Brand i kabelschakt

Utvärdering av konsekvenser vid brand i kabelschakt vid SSAB

Fredrik Nilsson

Department of Fire Safety Engineering
Lund University, Sweden

Brandteknik
Lunds tekniska högskola
Lunds universitet

Report 5408, Lund 2014

The report has been financed by SSAB
Rapporten har finansierats av SSAB

Brand i kabelschakt

Utvärdering av konsekvenser vid brand i kabelschakt vid SSAB

Fredrik Nilsson

Lund 2014

Titel: Brand i kabelschakt - Utvärdering av konsekvenser vid brand i kabelschakt vid SSAB

Title: Fire in Cable Shaft - Evaluation of the consequences of fire in a cable shaft at SSAB

Författare/Author: Fredrik Nilsson

Rapport/Report 5408
ISSN: 1402-3504
ISRN: LUTVDG/TVBB--5408--SE

Number of pages: 227

Illustrationer och bilder: Fredrik Nilsson om inget annat anges

Sökord: Kabelbrand, kabelschakt, SSAB, FIPEC, Brandspridningsklass, FDS.

Keywords: Cable fire, Cable shaft, SSAB, FIPEC, Flammability class, FDS.

Språk/language: Svenska/Swedish

Abstract
This report evaluates the consequences of fire in a cable shaft at one of SSAB's facilities. Available models of cable fire behavior and the state of knowledge of cable fires in various configurations have been evaluated. Furthermore, an assessment has been made of which areas that is in need of more research. The applicability of the cable fire models to the configurations in the cable shaft have been assessed and the models that are considered to be most consistent with the configurations in the cable shaft have been used in the evaluation. The evaluation includes assessments regarding extent of fire damage, recovery time and evacuation due to a potential fire and is made using simulations in the computer program Fire Dynamics Simulator and hand calculations. The evaluation results in various proposals for measures regarding fire protection and will serve as a basis for decision of improvement of the current fire protection system.

Författaren ansvarar för innehållet i rapporten

© Copyright: Brandteknik, Lunds tekniska högskola, Lunds universitet,
Lund 2014.

Brandteknik
Lunds tekniska högskola
Lunds universitet
Box 118
221 00 Lund

brand@brand.lth.se
http://www.brand.lth.se
Telefon: 046 - 222 73 60
Telefax: 046- 222 46 12

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

brand@brand.lth.se
http://www.brand.lth.se/english
Telephone: +46 46 222 73 60
Fax: +46 46 222 46 12

Förord

Detta arbete utgör huvudmomentet i kursen VBRM01 vilken utförs som en avslutande del av brandingenjörsutbildningen vid Lunds Tekniska Högskola. Examensarbetets omfattning är 22.5 högskolepoäng.

Ett stort tack riktas till de personer som varit till hjälp under arbetets gång. Följande personer vill jag rikta ett extra stort tack till.

Martin Nilsson, Doktorand, Avdelningen för brandteknik och riskhantering, LTH. Handledare. För hjälp och vägledning under hela arbetes gång.

Patrick van Hees, Professor i brandteknik, Avdelningen för brandteknik och riskhantering, LTH. För hjälp och vägledning under hela arbetes gång.

André Vestin, Avsnittschef Säkerhet SSAB. För nyttig information och rundvandring vid platsbesök.

Björn Jansson. Project Leader SSAB. För nyttig information och rundvandring vid platsbesök.

Michael Nilsson, Elektriker SSAB. För information avseende kablar och återställningstider.

Jonathan Wahlqvist, Doktorand, Avdelningen för brandteknik och riskhantering, LTH. För hjälp och tips med FDS-simuleringarna.

Håkan Frantzich, Universitetslektor, Avdelningen för brandteknik och riskhantering, LTH. För hjälp kring skadekriterier och dylikt.

Lund, oktober 2014

Fredrik Nilsson

Sammanfattning

Följande rapport är framtagen som en utvärdering av potentiella konsekvenser vid brand i ett kabelschakt, som även fungerar som ett trapphus, vid en av SSAB:s anläggningar. Rapporten är även framtagen med syftet att utifrån erhållna resultat ge förslag på möjliga skadebegränsande åtgärder vilka därmed skall fungera som ett beslutsunderlag vid bedömningar om framtida brandskydd.

Via en omfattande litteraturstudie följt av simuleringar i datorprogrammet Fire Dynamics Simulator (FDS) har målsättningen med arbetet varit att besvara följande frågeställningar avseende brand i kablar och den potentiella skadeomfattningen vid en brand i kabelschaktet.

1. Hur väl kan dagens modeller avseende brand i kablar tillämpas för denna applikation?
2. Vad kan göra för att minska osäkerheterna i dagens modeller?
3. Vad finns det för möjliga brandscenarion och vad kan vara troliga tändkällor?
4. Hur stora blir skadorna på kablarna (antal, skadad längd etc.) i händelse av brand?
5. Hur påverkas utrymningssäkerheten i kabelschaktet i händelse av brand?
6. Vilka möjligheter finns att skydda detta utrymme?
7. Hur stora blir skadorna på kablarna i händelse av brand med föreslagna åtgärder?
8. Hur påverkas utrymningssäkerheten i schaktet i händelse av brand med föreslagna åtgärder?

Det framgår av litteraturstudien att det förekommer mycket osäkerheter vad gäller bedömningar av när olika sorters kablar kortsluter och/eller antänder vid brandpåverkan samt hur brandspridningen kan se ut. Detta då huvuddelen av tillgängliga resultat är framtagna med en stor variation av kablar, apparatur och försöksuppställningar. Därmed anses dessa resultat endast vara giltiga för den befintliga kabelsorten vid det befintliga försöket, detta medför därmed svårigheter att direkt tillämpa resultat till applikationen i fråga. Vad gäller brandspridning hos kablar dras slutsatsen att en kabels brandspridningsklass, som är ett mått på antändbarhet och brandspridning, inte är något bra verktyg för att förutsäga brandspridningen hos kablar, detta då brandspridningsklassen inte ger några kvantitativa mätresultat utan delar endast in kablar i godkända eller icke godkända enligt en viss standard. Bedömningar avseende antändbarhet och brandspridning har istället skett med utgångspunkt från ett projekt kallat FIPEC (Fire Performance of Electric Cables) vid vilket det utfördes omfattande studier av brandbeteende hos ett stort spektrum av kablar. Med utgångspunkt från resultat av detta projekt kan diverse kabelparametrar identifieras vilket vidare medför att giltiga resultat kan erhållas även då geometri och yttre förhållanden ändras.

För att minska osäkerheterna i dagens modeller rekommenderas bland annat att utföra mer omfattande analyser av vilka effekter kablars uppbyggnadsmaterial har både på skadekriterier och brandspridning för att vidare kunna dra mer adekvata slutsatser avseende brand i kablar.

I kabelschaktet anses den troligaste typen av tändkälla vara någon typ av elektriskt fel i kablarna, detta betyder att en brand kan uppkomma i princip var som helst i schaktet. Från erhållna resultat framgår att skadeomfattningen till stor del beror på var branden startar. Resultaten visar att skadeomfattningen i kabelschaktet kan, beroende på brandens startposition, gå från tre kabelstegar till att omfatta i princip hela schaktet. Utrymning bedöms dock kunna ske innan dess att kritiska förhållanden uppstår vid samtliga brandscenarion.

Det finns många olika möjligheter att, vid en eventuell brand, begränsa det negativa förloppet eller till och med förhindra att en brand överhuvudtaget uppkommer, detta innefattar både passiva och aktiva system. I arbetet har det föreslagits 12 stycken olika åtgärder och åtgärdskombinationer, givetvis finns det fler möjligheter att skydda detta utrymme men de föreslagna åtgärderna anses representera ett stort

spektrum av de möjligheter som finns för att skydda utrymmet. Den potentiella skadeomfattningen i schaktet anses kunna reduceras till noll vid införandet av ett inerteringssystem då denna typ av system medför att en brand ej skall kunna uppkomma. I annat fall kan skadeomfattningen, vid införandet av strålningsskärmar i kombination med antingen halogenfria flamskyddsmålade kablar eller brandskyddsmålning av kablarna, reduceras från i princip hela schaktet till endast en kabelstege, dessa åtgärdskombinationer kan reducera återställningstiden från månader till ungefär 1,5 dygn.

Utrymning från kabelschaktet bedöms kunna vara möjlig att utföra även då ingen av de föreslagna åtgärderna installeras. Vid införandet av någon eller några av dessa åtgärder kommer dock tidsmarginalen för säker utrymning ökas vilket anses vara ett positivt inslag.

Summary

The following report is designed as an evaluation of potential consequences of a fire in a cable shaft, which also serves as stairwells, at one of SSAB's facilities. The report is also designed with the aim of suggesting possible mitigation which thus serve as a basis for decisions on assessments of future fire protection.

Through an extensive literature review followed by simulations using Fire Dynamics Simulator (FDS), the objective of the thesis was to answer the following questions regarding fire in cables and the potential extent of damage in the event of a fire in the cable shaft.

1. To what extent can the current models regarding fire in cables be applied for this application?
2. How can the uncertainties in the current models be reduced?
3. What are possible fire scenarios and what could be possible sources of ignition?
4. How extensive is the damage to the cables (quantity, damaged length etc.) in case of fire?
5. How does the safety of escape in the cable shaft being affected in the case of fire?
6. What possibilities are there to protect the cable shaft?
7. What will be the extent of fire damage to the cables with proposed actions?
8. How does the safety of escape in the cable shaft being affected in case of fire with proposed actions?

The literature review revealed that there is several uncertainties regarding estimates of when different kinds of cables shorting out and ignites from the influence of fire and how a ensuing fire spreads due to the structure and configuration of the cables. This is due to the fact that the major part of available results is obtained with a wide variety of cables, devices and experimental setups. Thus these results are considered to be valid only for the current cable in the current experiment, this makes it difficult to apply the results to this application. The study also concluded that the flammability classes, in which cables are grouped depending on ignition and fire spread, is not a good way to predict the fire spread in cables. The reason is that the flammability class does not provide any quantitative results, it only divides the cables in pass or fail according to a certain standard. Instead assessments of ignition and fire spread in cables have been made based on a project entitled FIPEC (Fire Performance of Electric Cables) in which it was concluded extensive studies of fire behavior of a wide range of cables. Based on the results of this project, various cable parameters can be identified which in turn makes it possible to obtain valid results even when changing the geometry and external conditions.

To reduce the uncertainties in the current models it is recommended to conduct more extensive studies on the effects of the cable material on both damage criteria and fire spread to further derive adequate conclusions regarding cable fires.

The type of ignition source that is considered to be the most likely is some kind of electrical fault, this means that a fire may occur anywhere in the shaft. Based on the results it is concluded that the extent of damage largely depends on the place of ignition. The results show that the extent of damage in the cable shaft vary between three cable trays to virtually the entire shaft depending on fire starting position. Evacuation from the cable shaft is considered possible before critical conditions occur in all the analyzed fire scenarios.

There are plenty of possibilities to limit the fire progression at an early stage or even prevent that a fire occurs in the first place, this includes both passive and active systems. Twelve different measures or combinations of measures have been suggested, of course there are more possibilities to protect this space but the suggested measures is considered to represent a wide spectrum of possible solutions. The

extent of damage can be reduced significantly with the introduction of various passive and active systems. The introduction of an inerting system can reduce the extent of damage to zero since this type of system prevents a fire from occur. In other case the extent of damage can be reduced from virtually the entire shaft to only one cable tray, this can be done with the introduction of radiation shields in combination with either halogen free flame retardant cables or intumescent cable coatings.

Safe evacuation from the cable shaft is expected to be feasible even when none of the proposed measures are installed. However, with the introduction of these measures the time margin for safe evacuation is increased, this is considered to be a positive element.

Nomenklatur

A	Dimensionslös variabel för beräkning av inre temperatur, -
Bi	Biots tal, -
C	Önskad koncentration släckmedel, vol%
d	Diameter, m
D_0	Rökpotential, m^2/g
$D_{0,10log}$	Rökpotential, obs m^3/g
D_L	Optisk densitet per meter, m^{-1}
$D_{L,10log}$	Optisk densitet per meter, dB/m
E_{cr}	Kritisk dos, J/m^2
$FIGRA$	Tillväxtfaktor, kW/s
h	Effektivt värmeövergångstal, $W/K \cdot m^2$
ΔH_c	Förbränningsvärme, kJ/g
ΔH_{eff}	Effektiv förbränningsvärme, kJ/g
J_n	n:e Besselfunktionen av den första sorten
k	Termisk konduktivitet, W/m·K
m	Massa, g
$\dot{m}$	Massflöde, g/s
m_f	Massan förbränt material, g
m_i	Massan av producerat ämne, g
M	Molmassa, g/mol
p	Tryck, Pa
$\dot{Q}$	Effekt, kW
$\dot{q}''$	Termisk strålning, W/m^2
$\dot{q}''_{cr}$	Kritisk termisk strålningsnivå, ingen skada sker under denna strålningsnivå, W/m^2
$\dot{Q}_{max}$	Maximal effektutveckling, W/m^2
r	Radie av kabel, m
R	Allmänna gaskonstanten, 8,3145 J/mol·K
T	Temperatur, K
t_d	Tid till skada, s
t_s	Varaktighet för maximal effektutveckling, s
T_u	Omgivningstemperatur, K
T_0	Begynnelsetemperatur, K
V	Volym som brandgaser ansamlas i, m^3
V_e	Erforderlig gasmängd, m^3
V_{gas}	Volym av brandgaser, m^3
V_{schakt}	Volym av kabelschakt = 1278 m^3
V_u	Volym av utrymme som ska fyllas med släckmedel, m^3
y_i	Yield av producerat ämne i, -
α	Tillväxtfaktor, kW/s^2
β_n	n:e roten till ekvationen $\beta J_1(\beta) = AJ_0(\beta)$
κ	Termisk diffusivitet, m^2/s
θ	Dimensionslös temperatur = $(T-T_0)/(T_u-T_0)$, -
θ_0	Dimensionslös temperatur i centrum av kabeln, -
τ	Dimensionslös tid, -
χ	Förbränningseffektivitet, -

Innehåll

1 Inledning ... 1
1.1 Bakgrund ... 1
1.2 Syfte och mål ... 1
1.3 Frågeställningar ... 1
1.4 Avgränsningar ... 2
2 Tillvägagångssätt ... 3
2.1 Platsbesök ... 4
2.2 Litteraturstudie ... 4
2.3 Applicering av brandspridningsmodell till kabelschaktet ... 5
2.4 Brandteknisk utvärdering ... 5
2.5 Åtgärdsförslag ... 5
3 Objektsbeskrivning ... 7
3.1 Schaktet ... 7
3.2 Kabelidentifiering ... 8
3.3 Återställningstid ... 12
3.4 Antändningskällor ... 12
4 Litteraturstudie ... 15
4.1 Upplägg litteraturstudie ... 15
4.2 Sökmotorer ... 16
4.3 Resultat av litteratursökning ... 16
5 Analys av litteratur ... 21
5.1 Skadekriterier för kablar ... 21
5.2 Brandspridning ... 26
5.3 Utrymningsförhållanden ... 37
5.4 Sammanfattning litteraturstudie ... 39
5.5 Förslag på framtida forskning ... 41
6 Applicering av modeller till kabelschaktet ... 43
6.1 Skadekriterier ... 43
6.2 Brandspridning ... 45
6.3 Utrymningsförhållanden ... 51
6.4 Sammanfattning av modellering till schaktet ... 52
6.5 Sammanfattning osäkerheter ... 53
7 Brandteknisk utvärdering ... 61
7.1 Beräkningsmodeller ... 61
7.2 Val av beräkningsmodeller ... 63

7.3 Kalibrering FDS 67
7.4 Brandscenarion 75
7.5 Simuleringar och resultat 77
8 Åtgärdsförslag 121
8.1 Passiva system 121
8.2 Aktiva system 122
9 Bedömningar med införda åtgärder 125
9.1 Strålningsskärmar 125
9.2 Brandskyddsfärg 126
9.3 Halogenfria kablar 126
9.4 Detektorsystem 127
9.5 Inerteringssystem 127
9.6 Gassläcksystem 127
9.7 Sprinklersystem 128
9.8 Sammanfattning bedömning av åtgärder 130
10 Diskussion 133
10.1 Litteraturstudie 133
10.2 FDS 134
10.3 Resultat 135
10.4 Åtgärder 136
11 Slutsatser 137
Litteraturförteckning 141
Bilaga A Grundbeteckning enligt svensk standard SS 424 17 01 147
Bilaga B Kabelbeskrivningar och testresultat från FIPEC-projektet 149
Bilaga C Anpassning av effektutvecklingskurva för kabel 5 151
Bilaga D Modell för beräkning av inre temperatur hos en kabel 155
Bilaga E Beräkningar siktförhållanden 159
Bilaga F Beräkningar toxicitet 175
Bilaga G Beräkningar av utrymningstid från schaktet 185
Bilaga H FDS & Pyrosim 187

1 Inledning

Följande rapport är utförd som ett uppdrag från SSAB och är genomförd med avsikt analysera möjliga konsekvenser av en eventuell brand i ett centralt placerat kabelschakt på en av deras anläggningar. Analysen innefattar att göra bedömningar avseende skadeomfattning, återställningstider och personsäkerhet. Uppdraget innefattar även att utifrån erhållna resultat ge förslag på möjliga skadebegränsande åtgärder. Rapporten utgör det huvudsakliga momentet i kursen Examensarbete, VBRM01, som omfattar 22.5 högskolepoäng och utförs som en avslutande del av brandingenjörsutbildningen vid Lunds Tekniska Högskola. Syftet med arbetet är att kunna applicera nya kunskaper samt kunskaper erhållna under studietiden på en problemställning inom det brandtekniska området och lösa denna på ett ingenjörsmässigt sätt.

1.1 Bakgrund

Projektet utförs på uppdrag av SSAB varpå resultatet har för avsikt att fungera som ett beslutsunderlag avseende skydd av ett centralt placerat kabelschakt på den befintliga anläggningen. SSAB är en ledande producent av höghållfast stål och har omkring 9000 anställda i 45 länder. I Norden är SSAB den ledande leverantören av tunnplåt och i Nordamerika den ledande leverantören av grovplåt. I Sverige tillverkas stålämnen genom masugnsteknik där insatsvarorna främst är järnmalm och kol (SSAB, n d). Tillverkningen av råjärn i masugnarna är en process som kräver såväl el som styrning och noga övervakning. På anläggningen sker huvudstyrningen av detta genom ett centralt placerat kabelstråk vilket innefattar cirka 200 kablar och löper vertikalt i ett ungefär 70 meter högt schakt. Huvuddelen av kablarna är centrala för produktionen och skador på dessa skulle kunna innebära totalt produktionsstopp för hela anläggningen tills dess att kablarna är ersatta. Kabelstråket är beläget i ett trapphus vilket betyder att en brand i kablarna dessutom skulle kunna medföra sämre förutsättningar för utrymning. En eventuell brand i kabelschaktet skulle alltså kunna medföra konsekvenser avseende både produktion och personsäkerhet varför det är viktigt att på ett bra sätt kunna bryta det negativa förloppet vid ett tidigt skede.

1.2 Syfte och mål

Syftet med examensarbetet är att, med nuvarande kunskapsläge, utvärdera skadeomfattning och återställningstid vid en potentiell brand i kabelschaktet samt att ge SSAB ett beslutsunderlag för möjliga skadebegränsande åtgärder. Dessutom är syftet att med underlag från BBR19 utvärdera om utrymningsförhållandena i schaktet vid en eventuell brand är acceptabla eller ej.

Målet med arbetet är att bedöma konsekvenser avseende produktion och personsäkerhet vid en potentiell brand i kabelschaktet, både med dagens samt föreslagna skyddssystem. Dessutom är målet att kartlägga kunskapsläget för bränder i denna sorts kabelkonfigurationer samt tillämpligheten av de modeller som finns tillgängliga i dagens läge. Det ska även utvärderas vad som kan göras i framtida forskning för att minska osäkerheterna i dagens modeller.

1.3 Frågeställningar

För att uppfylla mål och syfte ovan kommer följande frågeställningar behandlas i rapporten:

1. Hur väl kan dagens modeller avseende kabelbrand tillämpas för denna applikation?
2. Vad kan göras för att minska osäkerheterna i dagens modeller?
3. Vad finns det för möjliga brandscenarion och vad kan vara troliga tändkällor?
4. Hur stora blir skadorna på kablarna (antal, skadad längd etc.) i händelse av brand?
5. Hur påverkas utrymningssäkerheten i schaktet i händelse av brand?
6. Vilka möjligheter finns att skydda detta utrymme?

7. Hur stora blir skadorna på kablarna i händelse av brand med föreslagna åtgärder?
8. Hur påverkas utrymningssäkerheten i schaktet i händelse av brand med föreslagna åtgärder?

1.4 Avgränsningar

Arbetet kommer endast att behandla potentiell brand- och brandgasspridning inom den påverkade brandcellen, ingen hänsyn kommer att tas till möjlig spridning utanför detta område. Arbetet är utfört med nuvarande kunskap och utan genomförande av provningar.

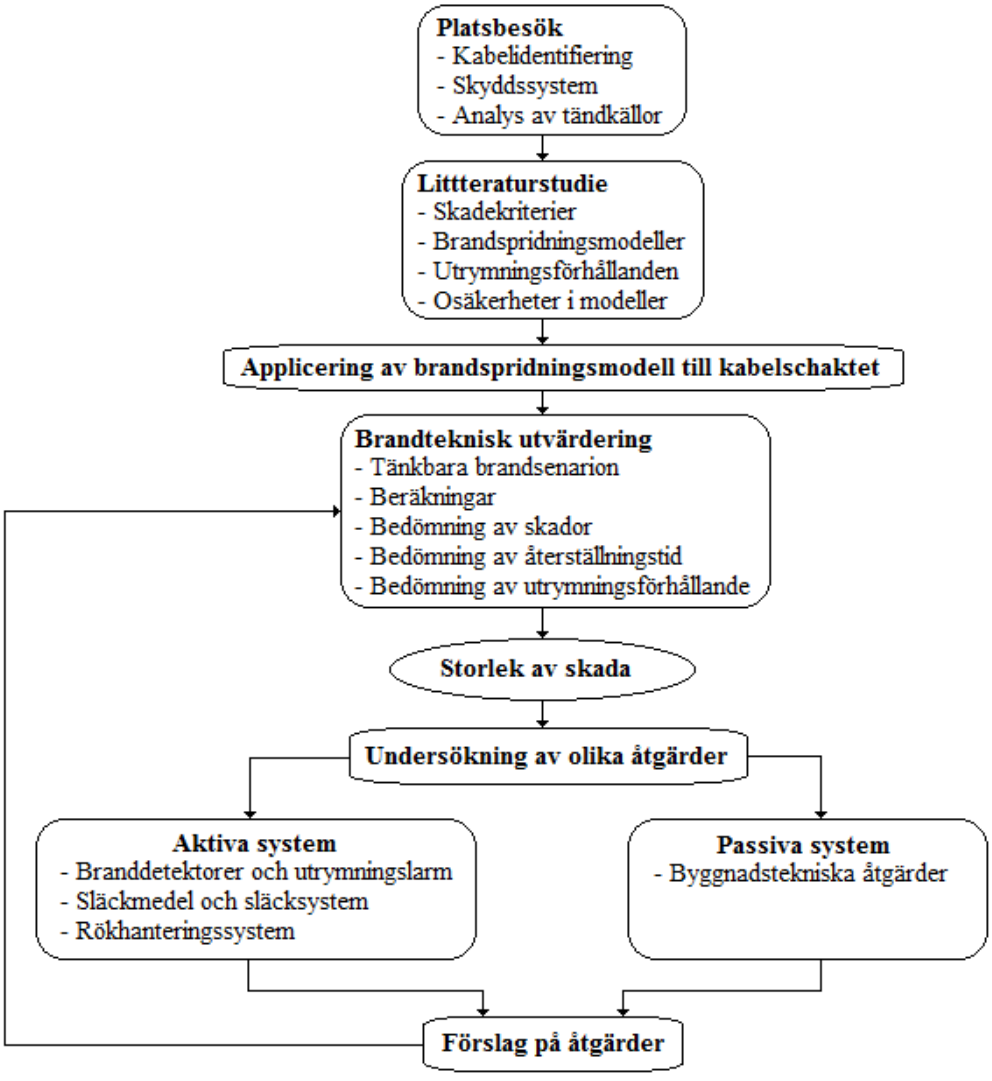
2 Tillvägagångssätt

Examensarbetet har utförts med en kombination av flera syften i enighet med *Att genomföra examensarbete* (Höst, Regnell & Runeson, 2006). Arbetet utfördes dels som en utforskande studie med fokus på modeller för kabelbränder samt förväntade återställningstider och dels som en problemlösande studie där fokus låg på att minska återställningstiderna och vid behov förbättra utrymningssäkerheten med diverse skyddsåtgärder. Metodiken som användes i arbetet kan liknas vid aktionsforskning vilket enligt Höst, Regnell & Runeson är ett arbete som har till syfte att förbättra något medan man undersöker det.

Aktionsforskning innefattar fyra steg (Höst, Regnell & Runeson, 2006)

- Planera - Identifiera problemet och dess orsaker
- Gör - Föreslå och genomför förbättringar
- Studera - Kontrollera att åtgärder lett till förbättring
- Lär - Om åtgärderna är lyckade ska den nya lösningen permanenteras

Figur 2.1 nedan åskådliggör flödesschemat som arbetet utförts efter.



Figur 2.1 Arbetets flödesschema

2.1 Platsbesök

Det första steget av arbetet innefattade ett platsbesök på den berörda anläggningen. Vid besöket utfördes en grundlig genomgång av schaktet. Det skedde identifiering av de olika sorters kablarna i schaktet vilket innefattade kabelmått, typer, mängder, orienteringar, spänningar, närhet till varandra, speciella konfigurationer med mera. Det skedde även identifiering av dagens skyddssystem, aktiva som passiva, samt en analys av troliga tändkällor.

2.2 Litteraturstudie

I arbetets inledande skede utfördes en omfattande litteraturstudie, detta för möjligheten att bilda en helhetsuppfattning om dagens kunskapsläge gällande brandbeteende och brandspridning i kablar. Litteraturstudien är en viktig del av arbetet då denna helhetsuppfattning är en värdefull utgångspunkt för fortsatt arbete och dessutom möjliggör påbyggnad av befintlig kunskap (Höst, Regnell & Runeson, 2006). Litteraturstudien utfördes med tre övergripande mål vilka redogörs för nedan.

2.2.1 Skadekriterier för kablar

Inledningsvis utfördes en analys av skadekriterier för olika kabelsorter. Med skadekriterier avses för vid vilka gränsvärden avseende temperatur och strålning en kabel fallerar, fallering definieras i detta fall som då en kabel kortsluter och/eller antänder. Skadekriterierna beskriver alltså vilka förhållanden som skall uppkomma för att en kabel ska sluta fungera. Avseende temperatur analyserades vilken inre respektive yttre temperatur en kabel kan uppnå innan den fallerar och vad gäller strålningspåverkan analyserades vid vilken infallande strålning kabelfallering sker. Dessa tre parametrar definieras därmed i detta fall som kablarnas skadekriterier. För att tydliggöra ges följande exempel: Fasta material antänds normalt, vid närvaro av en pilotlåga, vid en yttertemperatur på 300-400 °C (Bengtsson, 2001). Säg att det lägre värdet, det vill säga 300 °C, gäller för antändning av ett visst sorts material. Vid utvärdering om detta material antänder vid ett visst förutbestämt brandscenario sätts därmed 300 °C som materialets skadekriterium. Om temperaturen överstiger detta gränsvärde vid brandscenariot är skadekriteriet uppnått varpå materialet därmed anses antända.

