

När tunnelduk monteras sker det på samma sätt som för dukmembran, med några undantag. Tunnelduken är monterad mellan två rörböjar på vardera sida om duken. Tunnelduken kläms åt mellan rörböjarna och dras åt med hjälp av en ändtätning för att skapa en vattentät konstruktion. De rörelser som kan ske i tunnelduken på grund av sug och tryckkrafter från trafiken förhindrar att isbildningen bakom tunnelduken byggs upp. Skillnaden är också att duken inte behöver bli applicerad med sprutbetong, då tunnelduken klarar kraven för brandklass på ytskikt.

4. Brandpåverkan av tunnelkonstruktionen

För att avgöra huruvida dukmembranet utsätts för höga temperaturer i tunnelbränder krävs det att betongens samt plastmaterialets egenskaper vid höga temperaturer studeras. Den främsta risken för brandspridning vid drift i dukmembranet är att det sker en brandspjälkning i betongen under brandförloppet som gör att dukmembranet exponeras. Betongen kommer alltså fungera som ett skydd för det bakomliggande materialet ur ett brandperspektiv. I rapporten " Verifiering av brandmotstånd för betong och sprutbetong i tunnlar" (Boström, 2010) ges en genomgång av brandmotstånd hos betong i tunnlar som presenteras i kapitlen 4.1–4.3 nedan.

När det kommer till brandmotstånd hos sprutbetong och betongelement i tunnlar är det framför allt sex olika egenskaper som behöver säkerhetsställas för att nå en god brandsäkerhet. Dessa sex är mekanisk stabilitet, integritet, bärförmåga vid brand, motstånd mot brandspjälkning, isolationsförmåga och förändringar av betongsammansättningen.

4.1 Bärförmåga vid brand

Konstruktioners bärförmåga vid brand brukar använda klassificeringen R med en tidsangivelse, denna tidsangivelse betecknar hur länge bärförmågan upprätthålls vid brand.

Beräkningarna som görs för att bestämma bärförmåga hos betong och sprutbetong tar i normala fall inte hänsyn till spjälkning. För att kompensera för detta bör man vid dimensionering bortse från de yttersta 5–10 mm material som vetter mot branden.

Det behövs data på de termiska och mekaniska egenskaperna för de ingående materialen för att kunna utföra beräkningarna. När det kommer till betong kan data hämtas från handböcker och Eurocode om det mesta är känt om det materialet. Om nya material används, till exempel ett nytt membran, kan det finnas behov av att verifiera och mäta de mekaniska och termiska egenskaperna.

4.2 Brandspjälkning

Spjälkning är då konstruktionens yta skjuts loss eller flagnar av från ytan. Det är ett fenomen som kan hända både sprutbetong och betong. Spjälkningen innebär att konstruktionens tvärsnitt minskar vilket leder till att bärförmågan minskar samt att det bakomliggande materialet får sämre skydd. Genom historien har det skett kraftig avspjälkning vid större tunnelbränder. Exempel på sådana händelser är bränderna som skett i Stora Bält 1994, St Gotthard 2001, Mont Blanc 1999 samt Engelska Kanalen 1996. I större bränder kan avspjälkning ske från både tak och väggar.

Det finns många faktorer som påverkar betongens risk för spjälkning vid brand. De faktorer som anses ha störst påverkan på risken för spjälkning är fuktkvoten, tätheten, mängden finmaterial, brandkurvan samt den yttre belastningen.

4.3 Integritet och isolationsförmåga

Den brandtekniska klassen E betecknar integriteten när det syftar på materialegenskaper. Integritet är branden, eller värmen, inte ska kunna ta sig igenom konstruktionen under den tid som specificeras. Sådana krav kan förekomma för att upprätthålla åtskiljande konstruktioner. Betong och sprutbetong har i normala fall bra egenskaper då det kommer till integritet, det är i princip bara ett problem då spjälkning sker i betongen.

Betong är ett material som det tar relativt lång tid för värme att transporteras genom, därav har betong goda isolationsegenskaper. Krav på isolationsförmåga kan förekomma då betongen används som ett brandskydd för bakomliggande brännbara material, såsom till exempel ett membran. Om betongen ska användas för att skydda bakomliggande material, bör man kompensera med 5–10 cm

vid konstruktionen för att dimensionera för eventuell ytavflagnig. En annan viktig faktor som ska ta hänsyn till om betongen ska användas som skydd för bakomliggande material är den mekaniska stabiliteten vid brand. För att skyddet ska upprätthållas krävs det att materialet inte faller ner vid brand. Det problemet finns främst hos sprutade produkter, och speciellt om ingen mekanisk förankring används.

Vidare presenteras en tabell som beskriver egenskaper och kravnivåer som kan behövas verifieras.

Tabell 5: Förslag på kravnivåer samt egenskaper som kan behövas verifieras (Boström, 2010).

Egenskap	Förslag på krav	Anmärkning
Bärförmåga vid brand	-	Bestäms för varje projekt och det kan vara olika kravnivå på olika delar av tunneln.
Brandspjälkning	Maximalt spjälkningsdjup < 40 mm Medelspjälkningsdjup < 10 mm	Gäller vid verifiering i stor skala.
Integritet	-	Bestäms enskilt för varje projekt, nivåkraven kan skilja sig för olika delar av tunneln.
Isolationsförmåga	För sprutbetong eller betong som används som brandskydd får temperaturen maximalt uppgå till 380 °C bakom skyddet.	Temperaturnivån är tillämplig för skydd av brännbara material.
Mekanisk stabilitet vid brand	Inga delar av väggen får falla ner under brandprovning.	Samma krav som får brandspjälkning.

Statens Vegvesen, som är Norges motsvarighet till svenska Trafikverket, har använt kravet 380 °C från tabellen ovan för skydd av betong i Björkaviktunneln, och den nivån bör kunna användas generellt.

4.4 Plastmaterial i tunnlar

Det som är mest relevant för den här rapporten är hur plastmaterial i tunnlar påverkas av bränder. Norsk forening for fjellsprengningsteknik har skrivit rapporten "Plastmaterial i tunneler og bergrom" (Norsk forening for fjellsprengningsteknik, 2004) där detta ämne diskuteras. En sammanställning presenteras nedan.

Vid förhöjda temperaturer smälter termoplaster. En del termoplaster har ingen exakt smältpunkt, men ett temperaturområde då plasten ändrar egenskaper fast till mjukare. Över det temperatursintervallet blir plasten mjukare och mjukare till dess att den förlorar sin funktion. Andra plaster har en mer definierad smältpunkt. I regel gäller det att de flesta termoplaster förlorar sin funktion vid temperaturer över 100 °C.

Polymerer är inte det enda som plastmaterialen innehåller. Materialen innehåller också andra ämnen som antingen påverkar materialets egenskaper eller har sin funktion vid bearbetningen av plastmaterialet till att bli en produkt. Tillsatser som kan förekomma i materialet är antioxidanter, mjukgörare, pigment och värmestabilisatorer. Dessa tillsatser kan påverka materialets brandegenskaper, samt påverka avgaserna och komplicera rökgaserna. Tillsatserna är dock små i förhållande till mängden, så gasmängden från dessa ämnen blir således liten. Det enda materialet som använder mjukgörare är PVC.

Valet och mängden mjukgörare är beroende av användningsområdet för PVC-materialet. Materialets brandfarlighet ökar med mängden mjukgörande tillsatser i materialet. Det finns även tillsatsmaterial som fungerar som flamskyddande ämnen.

I rapporten "Plastics their behaviour in fires" (Pál & Macskásy, 1991) står det att smältningen gör att termoplasten blir till droppar som faller ner på andra brännbara objekt som börjar brinna eller att dropparna skapar en sekundär pölbrand. Detta kan bidra till brandspridningen och kan också vara en fara för både räddningspersonalen och personer som utrymmer. Även röken som bildas av förbränning av termoplaster kan vara extra utmanade, då röken som bildas är tjock och kan hindra människor från att orientera sig och skapa panik. Dock kan även en tjock rök vara fördelaktig, då den är lätt att upptäcka och brandbekämpningsarbetet kan sålde starta fort.

5. Brandskydd under byggnation

Som nämns i kapitel 4 är dukmembranet skyddat av sprutbetong när väl tunnel är färdigställd. Sprutbetongens uppgift är att skydda dukmembranet mot yttre påverkan, som till exempel bränder. Det betyder att en låg brandklass på dukmembranet inte spelar så stor roll, eftersom den är skyddad från eventuella bränder i trafikutrymmet av just sprutbetongen. Det stora problemet är att dukmembranet ligger exponerat under själva byggtiden, då dukmembranet har en låg brandklass finns stor risk för brandspridning i dukmembranet om brand skulle uppstå. Detta kan leda till stora förluster, både sett ekonomiskt och sett till människors hälsa.

Av produktions-skäl är det billigare och smidigare att montera dukmembran i långa delar eller hela tunneln innan dukmembranet täcks med sprutbetong. Ett exempel som tas upp i rapporten "Brandskydd under byggtiden för tunnlar och andra undermarksanläggningar" (Gehandler & Millgård, 2022) är just brandriskerna som finns under byggtiden med dukmembran. Nedan summeras några intressanta stycken ur den rapporten.

När mycket dukmembran är exponerat på det här sättet väcks frågor om brandriskerna som det medför. Det är därför eftersträvansvärt att dukmembranet:

1. Inte aktivt bidrar till brandförloppet.
2. Inte sprider branden vidare till andra material.
3. Inte försätter brinna efter det att den initiala branden har slocknat.

Det finns mycket osäkerheter kring brandrisken med exponerad dukmembran i tunnlar. Det är således viktigt att entreprenörer och byggherrar förhåller sig till dessa risker och gör åtgärder för att minska risken för brand.

För att förhindra brand under tunnelkonstruktion finns det åtgärder man kan vidta. Det kan vara att till exempel minska risken för eventuell brandspridning längst exponerad tunnelduk genom att skapa ett mellanrum mellan dukmembranssegment, samt att reducera ytan exponerad dukmembran. Ett annat sätt är att inte parkera fordon nära oskyddad tunnelduk, och att inte placera potentiella brandstiftare i närheten av exponerad tunnelduk.

I rapporten "Ökad brandsäkerhet vid tunnelbyggnation" (Ingason, 2011) står det att enligt europeiska föreskrifter tillåts 50 meter fritt exponerat plastisoleringen i tak utan att särskilda brandtekniska åtgärder krävs, men om det uppgår till mellan 50 och 150 meter krävs ringa åtgärder. Tyvärr går det inte att minska eller förebygga de skadliga konsekvenserna av en sådan brand, därför rekommenderas en god tillgång till släckutrustning och stor försiktighet. I samband med rapporten genomfördes också besök på arbetsplatser i tunnlar. Besöken på de pågående tunnelbyggnationerna visade att antalet lagrad brännbart material skiljer sig åt från plats till plats. Om det antas att branden från de lagrade materialet inte får uppnå en effekt högre än 12 MW, skulle det motsvara 25 m² material. Det är alltså de rekommendationerna som finns för att minska riskerna och de eventuella konsekvenserna med en brand under tunnelbyggnation.

I Sverige har arbetsmiljöverket publicerat föreskrifter om allmänna råd om berg- och gruvarbete (Arbetsmiljöverket, 2014). Syftet med föreskrifterna är att förebygga olycksfall och ohälsa vid berg- och gruvarbete. I föreskrifterna står det att brandbelastningen på arbetsplatser ska vara så låg som möjligt, samt att brandfarliga och explosiva faror ska hanteras så ett sådant sätt att risken för brand eller explosion minimeras. Allt material som kan bidra till branden räknas in som brandbelastning.