2.2.2 Brandspridning

Därefter undersöktes vilka modeller avseende brandspridning för kablar som finns att tillgå i dagens läge samt hur applicerbara dessa är på de geometrier och konfigurationer av kablar som finns i schaktet. Det undersöktes även vilka osäkerheter som förekommer i modellerna samt hur dessa osäkerheter skulle kunna påverka resultaten vid utvärderingar av brandspridning i schaktet.

2.2.3 Utrymningsförhållanden

Vidare undersöktes hur utrymningsförhållanden, avseende sikt genom brandgaser och toxicitet i omgivande luft, påverkades vid en eventuell brand i schaktet. Det definierades diverse kriterium avseende sikt och toxicitet vilka skulle vara uppfyllda för att utrymning skulle accepteras varpå det beräknades tider tills dessa kriterier inte längre uppfylldes. Därefter utfördes en uppskattning av utrymningstiden som vidare jämfördes med tiderna till kritiska förhållanden, detta för att kunna utvärdera om säker utrymning skulle vara möjlig att genomföras innan kritiska förhållanden skulle uppstå.

2.2.4 Förslag till vidare forskning

Avslutningsvis gavs förslag på vad som kan göras vid framtida forskning för att minska osäkerheter hos dagens modeller avseende både skadekriterier och brandspridning hos kablar.

2.3 Applicering av brandspridningsmodell till kabelschaktet

Efter utvärdering av vilka skadekriterier som skall gälla för kablarna i schaktet samt vilken brandspridningsmodell och vilket beräkningssätt som anses ge de mest tillförlitliga resultaten applicerades detta till kabelschaktets konfigurationer. Vidare diskuterades kring de osäkerheter som uppkom vid denna applicering samt hur dessa osäkerheter skulle kunna hanteras vid fortsatta beräkningar avseende brandspridning i schaktet.

2.4 Brandteknisk utvärdering

Inledningsvis identifierades möjliga brandscenarion i schaktet, brandscenarierna valdes med målet att täcka in brandförlopp i större delen av de möjliga kabelkonfigurationer som finns i schaktet. Vidare utfördes utvärderingar av brandspridning vid de olika scenarierna med underlag av valda skadekriterier och brandspridningsmodeller erhållna från litteraturstudien. Utifrån dessa resultat drogs därefter slutsatser avseende skadeomfattningar, återställningstider samt utrymningsförhållanden för de olika brandscenarierna.

2.5 Åtgärdsförslag

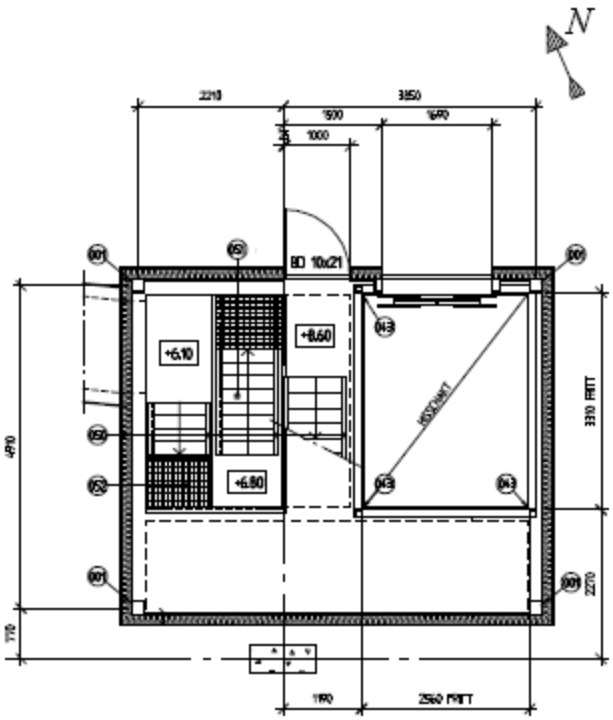
Med underlag av slutsatser från den brandtekniska utvärderingen presenterades sedan ett antal åtgärdsförslag, både passiva och aktiva system, vilka syftade till att förbättra brandskyddet gällande både skadeomfattning och utrymningssäkerhet. Vidare utvärderades vilken påverkan de olika föreslagna åtgärderna skulle kunna ha på skadeomfattningar, återställningstider och utrymningsförhållanden.

3 Objektsbeskrivning

Nedan följer inledningsvis en beskrivning av schaktet, dess skyddssystem och kabelkonfigurationer följt av en redogörelse av vilka kablar som återfinns i schaktet.

3.1 Schaktet

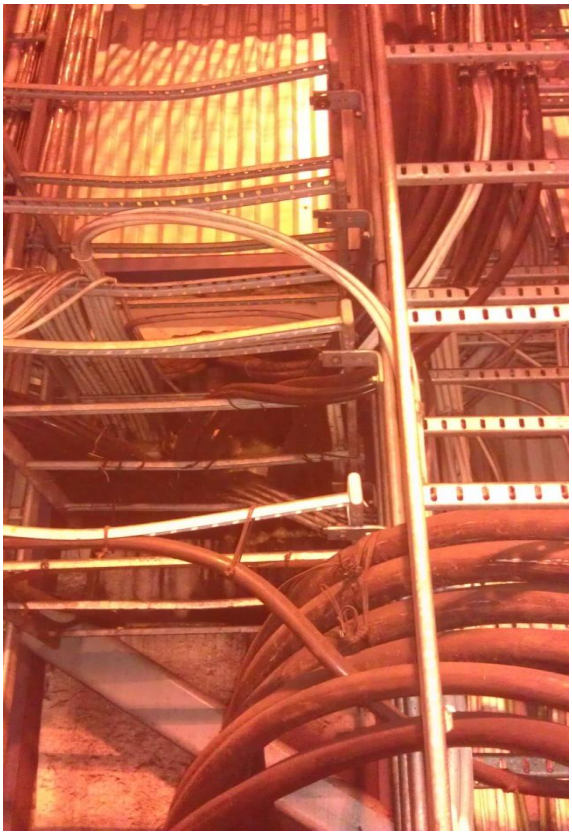
Schaktet är ungefär 70 meter högt och innefattar åtta våningsplan med dörrar ut till det fria på varje plan. Sex av dessa utgångar leder, via gångbroar, ut till masugnen. Det finns även ett hisschakt som löper hela vägen upp till toppen av schaktet. Figur 3.1 visar en genomskärning på hur schaktet ser ut ovanifrån.



Figur 3.1 Genomskärningsbild av schaktet sett ovanifrån (Reproducerat med tillåtelse av SSAB)

3.1.1 Kabelkonfiguration

Beroende på våningsplan skiljer sig kabelkonfigurationerna en hel del, detta då det vid varje våningsplan finns kablar som leder antingen ut eller in i schaktet. Kablarna i schaktet är monterade i både vertikala och horisontella konfigurationer. Längs dess ena hörn löper fyra kabelstegar från botten och hela vägen upp till toppen, dessa är placerade med 0,3 meters inbördes avstånd och är belägna uppe i vänstra hörnet i Figur 3.1, det vill säga i anslutning till trapporna. På varje våningsplan finns även horisontella kabelsektioner som löper antingen längs schaktets inre vägg (den vänstra väggen i figuren ovan) eller som leds in i schaktet (från vänster i figuren ovan). Två exempel på hur kabelkonfigurationerna kan se ut för olika våningsplan åskådliggörs i Figur 3.2 och Figur 3.3.



Figur 3.2 Kabelkonfiguration för en våning i schaktet

Figur 3.3 Kabelkonfiguration för en våning i schaktet

3.1.2 Dagens skyddssystem

Hela schaktet är en egen brandcell med ståldörrar av brandklassen A60 samt treglas isolerglasfönster placerade i brandcellsgränserna. De enda aktiva systemen som i dagens läge finns i schaktet är åtta stycken rökdetektorer placerade i närhet till kabelstegarna på olika plan samt en röklucka som är placerad mellan våningsplanen sex och sju, denna öppnas manuellt från bottenplanet. På anläggningen finns även en industribrandkår med en styrkeledare och tre brandmän vilka befinner sig på området mån-fre 7-16, vid en eventuell brand i schaktet ligger dess insatstid på ungefär 15 minuter[1]. Vad gäller insatstid för kommunens brandförsvar råder det dock en större osäkerhet. Den närmst belägna brandstationen ligger ungefär 2,5 kilometer från anläggningen, med antagandet att det tar ungefär 5 minuter att köra dit anses att en insatstid på 15-20 minuter ej vara orimlig.

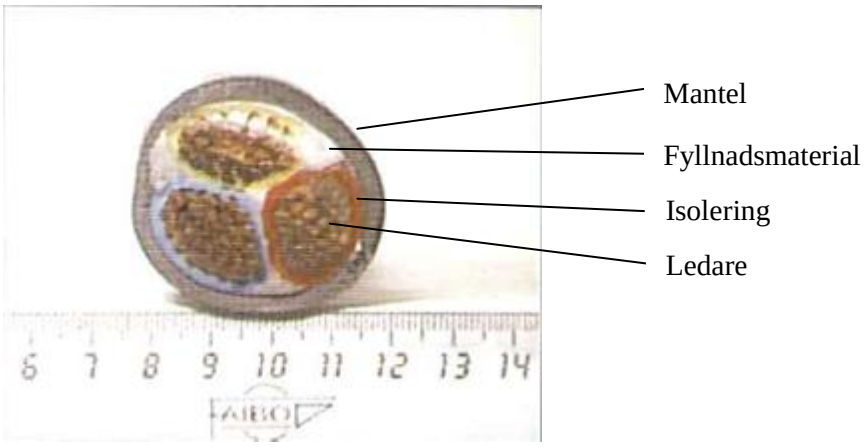
3.2 Kabelidentifiering

För att kunna avgöra när kablarna skadas i händelse av brand (skadekriterium) samt hur en brand utvecklas i den aktuella konfigurationen krävs information om vilka kablar som återfinns i schaktet samt vilken geometrisk konfiguration kablarna har (geometrisk placering). Därför utfördes en kabelidentifiering vid platsbesöket där både kabelkonfigurationer och kabelbeteckningar observerades.

De kabelsorter som återfinns i schaktet är främst av fyra olika typer: kraft-, styr-, signal- och installationskablar. Från bottenplan upp till plan 6 finns främst kraft- och styrkablarna, på plan 6 leds en stor del av kablarna vidare ut till ett hydraulikrum, övriga kablar finns placerade längs hela schaktets höjd. Utförligare information om uppbyggnad och egenskaper för de olika sorters kablarna återfinns i kommande avsnitt.

Elektriska kablar är, beroende på sort, uppbyggda av tre till fem huvudelement. Fyra av dessa åskådliggörs i Figur 3.4

[1] André Vestin, Säkerhetschef SSAB, mailkonversation, 2012-12-07



Figur 3.4 Genomskärningsbild av en elkabel (Grayson et al, 2000; reproducerat med tillåtelse av Interscience)

Det yttre skalet är kabelns mantel. Denna håller ihop kabeln och är dess mekaniska skydd, manteln skyddar alltså insidan från omgivningen. Innanför manteln sitter ett fyllnadsmaterial för att hålla ihop ledarna tätt, detta är ej inkluderat i alla kablar (Murphy, 2004). Vidare sitter isoleringen, denna omringar ledarna och fungerar som ytterligare skydd mot omgivningen. Isoleringen håller även inne eventuella värmeökningar som uppstår i ledaren. Det fjärde elementet är ledaren, denna består oftast av koppar eller aluminium (Murphy, 2004). För en stor del av svenska lågspänningskablar finns även ett femte element, skärmen, vilken kan bestå av koppartråd, aluminiumfolie, kopparband eller fintrådiga kopparflätor. Skärmen sitter runt om isoleringen och syftar till att minska de elektriska störningarna från omgivningen samt för att öka säkerheten för person och egendom (Murphy, 2004). I kommande avsnitt beskrivs hur kraft-, styr-, signal- och installationskablar vanligen är uppbyggda och inom vilket område de vanligen används. I nedanstående avsnitt betecknas styr-, signal och installationskablarna som övriga kablar.

3.2.1 Kraftkablar

Kraftkablar används inom industrin som distributions-, matar-, eller servicekablar. De förekommer i låg-, mellan- och högspänningskablar med driftspänningar på <1 kV för lågspänningskablar, 12-36 kV för mellanspänningskablar och >36 kV för högspänningskablar (Nexans, 2012a). Kablar med spänningar mellan 1-12 kV finns i varianterna 3 och 6 kV och går inte under något speciellt namn[2]. Kablar med driftspänningen 3 kV är väldigt ovanliga, om ens förekommande, i Sverige men har en uppbyggnad som medför att de i så fall kan klassas som lågspänningskablar medan 6 kV kablar ibland används i till exempel motorer, då i kombination med 12 kV kablar, och har en uppbyggnad som medför att de kan klassas som mellanspänningskablar[2]. Som ledarmaterial i kraftkablar används koppar eller aluminium, i dagens läge är andelen kraftkablar med aluminiumledare i Sverige ungefär 90 % (Draka, 2012a). I jämförelse med koppar har aluminiumledare ett antal tekniska nackdelar, bland annat oxideringsbenägenhet och sämre ledningsförmåga, dock medför ett lägre pris och större tillgång att aluminiumledare ändå är att föredra hos konsumenterna (Draka, 2012a). Isoleringsmaterialet består nästan uteslutande av PVC eller PEX, där den senare är tvärbunden polyeten och därmed en halogenfri variant av isolering (Draka, 2012a). Manteln består vanligtvis av PE (polyeten), PVC (polyvinylklorid) eller HFFR (Halogen-Free Flame Retardant). PE-mantlade kablar är inte självslocknande och sprider brand vilket medför att dessa förläggs i områden utan brandrisk, dock är de mekaniska egenskaperna bra vilket gör att de tål både kyla och nedgrävning (Draka, 2012a). PVC-mantlade produkter kan däremot placeras i områden där det finns en brandrisk då materialet innehåller halogener vilket medför att det är självslocknande. Dock medför halogenerna att det vid en brand utvecklas en kraftig svart rök som både är giftig och korrosiv (Draka, 2012a). Därför har det även

[2] Aron Andersson, Nexans, telefonkonversation 2012-12-02

utvecklats halogenfria alternativ, HFFR-mantlade kablar, vilka har halogenfria flamskyddade mantlar av polyeten (Draka, 2012a).

HFFR-mantlade kablar har likande brandspridningsegenskaper som PVC men utvecklar vid brand istället en tunn vit rök som varken är giftig eller korrosiv. Denna variant är dock både dyrare och mer känslig för yttre mekanisk påverkan än de andra sorterna (Draka, 2012a).

I kabelschaktet förekommer kraftkablar av typerna låg- och mellanspänningskablar. Lågspänningskablarna på anläggningen förekommer i olika varianter, med märkningar som följer:

- AKKJ 0,6/1 kV 3*150/41 F4B
- AKKJ 0,6/1 kV 3*185/57 F4B
- AKKJ 0,6/1 kV 3*240/72 F4B

Det finns även en mellanspänningskabel i schaktet, denna med beteckningen:

- AXQJ 12 kV LT 3*150 F4C

De fyra inledande bokstäverna är en märkning som talar om hur kablarna är uppbyggda, denna märkning är en grundbeteckning enligt svensk standard SS 424 17 01 (Konsultsupporten, 2007). Den första bokstaven anger vilken typ av ledare som avses, den andra bokstaven isoleringstyp, den tredje bokstaven typ av ledningshölje eller annan konstruktionsdetalj och den fjärde bokstaven anger konstruktionsdetalj eller användning (Konsultsupporten, 2007). Utförligare beskrivningar av hur kablar namnges enligt SS 424 17 01 finns att tillgå i Bilaga A. Nästa steg i märkningen avser kablarnas driftspänning, den första siffran anger spänning mellan fas och nolla och den andra anger spänningen mellan faserna (CSE Cables, n d). Efter detta anges antal ledare i kabeln följt av ledarnas areor i mm^2 samt skärmens area i mm^2 (Draka, 2012b). Den sista beteckningen anger kabelns brandspridningsklass, detta behandlas i senare kapitel.

För lågspänningskablarna anger grundbeteckningen AKKJ att kabeln är aluminiumledad, PVC-isolerad, PVC-mantlad och kan förläggas i mark (Konsultsupporten, 2007). Driftspänningen, det vill säga spänningen mellan faserna, är 1 kV för alla ovan nämnda lågspänningskablar. Alla ovanstående lågspänningskablar har tre stycken ledare, dock av olika storlekar, och brandspridningsklassen F4B.

Mellanspänningskabelns grundbeteckning, AXQJ, anger att även denna kabel har en aluminiumledare och kan förläggas i mark, skillnaden är att kabeln är PEX-isolerad och HFFR-mantlad (Draka, 2012c). Detta betyder därmed att kabeln är halogenfri. Den har driftspänningen 12 kV, 3 stycken ledare med respektive area 150 mm^2 och brandspridningsklassen F4C.

I Tabell 3.1 nedan åskådliggörs data för de kraftkablar som förekommer i schaktet.

Tabell 3.1 Materialdata för kraftkablarna i schaktet (Nexans, 2012b; Draka, 2012b)

Grundbeteckning	Ledarantal * area mm^2	Driftspänning [kV]	Ytterdiameter [mm]	Brandspridningsklass	Mantel	Isolering	Fyllnadsmaterial	Ledare	Halogenfri
AKKJ	3*150/41	1	42,1	F4B	PVC	PVC	-	Aluminium	Nej
AKKJ	3*185/57	1	46,8	F4B	PVC	PVC	-	Aluminium	Nej
AKKJ	3*240/72	1	51,5	F4B	PVC	PVC	-	Aluminium	Nej
AXQJ	3*150	12	59,0	F4C	HFFR	PEX	-	Aluminium	Ja

3.2.2 Övriga kablar

Övriga kablar som finns i schaktet innefattar installations-, signal- och styrkablar. Installationskablar används vid signalöverföring och elinstallationer och finns i två huvudvarianter, med eller utan mantel (Draka, 2012d). Kablar utan mantel kan inte förläggas i öppen miljö utan måste förläggas i rör eller motsvarande då dessa har ett dåligt mekaniskt skydd. De kablar som har en mantel kan däremot förläggas i öppen miljö då manteln utgör det mekaniska skyddet (Draka, 2012d). Ledarmaterialet består alltid av koppar medan isolerings- och mantelmaterial både finns i PVC- och halogenfria varianter (Draka, 2012d).

De installationskablar som återfinns i schaktet har beteckningar som följer:

- FQLQ 450/750 V F3
- FKLK 300/500 V F4C

Beteckningen FQLQ anger en kopparledad, HFFR-isolerad, aluminiumbandad och HFFR-mantlad kabel. Med aluminiumbandad menas att kabeln har en skärm av plastbelagt aluminiumband (Konsultsupporten, 2007). Den har driftspänningen 750 V och brandspridningsklassen F3. Beteckningen FKLK anger en kopparledad, PVC-isolerad, aluminiumbandad och PVC-mantlad kabel (Konsultsupporten, 2007). Den har driftspänningen 500 V och brandspridningsklassen F4C.

Även signalkablar används vid signalöverföring och elinstallationer. Dess ledarmaterial består av koppar och det finns även i detta fall varianterna med eller utan skärm. Isolerings- och mantelmaterialet består av antingen av PVC- eller halogenfritt material (Nexans, 2012c).

De signalkablar som återfinns i schaktet har beteckningar som följer:

- FKAR-PG 150/250 V F3
- FQAR-PG 150/250 V F3
- UNITRONIC-LiYCY

Beteckningen FKAR-PG anger en kopparledad, PVC-isolerad, aluminiumskärmad och PVC-mantlad kabel (Konsultsupporten, 2007). De två sista bokstäverna i märkningen, PG, anger att kabeln är kablad i par. Beteckningen FQAR-PG anger en halogenfri variant av föregående kabel. Båda kablarna har driftspänningen 250 V och brandspridningsklassen F3 (Nexans, 2012d). UNITRONIC-LiYCY är en kopparledad, PVC-isolerad, kopparskärmad och PVC-mantlad signalkabel. Den har driftspänningen 250 V och brandspridningsklassen F2 (Lappusa, 2012).

Styrkablar används för kontroll-, manöver- och signaländamål med driftsspänningar på 500 V (Draka, 2012e). Som ledarmaterial för styrkablarna används endast koppar men i övrigt finns det samma varianter på både isolerings- och mantelmaterial som hos installations- och signalkablarna (Draka,2012e).

De styrkablar som återfinns i schaktet förekommer i två varianter:

- FKFR 300/500 V F3
- ÖLFLEX 300/500 V F2

Beteckningen FKFR anger en kopparledad, PVC-isolerad kabel med ett ledningshölje av flätade koppartrådar samt att det är en styr- eller signalkabel (Konsultsupporten, 2007). Kabeln har driftspänningen 500 V och brandspridningsklassen F3 (Draka, 2012e). ÖLFLEX är en kopparledad

kontrollkabel med PVC-isolering och PVC-mantel. Den har driftspänningen 500 V och brandspridningsklassen F2 (Miltronic, n d).

I Tabell 3.2 åskådliggörs data för övriga kablar som förekommer i schaktet.

Tabell 3.2 Materialdata för övriga kablar i schaktet (Konsultsupporten, 2007; Nexans, 2012d; Lappusa, 2012; Draka, 2012e; Miltronic, n d)

Grund beteckning	Ledaranta l * area mm^2	Drift spänni ng [V]	Ytter diame ter [mm]	Brands pridnin gsklass	Mantel	Isolering	Fyllnads material	Ledare	Halogenfri
FQLQ	-	750	10-16	F3	HFFR	HFFR	-	Koppar	Ja
FKLK	-	500	11-17	F4C	PVC	PVC	PVC	Koppar	Nej
FKAR-PG	-	250	6-21	F3	PVC	PVC	-	Koppar	Nej
FQAR-PG	-	250	6-21	F3	HFFR	PEX	-	Koppar	Ja
UNITRONIC-LiYCY	-	250	5-9	F2	PVC	PVC	-	Koppar	Nej
FKFR	-	500	14-23	F3	PVC	PVC	PVC	Koppar	Nej
ÖLFLEX	-	500	7-27	F2	PVC	PVC	-	Koppar	Nej

I tabellen ovan anger kolumnen ytterdiameter de kabelstorlekar som finns tillgängliga på marknaden. I schaktet finns de olika kabelsorterna i flera olika storlekar varför en enda diameter för respektive kabelsort ej kan definieras.

3.3 Återställningstid

Tid för ersättning av kablar i schaktet skiljer sig framförallt beroende på hur de är monterade. För kablar monterade på en kabelstege ligger ersättningstiden på ungefär 1.5 dygn, detta gäller oberoende av antal kablar på kabelstegen som ska ersättas. Ersättning av en kabelsektion, det vill säga ett knippe kablar, som inte är monterade på en kabelstege tar ungefär 8 timmar, även detta oberoende på antal kablar. Vid ett scenario då huvuddelen av alla kablar i schaktet måste bytas kan processen ta flera månader. Alla kabelsorter som finns i schaktet finns i lager på anläggningen vilket medför att ersättningsprocessen kan inledas direkt då det upptäcks en skada på någon eller några kablar. Tiden för kabelersättning ökas inte heller då det finns behov av sanering av schaktet, detta då både sanering och kabelersättning kan ske simultant[3]. Dessa återställningstider är baserade på hur kabelkonfigurationen i schaktet ser ut i dagens läge, om det skulle ske en ombyggnation och kabelkonfigurationerna vid detta fall skulle skilja sig från de befintliga kan även återställningstiderna bli annorlunda.

3.4 Antändningskällor

Den vanligaste brandorsaken för kablar är överhettning eller kortslutning i befintliga eller intilliggande kablar. Vad gäller tändkällor av elektrisk karaktär kan antändning av kablar bland annat ske genom följande elektriska fel (Widlund, 2009):

- Glappkontakt

  Glappkontakt innebär att det uppkommer ett elektriskt fel i kretsen och uppstår då det är dålig kontakt mellan metallerna i en koppling eller liknande. Detta kan orsaka en ljusbåge, som är en kraftig elektrisk urladdning, vilket därmed kan orsaka brand i glappkontakten.

[3] Michael Nilsson, Elektriker SSAB, muntligt samtal 2012-08-24

- Överbelastning

  Detta innebär att det i en ledning går en högre ström än vad denna är ämnad för. En för hög ström ska leda till att de säkringar som avsäkrar en elektrisk krets löser ut, men om dessa säkringar är för stora jämfört med ledningsarean kan det innebära en brandrisk.

- Överhettning

  Detta innebär att det av någon anledning uppstår höga temperaturer i ledningen vilket därmed kan orsaka brand.

- Överledning

  Detta innebär att det blir ett fel i en krets vilket leder till att strömmen tar en annan väg än vad det är tänkt att den ska göra. Denna kategori innefattar även kortslutning vilket innebär att en hög ström och temperatur uppstår i en kontaktpunkt vilket därmed kan orsaka en skada på elledaren.

- Överspänning

  Detta innebär att en ledare eller utrustning utsätts för en högre spänning än vad den är dimensionerad för. Detta kan bland annat orsakas av åska, ledarbrott eller statisk elektricitet.

Det finns även fler tänkbara brandorsaker som mindre brinnande föremål, till exempel brand i papperskorg, eller större lokala bränder, till exempel brand vid oljeläckage (Göransson, 1992). Även anlagd brand eller någon form av heta arbeten, som till exempel svetsning eller liknande kan vara tänkbara antändningskällor.

4 Litteraturstudie

Då ett av målen med arbetet är att göra en bedömning av skadeomfattningar och återställningstider i schaktet till följd av brand krävs information om hur kablarna beter sig då de är brandutsatta. Det behövs information om vid vilken yttre brandpåverkan kablarna fallerar, det vill säga kortsluter och/eller antänder. Detta definieras som kablarnas skadekriterier och avser för vilken yttre påverkan av strålning och/eller temperatur det föreligger risk för kortslutning eller antändning av kablarna. Det behövs dessutom information om hur en potentiell brandspridning i kablarna kan se ut. Detta undersöks genom att söka information om hur brandtillväxten ser ut för diverse kabelkonfigurationer vilket sedan kan kopplas till kriterier för antändning av närliggande kablar. Då även utrymningssäkerheten skall utvärderas analyseras även vilka kriterier som skall vara uppfyllda för att utrymning skall kunna ske. I följande kapitel undersöks därför tidigare forskning som gjorts inom ramen för antändning och brandspridning i kablar samt hur väl resultat från dessa forskningsinsatser kan approximeras till de förhållanden som råder i schaktet. Nedan beskrivs upplägget för litteraturstudien, vilka sökmotorer som använts samt vilka dokument som hittats. I kommande kapitel diskuteras kring resultat och tillämpligheten av dessa till befintliga kablar och dess konfigurationer. Det diskuteras även kring de osäkerheter som förekommer samt vad som kan göras för att minska dessa.

4.1 Upplägg litteraturstudie

Litteraturstudien är utförd med de två inledande frågeställningarna som övergripande mål, dessa är som följer:

1. Hur väl kan dagens modeller avseende kabelbrand tillämpas för denna applikation?
2. Vad kan göras för att minska osäkerheterna i dagens modeller?

För att uppfylla den första frågeställningen kommer det inledningsvis sökas information om vilka skadekriterier som kan användas för de befintliga kablarna i schaktet, det vill säga vid vilka inre respektive yttre kabeltemperaturer samt vid vilka infallande strålningsnivåer kablarna bedöms att fallera. Vidare utvärderas vilka modeller för brandspridning i kablar vid olika konfigurationer som finns att tillgå samt hur tillämpliga dessa är för den befintliga konfigurationen i schaktet. Avslutningsvis analyseras vilka kriterier som skall gälla för säker utrymning samt vilka beräkningsmodeller som skall användas vid fortsatta bedömningar avseende utrymningsförhållandena i kabelschaktet.

För att uppfylla den andra frågeställningen granskas vilka osäkerheter som uppkommer vid val av skadekriterier, brandspridningsmodeller och kriterier för säker utrymning varpå det ges förslag på framtida forskning som skall syfta till att minska de identifierade osäkerheterna.

Som underlag för litteraturstudien avseende brandspridning används litteratur från ett projekt kallat FIPEC (Fire Performance of Electric Cables). Detta var ett EU-finansierat forskningsprogram vilket utfördes för att utveckla metoder avseende mätningar av kablars brandbeteende. I forskningsprogrammet utfördes nästan 2000 experiment i fyra olika skalor med provexemplar vilka representerade ett stort spektrum av brandbeteenden (Grayson et al, 2000). Detta kompletteras med en litteratursökning i diverse sökmotorer där specifika nyckelord använts, detta redovisas i kommande avsnitt.

4.2 Sökmotorer

Sökmotorer som använts för litteratursökningen åskådliggörs i Tabell 4.1

Tabell 4.1 Sökmotorer vilka använts vid litteratursökningen

Sökmotor	URL-adress	Beskrivning
Summon	http://lu.summon.serialssolutions.com/sv-SE/	Lunds Universitets Bibliotek
LTH Brandteknik	http://brand.lth.se	Avdelningen för brandteknik och riskhantering vid Lunds Tekniska Högskola
UL	http://www.ul.com	Underwriters Laboratories, globalt säkerhets- och certifikationsföretag
SP	http://www.sp.se	SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut
Google	http://www.google.com	Global sökmotor
FM Global	https://www.fmglobal.com/	Globalt försäkringsbolag
NIST	http://www.nist.gov	Amerikanskt forskningsföretag
Web of Science	http://www3.ub.lu.se/infokompetens/bibl/ahci.html	Databas innehållande artikelreferenser från internationella vetenskapliga tidskrifter

Det genomfördes sökningar på följande sökord: Cable failure, cable damageability, brandförlopp kabel, flame spread cable, fire performance cable, cable burning behavior, cable fire propagation, THIEF cable, cable fire toxic products, combustion products poly vinyl chloride, toxicity pvc, produktion brandgaser

4.3 Resultat av litteratursökning

Sökningen resulterade i 26 artiklar som behandlar skadekriterier, brandspridning samt toxicitet vid bränder i kablar. I Tabell 4.2 nedan åskådliggörs vilka artiklar som hittats, vilken databas som använts, vilket år de publicerats, sökord, var artikeln publicerats samt vilket område artikeln behandlar. De exakta referenserna till artiklarna finns i avsnittet "Referenser".

Tabell 4.2 Artiklar som påträffats vid litteratursökningen

Nr	Författare	Titel	År	Sökord	Publikation	Källa	Område
1	Murphy, J	*Determination of Failure Criteria for Electric Cables Exposed to Fire for Use in a Nuclear Power Plant Risk Analysis*	2004	Cable failure	Worcester Polytechnic Institute	Google	Skadekriterier
2	Andersson, P, Persson, B	*Performance of Cables Subjected to Elevated Temperatures*	2001	Cable failure	SP	SP	Skadekriterier
3	Andersson, P, Van Hees, P	*Performance of Cables Subject to Thermal*	2000	Cable failure	SP	SP	Skadekriterier

		Radiation					
4	U.S. Nuclear Regulatory Commission	*EPRI/NRC-RES, Fire PRA Methodology for Nuclear Power Facilities, Volume 2: Detailed Methodology*	2005	Nureg 6850	NRC	Google	Skadekriterier
5	Lukens, L.L.	*Nuclear Power Plant Electrical Cable Damageability Experiments*	1982	Electrical cable damageability	NRC	Google	Skadekriterier
6	Nystedt, F, Frantzich, H	*Kvalitetsmanual för brandtekniska analyser vid svenska kärntekniska anläggningar*	2011	Nystedt	Brandteknik och Riskhantering, Lunds Tekniska Högskola	Summon	Skadekriterier
7	Babrauskas, V	*Mechanism and Modes for Ignition of Low-Voltage PVC-wires, Cables, and Cords*	2005	Cable ignition temperature	Fire and Materials	Google	Skadekriterier
8	Göransson, U	*Brandförlopp i kabelstråk*	1992	Brandförlopp kabel	SP	Google	Brandspridning
9	Gyppaz, F	*Flame Spread Behaviour of Electric Cables: Round-robin characterization of the IEC/EN 60332-1 tests*	2012	Cable flame spread	Journal of Fire Sciences	Web of Science	Brandspridning
10	Sundström, B	*The Development of a European Fire Classification System for Building Products, Test Methods and Mathematical Modelling*	2007	Cable failure	SP	SP	Brandspridning
11	Babrauskas, V, Peacock, R.D., Braun, E, Bukowski, R.W., Jones, W.W.	*Fire performance of wire and cable: Reaction-to-Fire Tests-A Critical Review of the Existing Methods and of New Concepts*	1991	Fire performance of wire and cable	NIST	NIST, Google	Brandspridning
12	Tewarson, A, Khan M.M.	*A New Standard Test Method for the Quantification of Fire Propagation Behavior of Electrical Cables*	1992	Cable fire propagation	Fire Technology	Google	Brandspridning

		Using Factory Mutual Research Corporation's Small-Scale Flammability Apparatus					
13	Van Hees, P, Thureson, P	*Burning behaviour of cables - Modelling of flame spread*	1996	Cable burning behavior	SP	Summon, Google	Brandspridning
14	Axelsson, J, Van Hees, P, Blomqvist, P	*Cable fire in difficulty accessible areas*	2002	Cable fire	SP	Summon	Brandspridning
15	FM Global	*Test standard for cable fire propagation*	1994	Cable fire propagation	FM Global	FM Global	Brandspridning
16	FM Global	*Test standard for cable fire propagation*	2009	Cable fire propagation	FM Global	FM Global	Brandspridning
17	Underwriters Laboratories Inc.	*Vertical tray fire propagation and smoke-release test for electrical and optical fiber cables*	2007	Cable fire propagation	UL	Google	Brandspridning
18	Breulet, H, Steenhuizen, T	*Fire testing of cables: Comparison of SBI with FIPEC/Europacable tests*	2005	Cable fire	Polymer Degradation and Stability	Web of science	Brandspridning
19	U.S. Nuclear Regulatory Commission	*Cable response to live fire (CAROLFIRE) Volume 3: Thermally-Induced Electrical Failure (THIEF) model*	2007	THIEF cable	NRC	Google	Brandspridning
20	Van Hees, P, Axelsson, J, Green, A.M., Grayson, S.J.	*Mathematical modelling of fire development in cable installations*	2001	Cable flame spread	SP	Web of science	Brandspridning
21	Huggett, C, Levin, B.C.	*Toxicity of the Pyrolysis and Combustion Products of Poly (Vinyl Chlorides): A Literature Assessment*	1987	Combustion products poly vinyl chloride	Fire and Materials	Google	Toxicitet
22	Dervos, C.T., Vassiliou, P	*Effects of Fire Combustion Products on Degradation of Cable Insulation*	1998	Combustion products cable	Journal of Fire Sciences	Summon	Toxicitet
23	Doe, J.E.	*The Combustion*	1987	Combustion	Journal of	Summon	Toxicitet

		Toxicology of Polyvinylchloride revisited		products polyvinylchloride	Fire Sciences		
24	Hasegawa, H.K.	*Characterization and toxicity of smoke*	1990	Toxicity pvc	American Society of Testing and Materials	Web of science, Google	Toxicitet
25	Hull, T.R., Krzysztof, L, Pezzani, M, Messa, S	*Comparsion of toxic product yields of burning cables in bench and large-scale experiments*	2008	Cable fire toxic products	Fire Safety Journal	Web of science	Toxicitet
26	Larssson, I, Lönnemark, A	*Utsläpp från Bränder - Analyser av Brandgaser och Släckvatten*	2002	Produktion brandgaser	SP	Google	Toxicitet

Efter genomläsning gallrades ett antal artiklar bort. De artiklar som gallrades bort ansågs ej fokusera på de specifika områden som ansågs vara intressanta för arbetet. Detta ledde slutligen till de artiklar som använts vid litteraturstudien, dessa åskådliggörs i Tabell 4.3 nedan.

Tabell 4.3 Artiklar vilka används vid det fortsatta arbetet

Nr	Författare	Titel	År	Sökord	Publikation	Källa	Område
1	Murphy, J	*Determination of Failure Criteria for Electric Cables Exposed to Fire for Use in a Nuclear Power Plant Risk Analysis*	2004	Failure criteria cables	Worcester Polytechnic Institute	Google	Skadekriterier
2	Andersson, P, Persson, B	*Performance of Cables Subjected to Elevated Temperatures*	2001	Cable failure	SP	SP	Skadekriterier
3	Andersson, P, Van Hees, P	*Performance of Cables Subject to Thermal Radiation*	2000	Cable failure	SP	SP	Skadekriterier
4	U.S. Nuclear Regulatory Commission	*EPRI/NRC-RES, Fire PRA Methodology for Nuclear Power Facilities, Volume 2: Detailed Methodology*	2005	Nureg 6850	NRC	Google	Skadekriterier
5	Lukens, L.L.	*Nuclear Power Plant Electrical Cable Damageability Experiments*	1982	Electrical cable damageability	NRC	Google	Skadekriterier
	Nystedt, F, Frantzich, H	*Kvalitetsmanual för brandtekniska analyser vid svenska kärntekniska anläggningar*	2011	Nystedt	Brandteknik och Riskhantering, Lunds Tekniska Högskola	Summon	Skadekriterier
6	Göransson, U	*Brandförlopp i kabelstråk*	1992	Brandförlopp kabel	SP	Google	Brandspridning

7	Axelsson, J, Van Hees, P, Blomqvist, P	*Cable fire in difficulty accessible areas*	2002	Cable fire	SP	Summon	Brandspridning
8	Breulet, H, Steenhuizen, T	*Fire testing of cables: Comparison of SBI with FIPEC/Europacable tests*	2005	Cable fire	Polymer Degradation and Stability	Web of science	Brandspridning
9	Larssson, I, Lönnemark, A	*Utsläpp från Bränder - Analyser av Brandgaser och Släckvatten*	2002	Produktion brandgaser	SP	Google	Toxicitet
10	Doe, J.E.	*The Combustion Toxicology of Polyvinylchloride revisited*	1987	Combustion products polyvinylchloride	Journal of Fire Sciences	Summon	Toxicitet

5 Analys av litteratur

Inledningsvis analyseras tidigare utförda undersökningar avseende skadekriterier för kablar. Skadekriterierna definieras som för vilken lägsta infallande strålning respektive inre och yttre temperaturer som orsakar kortslutning och/eller antändning av kablar. En infallande strålning eller temperaturer över dessa gränsvärden medför en föreliggande risk för kortslutning och/eller antändning. Därefter diskuteras begränsningar och osäkerheter i resultat från dessa undersökningar.

Vidare utvärderas olika metoder för att analysera brandspridning vid eventuella kabelbränder. Utvärderingen utförs genom att analysera testmetoder och tidigare försök avseende brandspridning för att vidare diskutera kring intressanta resultat från dessa testmetoder och försök. Därefter analyseras vilka begränsningar och osäkerheter som föreligger hos de diskuterade modellerna.

Vidare diskuteras kring kriterier för utrymning och vilka kriterier kommer att användas vid detta fall för att därefter sammanfattas resultaten från litteraturstudien. Det diskuteras kring vilka parametrar som har inverkan på skadekriterierna och brandspridningen samt vilka begränsningar och osäkerheter som uppkommer vid användandet av dessa resultat. Avslutningsvis diskuteras vad som kan utföras i framtida forskning för att minska osäkerheterna i dagens modeller.

5.1 Skadekriterier för kablar

Vid en brand i anslutning till en kabel blir denna utsatt för både termisk strålning och en förhöjd temperatur i omgivande luft. Beroende på kabelns placering i förhållande till branden kan kortslutning och/eller antändning ske via infallande strålning mot kabeln eller genom en direkt påverkan från branden. Kortslutning kan även ske via förhöjd temperatur inuti kabeln (Murphy, 2004). För bedömningar av vilka skadekriterier som skall gälla för kablarna ska därmed både den infallande termiska strålningen samt den omgivande temperaturen tas i beaktning. I följande avsnitt redogörs inledningsvis för två metoder som kan användas för mätningar av skadekriterier avseende termisk strålning och temperatur. Vidare redovisas resultat från diverse försök med olika kablar avseende dessa parametrar för att slutligen diskutera begränsningar gällande både testmetoderna och dess resultat.

Beroende på mantel- och isoleringsmaterial delas kablar ofta in i två övergripande kategorier, klassade (thermosetting plastics) och oklassade (thermoplastics) kablar (Murphy, 2004). Dessa två grupper beter sig olika då de exponeras för brand, de klassade kablarna blir stela och förkolnas medan de oklassade kablarna blir mjuka, deformeras och smälter (Murphy, 2004).

Klassade kablar är kablar med mantel och isolering av tvärbunden polyeten (PEX/XLPE), etylenpropylengummi (EPR) eller silikongummi, dessa mantel- och isoleringsmaterial är alla halogenfria. Oklassade kablar är kablar med mantel och isolering av polyetylen (PE), polyvinylklorid (PVC), teflon (PTFE) eller polypropylen (PP), inga av dessa material är halogenfria (Murphy, 2004).

5.1.1 Testmetoder för utvärdering av skadekriterier

De testmetoder som främst används för att göra bedömningar av skadekriterier avseende strålning och temperatur är benämnda termisk strålningspåverkan och temperaturpåverkan (Murphy, 2004).

Den första metoden innebär att kablarna utsätts för termisk strålning, från till exempel en konkalorimeter, med konstanta strålningsnivåer. Kablarna utsätts för denna strålningsnivå under en viss tid eller tills dess att de antänds, kortsluts eller både och (Murphy, 2004).

Den andra metoden innebär att kablarna placeras i en ugn där de värms upp till en viss temperatur. Provningen kan utföras på två sätt, steady state-försök eller temperaturkontrollerade försök. Vid steady

state-försöken hålls temperaturen konstant tills dess att kablarna kortsluts. Vid de temperaturkontrollerade försöken hålls temperaturen konstant en viss tid, om kablarna ej kortslutits under denna tid höjs temperaturen för att på nytt hållas konstant under lika lång tid. Denna procedur fortgår tills dess att kablarna kortsluter (Murphy, 2004).

Det finns även andra metoder för analyser av kabelfallering. En modell för hur kablar reagerar när de utsätts för termisk strålning framarbetad av Frank & Moeini (1986) indikerar att det finns en kritisk strålningsnivå, $\dot{q}''_{cr}$, vid vilken en kabel kan utsättas för i obegränsad tid. Vid strålningsnivåer över denna kritiska strålningsnivå kan tiden till skada beräknas från kabelns kritiska dos, E_{cr}, i enighet med ekvation 5.1.

$$E_{cr} = t_d \cdot (\dot{q}'' - \dot{q}''_{cr}) \qquad \text{Ekvation 5.1}$$

Denna modell har dock kritiserats då ekvationen tagits fram utifrån höga strålningsnivåer, detta då den är framtagen för att användas vid beräkningar av främst radioaktiv strålning. Det uppkommer även ett problem vid beräkningar med ekvationen ovan då det är nettostrålningen, vilken beror på temperaturen av det absorberande materialet, som skall sättas in i formeln (Andersson & Persson, 2001). Andersson & Van Hees (2000) samt Andersson & Persson (2001) utförde försök med termisk strålningspåverkan och temperaturpåverkan där erhållna resultat jämfördes med resultat från beräkningar med ovanstående ekvation. Det drogs slutsatsen att spridningen i resultaten för den kritiska dosen var för stor för att ekvationen skulle kunna vara av någon praktisk användning (Andersson & Persson, 2001). Med hänsyn till detta kommer beräkningar med ovanstående ekvation ej utföras i arbetet.

Nedan redovisas inhämtade resultat från de två ovan nämnda testmetoderna för bedömningar av skadekriterier hos kablar.

5.1.2 Termisk strålning

I rapporten "Performance of Cables Subjected to Thermal Radiation" av Andersson & Van Hees (2000) utvärderades försök i konkalorimeter på olika sorters kablar där tider till kortslutning mättes beroende på infallande termisk strålning. Försöken innefattade två sorters lågspänningskablar samt två sorters datakablar, försöken utfördes vid både raka och böjda konfigurationer. Den ena lågspänningskabeln var halogenfri medan den andra var PVC-isolerad och PVC-mantlad, vad gäller datakablarna var den ena PVC-isolerad och flamskyddad medan den andra var PVC-isolerad och PVC-mantlad. I samtliga försök noterades att kablarna var allvarligt skadade på utsidan redan innan kortslutning inträffade. Det noterades även att kablarna ofta antändes i samband med kortslutning. Slutsatser drogs att för datakablarna verkade den kritiska strålningsnivån för kortslutning ligga på ungefär 9 kW/m^2 och för lågspänningskablarna på mellan 18-25 kW/m^2. Vad gäller rak eller böjd konfiguration upptäcktes ingen signifikant skillnad i tid till skada för datakablarna, detta var inte fallet för en av lågspänningskablarna där tiden till skada reducerades märkbart vid böjd konfiguration.

I rapporten NUGEG/CR-6850 (2005) utgiven av U.S. NRC (United States Nuclear Regulatory Commision) anges att oklassade kablar anses kortsluta och/eller antända om den infallande strålningen mot kablarna överstiger 6 kW/m^2 och klassade kablar anses kortsluta och/eller antända om den infallande strålningen mot kablarna överstiger 11 kW/m^2.

Murphy (2004) gjorde mätningar på klassade kraft- och kontrollkablar. Från de utförda försöken verkade det finnas en kritisk strålningsnivå för kabelfallering (kortslutning och/eller antändning) på ungefär 14 kW/m^2 för både klassade kraft- och kontrollkablar.

Lukens (1982) gjorde mätningar på två typer av kablar, oklassade samt IEEE-383-klassade. IEEE-383 är en standard utgiven av The Institute of Electrical and Electronic Engineers där testmetoden kan liknas med den som utförs för brandspridningsklassen F4C (Houwire, 2004). Från försöken drogs slutsatserna att den kritiska strålningsnivån för kortslutning och/eller antändning för de oklassade kablarna verkade ligga kring 8 kW/m^2 och för de IEEE-383-klassade kring 18 kW/m^2. Det gjordes även mätningar på vilka strålningsnivåer som krävdes för att kablarna skulle självantända, det vill säga antändas utan pilotlåga. Resultaten för de oklassade kablarna låg på 22 kW/m^2 och för de klassade på 28 kW/m^2.

Från rapporterna ovan ses att vid tester med oklassade kablar har de kritiska strålningsnivåerna, det vill säga de lägsta strålningsnivåer kablarna kan stå emot under obegränsad tid utan att kortsluta och/eller antända, har legat mellan 6-18 kW/m^2 medan de för klassade kablar legat mellan 11-25 kW/m^2.

De kritiska strålningsnivåerna är alltså de lägsta en kabel skall kunna stå emot under en obegränsad tid. Vid en brand föreligger risken att strålningsnivåerna överstiger detta värde vilket därmed medför att tiden till skada kommer vara en viktig parameter. Därför undersöktes även tider till fallering av kablar vid olika strålningsnivåer. Som ett exempel åskådliggörs i Tabell 5.1 en jämförelse av data från fyra olika rapporter där det undersökts tid till antändning vid olika strålningsnivåer för både klassade och oklassade kablar.

Tabell 5.1 Jämförelse av tid till fallering vid olika strålningsnivåer (Andersson & Van Hees, 2000; Murphy, 2004; NUREG-6850, 2005; Grayson et al, 2000)

Strålnings nivå [kW/m^2]	Andersson & Van Hees (2000)		Grayson et al (2000)		Murphy (2004)		NUREG-6850 (2005)	
	Tid till fallering [s]		Tid till fallering [s]		Tid till fallering [s]		Tid till fallering [s]	
	Klassade kablar	Oklassade kablar	Klassade kablar	Oklassade kablar	Klassade kablar	Oklassade kablar	Klassade kablar	Oklassade kablar
11	-	-	-	-	-	-	1140	240
12	-	509	-	-	-	-	-	-
16	-	-	-	-	-	-	360	60
20	507	150	-	-	85-553	61	60	60
30	-	-	-	-	35-167	34	-	-
35	98	20	83-304	21-165	-	-	-	-
40	-	-	-	-	18-54	17-26	-	-
50	-	-	43-93	13-49	13-31	13-22	-	-
60	-	-	-	-	-	-	-	-
75	23	6	22-42	4-36	-	-	-	-

Vid de tre första rapporterna är försöken utförda i konkalorimeter med en testmetod kallad ISO 5660, vid denna metod utförs tester vid konstanta strålningsnivåer på provkroppar med dimensionerna 100 * 100 mm^2 (SP, n d) Värdena vid den fjärde rapporten, det vill säga NUREG-6850, är rekommenderade värden som tagits fram från expertbedömningar med underlag av tidigare undersökningar av tider till kabelfallering vid högre strålningsnivåer (NUREG-1805, 2004). Testerna utförda av Andersson & Van Hees (2000) är utförda på en sorts klassad samt en sorts oklassad kabel där den klassade kabeln var en kraftkabel medan oklassade var en typ av datakabel. Testerna utförda av Grayson et al (2000) är utförda på 26 olika sorters kablar, både kraft- och datakablar, med 10 olika sorters klassade och 16 sorters oklassade kablar. Försöken utförda av Murphy (2004) är utförda på två sorters klassade och två sorters oklassade kablar med samma antal ledare och mått. De enda skillnaderna kablarna emellan är dess mantel- och isoleringsmaterial.

Även då större delen av försöken är utförda vid olika strålningsnivåer kan det ändå urskiljas att tider till fallering kan skilja sig markant beroende på vilken rapport som studeras. Att värdena för NUREG-6850 skiljer sig från de andra beror självklart på att dessa värden endast är rekommenderade generaliserade värden för klassade respektive oklassade kablar. Skillnaderna de andra rapporterna emellan härleds både till material och storlekar på kablarna. Det finns dessutom flera olika sorters PVC-, PE- och XLPE-material kablar kan vara uppbyggda av, detta medför därmed att skillnader i falleringstider är att vänta då dessa material inte reagerar på samma sätt då de blir utsatta för termisk strålning. Även storlekarna på kablarna leder till skillnader i falleringstider, exempelvis reagerar en kabel med en millimeter tjock mantel självklart snabbare än en kabel med fem millimeter tjock mantel.

Resultaten avseende falleringstider anses ha allt för stor spridning för att några giltiga slutsatser ska kunna dras. Dessutom kommer strålningsnivån vid ett eventuellt brandförlopp i schaktet inte ligga på ett konstant värde utan öka med tiden, detta medför svårigheter att bedöma tider till fallering då denna tid kommer minska med ökad strålningsnivå. Beslutet tas därför att ej observera tider till fallering för olika strålningsnivåer då detta anses innebära allt för stora osäkerheter.

Mer detaljerad information avseende använda kabelsorter och testutföranden i de olika rapporterna som diskuterats ovan finns att tillgå i respektive rapport.

5.1.3 Temperaturpåverkan

Andersson & Persson (2001) utförde temperaturförsök i en rörformad ugn. Kablarna var identiska med de som användes i försöken gjorda av Andersson & Van Hees (2000) med skillnaden att det inte utfördes några försök med den halogenfria lågspänningskabeln. Från försöken drogs slutsatserna att kortslutning av kablarna skedde då innertemperaturen i kablarna låg omkring 180-215 °C (Andersson & Persson, 2001). I rapporten av Andersson & Persson (2001) diskuteras även en metod för att beräkna inre temperatur i en kabel efter en viss tid, denna metod analyseras vidare i avsnitt 7.1, 7.2 samt Bilaga D.

NUREG/CR-6850 (2005) anger att oklassade kablar anses kortsluta då dess inre temperatur överstiger 205 °C medan klassade kablar anses kortsluta då dess inre temperatur överstiger 330 °C. Det anges även att elskåp, apparatskåp, motorer, ventiler etcetera anses skadade då temperaturen överstiger skadekriterierna för de kablar som finns i utrustningen. Vad gäller andra fall, till exempel då fasta styrkomponenter är utsatta för ökad temperatur, rekommenderas en kritisk temperatur på 65 °C samt en strålningsnivå på 3 kW/m^2 (NUREG/CR-6850, 2005)

Murphy (2004) utförde en litteratursammanställning av kabeltester vid förhöjda temperaturer, denna sammanställning resulterade i slutsatserna att oklassade kablar anses kortsluta vid inre temperaturer mellan 138-460 °C medan klassade kablar kortsluts då dess inre temperaturer ligger mellan 249-395 °C. För de oklassade kablarna är detta ett otroligt stort spann, vilket även noterades av Murphy i sin sammanställning. För oklassade kablar är 460 °C en ovanligt hög temperatur då denna sorts kablar vanligen anses kortslutas vid innertemperaturer på ungefär 250 °C (Murphy 2004). Denna höga inre temperatur noterades dock endast i ett fall medan innertemperaturerna för kortslutning hos större delen av de oklassade kablarna i sammanställningen låg minst 200 °C lägre. Det noterades även att vissa klassade kablar kunde klara upp emot 450 °C utan att kortslutas (Murphy 2004).

Lukens (1982) gjorde försök för att bestämma skador på isoleringsmaterial hos kablar genom att utsätta dessa för en konstant förhöjd temperatur. Resultat från försöken indikerade att IEEE-383-klassade kablar kortslöts vid exponering av temperaturer högre än 250 °C under 60 minuter medan oklassade kablar kortslöts vid exponering av 130 °C under 60 minuter.

Avseende yttre temperaturer för antändning ligger antändningstemperaturen för ren PVC på ett väldigt högt värde, detta är dock ej relevant för kablar då elektriska mekanismer i kablarna medför att de kan antändas vid betydligt lägre temperaturer, för PVC-kablar omkring 240-422 °C vid närvaro av pilotlåga (Babrauskas 2005).

I NUREG/CR-6850 (2005) anges en yttre temperatur för antändning på 218 °C för oklassade och 330 °C för klassade kablar, även detta i närvaro av pilotlåga.

Sammanfattningsvis ligger alltså den kritiska inre temperaturen för kortslutning för oklassade kablar på mellan 138-460 °C och för klassade kablar på mellan 249-395 °C. Vad gäller yttre temperaturer för antändning ligger dessa mellan 218-422 °C för båda sorters kablar.

Mer detaljerad information avseende använda kabelsorter och testutföranden i de olika rapporterna som diskuterats ovan finns att tillgå i respektive rapport.

5.1.4 Sammanfattning skadekriterier

Det finns ett antal osäkerheter var gäller kriterierna ovan. Då det är en stor variation av testmetoder, kablar, apparatur och så vidare som använts är det svårt att jämföra resultaten med varandra. Kablarnas egenskaper, emissivitet, konduktivitet, massa, tjocklek med mera kommer spela in likväl som geometrin i övrigt vid försöken. Resultaten gäller alltså endast för den befintliga kabelsorten vid det befintliga försöket varför det föreligger osäkerheter avseende vilka skadekriterier som gäller för kablarna i schaktet. Dessutom finns det begränsade mängder testdata vilket medför ytterligare problem i att definiera precisa värden. Vid samtliga försök har kablarna även testats under en viss tid, ofta mellan 30-60 minuter, om kablarna ej kortslutits och/eller antänts inom denna tid har försöken avbrutits. Detta medför ytterligare en osäkerhet då kablarna mycket väl hade kunnat fallera om försöken utförts under ett längre tidsintervall. Dessutom är testerna vid temperaturpåverkan utförda i ugnar med konstanta omgivningstemperaturer vilket så ej är fallet vid en riktig brand.

En ytterligare begränsning med testmetoderna är att endast en parameter i taget har undersökts, det vill säga antingen hur kablarna reagerar på termisk strålning eller hur de reagerar på förhöjd temperatur. Detta är ej fallet vid en riktig brand då kabeln i fråga påverkas av både termisk strålning och temperatur. Därför kan det ej med säkerhet sägas att den ena parametern, till exempel kritisk temperatur, även är giltig vid inverkan av den andra parametern, i detta fall termisk strålning.