I andra delar av Europa finns liknade rekommendationer. D-A-CH-kommittén består av representanter från Tyskland, Österrike och Schweiz. Kommittén har publicerat en rekommendation

(Chromy, Stephan, Eder, & Vogel, 2007) för planering och genomförande samt hälsa och säkerhet för arbetsplatser under jord, liknade Sveriges arbetsmiljöverket. I delen som berör Tyskland, delar de in tunnlar i tre riskkategorier efter längd på tunneln. De tre klasserna är A, B, samt C.

Tabell 6: Beskrivning av riskkategorier för tyska tunnlar (Chromy, Stephan, Eder, & Vogel, 2007).

Riskkategori A	Gäller för tunnlar där vägen till närmaste utrymningsväg till säker plats är under 500 meter.
Riskkategori B	Gäller för tunnlar där vägen till närmaste utrymningsväg till säker plats är mellan 500 och 1000 meter.
Riskkategori C	Gäller för tunnlar där vägen till närmaste utrymningsväg till säker plats är över 1000 meter.

För tunnlar i riskkategori B och C, får inte fritt liggande tätning utan betongtäckning stäcka sig längre än 50 meter. Om detta inte går att uppnå, till exempel för att materialet är längre än 50 meter, för gränser utökas till 150 meter om man samtidigt vidtar skyddsåtgärder.

6. Användningen av dukmembran och tunnelduk i Norden

För att skydda underjordiska konstruktioner mot krafter och andra aggressiva grundförhållanden, eller som måste hållas torr, används dukmembran som vattentätningssystem. Ett membran är ett fast, men flexibelt material som installeras på den våta sida av konstruktionen för att skydda den. Främst används membran för att skydda betongen mot vatten.

Vanligtvis installeras dräner som vatten- och frostsäkring i väggar och tak för att förhindra frysning och dropp. Dräner består främst av en isolermatta av polyeten som ett tätande membran, som är täckt med sprutbetong. Sprutbetongen används som ett mekanisk skydd samt som skydd mot brand (Häggström, Wahlström, & Maria, 2007).

2008 skrevs en rapport som beskriver tunnelklädningar (Buvik, o.a., 2008) i Norden samt beskriver hur tunnelklädningen skiljer sig åt mellan de nordiska länderna. En del av denna rapport sammanfattas nedan i kapitlen 6.1–6.4.

6.1 Sverige

Tunnelprojektet Norra länken har valt lösningen membraninklädnad med sprutbetong. Membranet är upphängt i berget och skyddas av 100mm armerad sprutbetong (Khaled & Behaderovic, 2019).

I Norra länken insåg man att det inte är möjligt att med kontinuerlig förinjektering uppnå ett torrt trafikutrymme, därför valdes lösningen med det täta membranet. Membranet är monterat minst 100 mm från det utsprängda berget för att underlätta för inspektion. Lärdomarna från bygget av Södra länken är också en av anledningarna till att man valde en inklädnadsstrategi. Några andra anledningar är att byggnadsmetoden medger ett rationellt montage, som i liten utsträckning stör tunnelproduktionen. För att sammanfatta det ska tunneln ge en låg byggnads samt drift och underhållskostnad.

När Södra länken byggdes valde man att använda en inklädnad baserat på betongelement upphängda i bergsbultar i tunnelns tak med uppgift att leda bort vatten från körbanan. För att kunna göra utformningen jämn var man tvungen att utforma flera av betongelementen individuellt vilken ledde till en besvärlig logistik och höga produktionskostnader. Denna typ av inklädnadsmetod visade sig således vara dyr.

När Mariedammstunnelns byggdes testades en ny teknik, nämligen betonglining. När sprängningen var klar monterades ett tätande, dränerande membran mot berget. Efter det gjöts tak och stabila väggar av betong med hjälp av en form som sköts genom tunneln i takt med gjutningen. Det är en ovanlig teknik i Sverige, som bara används på några få hela vägtunnlar, som till exempel även Grindtunnelns vid Rabbalshede på E6 och på en delar av järnvägar (Trafikverket, 2022).

6.2 Island

På Island har man använt sig av dukmembran i två tunnlar, Múlatunnelen samt Hvalfjörðurtunneln. I Múlatunnelen har membranet använts för att hålla vägbanan fri från vatten. Tunneln har endast en vägbana, vilket gör att tunneln är smal. På grund av att utrymmet är litet fanns ingen plats för fästen, membranet har därför satts direkt på sten eller sprutbetong. Hvalfjörðurtunneln är delvis inklädd, med totalt cirka 26% av den totala tunnellängden. Erfarenheterna med membranet har varit bra. Det har ibland skett reparationer av membranet då trafikolyckor inträffat men det har tagit relativt kort tid att utföra.

6.3 Norge

I Norge används både tunnelduk och dukmembran. Alla typer av membran som använts i tunnlar ska ha godkännande från Vegdirektoratet. Tunnelduken, som ligger exponerad mot trafikutrymmet, använts i tunnlar med låg trafikmängd. När det kommer till dukmembran måste sex olika punkter uppfyllas för att få användas, dessa sex punkter listas nedan:

- Leverantören ska stå för monteringsfasen.
- Svtsegenskaperna ska dokumenteras.
- Kvalitetsplaner för utförandet och av membranarbetet och materialet ska upprättas för att undvika punktering.
- Membranentreprenören ska ha godkännande enligt planering och bygglag samt dokumentation av erfarenhet och yrkeskompetens.
- Om ett PVC-membran appliceras mot en annan typ av plast krävs en migrationsbarriär, till exempel en fiberduk.
- All fogning ska ske med hjälp av varmluftssvets med krav på dubbelsvets, även en täthetskontrollspvning ska ske genom tryckluftspvning. Om inmatnings av detaljer ska utföras kan detta göras med en enkelsvets, med krav på dokumentation på täthet och styrka. All genomföring, övergångar och anslutningar av konstruktionerna ska tätas och metoderna ska dokumenteras.

6.4 Färöarna

Förhållandena som råder sett till trafikvolym och topografi använder Färöarna samma standarder som de gör i Norge när nya tunnlar byggs. I den mån det är möjligt renoveras även äldre tunnlar till samma standard. Färöarna har inga större frostproblem, utan tätningen är främst riktad mot vatteninträning. Vattnet kommer från sprickor i berget, då det inte finns något egentligt grundvatten.

I vissa tunnlar har dukmembranet Masterseal använts. Metoden som har använts är att först applicera sprutbetong, sedan sätt membranet på, och sedan täcks membranet av ett lager sprutbetong.

7. Brandklassificering och provningsmetoder

Hur brandklassificering och provningsmetoder av material och produkter skiljer sig åt internationellt. Det är upp till varje land att själva bestämma vilken kravnivå som gäller, men i EU används Euroklass EN 13501–1 för att brandklassificera byggnadsprodukter och byggnadselement som standard. Även en del länder som inte är medlemmar i EU använder EN 13501–1, till exempel Norge och Island.

Det som skiljer USA från EU är att det inte finns några bestämda föreskrifter och standarder när det kommer till byggregler eller brandskydd. Enligt (Hirschler, 2017) skapas standarderna och sköts av privata icke-vinstdrivande organisationer. När standarderna modifieras och utvecklas baseras det på olika konsensusprocesser. Dessa procedurer är öppna för deltagare från alla olika intressenter och parter. Dock tillåts inte tillverkare ha kontroll över de slutgiltiga åtgärderna. Byggreglerna har under åren utvecklats huvudsakligen lokalt i de olika regionerna.

7.1 EN 13501–1

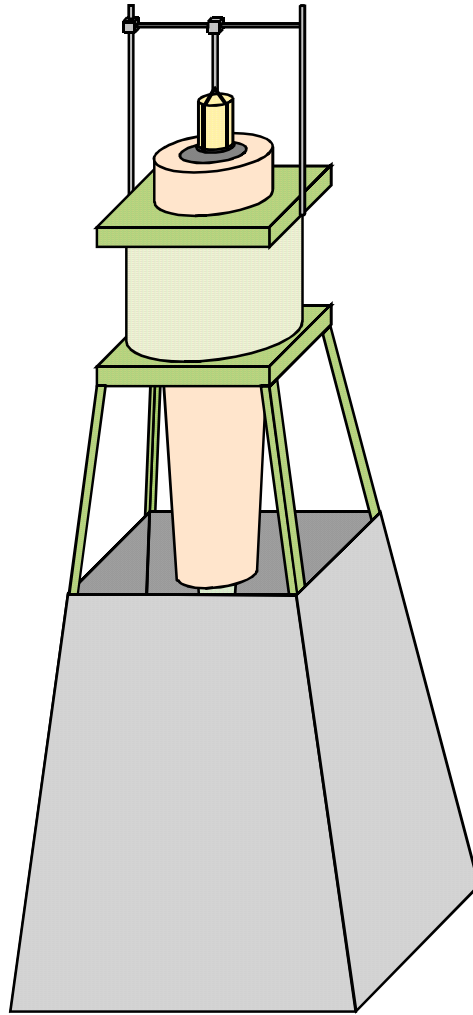
Brandklasser delas in i tre kategorier enligt EN 13501–1. Dessa tre är brännbarhet, rökintensitet och brinnande droppar. I Sverige styrs byggreglerna utifrån EU som delar in material i olika klasser. Dessa klasser kallas Euroklass och används i EU samt en del andra europeiska länder.

Brandklassificeringarna delas in från A1 till F, med tilläggsklassificeringarna s och d. En viktig skillnad mellan brandklassificeringarna är att alla klasser utom A1 också har tilläggsklasserna s och d redovisade.

Den lägsta klassificeringen där prestandan kan bestämmas är E, som ges av resultat från provningsmetod EN 11925–2. För att materialet ska kunna uppfylla kraven för klassificeringarna D, C och B krävs även att provningar enligt EN 13823 (SBI) genomförs. För att kunna klassificera ett material med A2 eller A1 krävs ytterligare provningar med provningsmetoderna EN ISO 1716 och EN ISO 1182 (Blomqvist & Andersson, 2011).

För att avgöra vilken brandklassificering ett material har finns det fem olika provningsmetoder som används enligt EN 13501–1. De fem är EN ISO 1182, EN ISO 1716, EN 13823, EN ISO 11925–2 samt EN ISO 9239–1. Nedan kommer de fyra förstnämnda provningsmetoderna redovisas, då den sista enbart används för golvmaterial. Provningsmetoden EN ISO 1182 presenteras från rapporten "A summary of fire regulations, requirements and test methods for technical textiles used in buildings" (Van Hess & Blomqvist, 2007) och resterande provningsmetoder är sammanfattade från RISEs hemsida.

EN ISO 1182 används för att avgöra om ett material är obrännbart, och är således bara relevant för klassificeringarna A1 och A2. Provningsmetoden utförs genom att en provkropp med en höjd på 50 mm och en diameter på 45 mm placeras i en vertikal, cylinderformad ugn var temperatur är 750 °C. Brandklassificeringen bestäms med hjälp av temperaturstigningen, massförlust av provkroppen samt hur länge eventuella flammor från provkroppen uppstår.