De utförda försöken från rapporterna ovan är dessutom utförda med att utsätta en kabel i taget för termisk strålning eller en förhöjd temperatur. Vid ett riktigt brandscenario med flera kablar inblandade kommer, förutom kablarnas egenskaper och rummets geometri, även brandkällans storlek, konfigurationen av kablarna, omgivningens egenskaper samt möjlig närvaro av andra brandkällor spela in. Även då strålningen från själva brandkällan ej överstiger ett skadekriterium kan till exempel återstrålning från omgivning samt strålning och värmeöverföring mellan kablar medföra att den totala infallande strålningen når upp till skadekriterierna för kablarna.

Vid större delen av testerna ovan är kablarna indelade i grupperna oklassade respektive klassade kablar, kablars beteende vid inverkan av termisk strålning och temperaturförhöjningar utvärderas alltså beroende på mantel- och isoleringsmaterial. Det tas därmed ingen hänsyn till fyllnadsmaterial eller armering och hur detta skulle kunna påverka skadekriterierna.

Det finns även fall då en kabel har olika sorters mantel- och isoleringsmaterial, till exempel en klassad mantel och en oklassad isolering, vid dessa fall måste det fattas beslut huruvida kabeln ska gå under skadekriterierna för klassade eller oklassade kablar. Vid detta fall kommer det oklassade materialet

vara den begränsande faktorn varför dess skadekriterium därmed borde gälla, diverse utförda tester har även visat på att detta borde vara fallet (NUREG-6850, 2005).

5.2 Brandspridning

För att kunna dra slutsatser avseende omfattning av kabelskador vid en brand behövs, förutom skadekriterierna, även information om hur branden sprider sig i kablarna. Brandspridningen beror på parametrar sådana som geometri, ytskikt, mängden kablar på en kabelstege, avstånd mellan kablar, olika kabelkonfigurationer, avstånd från vägg/tak med mera (Göransson, 1992). Brandspridningen längs en kabel kan även påverkas beroende på ledarmaterial, en kopparledare kan fungera som en värmesänka vilket därmed fördröjer brandspridningen. Men detta medför även att kopparledaren sprider värmen vidare genom kabeln vilket orsakar en förvärmning av kabeln på platser som ej ännu antänts (Grayson et al, 2000). Dessa parametrar medför svårigheter att kunna modellera en kabelbrand på ett korrekt sätt.

För att kunna beräkna brandspridningen behövs information om brandens effektutveckling, detta då effekten är primär orsak till spridning till andra föremål. Dessutom behövs det information om flamspridningen inom föremålet då denna avgör hur stor mängd material som deltar i branden och därmed till stor del avgör vilken effekt som avges (Göransson, 1992).

Inledningsvis söks därför information om hur en brand sprider sig både vid vertikalt och horisontellt monterade kablar och kabelstegar, detta utförs genom att studera olika testmetoder avseende brandspridning. Därefter diskuteras intressanta resultat från dessa testmetoder för att slutligen dra slutsatser vilka parametrar som anses ha störst inverkan på brandspridningen i kablar.

Vid provningar av brandspridning vid både vertikalt och horisontellt monterade kablar har testerna utförts antingen med enskilda kablar eller genom kablar monterade på en kabelstege där alla kablar satts i brand på samma gång. Därför är det svårt att dra slutsatser avseende brandspridning mellan kablar monterade på en och samma kabelstege.

5.2.1 Testmetoder

I följande avsnitt undersöks tillgängliga testmetoder för utvärdering av brandspridning hos kablar. Inledningsvis undersöks en testmetoden som används för att dela in kablar i dess brandspridningsklasser vilket sedan följs av diskussion kring tester utförda av ett projekt kallat FIPEC för att avslutningsvis diskutera kring de begränsningar som förekommer vid dessa testmetoder.

5.2.1.1 Brandspridningsklass

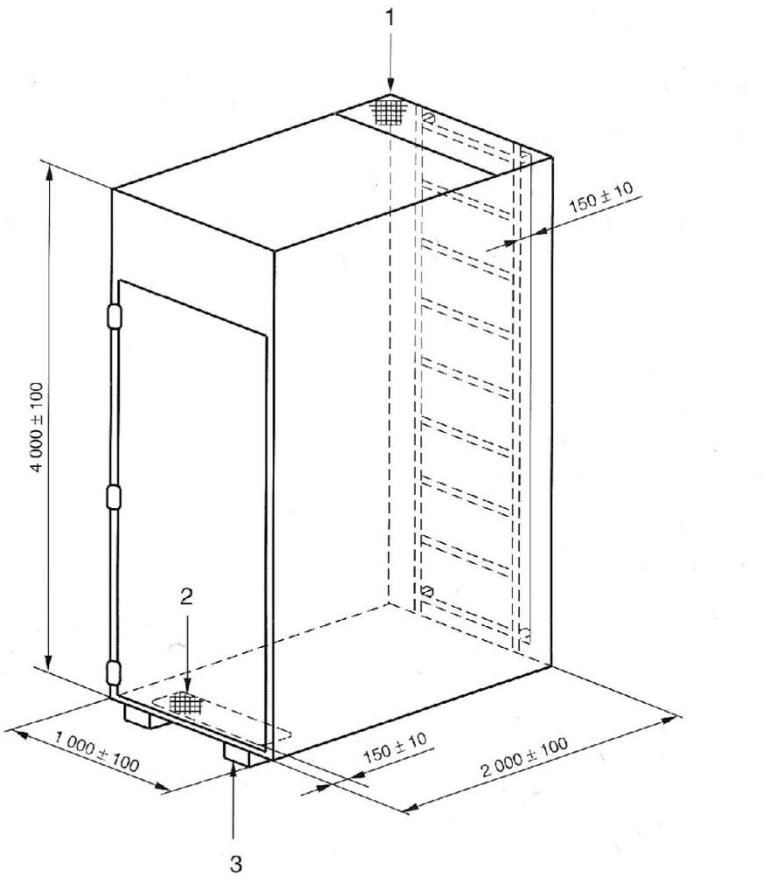
Enligt Svensk standard SS 424 14 75 delas kablar in i fyra olika brandspridningsklasser, F1-F4, beroende på antändbarhet och brandspridning. Brandspridningsklass F1 innebär att det inte finns några krav på brandspridning, det vill säga kabeln sprider brand och slocknar inte själv, medan brandspridningsklassen F4 innebär att kabeln inte får sprida brand trots att den ligger i bunt. F4-klassen är indelad i standardkategorierna, F4A F/R-F4D, där F4A är den mest krävande klassen (Solar, 2006). En överblick av brandspridningsklasserna och korta beskrivningar av dess testmetoder ges i Tabell 5.2.

Tabell 5.2 Brandspridningsklasser samt beskrivning av testerna (Nexans, 2012e; Reka Kabel, n d)

Klass	Beskrivning
F1	Kabeln är ej självslocknande och sprider brand
F2	Enstaka kabel är självslocknande och sprider ej brand. Vertikalt test med 600 mm långt kabelprov bränns med 1 kW propanbrännare. Brännare tänd 1-8 minuter beroende på kabelns ytterdiameter. Brandskadorna ska vara begränsade och branden ska slocknat 50 mm från övre infästningens nedre kant.
F3	Enstaka eller sammankablade kablar är självslocknande och sprider ej brand. Mer svårantändlig och underhåller brand sämre än F2. Vertikalt test på 850 mm långt kabelprov utförs i vertikalt stålrör. Tändvätska under kabeln antänds och får brinna i 3-9 minuter beroende på kabeldiameter och area. Brandskador ska vara begränsade. Inga yttre brandskador får finnas på de delar av provföremålet som ligger inom 300 mm från dess övre ände.
F4 **Allmän information**	Kablar i bunt är självslocknande och sprider inte brand. Mer svårantändlig och underhåller brand sämre än F3. Proven utförs med 3,5 meter långa kabelbuntar monterade vertikalt på en kabelstege i en 4 meter hög ugn. Bränns med 20 kW propanbrännare. Brandskador ska vara begränsade och får ej förekomma högre upp än 2,5 meter från brännaren.
F4A F/R	Bränntid 40 minuter, ska vara 7 liter brännbart material per meter i kabelbunten. Kablarna fästs på båda sidor om kabelstegen.
F4A	Bränntid 40 minuter, ska vara 7 liter brännbart material per meter i kabelbunten. Kablarna fästs på framsidan av kabelstegen.
F4B	Bränntid 40 minuter, ska vara 3,5 liter brännbart material per meter i kabelbunten. Kablarna fästs på framsidan av kabelstegen.
F4C	Bränntid 20 minuter, ska vara 1,5 liter brännbart material per meter i kabelbunten. Kablarna fästs på framsidan av kabelstegen.
F4D	Bränntid 20 minuter, ska vara 0,5 liter brännbart material per meter i kabelbunten. Kablarna fästs på framsidan av kabelstegen.

Det finns internationella standarder, utgivna av CENELEC (European Committee for Electrotechnical Standardization), som fastställer hur varje kabelprov skall utföras. Här beskrivs hur proven skall monteras, hur mängden brännbart material beräknas, hur utvärdering av resultat ska göras samt övriga steg i testprocedurerna. Testerna utförs i en kammare vars mått och omgivande mätutrustning är noga definierade i standarderna. Figur 5.1 åskådliggör en schematisk bild för hur denna kammare ser ut där kabelstegen är placerad 150±10 mm från den inre väggen (Grayson et al, 2000). För klassen F4 är standarden namngiven som IEC 60332-3 och varje standardkategori inom F4 är namngivna som IEC 60332-3-21, IEC 60332-3-22, IEC 60332-3-23, IEC 60332-3-24 och IEC 60332-3-25 (Addison Tech, n d; Reka Kabel, n d). Dessa kategorier finns även namngivna enligt Europastandard, för klassen F4 är

standarden namngiven som EN 60332-3 där varje standardkategori inom F4 är namngivna som EN 60332-3-21, EN 60332-3-22, EN 60332-3-23, EN 60332-3-24 och EN 60332-3-25 (Reka Kabel, n d).



Key

1 Smoke outlet - (300 ± 30) x (1000 ± 100)

2 Air inlet - (800 ± 20) x (400 ± 10)

3 Rig raised above ground level

Dimensions in millimetres

Figur 5.1 Försöksuppställning vid IEC 60332-testerna (Grayson et al, 2000; reproducerat med tillåtelse av Interscience)

Vid definiering av en kabels brandspridningsklass testas alltså endast den vertikala brandspridningen. Beroende på brandspridningsklass används olika mängder brännbart material vid tester utförda under olika långt tid, detta medför därmed svårigheter att göra inbördes jämförelser av kablar av olika brandklasser.

5.2.1.2 FIPEC-projektet

FIPEC-projektet (Fire Performance of Electric Cables) var ett EU-finansierat forskningsprogram vilket syftade till att utveckla metoder avseende mätningar av kablars brandbeteende. I detta projekt utfördes nästan 2000 experiment i fyra olika skalor, storskaleförsök, fullskaleförsök, småskaleförsök på kablar och småskaleförsök på material, med prover som representerade ett stort spektrum av brandbeteenden (Grayson et al, 2000). Experimenten utfördes i huvudsak vid vertikala konfigurationer, vid storskaleförsöken utfördes dock även försök vid horisontell konfiguration med ett urval av kablar. Vid försöken undersöktes bland annat antändningstider, effektutvecklingar, tillväxthastigheter, rökproduktioner och skadade kabellängder. Nedan ges korta beskrivningar av de fyra skalorna.

5.2.1.2.1 Småskaleförsök med kablar

Småskaleförsöken utfördes i konkalorimeter och baserades på en metod kallad ISO 5660 som är en väldigt användbar testmetod och kan användas för många olika material och applikationer (Grayson et al, 2000). Testerna utfördes på en kabel i taget vid olika infallande strålningsnivåer. Testerna utfördes med målet att fastställa småskaliga testprocedurer för kablar som vidare skulle kunna användas för modelleringar av fullskaletester och produktutveckling (Grayson et al, 2000).

5.2.1.2.2 Småskaleförsök med material

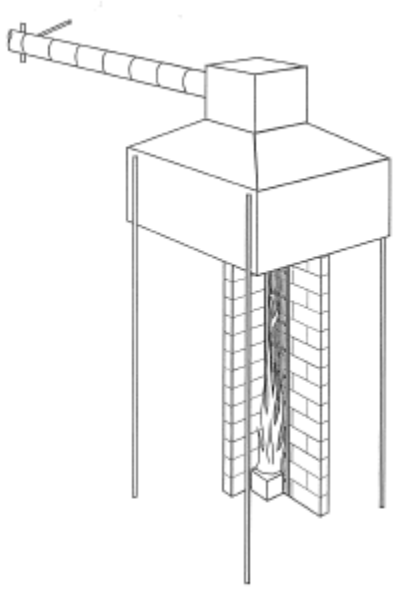
Småskaleförsöken med material utfördes på samma sätt och med samma mål som ovan med skillnaden att testerna utfördes på de rena materialen snarare än kablarna (Grayson et al, 2000).

5.2.1.2.3 Fullskaleförsök

Fullskaleförsöken utfördes vid vertikala konfigurationer. Försöken utfördes med uppställningar liknande de vid IEC 60332-3-testen, det vill säga som vid tester av brandspridningsklassen F4C, där försöken utfördes med en brännareffekt på 20 kW/m^2 under 40 minuter i testkammaren, se Figur 5.1. Skillnaderna uppställningarna emellan är att vid FIPEC-försöken ökades luftflödet in i kammaren, detta för att förbättra responsen av effektutvecklingsmätningarna (Grayson et al, 2000). Dessutom monterades kablar med hänsyn till inbördes avstånd snarare än att ta hänsyn till andelen brännbart material. Detta då tidigare mätningar påvisat att avståndet mellan kablarna har avsevärt mycket större inverkan på brandförloppet än andelen brännbart material på kabelstegarna (Grayson et al, 2000).

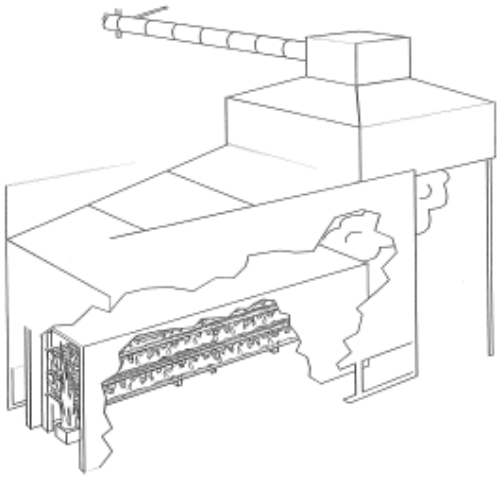
5.2.1.2.4 Storskaleförsök

Storskaleförsöken utfördes vid både vertikala och horisontella kabelkonfigurationer. Vid de vertikala försöken utfördes inledningsvis förstudier med varierande kabelkonfigurationer, brännareffekter, kabelavstånd med mera för att på så vis komma fram till den försöksuppställning som är mest effektiv för att särskilja olika kablars brandbeteende (Grayson et al, 2000). Resultaten av dessa förstudier visade på att den försöksuppställning som bäst kunde särskilja olika kablars brandbeteende var en försöksuppställning där kablarna var monterade i en hörnkonfiguration, kablarna monterades med en halv kabeldiameters avstånd, det var ingen forcerad ventilation och brännarens effekt låg på 40 kW/m^2 de första fem minuterna av testen, 100 kW/m^2 följande tio minuter för att sedan ökas ytterligare till 300 kW/m^2 de sista tio minuterna. Denna effektutvecklingsökning utfördes endast då brandspridning ej observerats under tidigare period. Försöksuppställningen vid de vertikala storskaleförsöken åskådliggörs i Figur 5.2 nedan.



Figur 5.2 Schematisk bild över försöksuppställningen vid de vertikala storskaleförsöken (Grayson et al, 2000; reproducerat med tillåtelse av Interscience)

Vid de horisontella storskaleförsöken utfördes tester på ett urval av kablar där det även i detta fall utfördes förstudier som syftade till att utvärdera vilken försöksuppställning som är mest effektiv för att särskilja olika kablars brandbeteende. Detta renderade i en försöksuppställning med en korridorkonfiguration och tre kabelstegar monterade ovan varandra, kablarna var monterade med en halv kabeldiameters avstånd och försöken utfördes utan forcerad ventilation. Brännarens effektutveckling såg ut som vid de vertikala testerna, det vill säga 40 kW/m^2 i fem minuter, 100 kW/m^2 följande tio minuter och 300 kW/m^2 de sista tio minuterna. Och precis som vid de vertikala testerna ökades brännarens effekt endast om brandspridning ej observerats under tidigare period (Grayson et al, 2000). Försöksuppställningen för de horisontella storskaleförsöken åskådliggörs i Figur 5.3 nedan.



Figur 5.3 Schematisk bild över försöksuppställningen vid de horisontella storskaleförsöken (Grayson et al, 2000; reproducerat med tillåtelse av Interscience)

5.2.2 Resultat testmetoder

I följande avsnitt diskuteras kring vad dessa testmetoder kan ge samt ett antal, för det kommande arbetet, intressanta resultat som erhållits från testerna.

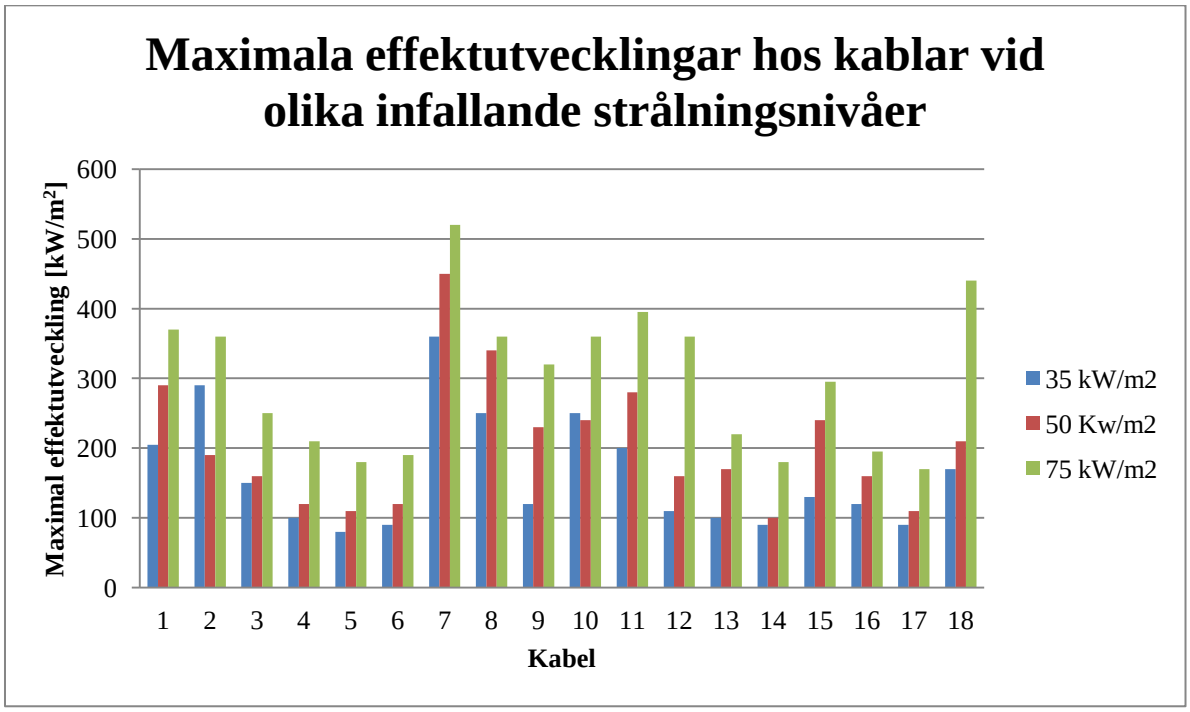
5.2.2.1 Brandspridningsklass

Alla kablar är indelade i brandspridningsklasser där de är testade och godkända för den befintliga brandspridningsklassen. En kabels brandspridningsklass ger alltså endast ett gränsvärde på hur kabeln antänds och underhåller brand. Det ges inga kvantitativa resultat på brandspridningens omfattning, dess hastighet, hur den sprider sig mellan kablar med mera utan delar endast in kablar i godkända eller icke godkända enligt en viss standard. Detta medför därmed svårigheter att kunna dra slutsatser om eventuell omfattning av brandspridning vid ett verkligt scenario då brandspridningsklassen endast ger ett ger ett maxvärde på hur omfattande spridningen får vara för en viss mängd kablar. Från brandspridningsklasserna kan det alltså ej erhållas några resultat utan endast gränsvärden varför denna testmetod ej diskuteras vidare i avsnittet.

5.2.2.2 FIPEC-projektet

Vid FIPEC-projektet utfördes däremot ett stort antal försök som resulterade i kvantitativa mätresultat avseende bland annat antändningstider, effektutvecklingar, tillväxthastigheter, rökproduktion, skadade kabellängder mer mera. Nedan diskuteras intressanta resultat från småskaleförsöken med kablar, fullskaleförsöken och storskaleförsöken, vad gäller småskaleförsöken med material kommer dessa ej diskuteras vidare då resultat från dessa tester ej anses vara av vikt för det fortsatta arbetet.

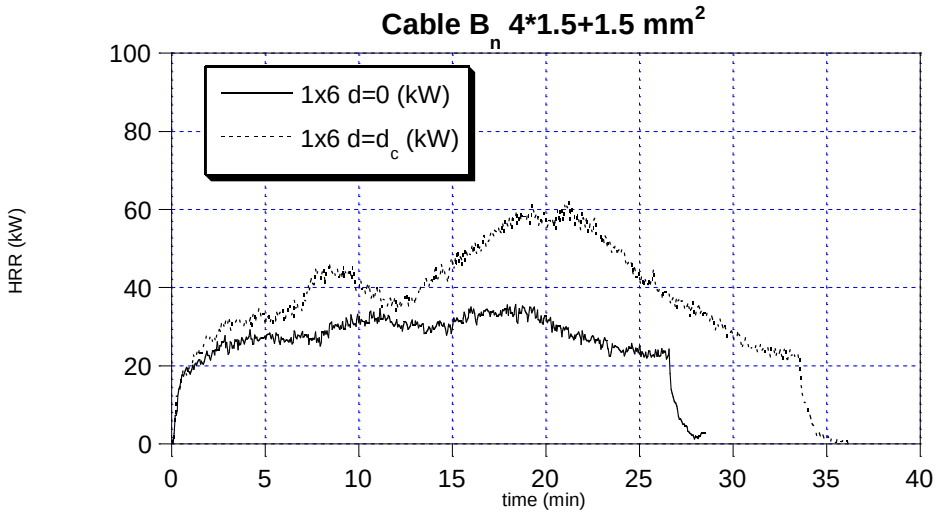
Vid analys av resultat från småskaleförsöken med kablar visade sig att antändningsenergin kan ha inverkan på brandförloppet. Vid en ökad infallande strålningsnivå reduceras antändningstiden medan både den maximala effektutvecklingen och tillväxthastigheten ökar (Grayson et al, 2000). Ett exempel på detta åskådliggörs i Figur 5.4 nedan som visar maximala effektutvecklingar hos 18 stycken lågspänningskablar vid tester med tre olika infallande strålningsnivåer, 35, 50 och 75 kW/m^2.



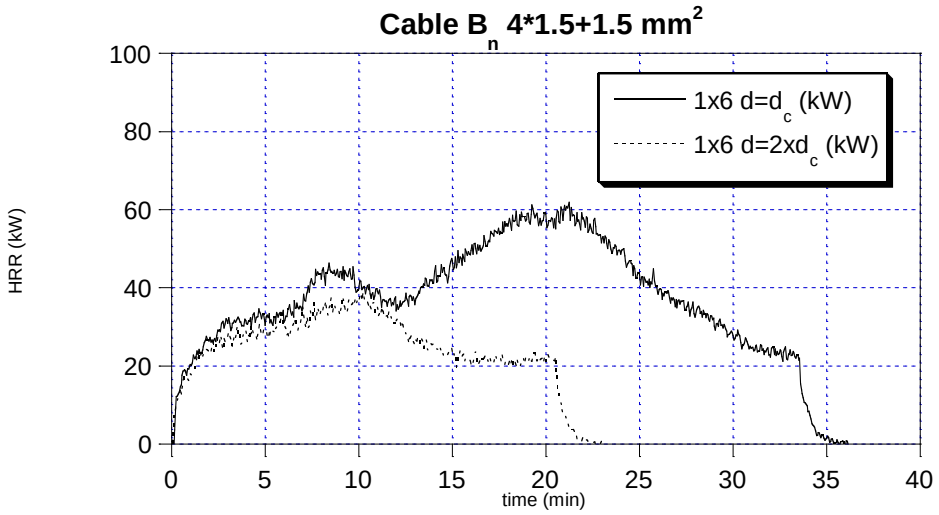
Figur 5.4 Maximala effektutvecklingar hos lågspänningskablar vid de infallande strålningsnivåerna 35, 50 & 75 kW/m^2 (reproducerad från Grayson et al, 2000)

Vilket kan ses i figuren ovan kan den maximala effektutvecklingen för en kabel skilja sig så mycket som 250 kW/m^2 vid en ökning av antändningsenergin från 35 till 75 kW/m^2 (kabel 18). Vid brandspridning mellan kabelstegar kommer alltså effektutvecklingen från den första kabelstegen ha inverkan på hur brandförloppet hos den andra kabelstegen ser ut.

Vid analys av resultat från fullskaleförsöken kunde det observeras att tester med varierade inbördes kabelavstånd visade på att effektutvecklingen ökar markant då kablarna monteras med en kabeldiameters avstånd i jämförelse med om de är monterade utan mellanrum eller på avståndet två kabeldiametrar (Grayson et al, 2000). Ett exempel på detta åskådliggörs i Figur 5.5 och 5.6 nedan där det utförts försök med sex stycken halogenfria 3-ledade kablar monterade på en kabelstege med olika inbördes avstånd. Vilket kan ses i figurerna renderar de så kallade optimerade kabelavstånden (en kabeldiameters mellanrum) både i högre effektutvecklingar och längre brandförlopp.



Figur 5.5 Jämförelse av effektutvecklingar för kablar monterad med och utan mellanrum (Grayson et al, 2000; reproducerat med tillåtelse av Interscience)



Figur 5.6 Jämförelse av effektutveckling för kablar monterade med olika mellanrum (Grayson et al, 2000; reproducerat med tillåtelse av Interscience)

Vid jämförelser av testresultat från IEC-60332-3 och tester utförda med optimerade kabelavstånd visade sig att denna kabelmontering renderade i allvarligare scenarion trots att mängden brännbart material per meter kablar var lägre (Grayson et al, 2000). Därför drogs slutsatserna att det är kabelmonteringen snarare än andelen brännbart material per meter kabel som har störst inverkan på brandbeteendet (Grayson et al, 2000). Vid utförda tester avseende brandspridning monterades kablarna därför på avståndet en kabeldiameter för att därmed få de allvarligaste scenarierna (Grayson et al, 2000). Denna montering gällde dock endast för kablar med diametrar på mellan 5-20 mm, för kablar med diametrar över 20 mm monterades kablarna med 20 mm avstånd och för kablar med diametrar mindre än 5 mm monterades de i buntar med avståndet 10 mm mellan buntarna.

Vid fullskaleförsöken noterades även att kablarnas uppbyggnadsmaterial har en påtaglig inverkan på brandförloppet. Som exempel åskådliggörs i Tabell 5.3 en jämförelse mellan två kablar refererade som kabel 1 och kabel 2 nedan, det enda som skiljer dessa kablar åt är dess mantelmaterial samt att kabel 2 har aningen större diameter vilket därmed medför en större mängd brännbart material per meter. Kabel 1 har en mantel av PVC och kabel 2 har en mantel av PE.