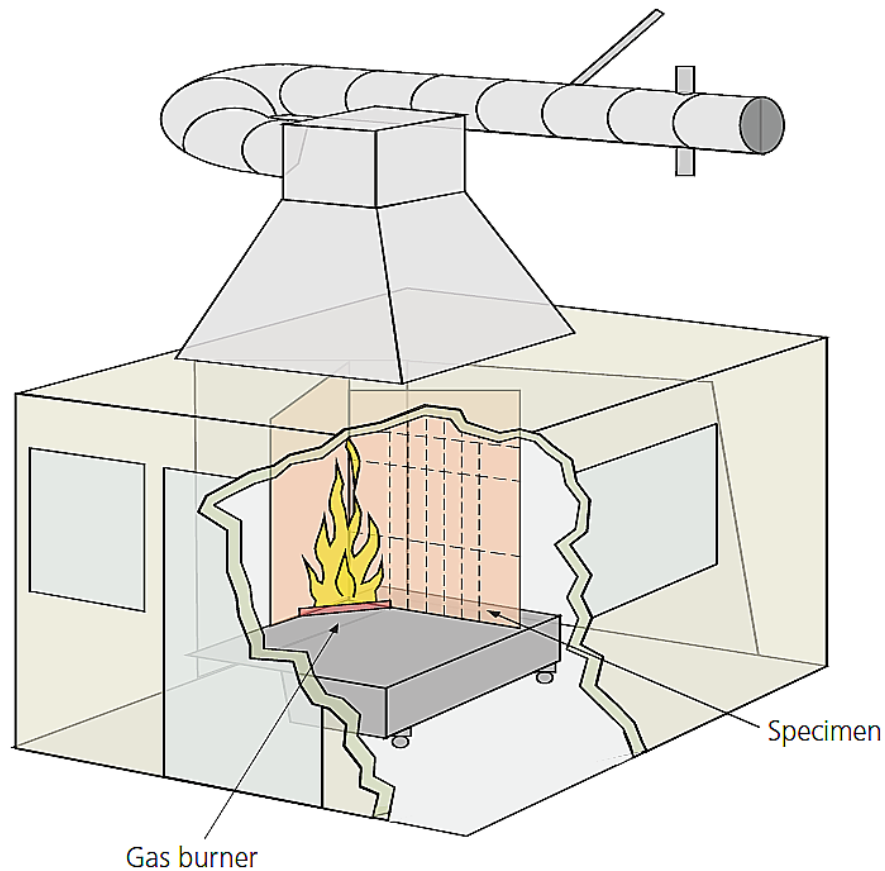
Figur 7: Schematisk bild över provningsmetoden ISO 1182 (RISE).

En annan provningsmetod som också avgör om ett material är obrännbart är EN ISO 1716. Provningsmetoden utvärderar en byggprodukts värmevärde, PCS(MJ/kg). Det huvudsakliga användningsområdet är testning av obrännbara produkter i klassificeringarna A_{ca} , A1, A1_{fl}, A1_L, A2, A2_{fl} samt A2_L. Underlag för CE-märkningen är brandklassning enligt EN 13501–1 som bland annat omfattar brandprovningensmetoden EN ISO 1716. Metoden går till genom att en liten provkropp med specificerad vikt förbränns fullständig under en konstant volym i syrgasatmosfär i en bombkalorimeter. I förbränningen värms vatten vars temperaturstegring anger ett mått på avgiven värmemängd.

Brandprovningensmetod EN 13823 utvärderar alla byggprodukter förutom golvbeläggningars brandegenskaper med avseende på rökbildning, flamspridning, värmeutveckling och brinnande droppar. I provningsprogrammet för CE-märkning ingår denna provningsmetod enligt byggproduktsförordningen. Exempel på produkter som provas med denna metod är alla typer av byggnadsmaterial.

Provningsen sker genom att en stor och en liten vägg monteras så de tillsammans bildar ett hörn. I hörnet är en brännare placerad som ger ifrån sig en effekt på 30 kW. Provet pågår under 21 minuter. Rökgaserna som bildas sugas upp i en huv. Produkternas angivna värmeeffekt används för beräkningar av THR, HRR (heat release rate), FIGRA. Mängden brandgaser som branden producerar används för

beräkningar av SPR, TSP samt SMOGRA. Brinnande droppar/partiklar samt flamspridningen observeras visuellt. Denna provningsmetod kallas även för SBI-provning.



Figur 8: Schematisk bild som visar provningsmetod EN 13832 (RISE).

Brandprovning enligt EN ISO 11925–2 testar byggprodukters anständighet vid direkt påverkan av låga. Det huvudsakliga användningsområdet för detta testet är för klassificering i Euroclass B, B_{fl}, B_L, C, C_{fl}, C_L, D, D_{fl}, D_L, E, E_{fl} samt E_L enligt det europeiska systemet för Euroklasser.

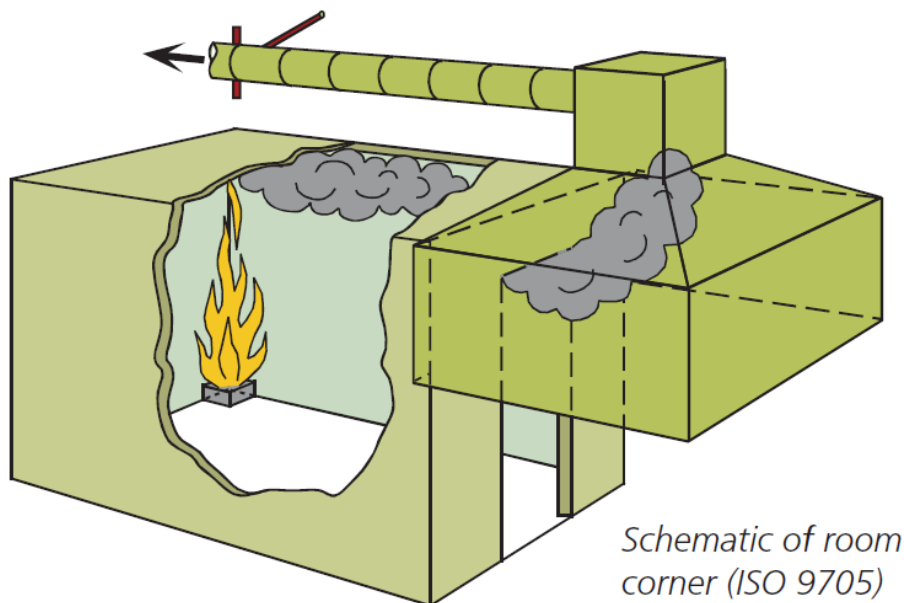
Provningen äger rum i en provkammare. Provkroppen monteras vertikalt och provet sker genom en kant eller ytantändning med en mindre gaslåga. Under provet registreras antändningstid, brinnande droppar samt om flammorna når toppmarkeringen på provkroppen inom föreskriven tid.



Figur 9: Bild som visar provningsmetod EN ISO 11925-2 (RISE).

ISO 9705 är en provningsmetod som mäter ytskiktets egenskaper i ett rumsbrandscenario med avseende på rökbildning, värmeutveckling, flamspridning brinnande partiklar/droppar samt förekomst av övertändning. Det huvudsakliga användningsområdet för detta test är att utvärdera brandegenskaper hos byggprodukter som inte kan provas i sin verkliga utformning i liten skala.

För att utföra provningen monteras provmaterialet på insidan av en testkammare. Materialet monteras på taket samt i alla väggar utom dörrväggen. Sedan placeras en propanbrännare i ena hörnet och avger en effekt på 100 kW under 10 minuter, sedan 300 kW under ytterligare 10 vilket ger en total provtid på 20 minuter. Värmeeffekten samt rökproduktionen mäts kontinuerligt samtidigt som rökgaserna sugas in i en huv. Eventuell flamspridning längst väggar och tak noteras visuellt. Om flammor slår ut genom dörröppning har övertändning skett och provningen avbryts. I regel sker övertändning vid en effektutveckling på 1 MW. För en fullständig provning krävs minst 35 m² material.



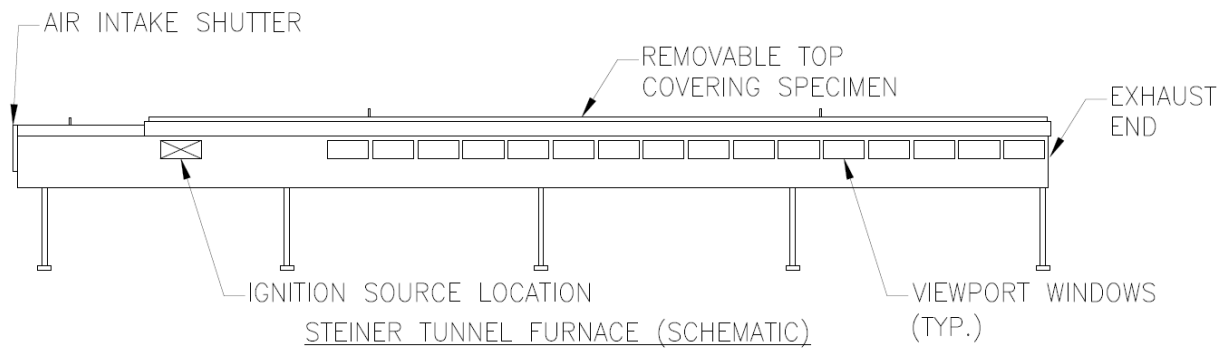
Figur 10: Schematisk bild över provningsmetoden ISO 9705 (RISE).

7.2 Standarder i USA

Byggnormernas utvecklas främst genom International Code Council (ICC) som jobbar med byggnader och bränder samt av National Fire Protection Association (NFPA) som jobbar med normer för elektronik och människors säkerhet (Hirschler, 2017). Även provningsmetoderna som tillhör standarderna är utvecklade av företagen, främst av American Society for Testing Materials (ASTM) och NFPA, dock utvecklar ASTM inga normer. Kommittén som hanterar brand inom ASTM är ASTM E05, men även andra kommittéer inom ASTM är med och utvecklar provningsmetoder och standarder

I USA är troligen den vanligaste provningsmetoden av ytskikt ASTM E84. Det är också den provningsmetoden som är viktigast i byggnormer angående brännbarheten hos plaster (Van Hess & Blomqvist, 2007). Provningsmetoden används på ytor som ligger exponerade, till exempel väggar och tak. Det är Underwriters Laboratories som har utvecklat provningsmetoden och tunneln där provningen utförs är känd som Steiner Tunnel. Nedan beskrivs provningsmetoden ASTM E84-00a.

Provkroppen som används är 7,3 meter lång och 0,61 meter bred och placeras horisontellt i taket av provningskammaren. Vidare placeras en antändningskälla i ena änden av provkroppen i tio minuter (Makoto S & Thomlinson, 2022). Rökdensiteten och flamspridningen mäts kontinuerligt över tid och dessa värden används för att bestämma indexen. För att avgöra indexen jämförs värdena med provningar på röd ek och fibercementskiva som genomgått samma provning under samma förhållande.



Figur 11: Schematisk bild över provningsmetoden ASTM E84 (Makoto S & Thomlinson, 2022).

8. Standarder och krav kring brandsäkerhet i tunnlar

För att säkerhetsställa brandskyddet i tunnlar finns manualer och kravdokument som talar om hur en tunnel ska byggas. I Sverige heter det kravställande dokumentet Krav tunnelbyggande, det motsvarade dokumentet i Norge heter N500 Vegtunneler, och i USA heter den NFPA 502. Dokumenten innehåller bland annat åtgärder för ventilering, frostskydd och utrymningsmöjligheter. I denna rapport behandlas bara ytskikten i tunneln.

8.1 Sverige

Sveriges kravställande dokument "Krav tunnelbyggande" publicerades 2021/01/11 av Trafikverket som en del av infrastrukturregelverken. Syftet med dokumenten är att beskriva de kraven som ställs på skötsel och egenskaper på infrastrukturanläggningar. I detta fall med "Krav tunnelbyggande" gäller det tunnelbyggnation. Kapitel 6.3.2 i dokumentet beskriver kraven på ytskikten i en tunnel. Dessa presenteras nedan.

"Trafikutrymme, utrymningsväg, insatsväg samt räddningsrum i tunnel ska vara utformade enligt följande krav:

- Takytan ska ha ytskikt av lägst klass B-s1,d0 (klass I), fäst på ett material av A2-s1,d0 (obrännbart material) eller på en beklädnad i klass K210/B-s1,d0 (tändskyddande beklädnad).
- Väggytan ska ha ytskikt av lägst klass C2-s2,d0 (klass II).
- Beläggning i utrymningsväg ska ha måttlig benägenhet att sprida brand och utveckla brandgas.
- Bärverk för inredning som krävs för att upprätthålla avskiljande konstruktion ska ha motsvarande brandteknisk klass EI 90."

Vidare finns kraven som gäller i delarna som inte innefattar de ovanstående, till exempel en installationskorridor.

"Utrymmen som inte är trafikutrymme, utrymningsväg, insatsväg eller räddningsrum ska vara utformade enligt följande krav:

- Takyta ska ha ytskikt av lägst klass C-s2,d0 (klass II), fäst på material av A2-s1,d0 (obrännbart material eller på beklädnad i klass K210/B-s1,d0 (tändskyddande beklädnad).
- Väggyta ska ha ytskikt av lägst klass D-s2,d0 (klass III)
- Bärverk för inredning som krävs för att upprätthålla avskiljande konstruktion ska ha motsvarande brandteknisk klass EI 90."

8.1.1 Specialfall E4 Förbifart Stockholm

När E4 Förbifart Stockholm byggdes valde Trafikverket att frånga de kraven som ställs i "Krav tunnelbyggande" genom att införa ett tilläggskrav. I dokumentet "E4 Förbifart Stockholm". Kraven på ytskikten i E4 Förbifart Stockholm presenteras nedan.

" Membranet ska vara brandbeständigt eller inneha självsläckande egenskaper, med syfte att förhindrafortsqidande brand. Detta krav gäller allt membran innanför inklädnadsvalv, i utrymningsvägar, i ledningskulvert och i övriga teknikutrymmen. Kravet anses uppfyllt via något av följande kriterier:

- Membranet ska utföras i minst brandteknisk klass D-s2,d1 i enlighet med klassifikationsstandard EN13501-1. Tillämpliga provningsstandarder är EN 13823 och EN ISO 11925-2.

- Membranet ska utföras i minst brandteknisk klass E i enlighet med klassifikationsstandard EN 13501–1. Följande tillägg ska uppfyllas: efterbrinntiden efter det att tändkällan avlägsnats ska för varje delförsök vara maximalt 10 sekunder.”

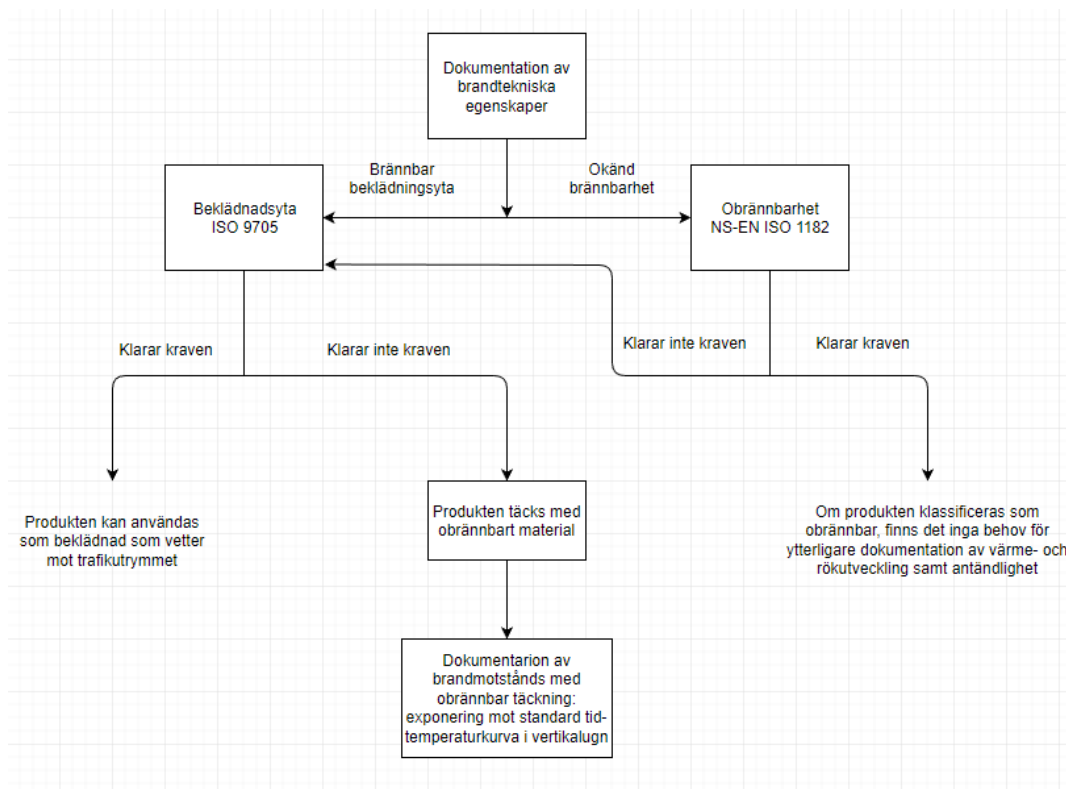
Detta medför alltså att ett dukmembran med brandteknisk klass E med självsläckningstid på maximalt 10 sekunder får placeras som ytskikt i en installationskorridor.

8.2 Norge

Norges kravställande dokument ”N500 Vegtunneler” (Statens Vegvesene, 2022) togs i bruk 2022/03/31 av Statens vegvesen. Syftet med dokumentet är att säkerhetsställa en lägsta tillåtna säkerhetsnivå i tunnlar. Kraven som ställs ska förebygga incidenter som kan skada miljön, egendom eller människoliv. N500 gäller både i vägtunnlar genom berg och konstruktioner med vägtunnelfunktion.

Tunnelklädnaden ska inte bidra aktivt vid en bilbrand, den får inte sprida en sådan brand vidare eller bidra till rökutveckling eller giftiga gaser. Branden får heller inte fortgå efter att den initiala branden har slocknat. Membraner som installeras i tunneln ska uppfylla brandteknisk klass E i enlighet med NS-EN 13501–1.

NS-EN 1182 är en provningsmetod som är utvecklad internationellt (ISO), som sedan är satt som europisk standard (EN) och sedan satt som norsk standard (NS).



Figur 12: Diagram över dokumentationsprocessen för brandtekniska egenskaper för konstruktioner i tunnlar (Statens Vegvesene, 2022).

8.3 USA

I USA finns det en standard som heter NFPA 502: Standard för Road Tunnels, Bridges, and Other Limited Access Highways (NFPA, 2020). Kapitel 7 i standarden behandlar krav på brandskydd i tunnlar. Kraven som finns ska säkerhetsställa att tunnelkonstruktion inte kollapsar vid brand. För att säkerhetsställa detta finns fem olika punkter som ska uppfyllas. Dessa fem punkter presenteras nedan:

1. Tunnelns konstruktionsdelar skall skyddas för att uppnå följande för betong:
 - (a) Betongen är skyddad så att brandspjälkning förhindras.
 - (b) Betongytans temperatur får inte överstiger 380 °C.
 - (c) Stålarmeringens temperatur i betongen (om man utgår från en minsta täckning på 25 mm) inte överstiger 250 °C.
2. Konstruktionsdelar i tunneln skall skyddas för att uppnå en temperatur i fodret inte överstiger 300°C för stål.
3. Materialet skall vara obrännbart enligt följande avsnitt 4.8.
4. Materialet skall ha en lägsta smälttemperatur på följande sätt på 1350°C.
5. Materialet ska uppfylla brandskyddskraven med mindre än 5 viktprocent fukthalt och när det är helt mättat med vatten, i enlighet med godkänd tid-temperaturkurva.

Punkt 3, materialet skall vara obrännbart enligt avsnitt 4.8 beskrivs vidare nedan:

Ett material som uppfyller en av punkterna nedan skall ses som icke-brännbart.

1. Materialet, i den form som det används under de förväntade förhållandena, inte kommer antändas, brinna, inte bidra till branden eller avge brandfarliga ånger då det utsätts för brand eller värme.
2. Materialet har uppfyllt kraven för provningsmetod ASTM E136, *Standard Test Method for Behavior of Materials in a Vertical Tube Furnace at 750 °C*.
3. Materialet har uppfyllt kraven för provningsmetod ASTM E136, då materialet har provats i enlighet med ASTM E2652. *Standard Test Method for Behavior of Materials in a Tube Furnace with a Cone-shaped Airflow Stabilizer at 750 °C*.
4. Materialet har uppfyllt kraven enligt EN 13501-1, i enlighet med provningsmetoden ISO 1182.

E2652 är enligt ASTM teknisk ekvivalent med ISO 1182.

8.4 Kommentarer kring standarder och regleringar

I Sverige är kraven för brandteknisk klass på ytskikt tydlig. Byggherren kan med enkelhet välja ett material som uppfyller kraven för de olika utrymmen som en tunnel innefattar. Dock finns ingen fastsatt provningsmetod i Sverige, så länge materialet uppfyller kravet på brandteknisk klass är valfri provningsmetod godkänd. I specialfallet beskrivet i kapitel 10.1.1 är ett dukmembran med brandteknisk klass E godkänt om dukmembranet självslocknar inom 10 sekunder. Under marknadsanalysen som redovisas i kapitel 9 hittades inget dukmembran eller tunnelduk som har brandteknisk klass D-s2,d1. En trolig anledning till att tilläggskraven finns är att det inte finns något dukmembran eller tunnelduk som uppfyller den önskade brandtekniska klassen. Frågan är dock om ett dukmembran med brandteknisk klass E som har en självsläckningstid på maximalt 10 sekunder ger samma brandskydd som ett dukmembran med brandteknisk klass D-s2,d1.

I Norge får inte tunnelklädnaden (som kan tolkas som ytskiktet) inte bidra aktivt vid en bilbrand, inte sprida en sådan brand vidare eller bidra till rökutveckling eller giftiga gaser. Branden får heller inte fortgå efter att den initiala branden har slocknat. Även om det finns någon fastställd brandteknisk

klass kan detta tolkas som brandteknisk klass B. Det finns fem olika koncept som är typgodkända i Norge. I rapporten "Metoder för att resta dukar och membran i tunnlar och bergrum" (Ingason & Gehandler, 2018) presenteras fem olika typgodkända koncept för frost- och dräneringsskydd för norska tunnlar. Fyra dem innefattar att den yta som är exponerad mot trafikutrymmet är beklädd med sprutbetong. Den femte lösningen som presenteras har tunnelduken exponerad mot trafikutrymmet. Lösningen använder tunnelduk (T100) och är godkänd för trafiktunnlar med trafikvolym ÅDT (20) < 2500.

I USA kretsar kraven till att säkerhetsställa att strukturen håller vid en brand, alltså att betongen ska stå sig mot en brand. Provningsmetoderna som accepteras är bara provningsmetoder som provas på material som ska klara kraven för att klassas som obrännbara. En trolig anledning till detta är att dukmembranen eller tunnelduk, på grund av konstruktionssättet, aldrig ligger exponerat under tunnelns användningsperiod. I rapporten "Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels — Civil Elements" (Hung, Monsees, Munfah, & Wisniewski, 2009) står det att bergtunnlar i de allra flesta fall är vattentätas med en sandwich-konstruktion. Detta medför att dukmembranet alltid är skyddad av betong.