Tabell 5.3 Resultat från fullskaleförsök av kablarna refererade som kabel 1 och kabel 2 (Grayson et al, 2000)

Kabel	Tid till antändning [s]	Maximal effekt utveckling [kW]	Total effekt utveckling [MJ]	FIGRA [kW/s]	Skadad längd [m]	Vol. av brännbart material [l/m stege]	Isolering	Mantel
1	46	704	299.3	0.374	4.0	7.1	XLPE	PVC
2	136	41	43.9	0.017	1.9	11.5	XLPE	PE

FIGRA i tabellen ovan står för Fire Growth Rate och anger den linjära tillväxthastigheten för en brand. Parametern utvecklades för klassifikationer och riskbedömningar av byggnadsprodukter där tester utfördes på enstaka brinnande föremål. Testmetoden utvecklades ytterligare med FIPEC-projektet där testerna utförts som diskuterats ovan (Sundström, 2007). FIGRA beräknas som den maximala effekten (i 30-sekunders medelvärden) dividerat med tiden till effekten (Grayson et al, 2000). Från fullskaleförsöken finns även testresultat i form av effektutveckling över tid att tillgå på SP Fire Database.

Vilket kan ses i tabellen ovan är både effektutveckling och tillväxthastighet väsentligt högre för kabel 1 trots att denna har mindre brännbart material per meter kabel. Det ska dock observeras att kabel 2 endast har 1,9 meter skadad längd medan kabel 1 har fyra meter skadad längd vilket därmed påverkar effektutvecklingen. Vid utvärdering resultaten ovan anses att den enda giltiga slutsatsen som kan dras i detta fall är därmed att en PE-mantlad kabel ger ett mer begränsat brandförlopp i jämförelse med en PVC-mantlad kabel. För att kunna dra slutsatser om hur tillväxthastigheten och effektutvecklingen påverkas av materialskillnaderna jämförs därför resultat från tester av tre olika kabelsorter, kabel 5, 6 och 7, som alla har 4 meter skadad längd och endast skiljer sig i mantelmaterial, detta ger därmed även små skillnader i brännbart material per meter kablar, testresultaten åskådliggörs i Tabell 5.4 nedan.

Tabell 5.4 Resultat från fullskaleförsök av kablarna 5, 6 och 7 (Grayson et al, 2000)

Kabel	Tid till antändning [s]	Maximal effekt utveckling [kW]	Total effekt utveckling [MJ]	FIGRA [kW/s]	Skadad längd [m]	Vol. av brännbart material [l/m stege]	Isolering	Mantel
5	102	392	167.8	0.196	4.0	2.9	XLPE	PVC
6	132	367	195.1	0.140	4.0	3.0	XLPE	RPPVC
7	144	149	50.0	0.062	4.0	2.7	XLPE	Polyolefin

Vilket kan ses i tabellen ovan tenderar en kabel med PVC-mantel ändå rendera i ett allvarligare brandförlopp än kablar med andra sorters mantelmaterial. Denna tendens kan även ses för andra kablar i de genomförda testerna. Med detta i beaktning dras slutsatsen att det snarare är kabelkonstruktionen än andelen brännbart material som har den större inverkan på brandförloppet.

Vid analys av resultat från storskaleförsöken observerades resultat från samma kablar som ovan för att se om skillnaderna var lika tydliga vid dessa tester. Tendenserna att PVC medför allvarligare brandförlopp visade sig inte lika tydligt som vid fullskaleförsöken, och för vissa försök inte alls. Som exempel åskådliggörs i Tabell 5.5 även här en jämförelse mellan kablarna 5, 6 och 7 (Grayson et al, 2000).

Tabell 5.5 Resultat från storskaleförsök av kablarna 5, 6 och 7 (Grayson et al, 2000)

Kabel	Tid till antändning [s]	Maximal effekt utveckling [kW]	Total effekt utveckling [MJ]	FIGRA [kW/s]	Skadad längd [m]	Vol. av brännbart material [l/m stege]	Isolering	Mantel
5	314	323	196.3	0.315	-	2.9	XLPE	PVC
6	241	284	182.7	0.234	-	3.0	XLPE	RPPVC
7	217	404	241.7	0.346	-	2.7	XLPE	Polyolefin

Att denna tendens inte observeras för vissa av kablarna beror på att brännarens effektutveckling varierades under testerna, detta till skillnad från fullskaleförsöken där effektutvecklingen var konstant under hela testutförandet. Brännarens effektutveckling ökades vid de fall då brandspridning ej skett under en viss tidsperiod. Att effektutvecklingen för kabel 7 i tabellen ovan är så pass hög beror på att det, under detta försök, inte observerades någon brandspridning varken vid 40 eller 100 kW/m^2 varpå effektutvecklingen ökades till 300 kW/m^2 de sista tio minuterna vilket därmed medförde ett allvarligare brandförlopp. Detta var ej fallet för de två andra kablarna där brandspridning observerades vid brännareffekten 100 kW/m^2 varpå denna effekt hölls konstant under resterande tid av testutförandena (Grayson et al, 2000). Vid kontroll av brandbeteende för kablar som utsattes för samma effektutvecklingsökningar observerades tydligt att PVC medförde allvarligare brandförlopp än andra sorters mantelmaterial även här. Utförligare beskrivningar de kabelsorter som omnämns i tabellerna ovan samt beskrivningar av förkortningarna i tabellerna finns att tillgå i Bilaga B.

5.2.3 Sammanfattning testmetoder

Testmetoderna avseende kablars brandspridningsklasser ger endast gränsvärden på hur kablar antänds och underhåller brand. Detta då det endast anges om kablarna, enligt en viss standard, blivit godkända eller ej. Då antändning och brandspridning även har att göra med yttre förhållanden kan det inte antas att en kabel beter sig på samma sätt som i testerna, även då den uppfyller kravet för en viss standard. Några exempel på parametrar som anses spela in på brandförloppet är:

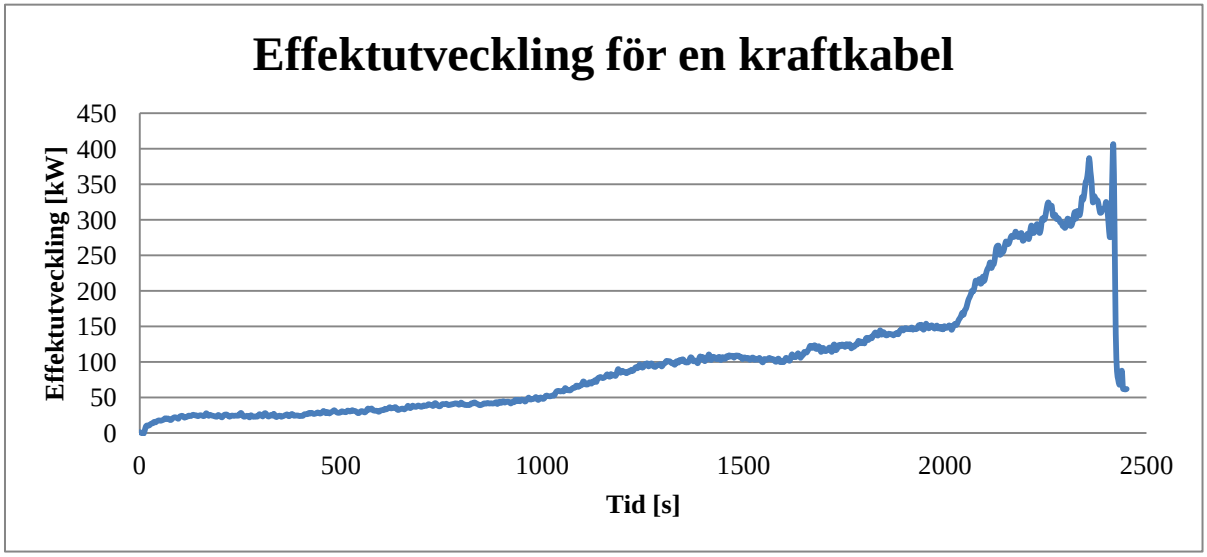
- Kabelmaterial
- Den geometriska konfigurationen, både kablarnas relation till varandra och dess relation till omgivningen.
- Storlek på tändkälla
- Hur stora mängder av kablarna som är utsatta för brand.
- Antal kablar på en kabelstege
- Ventilationsförhållanden.

Då testerna endast tar den vertikala brandspridningen i beaktning kan det inte heller sägas något om eventuell brandspridning för horisontellt monterade kablar. Det tas inte heller hänsyn till eventuell horisontell spridning både längs samma vertikalt monterade kabelstege och till närstående kabelstegar. Även mängden brännbart material har inverkan på hur branden fortlöper. Mängden brännbart material per meter i kabelbuntarna är fastställt beroende på brandspridningsklasserna, vid fall då den brännbara mängden överstiger dessa mängder kan detta medföra en mer omfattande brandspridning, även då denna parameter inte har lika stor inverkan som till exempel kabelavstånd och kabeluppbyggnad.

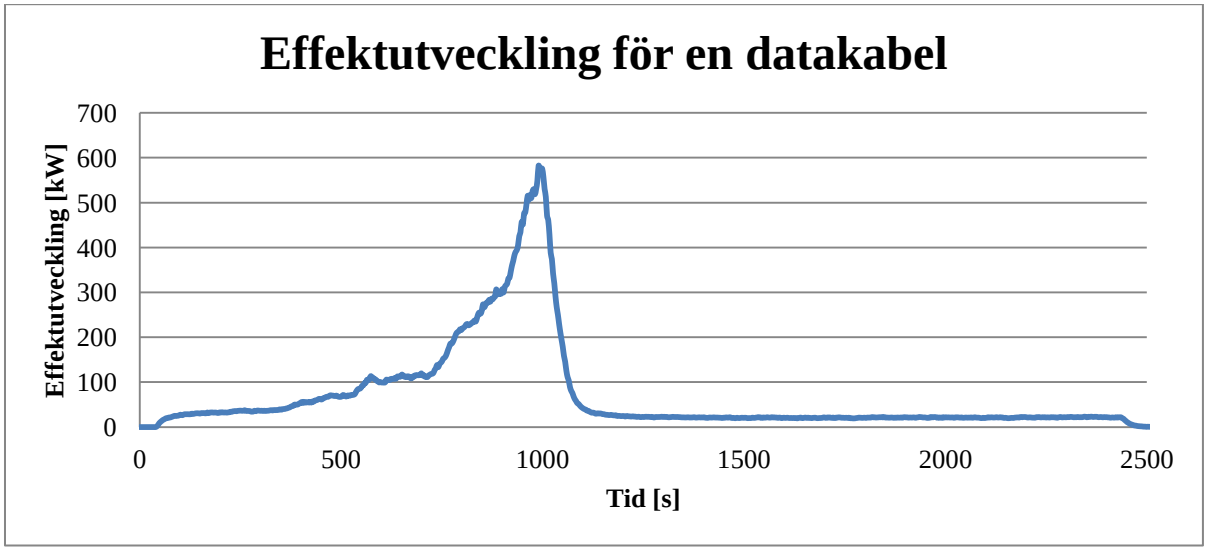
Beslutet tas att brandspridningsklassen ej kan användas för att förutsäga brandspridningen hos kablar. Grunden till beslutet ligger i att brandspridningsklassen ej specificerar hur omfattande spridningen blir, testerna ger inga kvantitativa mätresultat utan delar endast in kablar i godkända eller icke godkända enligt en viss standard. Dessutom tar brandspridningsklasserna ej hänsyn till brandspridning vid horisontellt monterade kablar.

Vad gäller FIPEC-projektet ligger det en stor fördel i att det finns kvantitativa mätresultat att tillgå för en stor mängd kablar. Dessutom har det utförts stora mängder tester vid olika konfigurationer, kabelavstånd, brännareffekter, ventilationsförhållanden med mera. Det ligger även en fördel i att testerna är utförda på samma sätt för alla kablar vilket gör att inbördes jämförelser av olika kablar och dess brandbeteende ej renderar i de osäkerheter som hade uppkommit då det hade gjorts jämförelser av resultat från olika rapporter, osäkerheter som till exempel försöksuppställningar, brännareffekter, inbördes kabelavstånd med mera. Vid analys av fullskaleförsöken, där tillgängliga effektutvecklingar över tid finns att tillgå på SP Fire Database (2012), noteras dock att resultaten avseende maximala effekter kan ge något vilseledande resultat, detta då testerna utfördes under en viss tid, 2400 sekunder, med en viss längdsektion kablar, 4 meter. För en del av testerna, framförallt vid testerna med kraftkablar, kan det urskiljas från effektutvecklingskurvorna att vid den tidpunkt då brännaren stängts av, det vill säga efter 2400 sekunder, ser branden fortfarande ut att vara i tillväxtfasen. Detta kan ses både genom att betrakta effektutvecklingskurvan för det befintliga testet samt att hela längdsektionerna av kablar ej var skadade. Om brännaren varit igång under ett längre tidsintervall hade troligtvis effekten fortsatt öka tills dess att bränslet nått sin maximala förbränningshastighet och därmed sin maximala effektutveckling. För en del av testerna kan det även urskiljas att bränslet tagit slut under tiden då testerna fortgått, detta då hela längdsektionerna av kablar blivit skadade och bränslet därmed tagit slut. Detta har därmed medfört att de maximala effekterna kan ha underskattats. Om kabelproverna varit längre kunde effektutvecklingen ha ökat till sitt potentiella maxvärde och uppehålla sig där en viss tid tills dess att bränslet tagit slut. Som exempel ges figurerna nedan där

Figur 5.7 är en kraftkabel som fortfarande ser ut att vara i tillväxtfasen då brännaren stängs av och där Figur 5.8 är en datakabel där bränslet tar slut under tiden då testet fortgått.



Figur 5.7 Effektutvecklingskurva för en kraftkabel vid fullskaleförsöken (SP Fire Database, 2012)



Figur 5.8 Effektutvecklingskurva för en datakabel vid fullskaleförsöken (SP Fire Database, 2012)

Med hänsyn till ovanstående diskussion anses erhållna resultat från FIPEC-projektet avseende maximala effekter för kablarna därmed vara bristfälliga.

Vid FIPEC-projektet har det testats många olika sorters kablar vilket gör det möjligt att göra inbördes jämförelser av kablarnas brandbeteende, dock har det ej utförts tester av kablar med samma typ av mantelmaterial men med olika sorters isolering. Från försöken kan det dras slutsatsen att mantelmaterialet kan ha en betydande inverkan på brandförloppet, hur stor inverkan olika sorters isoleringsmaterial kan ha på brandförloppet kan dock ej sägas något om.

En ytterligare begränsning med FIPEC-projektet är att de vertikala testerna endast är utförda på en kabelstege i taget, därför kan det ej sägas något om hur branden uppför sig då det är två eller fler närstående kabelstegar som är involverade där dess placeringar kan bidra till ett snabbare och mer omfattande brandförlopp på grund av återstrålning och/eller eventuella skorstenseffekter.

5.3 Utrymningsförhållanden

Produktion av brandgaser är en viktig faktor att ta hänsyn till vid bedömning av möjlighet till utrymning och möjlighet att ta sig in och bekämpa branden. Brandgasproduktionen beror på flera faktorer, bland annat på vilket material som brinner, förbränningsförhållanden, geometri och effektutveckling. Toxiciteten i brandgaserna är främst beroende på förbränningsförhållanden men även på materialegenskaper (Göransson, 1992). Förutom kolmonoxid, vilken är den dominerande toxiska gasen vid de flesta bränder, bildas vid förbränning av PVC även väteklorid (HCl). Detta är en frätande syra vilken vid exponering kan ge hälsoeffekter i form av frätskador på andningsvägarna och även dödsfall vid högre koncentrationer (Larsson & Lönnemark, 2002). Väteklorid är även extremt korrosivt, vid brand följer vätekloriden med rökgaserna och kondenserar på i princip allt som gaserna kommer i kontakt med. Detta kan ge stora skador på komponenter såvida inte en noggrant genomförd sanering utförs omgående efter brand för att begränsa skadorna (Palm, 2002).

För analysering av utrymningsförhållanden behandlar detta avsnitt sikt genom brandgaser samt toxicitet i omgivande luft. Analysen utförs med underlag av Boverkets allmänna råd om analytisk dimensionering av byggnaders brandskydd, BFS 2011:27. Denna författningssamling beskriver godtagbara nivåer för kritisk påverkan för säker utrymning (Boverket, 2011). BFS 2011:27 anger som allmänt råd att utrymningsmöjligheterna bör utgå från en jämförelse mellan tiden för utrymning och tiden tills dess att kritisk påverkan uppstår, där tiden för utrymning bör inkludera tider för varseblivning, förberedelse och förflyttning (Boverket, 2011).

5.3.1 Siktförhållanden

Enligt BFS 2011:27 är de allmänna råden gällande siktförhållanden vid utrymning att sikten 2,0 meter ovan golv ska vara (Boverket, 2011):

- 10,0 meter för utrymmen >100 m^2
- 5,0 meter för utrymmen <100 m^2

Beräkningar av siktförhållanden kan utföras enligt ekvationer avseende ett materials rökpotential och effektutveckling. Rökpotentialen för ett ämne ges av Ekvation 5.2 nedan (Nilsson & Holmstedt, 2008).

$$D_0 = D_L \cdot \frac{V}{m_f} \qquad \text{Ekvation 5.2}$$

Ekvationen ovan är framtagen av Rasbash & Phillips (1978) som mätte olika ämnens rökproduktion vid förbränning i ugn (Drysdale, 1999). Beräkningar av sikten skall utföras med resultat i enheten obscura varför ekvationen ovan modifieras till följande (Nilsson & Holmstedt, 2008).

$$D_{0,10log} = D_{L,10log} \cdot \frac{V}{m_f} \qquad \text{Ekvation 5.3}$$

Enligt ekvationen ovan ser rökpotentialen endast ut att bero på ämnet som brinner, detta är dock inte fallet. Rökpotentialen beror även på typ av brand, syretillgång, materialets placering, inkommande strålning med mera. Rökpotentialen för en glödbrand är generellt större än den för en flambrand i ett och samma material. Vid utvärdering av ett ämnes rökpotential råder välventilerade förhållanden vid försöksuppställningen, därför kan värdena skilja sig markant vid en verklig brand i det fall då syretillgången är en begränsande faktor (Drysdale, 1999). Rökpotentialen tar inte heller hänsyn till hur fort ett material brinner, för ett ämne med stor massavbrinning kan sikten i ett utrymme försämras betydligt snabbare än vad som väntas enligt tabellerade värden (Nilsson & Holmstedt, 2008).

För PVC gäller vid flambrand (Drysdale, 1999).

$D_{0,10log} = 1{,}7\ ob\ m^3/g$

Vid bestämning av förbränd massa används som underlag Ekvation 5.4 nedan (Karlsson & Quintiere, 2000).

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot \chi \cdot \Delta H_c \qquad \text{Ekvation 5.4}$$

som modifieras till

$$m_f = \int_0^t \frac{\dot{Q}}{\chi \cdot \Delta H_c} \cdot dt \qquad \text{Ekvation 5.5}$$

där m_f representerar massan brunnet material vid en viss tidpunkt. Slutligen bestäms sikten vid en viss tidpunkt enligt Ekvation 5.6 (Jönsson et al, 2005).

$$Sikt\ i\ meter = \frac{10}{D_{L,10log}} \qquad \text{Ekvation 5.6}$$

5.3.2 Toxicitet

Enligt BFS 2011:27 är de allmänna råden gällande toxiciteten vid utrymning att 2,0 meter ovan golv ska (Boverket 2011):

- Kolmonoxidkoncentration (CO) < 2 000 ppm
- Koldioxidkoncentration (CO_2) < 5 %
- Syrgaskoncentration (O_2) > 15 %

Då det brinner i PVC bildas väteklorid vilket även måste tas i beaktning. SFPE-handboken anger för väteklorid ett RD_{50}-värde på 309 ppm (Purser, 2002). RD_{50} står för Respiratory Depression och är den koncentration som orsakar 50 % minskning i andningshastighet under en kort exponeringstid. Dessa värden är förvisso uppmätta för möss, dock har det konstaterats rimliga samband mellan RD_{50}-koncentrationer för möss för ett stort spann av irriterande gaser med de koncentrationer som rapporterats smärtfyllt irriterande hos människor (Purser, 2002).

För att kunna utföra beräkningar avseende toxiciteten krävs kännedom om brandgasernas sammansättning, det vill säga dess innehåll av bland annat CO, CO_2, O_2, sot och i detta fall även väteklorid. För att brandgasernas sammansättning ska kunna beräknas krävs att förbränningsprodukternas och syrets yielder är kända. Med yield avses vilken massa, m_i, av ett ämne som bildas per massa avgivet bränsle, m_f. Detta beräknas enligt (Karlsson & Quintiere, 2000).

$$y_i = \frac{m_i}{m_f} \qquad \text{Ekvation 5.7}$$

Värden på yielder för olika ämnen finns att tillgå i diverse litteratur, dock kan dessa värden skilja sig från ett verkligt scenario, yielden för en viss produkt beror bland annat på typ av förbränning (flambrand eller glödbrand) samt förhållandet mellan bränsle och syre vid förbränningen (Nilsson & Holmstedt, 2008). Vid välventilerade förhållanden gäller följande värden på yielder vid brand i PVC (Karlsson & Quintiere, 2000).

$y_{CO} = 0.063$
$y_{CO_2} = 0.46$

$y_{HCl} = 0.5$
$y_s = 0.14$

Där det nedre värdet anger yielden av sot. Ovanstående värden är experimentellt framtagna vid välventilerade förhållanden och är förhållandevis konstanta för ett givet bränsle, men då en brand är ventilationskontrollerad är yielderna starkt beroende på syretillgången (Karlsson & Quintiere, 2000). Därför finns tabellvärden avseende yielder att tillgå nästan enbart för välventilerade förhållanden.

5.3.3 Sammanfattning utrymningsförhållanden

Kriterierna för utrymning hämtats från Boverkets allmänna råd om analytisk dimensionering av byggnaders brandskydd. I de allmänna råden redovisas vad som anses vara godtagbar exponering avseende bland annat sikt och toxicitet vid utrymning. Då detta endast är generella rekommendationer ligger det inget lagkrav bakom exponeringsnivåerna, detta är istället kriterier som någon lämpligen eller bör följa (Boverket, 2011). För kommande beräkningar av siktförhållanden antas värdet på rökpotentialen vara 1,7 $ob\ m^3/g$, detta värde är experimentellt framtaget vid en bestämd försöksuppställning vid vilken det råder välventilerade förhållanden. Värdet på rökpotentialen kan, vid en riktig brand, skilja sig markant från det experimentellt framtagna värdet då bland annat geometri, ventilation, strålning och placering kommer ha en betydande roll på rökproduktionen, skillnaden kan bli upp emot en faktor fyra till sex högre vid en rumsbrand i jämförelse med de experimentellt framtagna värdena (Nilsson & Holmstedt, 2008). Det är alltså en mängd omgivande faktorer som har inverkan på hur rökproduktionen för ett ämne ser ut, därmed är det svårt att ta fram precisa bedömningar av hur sikten kommer förändras med tiden vid en brand.

Vad gäller värden på yielder avseende brand i PVC är dessa, vilket nämnts tidigare, experimentellt framtagna vid välventilerade förhållanden. Vid en potentiell brand då välventilerade förhållanden ej råder kommer mängden oförbrända gaser öka. Hur yielderna ser ut vid dessa scenarion kan det ej sägas något om då de är starkt beroende på syretillgången (Karlsson & Quintiere, 2000).

5.4 Sammanfattning litteraturstudie

Det finns ett antal olika testmetoder för att bedöma skadekriterier hos kablar. Beräkningsmodellen för kritisk strålningsnivå och testmetoden avseende termisk strålningspåverkan anses dock ge allt för osäkra resultat för att dessa skall kunna vara till användning vid det fortsatta arbetet. De kritiska strålningsnivåerna är definierade som de nivåer kablar ska kunna stå emot under en obegränsad tid. Vid en strålningsnivå över detta värde kommer en kabel kortsluta och/eller antända efter en viss tid, men då det vid testerna med strålningsnivåer över dessa värden var så pass stor spridning i tider till fallering av kablarna samt att effekten hos en riktig brand inte ligger på ett konstant värde tas beslutet att ej använda kritisk strålningsnivå som underlag för vidare bedömningar avseende brandspridningen. De kritiska inre och yttre temperaturerna är till skillnad från den kritiska strålningsnivån definierade som för vid vilken inre respektive yttre temperatur det sker kortslutning och/eller antändning av kabeln. I detta fall förekommer alltså ej osäkerheterna avseende tidsaspekten varför därmed de kritiska inre respektive yttre temperaturerna väljs att gå vidare med vid bedömningar av skadekriterier hos kablarna. Dock är testerna avseende temperaturpåverkan utförda med en stor variation av testmetoder, kablar, apparatur och så vidare vilket medför att de framtagna resultaten endast gäller för den befintliga kabeln vid det befintliga testet. Dock anses de framtagna resultaten ändå kunna ge ett riktvärde på vid vilka ungefärliga temperaturer kablarna kortsluter och/eller antänder.

Identifierade parametrar som kan spela in för när en kabel kortsluter och/eller antänds vid brandpåverkan är:

- Mantel- och isoleringsmaterial
- Fyllnadsmaterial och armering
- Antal kablar per kabelstege
- Inverkan av både termisk strålning och temperaturhöjning

För brandspridningen anses en kabels brandspridningsklass endast ge ett gränsvärde på hur kabelsorten antänds och underhåller brand. Brandspridningsklassen anses därmed ej vara något giltigt verktyg för att kunna förutse brandspridningen hos kablar. FIPEC-försöken däremot ger kvantitativa resultat avseende bland annat brandspridning och effektutvecklingar för ett stort spann av kabelsorter vid tester med olika konfigurationer. Resultat från FIPEC-projektet kommer därmed användas för bedömning av brandspridning. Med valet av denna modell följer även här ett antal osäkerheter. Parametrar som påverkar brandspridningen hos kablar är:

- Kabelmaterial
- Den geometriska konfigurationen
- Storlek på tändkälla
- Hur stora mängder av kablarna som är utsatta för brand
- Antal kablar på en kabelstege
- Ventilationsförhållanden

Vad gäller utrymningsförhållanden har det undersökts vilka kriterier avseende sikt och toxicitet som ska gälla vid utrymning. Boverket (2011) anger följande råd för godtagbar exponering avseende sikt och toxicitet vid utrymning:

Sikten 2 meter ovan golv ska vara:

- 10,0 meter för utrymmen > 100 m^2
- 5,0 meter för utrymmen < 100 m^2

Vid beräkning av sikten utgås från rökpotentialen för det brandutsatta ämnet, i detta fall PVC, detta värde är experimentellt framtaget och kan vid en riktig brand vara en faktor fyra till sex högre beroende på en mängd omgivande faktorer.

För toxiciteten gäller att 2 meter ovan golv ska:

- Kolmonoxidkoncentration (CO) < 2 000 ppm
- Koldioxidkoncentration (CO_2) < 5 %
- Syrgaskoncentration (O_2) > 15 %

Avseende toxiciteten av väteklorid anger SFPE-handboken ett RD_{50}-värde på 309 ppm.

Vid beräkning av toxiciteten utgås från yielderna för det brandutsatta ämnet, i detta fall PVC, även dessa värden är experimentellt framtagna och utförda vid välventilerade förhållanden. Då yielderna är starkt beroende på syretillgången kan det ej sägas något om hur de ser ut då välventilerade förhållanden ej råder.

I följande kapitel kommer ovanstående parametrar diskuteras och tas hänsyn till vid fortsatta val av vilka sorters kablar och modeller som skall appliceras till förhållandena som råder i kabelschaktet.

5.5 Förslag på framtida forskning

Skadekriterier för kablar är svåra att definiera då det är så pass stora variationer i testmetoder, kablar, apparatur och så vidare. Därför vore det användbart att utföra en genomgående analys med väl definierade testmetoder för ett stort antal kablar, i linje med FIPEC-projektet, där det även studeras för vilka strålningsnivåer samt inre och yttre temperaturer kablar kortsluter och/eller antänder. Det rekommenderas att vid ett och samma test utföra både strålningsmätningar och temperaturmätningar samtidigt, detta då det i dagens läge ej med säkerhet kan sägas att den kritiska temperaturen är giltig då en kabel dessutom är strålningspåverkad och vice versa. Mätningarna skall även innefatta analyser av tider till kortslutning och/eller antändning vid flera olika strålningsnivåer.