9. Utförda brandprovningar av dukmembran och tunnelduk

RISE har utfört brandförsök i tunnelmiljö med en brand motsvarande en mindre lastbil (30 MW) på en tunnelduk med brandklass B. Sådana tunneldukar används exempelvis i Norge för lågt trafikerade tunnlar (Gehandler & Millgård, 2022). Utifrån det försöket bekräftades att en duk med B-klass inte nämnvärt bidrar till vare sig effektutvecklingen eller brandspridningen. Där duken utsätts för hög värme eller flammor brinner den eller smälter bort för att sedan självslockna.

Trafikverket har använd dukmembran med brandklass E, och sådana dukar har också genomgått brandprovning av RISE. Även en simulering med hjälp av programmet ConeTools har genomförts. Conetools är en flammspridningsmodell som är utvecklad av RISE. Simuleringen visade att duken skulle kunna skapa en övertändning i en rumsbrand inom 2 minuter. Duken kan antändas genom direkt värmepåverkan, såsom kortslutning i en lampa, men även genom värmestrålning, till exempel strålning från en bilbrand.

Resultatet från den småskaliga provningen visade att en duk i brandklass E:

1. Riskerar att bidra till brandspridning
2. Riskerar att aktivt bidra till brandutvecklingen
3. Skulle kunna fortsätta brinna även efter den initiala branden slocknat.

Det har tidigare gjorts brandprovningar på dukmembran. I rapporten "Tunnelmembran med fokus på brand" (Andersson & Ombert, 2015) testades sex olika membran med huvudsyftet att jämföra membran med tjocklek på 1,5 millimeter mellan olika tillverkare. Fyra av de sex membranerna hade tjockleken 1,5 mm, de resterande två 2,0 respektive 1,1 millimeter. Ett av membranerna hade även flammhämmande medel. Resultatet av testerna visade att fem av membranerna klarade kraven för brandklass E och ett membran klarade brandklass D. Membranet med de flammhämmande medlet klarade bara kraven för brandklass E, dessutom upptäcktes det att det flammhämmande medlet tycktes bidra till rökutveckling. Eftersom det flammhämmande medlet saktar ner brandförloppet minskar således förbränningsförmågan och skapar då större rökproduktion.

I rapporten "WG Tunnelhvelv T100 Fullskala branntest i Runehamar testtunnel" (Buvik, 2006) presenteras fullskaliga brandtester som har genomförts med tunnelduk. Tunnelsystemet är uppbyggt genom att tunnelduk och stålbågar sätts upp runt tunnelvalvet. Tunnelduken beräknades vara självslocknande, något som brandförsöken visade vara fallet. Under försöket nådde aldrig branden övertändning och det finns inte heller något som tyder på att det skulle kunna ske med de förutsättningarna som rådde under försöket. Tunnelduken självslocknade efter att den initiala branden slocknade.

10. Beräkningsmetoder och analys

Som tidigare beskrivits finns det risk för brandspridning i dukmembran i tunnel, speciellt i byggfasen då mycket material är exponerat. För att undersöka hur en brand i tunnel påverkar dukmembran och tunnelduk planeras det att göra försök med en inklädd fraktcontainer i Revinge. Inför dessa har en rad handberäkningar och simulationer gjorts som en förberedande undersökning inför de empiriska experimenten.

I boken *"SFPE Handbook of Fire Protection Engineering"* finns värden för den kritiska strålningen då materialet självantänder. Tunnelduk och dukmembran är gjort av olika former av plast, såsom polyvinylklorid (PVC), polypropen (PP) samt olika former av polyeten (PE). Dessa kritiska strålningsvärden presenteras i tabellen nedan.

Tabell 7: Kritiska strålningsvärden för självantändning för olika plaster (DiNunno, o.a., 2002).

Material	Kritisk strålning (kW/m ²)
PVC	10
PP	15
PE	15

Plaster är känsliga mot värme, och smälter vid relativt låga temperaturer. Detta gör att de ofta påverkas av en brand snabbt. Olika plaster smälter vid olika temperaturer. Nedan presenteras en tabell med smältpunkter för PVC, PE och PP från webbplatsen T.C Forensics.

Tabell 8: Smältpunkt för olika plaster (Cafe, Tony, 2007)

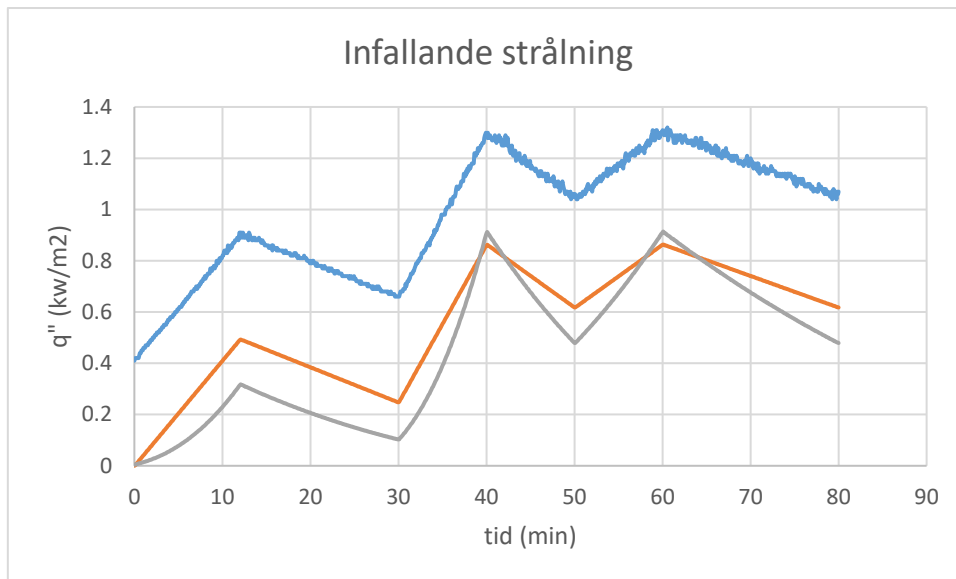
Material	Smältpunkt (°C)
PVC	75–100
PP	158–168
PE	107–137

10.1 Jämförelse och resultat

I detta avsnitt presenteras beräkningsresultaten för containerbranden samt branden i installationsutrymmet med hjälp av FDS och ekvationerna presenterade i kapitel 2.2.

10.1.1 Branden i installationsutrymmet

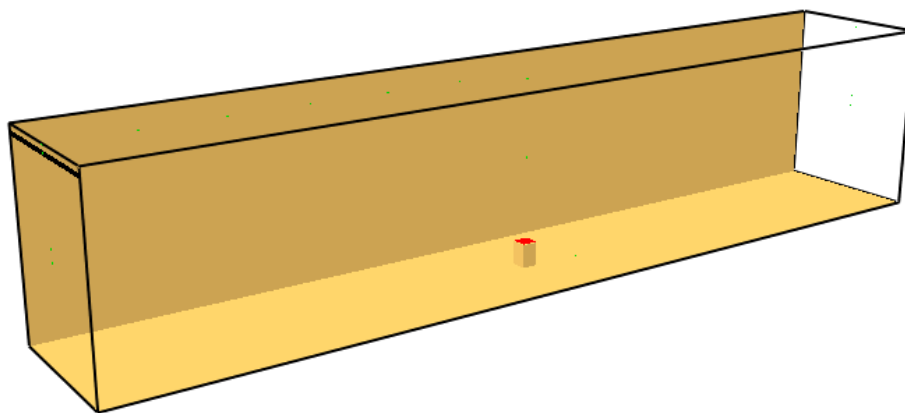
I figur 13 presenteras resultatet för strålningsberäkningarna för branden i installationsutrymmet. Den blå, röda samt grå linjen representerar resultatet för beräkningen med hjälp av FDS, punktkällsekvationen (3) respektive synfaktorekvationen (5).



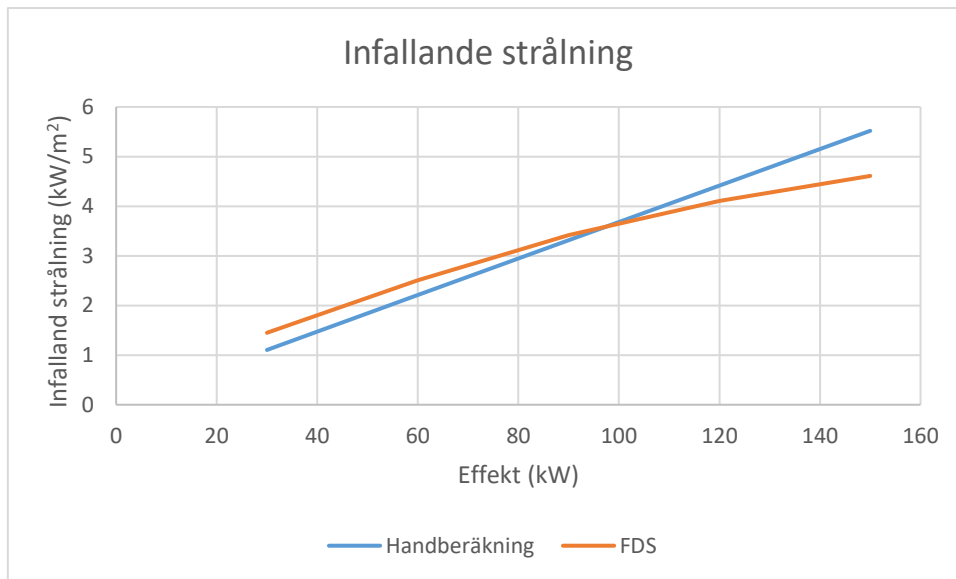
Figur 13: Den infallande strålningen för branden i installationsutrymmet

Som figur 13 visar når den infallande strålningen cirka 1,3 kW/m² för FDS-beräkningen och cirka 0,9 kW/m² för både punktkällsberäkningen och synfaktorsberäkningen.

10.1.2 Branden i forskningscontainern

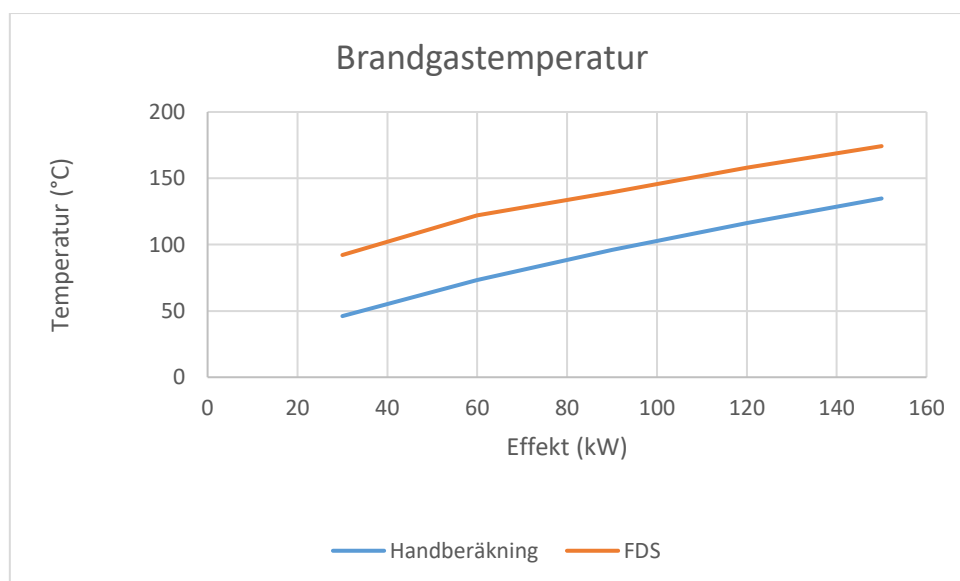


Figur 14: Bild som visar geometrin för forskningstunneln, med branden i mitten av tunneln.