Testerna avseende skadekriterier har dessutom endast utförts antingen med brännare eller i ugn, därför kan det ej med säkerhet sägas att skadekriterierna gäller vid ett riktigt brandscenario. Vid en riktig brand sker både värme- och strålningspåverkan samtidigt vilket gör det svårt att säga om skadekriterierna gäller då båda parametrarna inverkar. Det hade därför varit bra att utföra dessa tester vid riktiga brandscenarion då detta medför ett annat värde på värmeledningskoefficienten och då kablarna även kan vara utsatta för mekaniska spänningar.

Vid huvuddelen av testerna avseende skadekriterier är kablarna indelade i två övergripande kategorier, klassade och oklassade kablar. Kablarna är indelade i dessa klasser beroende på mantel- och isoleringsmaterial. Det finns dock inga tester som analyserar hur eventuellt fyllnadsmaterial och armering kan påverka dessa skadekriterier. Därför anses att försök avseende hur andra konstruktionsdetaljer påverkar skadekriterierna hade varit lämpliga att utföra.

Vad gäller brandspridning anses brandspridningsklasserna vara ett mindre bra sätt att förutsäga brandspridningen. Därför hade det varit bra att i dessa klasser även inkludera kvantitativa mätresultat så som mätningar avseende flamfrontens rörelse och brandspridning mellan kabelstegar för att på så sätt få mer adekvat information om hur en viss kabelsort underhåller och sprider brand. Dessutom ska det istället för att endast ta hänsyn till andelen brännbart material vid testerna även tas hänsyn till inbördes avstånd mellan kablar då detta, enligt tidigare, har visat sig ha en påtaglig inverkan på brandförloppet. Detta för att få ett indikation om hur variationer av dessa parametrar påverkar brandförloppet och till vilken grad dessa variationer förekommer. Därmed anses det kunna vara lättare att dra slutsatser om hur en effektutvecklingskurva troligtvis kommer se ut för en viss kabelstege med en viss kabelkonfiguration.

Det behövs även utföras mer studier avseende brandspridning vid horisontellt monterade kabelsektioner, de studier som finns är utförda i begränsat antal. Axelsson, Van Hees & Blomqvist (2002) har påvisat att ventilationsförhållanden har betydande inverkan på brandförloppet vid denna typ av konfiguration, därför anses att även denna parameter ska tas hänsyn till vid studierna. Mätningar ska även utföras med olika antal kabelstegar monterade ovan varandra så att slutsatser om brandtillväxt skall kunna dras både vid fallet med enstaka horisontellt monterade kabelstegar samt då det är monterat flera kabelstegar ovan varandra.

Vidare skall det vid brandspridningstesterna kontrolleras så att kablarnas maximala effektutvecklingar uppnås vid de olika konfigurationerna. Detta innebär att antingen förlänga provningstiden eller att förlänga kabelproverna, beroende på kabelsort. I dagsläget kan det ej sägas något om en mängd kabelsorters maximala effektutvecklingar då antingen provningstiderna eller kabelproven varit begränsande faktorer.

Vilket diskuterats tidigare angående antändning av kablar renderar en större infallande strålning även att dess maximala effekter kan ligga på ett betydligt högre värde. Därför rekommenderas att utföra en mer genomgående analys av hur olika infallande strålningsnivåer påverkar både tillväxthastigheter och maximala effekter för diverse kabelkonfigurationer.

Vid testerna avseende brandspridning sker antändning med en brännare som är igång under hela testutförandet, hur stor inverkan detta har på brandspridningen är svårt att säga. Även hur kablar påverkas av en större brännareffekt är oklart, enligt Göransson (1992) kan en större antändningskälla eventuellt även förutsäga resultatet för en liten tändkälla, men detta kan ej sägas med säkerhet. Hur kablarna reagerar då brännaren stängs av är även detta svårt att säga då en del kablar kommer fortsätta brinna medan en del kommer självslockna. Dessutom är det inte säkert att kablarna reagerar på samma sätt vid testerna som de hade gjort vid ett elektriskt fel så som kortslutning eller motsvarande då detta är en annan typ av antändningskälla.

Vid FIPEC-projektet utfördes tester på ett stort urval av kablar, dock saknas det tester av framförallt kraftkablar med olika sorters isoleringsmaterial. Det kunde urskiljas från effektutvecklingskurvorna att olika mantelmaterial kunde ha en betydande inverkan på brandförloppet, men det kan ej med säkerhet sägas att isoleringsmaterialet reagerar på samma sätt. Vilken/vilka av kablarnas konstruktionsdetaljer som har störst inverkan på brandförloppet och hur brandförloppet varierar vid ändringar av dessa parametrar anses vara intressanta frågor att ställa sig. Detta gäller inte endast mantel- och isoleringsmaterialen utan även fyllnadsmaterial, armering, ledarmaterial och dylikt.

Det rekommenderas även att utföra studier huruvida alla kablar i ett brandpåverkat utrymme behövs ersättas eller ej. Vid de fall då kablar blivit brandpåverkade men fortfarande fungerar finns det ingen lösning för att förutspå hur länge dessa fortsätter att fungera och huruvida de är i behov av ersättning eller ej.

I avsnitt 7.1 och 7.2 diskuteras kring en modell för beräkning av den inre temperaturen hos en kabel framtagen av Andersson & Persson (2001), efter beräkningar med större kablar än de som används i Andersson & Perssons rapport framgår att modellen ger stora felmarginaler vid större kabeldiametrar. Därför ges förslaget att utföra en undersökning för vilka storlekar på kablar denna modell ger giltiga värden. Utförligare diskussion och testberäkningar med denna modell redogörs i avsnitt 7.1, 7.2 samt Bilaga D.

6 Applicering av modeller till kabelschaktet

I följande avsnitt kommer de inhämtade resultaten från litteraturstudien användas för att vidare definiera vilka skadekriterier som skall råda för kablarna i schaktet, hur brandspridningen ska modelleras och vilka kriterier som skall gälla avseende utrymning genom schaktet. Inledningsvis definieras vilka skadekriterier som ska råda för kablarna i schaktet, detta utförs genom att utgå från testresultaten inhämtade från litteraturstudien samt från tidigare identifierade parametrar som kan påverka kortslutnings- och antändningstemperaturerna. Vidare förs diskussion kring vilka skadekriterier som skall appliceras till kablarna i schaktet.

För modellering av brandspridning utgås från tidigare definierade parametrar som kan påverka brandspridningen för att vidare välja vilka kablar samt vilka testmetoder som skall användas som grund för vidare modelleringar. Vidare förs diskussion kring likheter och skillnader mellan valda kablar, testmetoder, schaktets kablar och konfigurationer samt hur dessa parametrar påverkar resultaten.

För bedömning av utrymning från schaktet utgås från tidigare definierade värden avseende sikt och toxicitet för att vidare utvärdera huruvida dessa även kan anses gälla för schaktet.

Avslutningsvis sammanfattas vilka kablar och modeller som valts att appliceras till schaktet, vilka osäkerheter som föreligger samt hur dessa kan hanteras på bästa sätt.

6.1 Skadekriterier

För skadekriterier hos kablarna väljs att se på för vilken inre respektive yttre temperatur en kabel kortsluter och/eller antänder. Från litteraturstudien fås att den inre temperaturen för kortslutning av kablar ligger mellan 138-460 °C. Det påvisas dock en skillnad beroende på om kablarna är klassade eller ej, för de klassade kablarna ligger de inre temperaturerna för kortslutning mellan 249-395 °C och för de oklassade på mellan 138-460 °C. I genomsnitt klarar alltså de klassade kablarna av högre inre temperaturer innan kortslutning är ett faktum, men det ska noteras att även då de oklassade kablarna kortslöts vid lägre temperaturer fanns det någon enstaka kabel som klarade av en inre temperatur på upp emot 460 °C. Vilket nämnts tidigare anses 460 °C vara en hög inre temperatur för kortslutning hos oklassade kablar vilka vanligtvis anses kortslutas vid omkring 250 °C (Murphy, 2004). Även vid undersökningarna från NUREG/CR-6850 observerades stora skillnader i inre temperaturer för kortslutning hos de oklassade kablarna, vad detta beror på är ej klarlagt i dagsläget (NUREG-1805, 2004).

För slutsatser huruvida en kabel antänder eller ej ger litteraturstudien att den yttre temperaturen vid vilken en kabel, vid närvaro av pilotlåga, antänder ligger mellan 218-422 °C för oklassade kablar och kring 330 °C för klassade kablar. Även i detta fall finns det enstaka oklassade kablar som verkar klara av en högre yttre temperatur innan antändning än klassade kablar.

De parametrar som tidigare identifierats att kunna påverka när en kabel kortsluter och/eller antänder är:

- Mantel- och isoleringsmaterial
- Fyllnadsmaterial och armering
- Antal kablar per kabelstege
- Inverkan av både termisk strålning och temperaturhöjning

Huvuddelen av kablarna som identifierats under litteraturstudien är indelade i två huvudgrupper som beror av dess mantel- och isoleringsmaterial. Därmed antas även dessa vara de viktigaste parametrarna

för vid vilka inre och yttre temperaturer kablar kortsluter och/eller antänder. Fyllnadsmaterialet och armeringen anses inte ha någon nämnvärd påverkan vid vilken yttre temperatur en kabel antänder då detta till större delen anses bero på mantelmaterialet, dock kan det ha en viss påverkan på den inre temperaturen för kortslutning. Hur detta påverkar är svårt att säga då kablarna vid huvuddelen av rapporterna som analyserats endast är benämnda som klassade respektive oklassade kablar, vid de rapporter där mantel- och isoleringsmaterialen är specificerade finns dock ingen information om huruvida kablarna har fyllnadsmaterial eller armering eller hur dessa parametrar skulle kunna påverka.

Då testerna som identifierats under litteraturstudien endast utförts med en kabel i taget och genom antingen termisk strålning eller temperaturpåverkan tas det alltså ingen hänsyn till de två sista punkterna ovan. Dessa punkter anses dock ej påverka vid vilken inre temperatur en kabel kortsluter, det är snarare tiden till dess att temperaturen uppnås som reduceras. Vad gäller den yttre temperaturen för antändning kan inverkan av termisk strålning medföra att det krävs en lägre temperatur för att kablarna ska antända än vid fallet med enbart temperaturhöjning. Huruvida detta stämmer eller ej och om så är fallet hur stor temperaturskillnaden då är kan det ej sägas något om då inga undersökningar avseende detta är utförda.

Den större delen av kablarna i schaktet är oklassade kablar och går under den tidigare definierade kategorin övriga kablar. I tabell 6.1 åskådliggörs de olika sorters kablarna och dess uppbyggnader som finns i schaktet.

Tabell 6.1 Kabelparametrar för de kabelsorterna i schaktet

Kabelsort	Ledare	Mantel	Fyllnadsmaterial	Isolering	Ytterdiameter [mm]
FQLQ	Koppar	HFFR	-	HFFR	10-16
FKLK	Koppar	PVC	PVC	PVC	11-17
FKAR-PG	Koppar	PVC	-	PVC	6-21
FQAR-PG	Koppar	HFFR	-	PEX	6-21
UNITRONIC-LiYCY	Koppar	PVC	-	PVC	5-16
FKFR	Koppar	PVC	PVC	PVC	11-23
ÖLFLEX	Koppar	PVC	-	PVC	7-27
AKKJ	Aluminium	PVC	-	PVC	42-52
AXQJ	Aluminium	HFFR	-	PEX	59

Vid val av vilka skadekriterier som ska gälla för kablarna i schaktet väljs samma skadekriterier för alla kablar, detta då kablarna sitter så pass blandat. Det väljs att främst titta på vilka kablar från testerna som har flest likheter i uppbyggnad som huvuddelen av kablarna i schaktet då det är denna parameter som anses ha störst inverkan på vid vilken inre respektive yttre temperatur en kabel kortsluter och/eller antänder. Efter analys av vilka olika sorters kablar som finns att tillgå vid de olika rapporterna väljs att definiera inre temperatur för kortslutning efter en kabel, kallad kabel F24, testad av Andersson &

Persson (2001). Detta är den kabel vid de olika testerna som anses ha flest likheter med huvuddelen av kablarna i schaktet. Uppbyggnaden av denna kabel åskådliggörs i Tabell 6.2 nedan.

Tabell 6.2 Kabelparametrar för kabeln testad av Andersson & Persson (2001)

Kabelsort	Ledare	Mantel	Fyllnadsmaterial	Isolering	Ytterdiameter [mm]
Kabel F24	Koppar	PVC	-	PVC	12

Det kan ses att huvuddelen av kabelsorterna i schaktet är uppbyggda på samma sätt som kabel F24 från testerna av Andersson & Persson (2001) samt att ytterdiametern ligger i storleksintervallet för alla kablar vilka benämns som övriga kablar. Kabeldiametern skiljer sig dock från kraftkablarnas diametrar, dessa större diametrar innebär dock inte att den inre temperaturen för kortslutning ändras utan snarare att de uppnås vid en senare tidpunkt än för kablarna med mindre diametrar. Denna parameter kommer tas hänsyn till vid senare beräkningar av inre temperaturer hos kablarna. Två av kabelsorterna i schaktet har fyllnadsmaterial av PVC, hur detta påverkar är dock oklart, då ingen av de tidigare rapporterna tar hänsyn till denna parameter anses detta dock ej ha nämnvärd inverkan på den inre temperaturen för kortslutning. Från rapporten av Andersson & Persson (2001) erhålls för kabel F24 en kritisk inre temperatur för kortslutning på 180 °C. Denna temperatur kan tyckas vara låg då det finns kablar i schaktet som troligtvis klarar av betydligt högre temperaturer och då någon typ av oklassade kablar, enligt tidigare, kunde klara upp emot 460 °C. Men då större delen av kablarna i schaktet är essentiella för den fortsatta produktionen väljs ändå detta låga värde då de sämre kablarna kommer vara de begränsande faktorerna och därmed väljs som referenskablar.

Vid val av den yttre temperaturen för antändning av kablarna i schaktet väljs temperaturen 218 °C, vilket var det lägre värdet för antändning av oklassade kablar. Detta värde väljs dels på grund av kabeluppbyggnaden samt att inverkan av termisk strålning kan medföra att en kabel antänder vid en lägre temperatur. Även i detta fall finns det troligtvis kablar i schaktet som klarar av betydligt högre yttre temperaturer för antändning, men precis som tidigare väljs detta låga värde då de sämre kablarna kommer vara de begränsande faktorerna.

För kablarna i schaktet väljs alltså:

- Kortslutning sker då den inre temperaturen i en kabel uppnår 180 °C
- Antändning sker då den yttre temperaturen på en kabel uppnår 218 °C

6.2 Brandspridning

Med underlag av tidigare diskussioner anses brandspridningsklassningen ej kunna användas för att dra några giltiga slutsatser avseende brandspridning i schaktet. FIPEC-projektets försök däremot redovisar kvantitativa resultat avseende bland annat effektutvecklingar och brandspridning och möjliggör även inbördes jämförelser av både försöksuppställningar och kabelsorter. Utvärdering av eventuell brandspridning kommer därmed ske med underlag av erhållna resultat från FIPEC-projektet. Utvärderingen kommer utföras genom att inledningsvis se på för vilka kablar från FIPEC-projektet som skall undersökas och hur de kan kopplas till de kablar som finns i schaktet. Vidare undersöks från vilka testutföranden resultat avseende brandspridning ska inhämtas, detta görs genom att jämföra befintliga försöksuppställningar med kabelkonfigurationerna i schaktet och tidigare identifierade parametrar som kan påverka brandspridningen.

De identifierade parametrarna som kan spela in på brandspridningen är:

- Kabelmaterial
- Den geometriska konfigurationen, det vill säga kabelstegarnas placering i förhållande till varandra samt kablarnas monteringar på kabelstegarna (till exempel mellanavstånd eller buntning)
- Storlek på tändkälla
- Hur stora mängder av kablarna som är utsatta för brand
- Antal kablar på en kabelstege
- Ventilationsförhållanden

I följande avsnitt väljs vilka kablar och försöksuppställningar som skall modelleras efter. Vid dessa val diskuteras kring ovanstående punkter, vad som skiljer sig mellan modellerna och schaktet, hur dessa skillnader påverkar ett eventuellt brandförlopp samt hur detta kan hanteras.

6.2.1 Val av kablar att applicera till schaktet

Vad gäller kabelmaterialet kan kablarnas uppbyggnad ha en stor inverkan på brandförloppet. Då det finns så pass många olika sorters kablar i schaktet med olika uppbyggnader resulterar detta också i att brandbeteende och effektutvecklingar kan skilja sig en hel del mellan kablarna. Att representera kabelbränder för alla kablar som finns i schaktet på ett korrekt sätt med generella effektutvecklingskurvor blir därmed i princip en omöjlighet. Men då det skulle vara allt för tidskrävande, om ens möjligt, att modellera exakta effektutvecklingskurvor för alla kablar i schaktet krävs ändå att någon sorts generalisering görs. Tidigare har kablarna i schaktet delats in i två huvudkategorier, kraftkablar och övriga kablar, samma uppdelning kommer göras även här. Kraftkablarna kommer alltså approximeras som en sorts kabel och övriga kablar som en annan.

Då uppbyggnaden av en kabel kan ha en betydande inverkan på brandförloppet medför ovanstående förenkling vissa osäkerheter vid den fortsatta utvärderingen. Därför kommer en känslighetsanalys avseende denna parameter utföras för att på bästa sätt kunna hantera dessa osäkerheter.

Vid val av vilka kablar som skall appliceras till schaktet görs en jämförelse av hur större delen av kraft- och övriga kablar i schaktet är uppbyggda med kablarna använda vid FIPEC-projektet. Detta för att se vilka kablar som har flest likheter i uppbyggnad, vilket troligtvis även medför mest likheter i brandbeteende. Om det finns flera olika kablar som skulle kunna appliceras till schaktets kablar väljs de som påvisade de allvarligaste brandförloppen. Detta av samma anledning som vid valet av skadekriterier för kablarna, det vill säga därför att de sämre kablarna i schaktet kommer vara de begränsande faktorerna. I Tabell 6.3 åskådliggörs uppbyggnader av kraftkablarna i schaktet och uppbyggnader av de kraftkablar som använts vid FIPEC-projektet, som i tabellen är benämnda med en siffra.

Tabell 6.3 Uppbyggnader av kraftkablarna i schaktet och kraftkablarna använda vid FIPEC-projektet (Grayson et al, 2000)

Kabel	Ledarmaterial	Antal ledare	Mantel	Isolering	Armering	Diameter [mm]
AKKJ	Aluminium	3	PVC	PVC	-	42-52
AXQJ	Aluminium	3	HFFR	PEX	-	59
Kabel 5	Koppar	3	PVC	XLPE	-	42
Kabel 6	Koppar	3	RPPVC	XLPE	-	45
Kabel 7	Koppar	3	Polyoefin	XLPE	-	42
Kabel 8	Koppar	3	PVC	XLPE	Ståltråd	52
Kabel 9	Koppar	3	RPPVC	XLPE	Ståltråd	52
Kabel 10	Koppar	3	Polyoefin	XLPE	Ståltråd	52
Kabel 11	Koppar	1	PVC	XLPE	-	20
Kabel 12	Koppar	1	RPPVC	XLPE	-	20
Kabel 13	Koppar	1	Polyoefin	XLPE	-	20
Kabel 14	Koppar	1	PVC	XLPE	Aluminiumtråd	25
Kabel 15	Koppar	1	RPPVC	XLPE	Aluminiumtråd	30
Kabel 16	Koppar	1	Polyoefin	XLPE	Aluminiumtråd	30
Kabel 17	Koppar	3	Polyoefin	XLPE	-	30
Kabel 18	Koppar	3	PVC	EPR	-	30
Kabel 19	Koppar	3	ZHPolyoefin	XLPE	-	30
Kabel 20	Koppar	7	Polyoefin	EPR	-	20
Kabel 21	Koppar	7	RPPVC	EPR	-	15
Kabel 22	Koppar	7	ZHPolyoefin	XLPE	-	15

Det finns endast en AXQJ-kabel i schaktet vilket betyder att större delen av kraftkablarna i schaktet är AKKJ-kablar av olika storlekar. Från tabellen ovan ses att den kabel från FIPEC-projektet som har flest likheter i uppbyggnad som större delen av kablarna i schaktet är kabel 5. Den har samma antal ledare, samma typ av mantel och ligger i rätt storleksintervall. Skillnaden ledarmaterial emellan anses endast ha mindre inverkan på brandförloppet, dock kan skillnaderna i isoleringsmaterial medföra att brandförloppen skiljer sig åt. Vilket diskuterats tidigare kan mantelmaterialet ha en påtaglig inverkan på brandförloppet. En kabel med PVC-mantel visade sig rendera i betydligt allvarligare brandförlopp än kablar med andra sorters mantelmaterial, samma fenomen antas därmed gälla för isoleringsmaterialet. Men då ingen kraftkabel testad vid FIPEC-projektet hade PVC-isolering föreligger en svårighet att bedöma exakt hur stor inverkan på brandförloppet denna skillnad medför. Hur denna begränsning hanteras diskuteras i kommande avsnitt.

I Tabell 6.4 åskådliggörs uppbyggnader av övriga kablar i schaktet samt uppbyggnader av de installations-, signal- och styrkablar som använts vid FIPEC-projektet, även i detta fall är de kablar som använts vid FIPEC-projektet benämnda med en siffra.

Tabell 6.4 Uppbyggnader av övriga kablar i schaktet och kablar använda vid FIPEC-projektet (Grayson et al, 2000)

Kabel	Ledarmaterial	Mantel	Isolering	Fyllnadsmaterial	Diameter [mm]
FQLQ	Koppar	HFFR	HFFR	-	10-16
FKLK	Koppar	PVC	PVC	-	11-17
FKAR-PG	Koppar	PVC	PVC	-	6-21
FQAR-PG	Koppar	HFFR	PEX	-	6-21
UNITRONIC	Koppar	PVC	PVC	-	5-9
FKFR	Koppar	PVC	PVC	PVC	14-23
ÖLFLEX	Koppar	PVC	PVC	-	7-27
Kabel 23	Koppar	PVC	PVC	PVC	24
Kabel 24	Koppar	PVC	PVC	-	12
Kabel 25	Koppar	RPPVC	PVC	-	15
Kabel 26	Koppar	PVC	PVC	PVC	9
Kabel 27	Koppar	ZHPolyoefin	PP	PVC	9
Kabel 28	Koppar	PVC	PVC	-	9

Av de kablar som finns i schaktet ses att större delen har både mantel och isolering av PVC, de har inget fyllnadsmaterial och ligger i storleksintervallet 5-27 millimeter i diameter. De kablar som har flest likheter i uppbyggnad med större delen av kablarna i schaktet är kabel 24 och kabel 28, dessa har både mantel och isolering av PVC och har diametrar som ligger inom storleksintervallen för kablarna i schaktet. Dock påvisade kabel 24 både hög effektutveckling och tillväxthastighet i jämförelse med kabel 28 vilket medför att denna kabel väljs som referenskabel för övriga kablar.

Kraftkablarna kommer alltså behandlas likvärdiga som kabel 5 och övriga kablar kommer behandlas likvärdiga som kabel 24. Utförligare beskrivningar av dessa kabelsorters uppbyggnader finns att tillgå i Bilaga B.

6.2.2 Val av försöksuppställning att applicera till schaktet

Val av vilken försöksuppställning resultat ska hämtas utgås från ovanstående parametrar som kan påverka brandspridningen. Inledningsvis ses på vilken modell som ska användas för de vertikalt monterade kablarna i schaktet för att vidare se på vilken modell som ska användas för de horisontellt monterade kablarna i schaktet. Vidare diskuteras skillnaderna mellan de valda modellerna och schaktets konfigurationer varpå det dra slutsatser om hur detta skulle kunna påverka ett eventuellt brandförlopp.

6.2.2.1 Vertikal montering

Vid val av vilket testutförande från FIPEC-projektet som skall användas vid applicering till schaktets vertikala kabelkonfigurationer väljs inledningsvis konkalorimeterförsöken och småskaleförsöken bort, detta då dessa tester endast är utförda på enstaka kablar vilket ej anses kunna ge giltiga resultat då kablarna i schaktet till största delen är monterade i buntar. Både fullskaleförsöken och storskaleförsöken är utförda på kablar monterade på kabelstegar, vilket så även är fallet i schaktet. Dock är storskaleförsöken utförda med en kabelstege i en hörnkonfiguration, så är ej fallet på någon plats i schaktet. Fullskaleförsöken däremot är utförda med en fritt stående kabelstege vilket kan liknas med hur de fyra kabelstegarna i schaktet är uppförda, se till exempel Figur 6.1 nedan. Därmed tas beslutet att utvärdera brandspridning vid vertikal montering med utgångspunkt från testresultat av fullskaleförsöken. Med denna approximation kommer dock en begränsning vad gäller den geometriska konfigurationen, det finns fler än en kabelstege i schaktet, 4 stycken, och de är placerade med 0,3 meters inbördes avstånd. Detta betyder att då det är två eller fler kabelstegar som samtidigt brinner kommer återstrålning mellan kabelstegarna samt eventuella skorstenseffekter bidra till ett snabbare

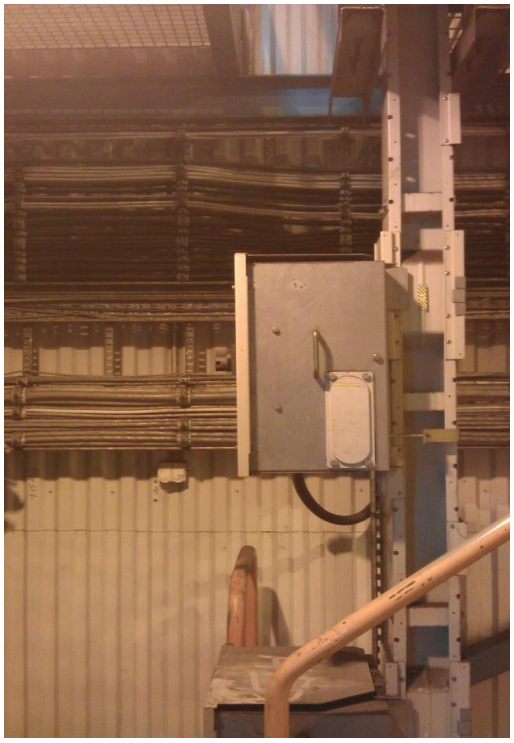
brandförlopp då det endast hade varit en fristående kabelstege som brunnit. Därmed kommer de effektutvecklingskurvor som hämtas från FIPEC-projektets försök vara något underskattade i jämförelse med hur effektutvecklingskurvan från en kabelstege i schaktet kommer att se ut, under förutsättning att flera kabelstegar står i brand samtidigt. Vad gäller kablarnas konfiguration i förhållande till varandra är kablarna vid FIPEC-projektet monterade med en kabeldiameters avstånd för att optimera brandförloppet, så är inte fallet i kabelschaktet där kablarna ofta är monterade tätt intill varandra vilket därmed, enligt tidigare diskussion, kommer ge något lindrigare brandförlopp.