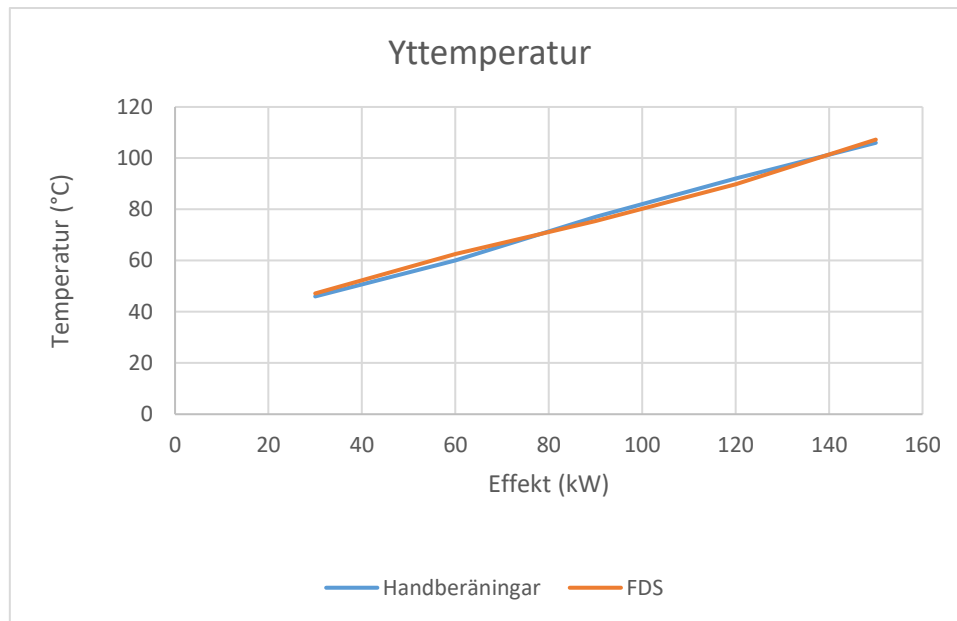
Figur 15: Den infallande strålningen vid olika brandeffekter.

Strålningen i forskningscontainern når ett maxvärde på cirka 5,5 kW/m² vid handberäkningar med ekvation (3) samt cirka 4,6 kW/m² i FDS.



Figur 16: Temperaturen på brandgaslagret vid olika effekter.

Brandgaslagret når en maximal temperatur en maxtemperatur på cirka 135 grader vid handberäkningar med ekvation (9) och cirka 175 grader i FDS.



Figur 17: Yttemperatur direkt över branden.

Yttemperaturen når ett maxvärde på cirka 106 grader vid handberäkning med ekvation (10) samt cirka 107 grader i FDS. Tabell 8 visar smälttemperaturer för olika plaster. Dessa smälttemperaturer visar att plasten smälter under branden.

10.2 Kommentarer kring beräkningar och analys

10.2.1 Infallande strålning

Genom att jämföra de värden som erhållits genom beräkningar baserade på effektkurvan från de experiment gjorda på elskåpsbranden med de värden som finns uppmätta i just den rapporten kan en del slutsatser dras. Ekvationerna som använts för jämförelsen är ekvation 3 samt ekvation 6.

Med utgångspunkt på 1123 Kelvin som maximal temperatur ges en effektutveckling på cirka 174 kW, denna använts vidare för att beräkna strålningen. Resultaten med de ingångsvärdena ger en infallande strålning på cirka 0,86 kW/m² med punktkällsekvationen och cirka 0,85 kW/m² med synfaktorsekvationen. Dessa värden korrelerar väl med de handberäkningarna som presenteras i figur 13, som grundar sig på effektutvecklingen enligt figur 2.

I figur 13 är den infallande strålningen nästan större med en faktor två jämfört med handberäkningarna. När simulationerna gjordes användes standardinställningarna i FDS. En anledning till att den infallande strålningen kan vara att antalet solida vinklar, som är 104 stycken i standardutförande, är färre än de borde vara vid optimala förhållanden. Handberäkningarna tar inte heller hänsyn till strålningen från brandgasen, till skillnad från fds.

När det kommer till forskningscontainern stämmer punktkällsberäkningen väl överens med de uppmätta värdena från FDS.

10.2.2 Brandgastemperatur

Brandgastemperaturen skiljer sig med cirka 50 grader för samtliga fem effekter för branden i forskningscontainern.

10.2.3 Yttemperatur

Yttemperaturens värden för de bägge beräkningarna följer varandra för alla fem effekter. Handberäkningen för yttemperaturen grundar sig på temperaturen för brandgasen, så att

brandgastemperaturen i figur 16 skiljer sig så mycket som det gör men inte yttemperaturen är lite märkligt.

11. Diskussion

En av de stora begränsningarna med att använda tunnelduk med hög brandklass i tunnlar är dess relativt korta livslängd. Detta leder till att duken behöver bytas efter cirka 40 år vilket leder till högre kostnader samt en avstängning av tunneln. Till skillnad från tunnelduken är dukmembranet skyddas av betong i trafikutrymmet vilket gör att själva membranet i sig inte kräver en hög brandklass, då betongen skyddar membranet. I installationsutrymmet är dukmembranet sällan skyddat. Om dukmembranet är exponerat i installationsutrymmet krävs det att dukmembranet har en tillräckligt hög brandteknisk klass enligt Trafikverkets föreskriver, således måste det bytas ut efter några decennier. Ett byte av dukmembranet i installationsutrymmet kan förslagsvis ske i samband med byte av den elektroniska utrustningen i installationsutrymmet för att också minska risken för elfel hos den elektiska utrustningen.

Som beskrivits tidigare i kapitel 8.1 fanns under byggnationen av E4 Förbifart Stockholm finns en beskrivning av vilka krav membranet ska uppfylla med hänseende på brandsäkerhet. Kraven gäller för allt membran innanför inklädningsväggen, ledningskulverten, utrymningsvägarna samt installationsutrymmet.

Kraven anses vara uppfyllt om något av de följande kriterierna uppnås

- "Membranet ska utföras i minst brandteknisk klass D-s2,d1 med klassifikationsstandard EN13501-1. Tillämpliga provningsstandarder är EN 13823 och EN ISO 11925-2."
- "Membranet ska utföras i minst brandteknisk klass E i enlighet med klassifikationsstandard EN13501-1. Följande tillägg ska uppfyllas: efterbrinntiden efter det att tändkällan avlägsnats ska för varje delförsök vara maximalt 10 sekunder."

Det är oklart hur väl tilläggskriteriet fungerar i praktiken vid en riktigt brand, och med vilka argument som gjort så att Trafikverket godkände kriterium. Varje tunnel är individuell och unik och kräver sina speciella kriterier i många avseenden, men frågan är hur mycket man kan ändra på kriterium utan att säkerhet förloras.

I början av arbetet av rapporten var tanken att inkludera fler länder, speciellt länderna med anknytning till de större bergskedjorna, såsom Alpena och Himalaya. Tyvärr är många av standarderna och kravställande dokument bara tillgängliga om de köps. På grund av det har det inte funnits möjlighet att studera dessa standarder och dokument närmare, men det är en punkt som tas upp i kapitel vidare framtida utredningar. För att kunna komplettera denna rapport krävs det tillgång till de nämnda standarderna, och troligen också sakkunniga i respektive länder.

Simuleringarna som gjordes för installationsutrymmet grundar sig på en HRR-kurva tagen från ett experiment om bränder i elskåp. Det finns alltid problem i att ta HRR-kurvor direkt från experiment på det sättet, då det är svårt att veta hur elskåpet i experimentet skiljer sig från elskåp som finns i installationsutrymmen. Elskåp skiljer sig i geometri och effekt, och det är svårt att ge ett exempel på ett generellt elskåp.

Skillnaderna som sker mellan FDS och handberäkningarna visar sig i temperaturerna är nästan linjära. De skillnader som sker i värdena kan ha att göra med vilka konstanter som använts när handberäkningarna gjordes.

Strålningsvärdena för installationsutrymmet skiljer sig med nästan en faktor två för handräkningarna och FDS-beräkningarna. FDS är ett användarkänsligt simulationsprogram, så en anledning till att det har blivit sådan stor skillnad kan bero på användaren. För att få en bra indikation på vilken av metoderna som representerar sanning bäst rekommenderas det att göra ett experiment.

12. Slutsats

Slutsatserna som kan dras från rapporten är att provningsmetoderna skiljer sig åt mellan Sverige, Norge och USA. I Sverige finns ingen bestämd provningsmetod som måste uppfyllas hos dukmembran eller dukmembran för att få användas, så länge materialet uppnår kravet på brandteknisk klass. I Norge används de två provningsmetoderna ISO 9705 och NS-EN 1182 för att godkänna tunnelbeklädnad. I USA använder de främst provningsmetoderna E2652 och E136, men även ISO 1182.

Beräkningarna visar att en brand i ett elskåp i ett installationsutrymme med brandkällan 2,2 meter från duken inte kommer antända duken. För att en antändning ska ske av duken måste antingen brandkällan vara placerad närmare duken, det vill säga en smalare korridor, eller att brandeffekten från elskåpet är större. Beräkningarna som gjordes i forskningscontainern visar att strålningen inte är nog för att antända duken, dock visar temperaturberäkningarna att temperaturen är tillräcklig för att smälta plast.

Beräkningarna visar också på att det inte krävs orealistiskt höga brandeffekter för att komma upp i de strålningsnivåer som krävs för att duken ska antändas, vilket förmodligen skulle ske om brandeffekten var högre. I och med det är det önskvärt att använda en duk med högre brandteknisk klass än E. Beräkningarna visar också att vid det planerade experimentet i forskningscontainern kommer duken att smälta, om inte en högre brandeffekt används.

13. Framtida utredningar

Denna rapport redogör för skillnaderna i klassificering samt provningsmetoder i Sverige, Norge och USA. Sett ur ett internationellt perspektiv är detta en liten del av världen. Vidare utredningar inom ämnet bör innefatta fler stater, förslagsvis stater som har stora bergskedjor i sig. Exempel på sådana bergskedjor är Alperna, Anderna, Himalaya, Atlasbergen samt Pyrenéerna.

Beräkningarna har utförts med hjälp av handberäkningar och simulationsprogram. Dessa har många osäkerheter i sig, så resultaten som presenteras bör användas med försiktighet. För att få bättre uppskattning om hur dukmembran samt dukmembran påverkas vid en brand bör verkliga experiment utföras. Då det finns många elinstallationer i installationsutrymmen bör experiment göras där bränder från elskåp eller kablage påverkar dukmembran och tunnelduk.

En jämförelse av två dukmembran, en med brandteknisk klass D-s2,d0 samt en med brandteknisk klass E med en efterbrinntid på maximalt 10 sekunder vid en fullt utvecklad rumsbrand bör göras. En sådan jämförelse hade gett en indikation på huruvida tilläggskravet är bra nog för att nå samma brandsäkerhet som ett dukmembran med brandtekniskklass D-s2,d0.

Om det inte är möjligt att använda en duk med tillräckligt hög brandteknisk klass, eller applicera sprutbetong på duken i installationsutrymmet så en till exempel E-klassad duk är exponerad kan det finnas andra möjligheter att brandskydda duken. Det bör undersökas om något annat än sprutbetong kan ge ett tillräckligt bra brandskydd, ett förslag som kan vara intressant för en sådan utredning är brandhämmande färg målade på duken.

Referenser

- Arbetsmiljöverket. (2014). *Berg- och gruvarbete*. Solna: Arbetsmiljöverket.
- Blomqvist, P., & Andersson, P. (2011). *A study of fire performance of textile membranes used as building components*. Borås: SP Technical Research Institute of Sweden.
- Boström, L. (2010). *Verifiering av brandmotstånd för betong och sprutbetong i tunnlar*. Borås: SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut.
- Brenden, L. (den 18 Juli 2009). brannredning.com. *Brann & Redning*. Hämtat från Stort tunnelansvar i Volda: <https://brannredning.com/brann/stort-tunnelansvar-volda/>
- Buvik, H. (2006). *WG Tunnelhvelv T100 Fullskala branntest i Runehamar testtunnel*. Oslo: Statens vegvesen.
- Buvik, H. (2007). *FoU Tunnelutvikling Sluttrapport Fase 1: Brann- og frostsikring*. Oslo: Statens vegvesen.
- Buvik, H., Berg, H., Freiholtz, B., Svangstu, O., Windelhed, K., Raun Gottfredson, F., . . . Haraldsson, H. (2008). *Kledninger i tunnel*. Oslo: Nordisk Vegteknisk Forbund.
- Cafe, Tony. (den 17 Juni 2007). *T.C Forensic*. Hämtat från PHYSICAL CONSTANTS FOR INVESTIGATORS: <https://www.tcforensic.com.au/docs/article10.html>
- Chromy, W., Stephan, D., Eder, M., & Vogel, M. (2007). *Recommendations for planning and implementation of occupational health and safety concept on underground worksites*. Stuva: BG BAU.
- Davidsson, C. (2012). *Tunneldrivning i tätort*. Luleå: Luleå tekniska universitet.
- DiNenno, P. J., Drysdale, D., Beyler, C. L., Walton, W. D., Custer, R. L., Hall, J. R., & Watts, J. M. (2002). *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. Quincy: e National Fire Protection Association.
- Furuli, B., Marino, V., & Veidekke. (2012). *Projektering och uppförande av inklädnad och kulvertvägg vid Norra Länken 33 & 34*. Svenska Bergteknikföreningen och författarna.
- Gehandler, J., & Millgård, U. (2022). *Brandskydd under byggtiden för tunnlar och andra undermarksanläggningar*. Borås: RISE Research Institutes of Sweden AB.
- Hirschler, M. M. (2017). *Procedures for development and revision of codes and standards associated with fire safety in the USA*. Mill Valley: GBH International.
- Hung, J., Monsees, J., Munfah, N., & Wisniewski, J. (2009). *TECHNICAL MANUAL FOR DESIGN AND CONSTRUCTION OF ROAD TUNNELS – CIVIL ELEMENTS*. Washington, D.C: National Highway Institute U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration.
- Häggström, J., Wahlström, B., & Maria, H. (2007). *BRANDSKYDD AV TUNNELKONSTRUKTIONER*. Stockholm: STIFTELSEN SVENSK BERGTEKNISK FORSKNING .
- Ingason, H. (2011). *Ökad brandsäkerhet vid tunnelbyggnation*. Karlstad: Myndigheten för samhällsskydd och beredskap.
- Ingason, H., & Gehandler, J. (2018). *Metoder för att testa dukar och membran i tunnlar och berggrum*. Borås: RISE.

- Ingason, H., Li, Y. Z., & Lönnemark, A. (2015). *Tunnel Fire Dynamics*. Borås: Springer New York is a brand of Springer.
- Jonsson, H. (2009). *Praktisk intervjuteknik*. Luleå: Luleå tekniska universitet.
- Karlsson, B., & Quintiere, J. G. (1999). *Enclosure fire dynamics*. Boca Raton: CRC Press LLC.
- Khaled, N., & Behaderovic, I. (2019). *Temperaturmätningar i inklädnadssystem och sprutbetong inom Norra länken*. Stockholm: KTH.
- Makoto S, W., & Thomlinson, S. A. (2022). Using Exterior-Grade Waterproofing in Interior Applications. *Construction Specifier*, 26-30.
- Malmberg, C.-J., & Andersson, F. (2020). *Utvärdering av FDS för dieselbrand i slutet utrymme*. Lund: Lunds universitet.
- Mangs, J., & Keski-Rahkonen, O. (1996). *Full scale fire experiments on electronic cabinets II*. Esbo: VTT Building Technology, Fire technology.
- NFPA. (2020). *NFPA 502 Standard for Road Tunnels, Bridges, and Other Limited Access Highways*. San Antonio: National Fire Protection Association.
- Norsk forening for fjellsprengningsteknik. (2004). *Plastmaterialer i tunneler og bergrom -sikker håndtering i anleggsfasen*. Oslo: Norsk forening for fjellsprengningsteknik.
- Pál, G., & Macskásy, H. (1991). *Plastics their behaviour in fires*. Budapest: ELSEVIER.
- Spearpoint, M., Hopkins, C., & Hopkins, D. (2020). Modelling the thermal radiation from kitchen hob fires. *Journal of Fire Sciences*, 377-394.
- Statens Vegvesene. (2022). *N500 Vegtunneler*. Oslo: Statens Vegvesene.
- Trafikverket. (2021). *Tunnelbyggande*. Borlänge: Trafikverket.
- Trafikverket. (den 23 Mars 2022). *Trafikverket*. Hämtat från Två tunnlar mellan Hallsberg och Degerön: <https://www.trafikverket.se/vara-projekt/projekt-som-stracker-sig-over-fleralan/hallsberg-degeron/nyheter-for-dubbelspar-hallsbergdegeron/2022/tva-tunnlar-mellan-hallsberg-och-degeron/>
- Tunnel. (den 9 September 2022). *tunnel-online*. Hämtat från Waterproofing Systems with Membranes: https://www.tunnel-online.info/en/artikel/tunnel_Waterproofing_Systems_with_Membranes_2323600.html
- Van Hess, P., & Blomqvist, P. (2007). *A summary of fire regulations, requirements and test methods for technical textiles used in buildings*. Borås: SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut .

Bilaga 1 FDS-kod för forskningstunneln

Denna bilaga innehåller koden för simuleringarna i forskningstunneln. Koden som presenteras är koden för simuleringen med en 150kW brand. Den enda skillnaden är att de andra 4 simuleringarna har bränder på 30, 60, 90 samt 120 kW.

```
&HEAD CHID='contanier150u', TITLE='contanier150u' /
```

```
&TIME T_END=300. /
```

```
&MESH IJK=120,20,25, XB=0.0, 12.0, -1.0, 1.0, 0.0, 2.5,/
```

```
&DUMP VELOCITY_ERROR_FILE=.TRUE. /
```

```
&SPEC ID = 'NITROGEN', LUMPED_COMPONENT_ONLY = .TRUE. /
```

```
&SPEC ID = 'OXYGEN', LUMPED_COMPONENT_ONLY = .TRUE. /
```

```
&SPEC ID = 'CARBON DIOXIDE', LUMPED_COMPONENT_ONLY = .TRUE. /
```

```
&SPEC ID = 'WATER VAPOR', LUMPED_COMPONENT_ONLY = .TRUE. /
```

```
&SPEC ID = 'PROPANE' /
```

```
&SPEC ID = 'SOOT', AEROSOL=.TRUE.,MEAN_DIAMETER=1.E-6 /
```

```
&SPEC ID = 'AIR', SPEC_ID = 'NITROGEN','OXYGEN',
```

```
VOLUME_FRACTION = 3.7619,1.000, BACKGROUND = .TRUE. /
```

```
&SPEC ID = 'PRODUCTS', SPEC_ID = 'NITROGEN','CARBON DIOXIDE','WATER VAPOR',
```

```
VOLUME_FRACTION = 18.10631,2.81813,3.98990/
```

```
&REAC FUEL='PROPANE',
```

```
SPEC_ID_NU = 'PROPANE','AIR','PRODUCTS','SOOT',
```

```
NU=-1.,-4.81308,1,0.20208/
```

```
&SURF ID='fire', COLOR='RED', HRRPUA=2122.0 /
```

```
&OBST XB= 5.85, 6.13, -0.13, 0.13, 0.0, 0.32,/
```

```
&VENT SURF_ID='fire', XB=5.85, 6.13, -0.13, 0.13, 0.32, 0.32, COLOR='RED'/
```

&VENT SURF_ID='OPEN', XB=12.0, 12.0, -1.0, 1.0, 0.0, 2.5 /

&VENT SURF_ID='OPEN', XB=0.0, 0.0, -1.0, 1.0, 0.0, 2.5 /

&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBX=0. /

&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBX=12. /

- gashastighetsmätare för mätning av luftflöden.

&DEVC ID='v_1', XYZ=0.0, 0.0, 1.4 , QUANTITY='VELOCITY' /

&DEVC ID='v_2', XYZ=0.0, 0.0, 2.4 , QUANTITY='VELOCITY' /

&DEVC ID='v_3', XYZ=12.0, 0.0, 1.4 , QUANTITY='VELOCITY' /

&DEVC ID='v_4', XYZ=12.0, 0.0, 2.4 , QUANTITY='VELOCITY' /

- olika lasermätare för mätning av brandgasernas optiska dämpning

&DEVC XB=0, 0, -1.0, 1.0, 0, 2.5, QUANTITY='SURFACE DEPOSITION', ID='stor', STATISTICS='SURFACE INTEGRAL', SPEC_ID='SOOT' /

&DEVC XB=12, 12, -1.0, 1.0, 0, 2.5, QUANTITY='SURFACE DEPOSITION', ID='liten', STATISTICS='SURFACE INTEGRAL', SPEC_ID='SOOT' /