Figur 6.1 Montering av kraftkablar på den yttre kabelstegen

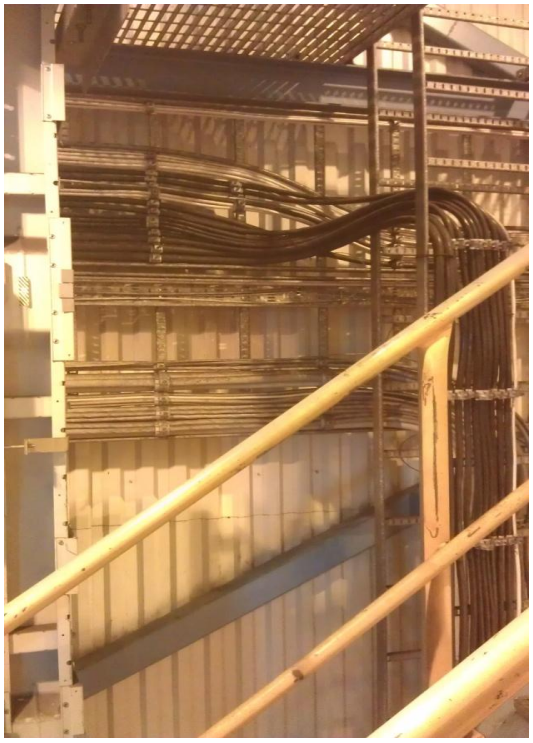
Vad gäller storleken på tändkälla och hur stora mängder av kablarna som är utsatta av brand är fullskaleförsöken utförda med en 340 millimeter bred brännare med effektutvecklingen 20 kW under 40 minuter. Brännaren är placerad 75 millimeter från kablar monterade på en 500 millimeter bred kabelstege. Då effektutvecklingen från brännaren är så pass hög, då den är igång under så pass långt tid samt att brännaren är så pass bred vilket medför att i princip alla kablar direkt blir involverade i branden anses brandförloppet hos kabelstegen från FIPEC-projektet vara allvarligare än ett eventuellt brandförlopp hos en kabelstege i schaktet. Vad gäller antalet kablar på en kabelstege finns det betydligt fler kablar per kabelstege i schaktet än vid FIPEC-projektets försök då kablarna i schaktet oftast är monterade utan inbördes avstånd. Detta betyder även att det finns en större mängd brännbart material per meter kabel i schaktet vilket medför ett allvarligare brandförlopp, dock spelar denna parameter ej lika stor roll som kablarnas inbördes avstånd. Testerna vid FIPEC-projektet är utförda med forcerad ventilation, detta medför troligtvis ett allvarligare brandförlopp än vid fallet utan forcerad ventilation, vilket är det förhållande som kan anses råda i schaktet.

6.2.2.2 Horisontell montering

Monteringarna av de horisontella kabelsektionerna i schaktet skiljer sig markant från de horisontella försöken vid FIPEC-projektet där det monterades tre kabelstegar ovan varandra i en korridorkonfiguration. I schaktet är det snarare kabelstegar som monterats horisontellt in mot väggen, se exempel i Figur 6.2 och 6.3 nedan.



Figur 6.2 Exempel på horisontell kabelkonfiguration



Figur 6.3 Exempel på horisontell kabelkonfiguration

Med tanke på denna stora skillnad tas beslutet att resultaten från de horisontella testerna vid FIPEC-projektet ej ger några giltiga resultat avseende brandspridningen. Beslutet tas istället att behandla dessa kablar med utgångspunkt från de vertikala fullskaleförsöken vid FIPEC-projektet, detta då monteringen kan liknas vid de vertikala testerna snarare än de horisontella. Därmed kommer samma osäkerheter som diskuterats vid vertikal montering gälla för den horisontella monteringen. Dock tillkommer ytterligare osäkerheter på grund av det faktum att kablarna är horisontellt monterade, vertikal brandspridning är betydligt snabbare än horisontell. Detta medför att brandförloppet från FIPEC-projektets tester är allvarligare än ett brandförlopp för de horisontella kabelsektionerna i schaktet.

Vad gäller ventilationsförhållandena har tidigare undersökningar påvisat att ventilationen kan ha betydande inverkan på brandspridningen vid horisontella monteringar, ökad ventilation medför en snabbare flamspridning och en större effektutveckling. Denna ventilationseffekt sker fram till en viss punkt då effektutvecklingen istället stannar av på grund av kylning och störningar i flamman (Axelsson et al, 2002). Denna kritiska vindhastighet är unik för den specifika geometri och kabelmontering som skall undersökas vilket medför att detta ej är något som kan beräknas för schaktet. Ventilationen har inte lika stor inverkan på vertikala monteringar, detta då brandplymen skapar ett naturligt luftflöde vilket främjar flamspridningen. Ökad ventilation har i vissa fall visat sig minska flamspridningen och effektutvecklingen vid vertikala scenarion, detta på grund av störningar i plymen och flammorna vilket därmed bromsar utvecklingen av branden (Axelsson et al, 2002).

6.3 Utrymningsförhållanden

För bedömning av utrymningsförhållanden väljs att utgå från Boverkets allmänna råd om analytisk dimensionering av byggnaders brandskydd. Det väljs att använda kriterier avseende sikt och toxicitet som underlag för verifiering av utrymningssäkerheten i schaktet, vid den tidpunkt då något av kriterierna ej längre uppfylls anses utrymning genom schaktet ej längre vara acceptabel. Dock gäller dessa kriterier endast enligt dagens byggregler varför detta ej är krav att uppfylla för schaktet, dessa kriterier används ändå då de anses avspegla en skälig nivå på brandskyddet. Vad gäller toxiska gaser i den omgivande luften listar BFS 2011:27 endast gränsvärden avseende kolmonoxid, koldioxid och syre. För gränsvärde avseende väteklorid används som underlag SFPE-handboken som anger RD_{50}-värden för diverse irriterande gaser.

6.3.1 Sikt

Enligt tidigare är de allmänna råden gällande siktförhållanden vid utrymning att sikten 2,0 meter ovan golv ska vara (Boverket, 2011):

- 10,0 meter för utrymmen > 100 m^2
- 5,0 meter för utrymmen < 100 m^2

Våningsplanens areor är ungefär 30 m^2 vilket innebär att sikten ska vara 5,0 meter på höjden 2 meter ovan golv. Detta kriterium ska därmed gälla för respektive våningsplan i schaktet. Då sikten på ett våningsplan understiger 5 meter anses utrymning från detta våningsplan ej längre vara acceptabel.

Beräkningar avseende sikten i schaktet utförs med tidigare uppställda ekvationer där rökpotentialen för PVC antas vara 1,7 $ob\ m^3/g$, vilket nämnts tidigare är detta värde är experimentellt framtaget vid en bestämd försöksuppställning i vilken det råder välventilerade förhållanden. Då värdet på rökpotentialen vid en riktig brand kan vara upp emot en faktor fyra till sex högre vid en rumsbrand i jämförelse med de experimentellt framtagna värdena kommer det även utföras beräkningar för att täcka in de värsta fallen avseende rökproduktion. Dessa beräkningar kommer utföras med ett sex gånger högre värde på rökpotentialen, det vill säga 10,2 $ob\ m^3/g$.

6.3.2 Toxicitet

De allmänna råden gällande toxicitet vid utrymning är enligt BFS 2011:27 att 2,0 meter ovan golv ska (Boverket, 2011):

- Kolmonoxidkoncentration (CO) < 2 000 ppm
- Koldioxidkoncentration (CO_2) < 5 %
- Syrgaskoncentration (O_2) > 15 %

SFPE-handboken anger ett RD_{50}-värde för väteklorid på 309 ppm. Dessa kriterier avseende toxiciteten kommer att användas som gränsvärden vid kommande beräkningar för schaktet.

Beräkningar avseende toxiciteten i schaktet utförs med tidigare uppställda ekvationer med tillhörande värden på yielderna. Vilket nämnts tidigare är dessa värden framtagna vid välventilerade förhållanden, hur yielderna ser ut för ett scenario där välventilerade förhållanden ej råder kan ej sägas något om då dessa starkt är beroende på syretillgången. Men då schaktet är så pass stort görs dock antagandet att en eventuell brand kommer vara bränslekontrollerad under den tid som analyseras varför värden på yielder för välventilerade förhållanden anses vara giltiga.

6.4 Sammanfattning av modellering till schaktet

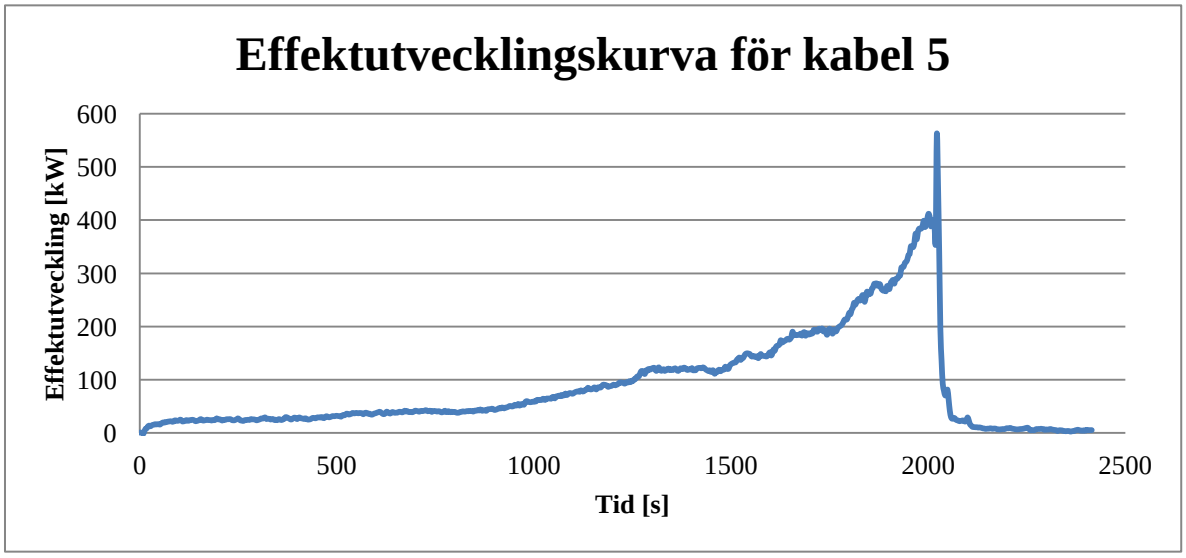
Som skadekriterier för kablarna i schaktet väljs att definiera för vilken inre respektive yttre temperatur en kabel kortsluter och/eller antänder. Då uppbyggnaden av en kabel har störst inverkan på dessa skadekriterier jämfördes uppbyggnaden av kablarna i schaktet med kablarna använda vid temperaturpåverkanstesterna. Efter denna jämförelse drogs slutsatsen att kablarna i schaktet antas kortsluta då dess inre temperatur når 180 °C och antända då dess yttre temperatur når 218 °C. Den yttre temperaturen gäller dock vid närvaro av pilotlåga, men då kabelsektionerna är placerade så pass nära varandra kommer en redan brandutsatt kabelsektion därmed fungera som pilotlåga. Detta är förhållandevis låga temperaturer i jämförelse med hur höga temperaturer vissa av kablarna i schaktet troligtvis skulle kunna klara av, men då de sämre kablarna i schaktet är de begränsande faktorerna väljs dessa som referenskablar. Därmed antas inga kablar i schaktet skulle kunna kortsluta och/eller antända innan dessa temperaturer är uppnådda. Detta medför att fortsatta resultat avseende kortslutning och antändning av kablar i schaktet kommer vara något konservativa.

Utvärdering av brandspridning utförs, både för vertikala och horisontella konfigurationer, med underlag av resultat från fullskaleförsöken för kabel 5 och kabel 24 från FIPEC-projektet. Testresultat från de vertikala fullskaleförsöken finns att tillgå i Tabell 6.5 nedan.

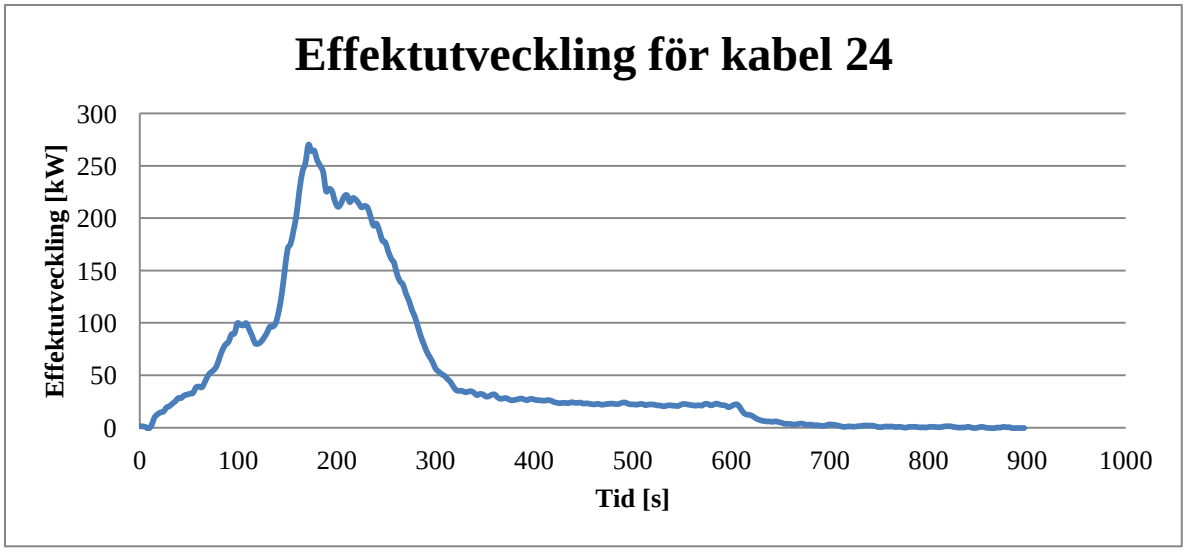
Tabell 6.5 Resultat från fullskaleförsöken för kablarna 5 och 24 (Grayson et al, 2000)

Kabel	Tid till antändning [s]	Maximal effekt utveckling [kW]	Total effekt utveckling [MJ]	FIGRA [kW/s]	Skadad längd [m]	Vol. av brännbart material [l/m stege]	Isolering	Mantel
5	102	392	167.8	0.196	4	2.9	XLPE	PVC
24	36	250	32.8	1.298	4	0.7	PVC	PVC

Från dessa tester finns även på SP Fire Database tillgängliga resultat avseende effektutvecklingar över tid för alla testade kablar, därmed kan effektutvecklingskurvor för de valda kablarna tas fram. Effektutvecklingen över tid för en kabelstege monterad med kabel 5 åskådliggörs i Figur 6.4 och för kabel 24 i Figur 6.5.



Figur 6.4 Effektutveckling över tid för kabel 5 (SP Fire Database, 2012)



Figur 6.5 Effektutveckling över tid för kabel 24 (SP Fire Database, 2012)

De två effektutvecklingskurvorna ovan påvisar antydan till exponentiella tillväxter, detta fenomen kan i testerna urskiljas för alla de kabelsorter som hade 4 meter skadad längd, det vill säga hela kabellängderna (SP Fire Database, 2012). För kabel 24 ser dock tillväxtfasen ut att ske i två faser, att det ser ut på detta sätt antas vara på grund av kabeluppbyggnaden. Den första fasen associeras med mantelmaterialet och den andra fasen med isolerings- och fyllnadsmaterialet, detta kan dock endast urskiljas för ett litet antal kablar i testerna. För kabel 5 ses antydan till dessa toppar först efter 1500 sekunder, vid denna tidpunkt antas isoleringsmaterialet bli involverat i branden. Med underlag av tidigare diskussion borde därför nästa fas rendera i ett allvarligare förlopp än vad som urskiljs i figuren då kraftkablarna i schaktet antas ha PVC-isolering. Hur mycket allvarligare förlopp är svårt att säga då ingen av kraftkablarna som testats vid FIPEC-projektet hade PVC-isolering.

För att utrymning genom schaktet gäller för respektive våningsplan att 2 meter ovan golv ska

- Sikten > 5 meter
- Kolmonoxidkoncentration (CO) < 2 000 ppm
- Koldioxidkoncentration (CO_2) < 5 %
- Syrgaskoncentration (O_2) > 15 %
- Vätekloridkoncentration (HCl) < 309 ppm

Vid den tidpunkt då något av ovanstående kriterier ej längre är uppfyllda anses utrymning från det våningsplan i schaktet detta sker ej längre vara acceptabel.

6.5 Sammanfattning osäkerheter

Vid val av skadekriterier, kablar att modellera efter och vilket försöksutförande resultat skall hämtas ifrån tillkommer, vilket diskuterats tidigare, ett antal osäkerheter. Nedan presenteras en sammanfattning av vilka parametrar som påverkar skadekriterier och brandspridning, likheter och olikheter mellan modelleringen och schaktet samt hur detta påverkar resultaten. Vad gäller brandspridning tillkommer ytterligare en osäkerhet avseende maximala effektutvecklingar som även diskuteras i avsnittet.

6.5.1 Skadekriterier

Nedan diskuteras tidigare parametrar som identifierats att påverka vid vilka inre respektive yttre temperaturer kablar kortsluter och/eller antänder, osäkerheter som uppstår vid applicering av dessa temperaturer till schaktets kablar samt hur dessa påverkar resultaten vid fortsatt modellering.

- Mantel- och isoleringsmaterial

Detta är den parameter som anses ha störst inverkan på skadekriterierna. Vad gäller den inre temperaturen för kortslutning väljs att använda samma temperatur som uppmättes av Andersson & Persson (2001) för en kabel med PVC-mantel och PVC-isolering. Denna uppbyggnad antas även gälla för större delen av kablarna i schaktet. Det finns dock kablar i schaktet som är uppbyggda på annat sätt, huvuddelen av dessa kablar är halogenfria vilket betyder att de går under den tidigare definierade kategorin klassade kablar vilka överlag klarade av högre inre temperaturer innan kortslutning inträffade. Vid val av vilken yttre temperatur som ska gälla för antändning väljs den lägsta uppmätta för oklassade kablar från litteraturen. De valda temperaturerna anses därmed vara något konservativa och ska ses som värden för det värsta möjliga fallet.

- Fyllnadsmaterial och armering

Fyllnadsmaterialet och armeringen anses inte ha någon nämnvärd påverkan på varken vid vilken inre eller yttre temperatur en kabel kortsluter eller antänder. I schaktet finns det endast två sorters kablar som innehåller fyllnadsmaterial och ingen sort som är armerad. Fyllnadsmaterialet skulle eventuellt kunna innebära att det tar lite längre tid att nå den inre temperaturen för kortslutning, men den anses ej påverka själva falleringstemperaturen. Detta anses vara en parameter som därmed inte är i behov av hantering.

- Antal kablar per kabelstege

Tidigare har denna parameter inte ansetts påverka vid vilken inre temperatur en kabel kortsluter, dock kan den ha inverkan på den yttre temperaturen för antändning. Kablarnas närhet till varandra skulle kunna innebära en lägre antändningstemperatur på grund av återstrålning, detta har dock hanterats genom att välja en så pass låg temperatur för antändning.

- Inverkan av både termisk strålning och temperaturhöjning

Inte heller denna parameter anses ha nämnvärd inverkan på vid vilken inre temperatur en kabel kortsluts, dock kan inverkan av termisk strålning i kombination med temperaturhöjning medföra en lägre antändningstemperatur för kablarna. Även denna parameter har hanterats genom att välja en så pass låg temperatur för antändning.

I Tabell 6.6 nedan ges en sammanfattning av de parametrar som inverkar på skadekriterierna, skillnader mellan litteraturen och schaktets kablar och konfiguration, hur dessa skillnader kan påverka skadekriterierna samt hur detta hanteras.

Tabell 6.6 Sammanfattning av osäkerheter för skadekriterier

	Litteratur	Schaktet	Påverkan	Hantering
Mantel- och isoleringsmaterial	PVC	Större delen PVC, finns halogenfria	Konservativa värden	Ej nödvändigt att hantera
Fyllnadsmaterial och armering	Ingen	Två sorter med fyllnadsmaterial	Ingen nämnvärd påverkan	Ej nödvändigt att hantera
Antal kablar per kabelstege	Tester på en kabel	Flera kablar tätt intill varandra	Ingen påverkan på inre temperatur, möjlig påverkan på yttre temperatur	En låg yttre temperatur för antändning väljs
Inverkan av både termisk strålning och temperaturhöjning	Endast temperaturhöjning	Inverkan av både temperaturhöjning och termisk strålning	Ingen påverkan på inre temperatur, möjlig påverkan på yttre temperatur	En låg yttre temperatur för antändning väljs

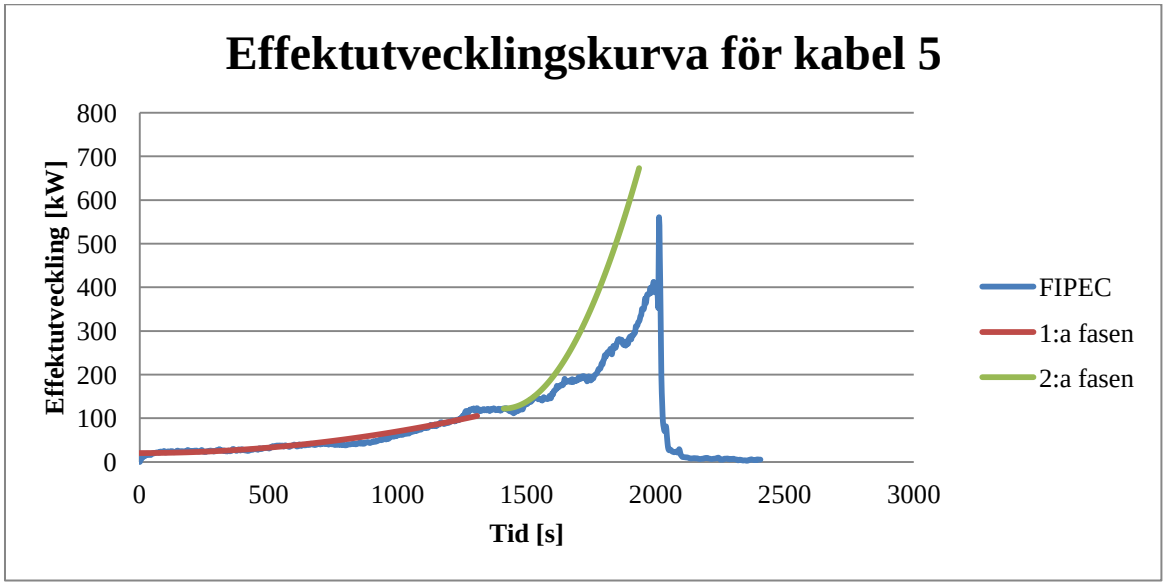
6.5.2 Brandspridning

Nedan diskuteras tidigare parametrar som identifierats att påverka brandspridningen hos kablar, de osäkerheter som uppkommer vid applicering av kablar och brandspridningsmodell till schaktet samt hur dessa skillnader kommer påverka resultaten vid fortsatt modellering.

- Kabelmaterial

Då det finns så pass många olika kablar i schaktet görs förenklingen att alla kablar i schaktet approximeras till två olika sorters kablar. Detta medför självklart en begränsning då de befintliga kablarna i schaktet har flera olika materialkompositioner och storlekar. Då kablarna i schaktet är uppbyggda på många olika sätt resulterar detta också i att brandbeteenden och effektutvecklingar kan skilja sig markant mellan kablarna. Vid val av vilka kablar som ska modelleras efter väljs de kablar som har flest likheter i uppbyggnad som större delen av kablarna i schaktet och vid de fall det finns flera kablar som skulle kunna passa in väljs de som renderade i de allvarligaste scenarierna. Vid val av vilken kraftkabel som ska modelleras efter skiljer sig ledar- och isoleringsmaterialet från de kraftkablar som anses vara de vanligaste i schaktet. Skillnaden i ledarmaterial anses ha mindre påverkan på brandförloppet men skillnaden i isoleringsmaterial anses kunna ha en påtaglig inverkan på brandförloppet. Detta då tidigare tester visat på att kablar med PVC-mantel renderar i något allvarligare brandförlopp än kablar med andra sorters mantelmaterial, detta anses även gälla för isoleringsmaterialet. Detta medför en underskattning av den potentiella tillväxthastigheten och effektutvecklingen för kraftkablarna i schaktet. Från FIPEC-projektets tester finns det dock inga kablar av samma storlek med samma mantelmaterial och olika isoleringsmaterial vilket medför svårigheter att bedöma hur mycket denna skillnad påverkar brandförloppet och hur mycket effektutvecklingskurvans lutning skall ökas. Då det inte är möjligt att göra några jämförelser kablar emellan för att utröna hur stor påverkan PVC-isolering har kontra XLPE-isolering måste det istället göras en egenhändig bedömning av hur effektutvecklingskurvan påverkas av materialskillnaden, denna bedömning utförs med målet att vara konservativ för att inte riskera en underskattning av ett potentiellt brandförlopp och för att utvärdera det som anses vara det värsta möjliga fallet. Bedömningen av hur

effektutvecklingskurvan modifieras redogörs för i Bilaga C, modifieringen ger en effektutvecklingskurva enligt Figur 6.6 nedan.



Figur 6.6 Modifierad effektutvecklingskurva för kabel 5

I kurvan ovan anger den första fasen då endast mantelmaterialet är involverat i branden och den andra fasen då även isoleringen involveras i brandförloppet, då det var isoleringen som skilde kablarna åt är det även denna fas vars lutning på effektutvecklingskurvan ökas.

Vad gäller övriga kablar finns resultat att tillgå för den kabel som anses vara den vanligaste i schaktet varför ovanstående felkälla ej uppkommer. Då det även finns en del halogenfria övriga kablar i schaktet kan detta möjligtvis medföra en överskattning av den potentiella effektutvecklingen för övriga kablar i schaktet.

- Den geometriska konfigurationen

Den geometriska konfigurationen innefattar kabelstegarnas placeringar i förhållande till varandra, kablarnas monteringar i förhållande till varandra samt de horisontella monteringarna. Då testerna vid FIPEC-projektet är utförda på en kabelstege tas det ej någon hänsyn till fallet då det står fler kabelstegar bredvid varandra, vilket är fallet i schaktet. Då de står så pass nära varandra kan det bland annat uppkomma skorstenseffekter vilket innebär att brandgaserna, som genom konvektion bildar ett naturligt uppåtgående luftflöde, kan få en betydligt snabbare spridning uppåt vilket därmed innebär att även branden kan sprida sig snabbare. Då branden spridit sig till ytterligare en kabelstege tillkommer en ytterligare begränsning, då spridning är ett faktum kommer infallande strålning från den första kabelstegen medföra en högre tillväxthastighet och därmed ett snabbare brandförlopp hos den andra kabelstegen. Detta medför alltså att resultaten från FIPEC-projektets tester kommer vara en underskattning av ett potentiellt brandförlopp i schaktet. Detta problem kan hanteras om brandförloppet modelleras i datorprogrammet FDS där hänsyn tas till både eventuell konvektion och strålning, detta program redogörs för i Bilaga H.

Monteringen av kablarna spelar också in på brandförloppet. Kablarna vid FIPEC-projektets tester är monterade med en kabeldiameters avstånd för att därmed få det allvarligaste scenariot, detta är ej fallet för kablarna i schaktet som ofta är monterade tätt intill varandra. Detta medför därmed en överskattning av brandförloppet i schaktet.

Att applicera resultat från vertikala tester till schaktets horisontella monteringar medför självklart begränsningar. Då brandtillväxten är betydligt snabbare vertikalt än horisontellt ger erhållna resultat från FIPEC-projektets försök en överskattning av ett brandförlopp för de horisontella sektionerna i schaktet.

- Storlek på tändkälla

Då FIPEC-projektets tester är utförda med en brännare, som dessutom är igång under långt tid anses storleken på denna tändkälla troligtvis vara betydligt högre än för en potentiell tändkälla i schaktet. Då en större tändkälla kan rendera i ett allvarligare brandförlopp anses därför resultaten från testerna vara en överskattning av ett potentiellt brandförlopp i schaktet.

- Hur stora mängder av kablarna som är utsatta för brand

Vid FIPEC-projektets tester är brännaren av den storlek att i princip alla kablar på kabelstegen blir brandutsatta vid ett tidigt skede. Detta anses ej ske då en antändning i schaktets kablar anses innefatta en eller få kablar vid ett tidigt skede. Därmed anses denna parameter medföra en överskattning av ett potentiellt brandförlopp i schaktet.