- termoelement för mätning av temperatur vid olika platser

&DEVC ID='T1', XYZ=0.0, 0.0, 1.4, QUANTITY='TEMPERATURE' /

&DEVC ID='T2', XYZ=0.0, 0.0, 2.4, QUANTITY='TEMPERATURE' /

&DEVC ID='T3', XYZ=12.0, 0.0, 1.4, QUANTITY='TEMPERATURE' /

&DEVC ID='T4', XYZ=12.0, 0.0, 2.4, QUANTITY='TEMPERATURE' /

&DEVC ID='T5', XYZ=6.0, 0.0, 1.4, QUANTITY='TEMPERATURE' /

&DEVC ID='T6', XYZ=6.0, 0.0, 2.4, QUANTITY='TEMPERATURE' /

&DEVC ID='absÖ', XYZ=6.0, 0.0, 2.49, QUANTITY='ADIABATIC SURFACE TEMPERATURE', IOR=-3 /

&DEVC ID='wallÖ', XYZ=6.0, 0.0, 2.49, QUANTITY='WALL TEMPERATURE', IOR=-3 /

&DEVC ID='T7', XYZ=0.0, 0.0, 2.49, QUANTITY='TEMPERATURE' /

&DEVC ID='T8', XYZ=1.0, 0.0, 2.49, QUANTITY='TEMPERATURE' /

&DEVC ID='T9', XYZ=2.0, 0.0, 2.49, QUANTITY='TEMPERATURE' /

&DEVC ID='T10', XYZ=3.0, 0.0, 2.49, QUANTITY='TEMPERATURE' /

&DEVC ID='T11', XYZ=4.0, 0.0, 2.49, QUANTITY='TEMPERATURE' /

&DEVC ID='T12', XYZ=5.0, 0.0, 2.49, QUANTITY='TEMPERATURE' /

&DEVC ID='RAD1', QUANTITY='INCIDENT HEAT FLUX', XB = 6.0, 6.0, -0.99, -0.99, 0.40, 0.40, IOR=2/

&DEVC ID='beam_N', XB=0, 0, -1.0, 1.0, 2.4, 2.4, QUANTITY='PATH OBSCURATION' /

&BNDF QUANTITY='NET HEAT FLUX', CELL_CENTERED=.TRUE. /

&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE., PBX=0. /

&SLCF QUANTITY='H', CELL_CENTERED=.TRUE., PBX=0. /

&TAIL /

Bilaga 2 FDS-kod för installationsutrymmet

```
&HEAD CHID='stralning_sida27s', TITLE='stralning_sida27s' /
```

```
&TIME T_END=4800 /
```

```
&MESH ID='mesh1', IJK=50, 11, 17, XB=0.0, 5.0 , 0.0, 1.1, 0.0, 1.7, MPI_PROCESS=0 /
```

```
&MESH ID='mesh2', IJK=50, 11, 17, XB=5.0, 10.0 , 0.0, 1.1, 0.0, 1.7, MPI_PROCESS=1 /
```

```
&MESH ID='mesh3', IJK=50, 11, 17, XB=10.0 ,15.0 , 0.0, 1.1, 0.0, 1.7, MPI_PROCESS=2 /
```

```
&MESH ID='mesh4', IJK=50, 11, 17, XB=0.0, 5.0 , 1.1, 2.2, 0.0, 1.7, MPI_PROCESS=3 /
```

```
&MESH ID='mesh5', IJK=50, 11, 17, XB=5.0, 10.0 , 1.1, 2.2, 0.0, 1.7, MPI_PROCESS=4 /
```

```
&MESH ID='mesh6', IJK=50, 11, 17, XB=10.0, 15.0 , 1.1, 2.2, 0.0, 1.7, MPI_PROCESS=5 /
```

```
&MESH ID='mesh7', IJK=50, 11, 17, XB=0.0, 5.0 , 2.2, 3.3, 0.0, 1.7, MPI_PROCESS=6 /
```

```
&MESH ID='mesh8', IJK=50, 11, 17, XB=5.0, 10.0 , 2.2, 3.3, 0.0, 1.7, MPI_PROCESS=7 /
```

```
&MESH ID='mesh9', IJK=50, 11, 17, XB=10.0, 15.0 , 2.2, 3.3, 0.0, 1.7, MPI_PROCESS=8 /
```

```
&MESH ID='mesh10', IJK=50, 11, 17, XB=0.0, 5.0 , 0.0, 1.1, 1.7, 2.4, MPI_PROCESS=9 /
```

```
&MESH ID='mesh11', IJK=50, 11, 17, XB=5.0, 10.0 , 0.0, 1.1, 1.7, 2.4, MPI_PROCESS=10 /
```

```
&MESH ID='mesh12', IJK=50, 11, 17, XB=10.0 ,15.0 , 0.0, 1.1, 1.7, 2.4, MPI_PROCESS=11 /
```

```
&MESH ID='mesh13', IJK=50, 11, 17, XB=0.0, 5.0 , 1.1, 2.2, 1.7, 2.4, MPI_PROCESS=12 /
```

```
&MESH ID='mesh14', IJK=50, 11, 17, XB=5.0, 10.0 , 1.1, 2.2, 1.7, 2.4, MPI_PROCESS=13 /
```

```
&MESH ID='mesh15', IJK=50, 11, 17, XB=10.0, 15.0 , 1.1, 2.2, 1.7, 2.4, MPI_PROCESS=14 /
```

```
&MESH ID='mesh16', IJK=50, 11, 17, XB=0.0, 5.0 , 2.2, 3.3, 1.7, 2.4, MPI_PROCESS=15 /
```

```
&MESH ID='mesh17', IJK=50, 11, 17, XB=5.0, 10.0 , 2.2, 3.3, 1.7, 2.4, MPI_PROCESS=16 /
```

```
&MESH ID='mesh18', IJK=50, 11, 17, XB=10.0, 15.0 , 2.2, 3.3, 1.7, 2.4, MPI_PROCESS=17 /
```

```
&MESH ID='mesh19', IJK=50, 11, 17, XB=0.0, 5.0 , 0.0, 1.1, 2.4, 5.1, MPI_PROCESS=18 /
```

```
&MESH ID='mesh20', IJK=50, 11, 17, XB=5.0, 10.0 , 0.0, 1.1, 2.4, 5.1, MPI_PROCESS=19 /
```

```
&MESH ID='mesh21', IJK=50, 11, 17, XB=10.0 ,15.0 , 0.0, 1.1, 2.4, 5.1, MPI_PROCESS=20 /
```

```
&MESH ID='mesh22', IJK=50, 11, 17, XB=0.0, 5.0 , 1.1, 2.2, 2.4, 5.1, MPI_PROCESS=21 /
```

```
&MESH ID='mesh23', IJK=50, 11, 17, XB=5.0, 10.0 , 1.1, 2.2, 2.4, 5.1, MPI_PROCESS=22 /
```

```
&MESH ID='mesh24', IJK=50, 11, 17, XB=10.0, 15.0 , 1.1, 2.2, 2.4, 5.1, MPI_PROCESS=23 /
```

&MESH ID='mesh25', IJK=50, 11, 17, XB=0.0, 5.0 , 2.2, 3.3, 2.4, 5.1, MPI_PROCESS=24 /
&MESH ID='mesh26', IJK=50, 11, 17, XB=5.0, 10.0 , 2.2, 3.3, 2.4, 5.1, MPI_PROCESS=25 /
&MESH ID='mesh27', IJK=50, 11, 17, XB=10.0, 15.0 , 2.2, 3.3, 2.4, 5.1, MPI_PROCESS=26 /

&DUMP VELOCITY_ERROR_FILE=.TRUE. /
&REAC FUEL='PROPANE', SOOT_YIELD=0.1, /

&RAMP ID='RAMP1', T=0, F=0.0 /
&RAMP ID='RAMP1', T=720, F=0.5 /
&RAMP ID='RAMP1', T=1800,F=0.25 /
&RAMP ID='RAMP1', T=2400, F=0.875 /
&RAMP ID='RAMP1', T=3000, F=0.625 /
&RAMP ID='RAMP1', T=3600,F=0.875 /
&RAMP ID='RAMP1', T=4800,F=0.625 /

&MATL ID = 'CONCRETE'

CONDUCTIVITY = 1.1
SPECIFIC_HEAT = 0.88
DENSITY = 2100.0
EMISSIVITY = 0.85/

&SURF ID = 'CONCRETE WALL'

MATL_ID = 'CONCRETE'
COLOR = 'GRAY 50'
BACKING = 'EXPOSED'
THICKNESS = 0.30 /

&MATL ID = 'STEEL'

CONDUCTIVITY = 45

SPECIFIC_HEAT = 0.46

DENSITY = 7820

EMISSIVITY = 0.85 /

&SURF ID = 'LÅDA'

MATL_ID = 'STEEL'

COLOR = 'GREEN'

BACKING = 'EXPOSED'

THICKNESS = 0.0015 /

&OBST XB= 0.0, 15.0, 0.0, 3.3, 5.0, 5.1, SURF_ID= 'CONCRETE WALL' /

&OBST XB= 0.0, 15.0, 0.0, 0.1, 0.0, 5.1, SURF_ID= 'CONCRETE WALL' /

&OBST XB= 6.9, 6.95, 0.0, 1.05, 0.0, 1.0, SURF_ID = 'LÅDA'/ vänster

&OBST XB= 8.1, 8.15, 0.0, 1.05, 0.0, 1.0, SURF_ID = 'LÅDA'/ höger

&OBST XB= 6.9, 8.15, 1.05, 1.1, 0.0, 1.0, SURF_ID = 'LÅDA'/ fram

&OBST XB= 6.9, 8.15, 0.0, 1.1, 1.05, 1.1, SURF_ID = 'LÅDA'/ uppe

&OBST XB= 7.0, 8.0, 0.0, 1.0, 0.0, 1.0,/

&SURF ID='FIRE', COLOR='RED', HRRPUA=200.0, RAMP_Q='RAMP1' /

&VENT SURF_ID='FIRE', XB= 7.0, 8.0, 1.0, 1.0, 0.0, 1.0, /

&VENT SURF_ID='OPEN', PBX=0.0 /

&VENT SURF_ID='OPEN', PBX=15.0 /

&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE., PBX=0. /

&SLCF QUANTITY='H', CELL_CENTERED=.TRUE., PBX=0. /

&SLCF QUANTITY='INTEGRATED INTENSITY', CELL_CENTERED=.TRUE., PBX=1.55 /

&DEVC ID='RAD50', QUANTITY='INCIDENT HEAT FLUX', XYZ = 7.5, 3.29, 0.50, IOR=-2,/

&DEVC ID='RAD75', QUANTITY='INCIDENT HEAT FLUX', XYZ = 7.5, 3.29, 0.75, IOR=-2,/

&DEVC ID='RAD100', QUANTITY='INCIDENT HEAT FLUX', XYZ = 7.5, 3.29, 1.0, IOR=-2,/

&DEVC ID='RAD125', QUANTITY='INCIDENT HEAT FLUX', XYZ = 7.5, 3.29, 1.25, IOR=-2,/

&DEVC ID='RAD150', QUANTITY='INCIDENT HEAT FLUX', XYZ = 7.5, 3.29, 1.50, IOR=-2,/

&DEVC ID='RAD175', QUANTITY='INCIDENT HEAT FLUX', XYZ = 7.5, 3.29, 1.75, IOR=-2,/

&DEVC ID='RAD200', QUANTITY='INCIDENT HEAT FLUX', XYZ = 7.5, 3.29, 2.0, IOR=-2,/

&DEVC ID='RAD225', QUANTITY='INCIDENT HEAT FLUX', XYZ = 7.5, 3.29, 2.25, IOR=-2,/

&DEVC ID='RAD250', QUANTITY='INCIDENT HEAT FLUX', XYZ = 7.5, 3.29, 2.50, IOR=-2,/

&DEVC ID='RAD275', QUANTITY='INCIDENT HEAT FLUX', XYZ = 7.5, 3.29, 2.75, IOR=-2,/

&DEVC ID='RAD300', QUANTITY='INCIDENT HEAT FLUX', XYZ = 7.5, 3.29, 3.0, IOR=-2,/

&DEVC ID='RAD325', QUANTITY='INCIDENT HEAT FLUX', XYZ = 7.5, 3.29, 3.25, IOR=-2,/

&DEVC ID='RAD350', QUANTITY='INCIDENT HEAT FLUX', XYZ = 7.5, 3.29, 3.50, IOR=-2,/

&DEVC ID='RAD375', QUANTITY='INCIDENT HEAT FLUX', XYZ = 7.5, 3.29, 3.75, IOR=-2,/

&DEVC ID='RAD400', QUANTITY='INCIDENT HEAT FLUX', XYZ = 7.5, 3.29, 4.0, IOR=-2,/

&DEVC ID='RAD425', QUANTITY='INCIDENT HEAT FLUX', XYZ = 7.5, 3.29, 4.25, IOR=-2,/

&DEVC ID='RAD450', QUANTITY='INCIDENT HEAT FLUX', XYZ = 7.5, 3.29, 4.50, IOR=-2,/

&DEVC ID='RAD475', QUANTITY='INCIDENT HEAT FLUX', XYZ = 7.5, 3.29, 4.75, IOR=-2,/

&BNDF QUANTITY='RADIATIVE HEAT FLUX', CELL_CENTERED=.TRUE.

&BNDF QUANTITY='CONVECTIVE HEAT FLUX', CELL_CENTERED=.TRUE.

&TAIL /