- Antal kablar på en kabelstege

Vid FIPEC-projektets tester är kablar monterade med en kabeldiameters avstånd medan de i schaktet ofta är monterade utan inbördes avstånd på kabelstegarna. Detta medför att den finns fler kablar per kabelstege i schaktet vilket även innebär en större brännbar mängd på kabelstegarna. Detta medför en underskattning av ett potentiellt brandförlopp i schaktet. Detta problem kan hanteras genom att med utgångspunkt från FIPEC-projektets resultat identifiera kabelparametrar sådana som effektutveckling per kvadratmeter och förbränningshastighet för att därmed kunna dra slutsatser om hur brandförloppet påverkas då de brännbara mängderna på kabelstegarna ökas.

- Ventilationsförhållanden

Vad gäller ventilationsförhållandena är FIPEC-projektets tester utförda med forcerad ventilation vilket så ej är fallet i schaktet. Detta medför troligtvis en överskattning av ett brandförlopp i schaktet. Då ventilationen har större inverkan på horisontella monteringar kommer även överskattningen vara större för de horisontella monteringarna i schaktet.

- Maximala effektutvecklingar

För de kablar som valts att modellera efter kan det inte sägas något om dess maximala effektutvecklingar. Vid fallet med kraftkablarna stängdes brännaren av under tillväxtfasen varför det ej kan sägas om den maximala effektutvecklingen är högre eller ligger på samma värde som anges i testresultaten. I fallet med övriga kablar tar bränslet slut under tiden brännaren fortfarande är igång, om kabelproven varit längre skulle även effektutvecklingen kunnat öka för att slutligen nå sitt maxvärde. Detta kan möjligtvis medföra underskattningar av brandförloppen hos kraft- och övriga kablar i schaktet. Detta kan hanteras genom att, precis som vid hanteringen av mängden kablar per kabelstege, identifiera ett antal kabelparametrar som medför att det kan dras slutsatser om hur brandförloppet påverkas då kabelstegarnas längder ökar vilket därmed medför att de maximala effektutvecklingarna kan uppnås. Utförligare förklaring av vilka kabelparametrar som avses, hur de tas fram och hur hanteringen av osäkerheten skett redogörs för i Kapitel 7 samt Bilaga H.

I Tabell 6.7 nedan åskådliggörs en sammanfattning av parametrar som påverkar brandspridningen, skillnader mellan dessa parametrar och FIPEC-projektets försök och schaktet, vilken påverkan dessa skillnader har på brandförloppet samt hur begränsningarna kan hanteras vid fortsatt modellering. De parametrar som medför att ett eventuellt brandförlopp överskattas har valts att ej hantera då detta ger konservativa resultat, fortsatta resultat avseende bedömningar av brandspridning i schaktet får därför ses som för de värsta möjliga fallen.

Tabell 6.7 Sammanfattning av osäkerheter

Parameter	FIPEC-projektet	Kabelschaktet	Påverkan på brandförlopp	Hantering
Kabelmaterial, kraftkablar	PVC-mantel, XLPE-isolering, kopparledare	PVC-mantel, PVC-isolering, aluminiumledare	Underskattning av brandförlopp	Modifiering av effektutvecklings-kurva enligt Bilaga H
Kabelmaterial, övriga kablar	PVC-mantel, PVC-isolering, kopparledare	PVC-mantel, PVC-isolering, kopparledare	Möjlig överskattning av brandförlopp	Ej nödvändigt att hantera
Geometrisk konfiguration, kabelstegar	Tester på en kabelstege	Flera kabelstegar nära varandra	Underskattning av brandförlopp	Modellering av brandförlopp i FDS
Geometrisk konfiguration, kablar	Optimerade avstånd	Tätt intill varandra	Överskattning av brandförlopp	Ej nödvändigt att hantera
Geometrisk konfiguration, horisontell	Resultat från vertikal montering	Horisontell montering	Överskattning av brandförlopp	Ej nödvändigt att hantera
Storlek på tändkälla	20 kW	Troligtvis mycket lägre	Överskattning av brandförlopp	Ej nödvändigt att hantera
Mängd brandutsatta kablar	I princip alla kablar i ett tidigt skede	Troligtvis en/få i ett tidigt skede	Överskattning av brandförlopp	Ej nödvändigt att hantera
Antal kablar/kabelstege	Färre	Fler	Underskattning av brandförlopp	Identifiera kabelparametrar för att därmed kunna variera de brännbara mängderna
Ventilationsförhållanden	Forcerad	Ej forcerad	Överskattning av brandförlopp	Ej nödvändigt att hantera
Maximala effektutvecklingar	Brännaren stängs/bränslet tar slut innan maximala effekter uppnås	Ingen brännare, mer bränsle	Möjlig underskattning av brandförlopp	Identifiera kabelparametrar för att därmed kunna dra slutsatser om maximala effektutvecklingar

6.5.3 Utrymningsförhållanden

Beräkningar av sikt och toxicitet sker med underlag av tidigare experimentellt framtagna värden på rökpotential och yielder för PVC. Detta kan medföra osäkerheter då det troligtvis råder andra förhållanden i schaktet än vid de utförda experimenten. Vad gäller rökpotentialen kan värdet vara en faktor fyra till sex gånger högre vid en rumsbrand i jämförelse med experimenten vilket därmed medför en underskattning av rökproduktionen i schaktet. Därför kommer beräkningar med ett sex gånger högre värde på rökpotentialen utföras för att även täcka in de värsta möjliga scenarierna. Värdet på yielderna är framtagna vid välventilerade förhållanden, vid de fall då detta ej råder kan det inte sägas något om värdet på yielderna då dessa är starkt beroende av syretillgången. Med då schaktet är så pass stort anses en eventuell brand vara bränslekontrollerad under långt tid, den anses vara bränslekontrollerad även efter den tidpunkt då kriterierna för toxiciteten uppnås varför denna parameter ej anses vara nödvändig att hantera vid beräkningarna. I Tabell 6.8 åskådliggörs en sammanfattning av osäkerheterna, hur dessa kan påverka resultaten samt hur de hanteras vid fortsatta beräkningar.

Tabell 6.8 Sammanfattning av osäkerheter

	Litteratur	Schakt	Påverkan	Hantering
Sikt	Rökpotential 1,7 ob m^3/g	Kan vara faktor fyra till sex gånger högre	Underskattning av rökutveckling	Beräkningar utförs med rökpotentialen 10,2 ob m^3/g
Toxicitet	Yielder för välventilerade förhållanden	Välventilerade förhållanden anses råda i schaktet	Ingen	Ej nödvändigt att hantera

7 Brandteknisk utvärdering

I följande avsnitt utförs analyser avseende brandspridning för ett antal brandscenarion. Inledningsvis analyseras olika beräkningsmodeller för beräkning av inre respektive yttre temperaturer hos kablarna samt brandspridning med syfte att välja den eller de modeller som anses kunna representera en eventuell brand i schaktet på bästa sätt. Vidare identifieras diverse brandscenarion som anses kunna vara representativa för ett stort spektrum av möjliga brandförlopp i schaktet. Därefter utförs beräkningar för dessa brandscenarion varpå skadeomfattningarna och återställningstiderna i schaktet för respektive brandscenario utvärderas. Avslutningsvis analyseras hur utrymningssäkerheten, med avseende på sikt och toxicitet, påverkas vid de olika brandscenarierna.

7.1 Beräkningsmodeller

För att utföra beräkningar avseende brandspridning och huruvida kablar kortsluter eller ej studeras diverse beräkningsmodeller som skulle kunna användas. Inledningsvis studeras olika tillgängliga beräkningsmodeller för hur brandspridningen i schaktet kan modelleras för att vidare studera beräkningsmodeller för beräkningar av den inre temperaturen hos en kabel.

7.1.1 Brandspridning

Med tanke på hur effektutvecklingskurvorna för de olika kabelsorterna ser ut skulle dessa kurvor kunna approximeras som αt^2-kurvor. En αt^2-kurva är ett enkelt sätt att beskriva den inledande tillväxtperioden av en brand med antagandet att effektutvecklingen ökar med kvadraten av tiden. Effektutvecklingen som funktion av tiden kan därmed beräknas med Ekvation 7.1 (Karlsson & Quintiere, 2000).

$$\dot{Q} = \alpha \cdot t^2 \qquad \text{Ekvation 7.1}$$

där tillväxtfaktorn, α, är en konstant som beskriver brandens tillväxthastighet och är beroende både på vilket ämne och hur stor mängd av det som brinner. Tiden definieras som tiden efter etablerad antändning, det vill säga då branden börjat växa (Karlsson & Quintiere, 2000). Ovanstående ekvation har visat sig stämma bra överens med tillväxthastigheter för flera olika bränslen, under förutsättning att det skett en etablerad antändning (Karlsson & Quintiere, 2000).

Beräkningar av när ytterligare en kabelstege antänder kan göras genom att beräkna den infallande strålningen från branden på kablarna för att vidare beräkna dess uppvärmning. Den infallande strålningsintensiteten mot en punkt kan beräknas med Ekvation 7.2 (Drysdale, 1999).

$$\dot{q}''_{inc} = \Phi_{tot} \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4_{flamma} \qquad \text{Ekvation 7.2}$$

varpå den totala värmeöverföringen på grund av strålning och konvektion till en exponerad yta kan skrivas enligt (Wickström, 2012).

$$\dot{q}''_{tot} = \varepsilon(\dot{q}''_{inc} - \sigma T_s^4) + h(T_g - T_s) \qquad \text{Ekvation 7.3}$$

Tiden det sedan tar för en yta att nå sin antändningstemperatur beror på materialets dimensioner och dess termiska egenskaper. För tunna material, vilket mantelmaterialet på kablarna kan antas vara, beräknas vidare tiden till antändning enligt Ekvation 7.4 (Wickström, 2012).

$$t_{ig} = \frac{\rho c d}{\varepsilon \dot{q}''_{inc} - 0{,}25 \cdot \dot{q}''_{cr}} (T_{ig} - T_i) \qquad \text{Ekvation 7.4}$$

där $\dot{q}''_{cr}$ är den infallande strålning som behövs för att balansera värmeförlusterna vid ytan genom emitterad strålning och konvektion vid antändningstemperaturen och beräknas enligt Ekvation 7.5 (Wickström, 2012).

$$\dot{q}''_{cr} = \sigma \cdot T_{ig}^4 + h(T_{ig} - T_g)/\varepsilon \qquad \text{Ekvation 7.5}$$

Beräkning av antändningstider enligt Ekvation 7.4 ger noggranna approximationer av de, i teorin, mer precisa förutsägelserna vilka ges av numeriska lösningar genom superpositioneringsprincip. Vid denna beräkning antas den inkommande strålningen mot den exponerade ytan samt materialegenskaperna vara konstanta (Wickström, 2012).

Ett annat tillvägagångssätt för att beräkna brandspridningen kan vara med hjälp av datorprogrammet FDS (Fire Dynamics Simulator), detta är ett datorprogram som används vid simuleringar av luft- och brandgasflöden vid brand i en användardefinierad omgivning. I datorprogrammet delas ett brandrum in i ett fördefinierat antal kontrollvolymer varpå en enklare form av Navier-Stokes-ekvationer för flöden löses i varje kontrollvolym (NIST, 2010). I programmet kan både αt^2-kurvor och antändningstemperaturer för olika material definieras. En begränsning med FDS är dock att programmet har vissa svårigheter att modellera en flamma, både avseende plymtemperatur och flamhöjd vilket kan medföra svårigheter att modellera spridning och tillväxt av brand i fasta material (Nystedt & Frantzich, 2011). Detta kan därmed leda till något osäkra resultat. För att begränsa dessa felkällor och för att programmet skall kunna leverera tillfredsställande resultat kan en användarspecificerad effektutveckling över tid modelleras (Nystedt & Frantzich, 2011).

7.1.2 Inre temperatur

Andersson & Persson (2001) tog fram en modell vid vilken den inre temperaturen hos en kabel kan beräknas efter ett visst tidsintervall. Vid denna modell används en analytisk lösning för värmeledning i cylindriska geometrier, med antagandet att kabeln endast består av PVC samt att omgivningstemperaturen är konstant. Dessa beräkningar utförs enligt Ekvation 7.6 nedan (Andersson & Persson, 2001).

$$\theta_0 = 1 - \frac{2A \cdot e^{-\beta_n^2 \cdot \tau}}{(\beta_1^2 + A^2) J_0(\beta_1)} \qquad \text{Ekvation 7.6}$$

Vid framtagandet av modellen testades tre olika sorters kablar, dessa värmdes upp i en ugn med konstant temperatur varpå kablarnas inre temperaturer mättes vid olika tidpunkter. Beräkningar med ovanstående analytiska lösning visade sig stämma bra överens med de uppmätta inre temperaturerna hos kablarna (Andersson & Persson, 2001).

En annan modell för att beräkna den inre temperaturen för ett objekt är med en modell kallad Lumped Heat Capacity Method, denna beräkningsmodell antar en genomsnittlig temperatur i materialet för varje tidssteg (Drysdale, 1999). Med modellen följer även antagandet att allt motstånd finns vid ytan av materialet vilket betyder att värmemotståndet i materialet måste vara lägre än det vid ytan, det vill säga

$$\frac{1}{h} >> \frac{d}{k}$$

vilket kan anges som

$$\frac{h \cdot d}{k} < 0{,}1$$

Där $\frac{h \cdot d}{k}$ benämns Biots tal (Bi)

Bi ≤ 0,1 ska alltid gälla vid beräkningar enligt Lumped Heat Capacity Method (Drysdale, 1999).

Beräkning av den inre temperaturen efter ett visst tidsintervall utförs med Lumped Heat Capacity Method enligt Ekvation 7.7 (Drysdale, 1999).

$$T(t + \Delta t) = \frac{\Delta t}{t_c} T_g + \left(1 - \frac{\Delta t}{t_c}\right) T(t) \qquad \text{Ekvation 7.7}$$

där t_c har dimensionen tid och benämns systemets tidskonstant, denna beräknas enligt Ekvation 7.8 (Drysdale, 1999).

$$t_c = \frac{c \rho V}{h A} \qquad \text{Ekvation 7.8}$$

Även i datorprogrammet FDS finns det möjligheter att beräkna inre temperaturer hos kablar, detta utförs genom att använda en sorts mätinstrument kallat cable failure detector. Detta mätinstrument mäter den inre temperaturen hos en kabel med en metod kallad THIEF (Thermally-Induced Electrical Failure) utvecklad av Andersson & van Hees (2005). Denna metod beräknar den inre temperaturen hos en kabel med hjälp av endimensionella värmeöverföringsekvationer, under förutsättning att kabeln behandlas som en homogen cylinder (Andersson & van Hees, 2005). Modellen antar att värmeledningen in i kabeln i stort sett endast sker radiellt samt att kabeln antas bestå av endast ett material vars termiska egenskaper är homogena och oberoende av temperaturen.

7.2 Val av beräkningsmodeller

I följande avsnitt identifieras för- och nackdelar med ovanstående beräkningsmodeller samt hur diverse osäkerheter i modellerna skulle kunna påverka erhållna resultat. Vidare väljs vilka modeller som skall användas vid fortsatta beräkningar av brandspridning och antändning av kablarna i schaktet.

7.2.1 Brandspridning

Inledningsvis diskuteras för- och nackdelar med de olika identifierade beräkningsmodellerna som skulle kunna användas för beräkning av brandspridning i schaktet. Vidare sammanfattas dessa för- och nackdelar samt hur detta skulle kunna påverka beräknade resultat för att slutligen välja vilken beräkningsmodell som skall användas vid fortsatta beräkningar av brandspridning i schaktet.

- αt^2-approximering

Approximering av en brands tillväxtfas med denna typ av kurva har visat sig stämma bra överens med tillväxthastigheter för många olika bränslen, såvida det skett en etablerad antändning och branden börjat växa (Karlsson & Quintiere, 2000). Om denna modell skall appliceras till schaktet tillkommer dock ett antal felkällor. Kabelmaterialet för kraftkablarna, den brännbara mängden per meter och kablarnas inbördes avstånd skiljer sig mellan FIPEC-projektets försök och schaktets konfigurationer vilket betyder att effektutvecklingskurvorna därmed måste modifieras. Det föreligger även osäkerheter då de maximala effektutvecklingarna för kablarna skall modelleras, om de maximala effektutvecklingarna sätts till de, av FIPEC-projektet, uppmätta maximala effektutvecklingar föreligger risken att brandförloppet underskattas. Även kabelstegarnas närhet till varandra kommer medföra ett problem, vid fallet då ytterligare en kabelstege blir involverad i branden kommer infallande strålning från den första kabelstegen bidra till ett snabbare brandförlopp hos den andra kabelstegen. Detta betyder att tillväxtkurvan för den andra kabelstegen måste modifieras att vara allvarligare än den första vilket även betyder att nästa kabelsteges tillväxtkurva kan behöva modifieras att vara allvarligare än de två första på grund av ytterligare inkommande strålning.

Om effektutvecklingskurvorna dessutom ska appliceras till de horisontella kabelsektionerna tillkommer, förutom ovan nämnda osäkerheter, ytterligare begränsningar på grund av det faktum att kabelsektionerna är horisontellt monterade.

- Infallande värmeflöde

Beräkning av det totala infallande värmeflödet genom strålning och konvektion mot en kabelstege kan beräknas med Ekvation 7.2 och 7.3. Det kan med dessa ekvationer beräknas hur stort värmeflödet är på en punkt på kabelstegarna för att vidare kunna beräkna tiden till antändning. Det ses i Ekvation 7.2 att flamtemperaturen kommer ha en betydande inverkan på strålningsintensiteten. Dock är denna temperatur okänd vilket medför att den måste uppskattas, detta kan medföra en stor felkälla. En ytterligare felkälla tillkommer vid beräkning av synfaktorn, vid denna beräkning antas branden vara rektangulär, det vill säga att flammans diameter antas vara lika stor i botten som i toppen, detta är ej fallet för en riktig flamma som smalnar av väsentligt i toppen. Vid beräkning av det totala värmeflödet enligt Ekvation 7.3 ses att yttemperaturen kommer ha en påtaglig inverkan på resultatet, inte heller denna är känd. Vid användandet av dessa beräkningsmodeller vid applicering till schaktet kan därför resultaten bli osäkra, framförallt på grund av den okända flamtemperaturen hos kabelbranden.

- Antändningstid

Beräkning av antändningstider enligt Ekvation 7.4 har visat sig ge bra approximationer av de mer precisa förutsägelserna från numeriska beräkningar. Dock sker beräkningarna med antagandena att både den infallande strålningen samt det exponerade materialets egenskaper är konstanta. Detta kommer ej vara fallet vid en brand i schaktet, att materialegenskaperna ej i detta fallet är konstanta anses ha mindre inverkan på resultatet, dock kommer den infallande strålningen öka med tiden varför resultaten blir osäkra och troligtvis underskattade.

- FDS

I FDS kan αt^2-kurvor för brinnande material modelleras, dessutom kan antändningstemperaturer för material definieras. Vid definiering av αt^2-kurvor tillkommer dock samma osäkerheter avseende kabelavstånd, brännbar mängd, kabelstegarnas närhet och dess maximala effektutvecklingar som vid handberäkningarna. Vid användning av programmet kan dock dessa felkällor begränsas genom att inledningsvis ta reda på kablarnas egenskaper, detta kan göras genom att utföra simuleringar med en uppställning enligt FIPEC-projektets tester för att vidare passa in FDS-simuleringarnas effektutvecklingskurvor med FIPEC-projektets. När kablarnas egenskaper definierats kan simuleringar med andra kabelavstånd och brännbara mängder utföras utan att ovanstående felkällor uppkommer. Vad gäller antändningstider för ytterligare kabelstegar kommer felkällorna som uppkommer vid handberäkningsmodellerna ovan kunna hanteras av programmet då bland annat flam- och yttemperaturerna är kända och då strålningen tas hänsyn till av programmet.

I Tabell 7.1 ges en sammanfattning av de olika beräkningsmodellernas för- och nackdelar samt hur detta skulle kunna påverka resultaten.

Tabell 7.1 För- och nackdelar samt påverkan på resultat för de olika beräkningsmodellerna

	Problem	Fördelar	Påverkan
αt^t-approximering	Maximala effektutvecklingar, kabelkonfiguration, brännbar mängd, tillväxthastigheter	Approximeringen stämmer bra överens med tillväxtfaser för många olika bränslen	Underskattning av effektutvecklingar, framförallt då brandspridning är ett faktum
Infallande värmeflöde	Flamtemperatur, yttemperatur, storlek på flamma	Ger möjligheter att beräkna antändningstid	Osäkra resultat, framförallt på grund av okänd flamtemperatur
Antändningstid	Konstant infallande strålning, konstanta materialegenskaper	Bra approximationer av mer precisa förutsägelser	Osäkra resultat, framförallt på grund av antagandet om konstant infallande strålning
FDS	Vissa svårigheter att modellera flammor	Kan modellera både brandtillväxt och brandspridning, kända flam- och yttemperaturer, kända strålningsnivåer, kan ta reda på kabelegenskaper	Något osäkra resultat avseende plymtemperatur och flamhöjd

Vid beräkning av brandtillväxten på en kabelstege anses αt^2-approximering från FIPEC-projektets tester endast kunna appliceras på en kabelstege med samma konfigurationer, då detta ej gäller för kabelstegarna i schaktet kan det ge osäkra resultat. Denna felkälla anses bli än mer påtaglig då brandspridning väl är ett faktum då brandtillväxten för nästa brandutsatta kabelstege troligtvis kommer ske snabbare på grund av återstrålning från den första. Det kommer även föreligga osäkerheter kring de maximala effektutvecklingarna då kabelstegarna i schaktet är längre än de vid FIPEC-projektets tester vilket betyder att en större längd kablar kan vara brandutsatta samtidigt, detta betyder att den maximala effektutvecklingen kan vara högre än den, av FIPEC-projektet, uppmätta. Beräkningar av det infallande värmeflödet är en förutsättning för att vidare kunna beräkna antändningstiden, vid dessa beräkningar har framförallt flamtemperaturen en påtaglig inverkan på resultatet. Flamtemperaturen är dock okänd vilket betyder att den måste uppskattas, detta kan rendera i stora osäkerheter. Vad gäller antändningstiden beräknas denna med antagandet om en konstant infallande strålning och konstanta materialegenskaper hos kablarna, även detta kan ge stora osäkerheter i resultat då den infallande strålningen vid en brand i schaktet ökar med tiden. Om flamtemperaturen vid tidigare beräkning har uppskattats fel kommer osäkerheterna ökas ytterligare. Vid beräkningar med FDS kan både brandtillväxter och antändningstider utvärderas. För beräkningar av brandtillväxterna kan det inledningsvis utföras en kalibrering för att ta reda på kablarnas egenskaper vilket därmed hanterar felkällorna avseende kabelavstånd och brännbara mängder. Vidare kommer både flamtemperaturerna och de infallande strålningsnivåerna vara kända vilket gör att dessa osäkerheter hanteras av programmet. Även då programmet har vissa svårigheter att modellera plymtemperaturer och flamhöjder anses beräkningar av brandspridningen med FDS vara ett bättre alternativ än handberäkningarna. Det anses även kunna leverera förhållandevis goda resultat då alla kabelegenskaper kommer modelleras och då programmet utför noga beräkningar i ett stort antal mindre kontrollvolymer. Med underlag av detta tas beslutet att FDS kommer användas vid fortsatta beräkningar av brandspridning i schaktet.

7.2.2 Inre temperatur

För beräkning av den inre temperaturen hos en kabel har tre modeller utvärderats, analytisk lösning, lumped heat capacity och beräkning i FDS. Nedan redogörs för- och nackdelar avseende dessa modeller och hur detta påverkar resultaten för att slutligen välja vilken modell som skall användas vid fortsatta beräkningar av de inre temperaturerna hos kablarna i schaktet.

- Analytisk lösning

Andersson & Persson (2001) utförde testberäkningar med tre olika sorters kablar, dessa beräkningar visade sig stämma bra överens med de uppmätta inre temperaturerna för dessa kablar. Dock gäller detta då omgivningstemperaturen är konstant vilket så ej är fallet vid en riktig brand då temperaturen ökar med tiden. En potentiell lösning på detta skulle kunna vara att beräkna temperaturen för varje tidssteg, dock följer osäkerheten att omgivningstemperaturen vid dessa tidssteg är okänd. Då omgivningstemperaturen har inverkan på resultatet anses denna beräkningsmodell kunna rendera i stora osäkerheter. Vid testberäkningar med kablar av större diametrar än kablarna som testats av Andersson & Persson (2001), sådana diametrar som kraftkablarna i schaktet, erhålls orimliga resultat i form av att kablarnas begynnelsetemperaturer blir alldeles för låga, och desto lägre med ökad omgivningstemperatur. Detta härleds att främst bero på kablarnas diametrar. En ytterligare osäkerhet med denna modell är att kabeln endast antas bestå av PVC vilket kan ge osäkra resultat avseende den inre temperaturen. En utförligare beskrivning av denna modell, ingående variabler samt beräkningsgång och resultat av testberäkningarna med kablar av större diametrar finns att tillgå i Bilaga D.

- Lumped Heat Capacity Method

Vid denna beräkningsmodell kan det utföras beräkningar av den inre temperaturen för varje tidssteg, dock antas för varje tidssteg en genomsnittlig temperatur i materialet vilket så ej är fallet i verkligheten där det alltid finns en temperaturgradient när värme går in eller ut ur ett material. Även vid denna modell antas en konstant omgivningstemperatur vilket därmed kommer ge osäkra resultat. Vilket nämnts tidigare ska $Bi \leq 0{,}1$ alltid gälla vid beräkningar med denna metod. Beräkningar ger för kraftkablarna $Bi = 2{,}63$ och för övriga kablar $Bi = 0{,}94$ varför denna metod inte kan användas för kablarna i schaktet.

- Beräkning i FDS

Vid beräkningar av den inre temperaturen hos kablarna i FDS tillkommer ej osäkerheten avseende okänd omgivningstemperatur då detta är något som beräknas av programmet, dessutom kommer variationen av denna temperatur tas hänsyn till. Antagandet att värmeöverföringen i stort sett endast sker radiellt kan ge konservativa resultat då kabeln därmed antas vara helt omringad av värmekällan (NIST, 2010). Dessutom kan antagandena att kabeln endast består av ett material vars termiska egenskaper är homogena och oberoende av temperaturen ge något osäkra resultat då kablar i verkligheten består av flera olika material och då både konduktivitet och specifik värmekapacitet är värmeberoende (NIST, 2010). Trots dessa begränsningar har beräkningar med denna metod visat på att resultat för olika sorters PVC-material kan vara adekvata för analyser av ett större spann kablar (NIST, 2010).

I Tabell 7.2 ges en sammanfattning av de olika beräkningsmodellernas för- och nackdelar samt hur detta skulle kunna påverka resultaten.

Tabell 7.2 För- och nackdelar samt påverkan på resultat för de olika beräkningsmodellerna

	Problem	Fördelar	Påverkan
Analytisk lösning	Orimliga resultat vid större kabeldiametrar, antag konstant omgivningstemperatur, omgivningstemperatur okänd, kabel endast av PVC,	Ger rimliga värden för mindre kablar vid konstant omgivningstemperatur	Orimliga resultat för kraftkablar, osäkra värden för övriga kablar
Lumped Heat Capacity Method	Bi > 0,1, konstant omgivningstemperatur, allt motstånd antas finnas vid ytan	Kan utföra beräkningar av inre temperatur för varje tidssteg	Går ej att använda denna beräkningsmodell för kablarna i schaktet
FDS	Kabeln endast av ett material, egenskaper homogena och oberoende av temperatur	Utför beräkningar av inre temperatur för varje tidssteg med varierande omgivningstemperatur, adekvata resultat för ett större spann av kablar	Kan ge något konservativa resultat

Beräkningar med en analytisk lösning anses ge stora osäkerheter, både på grund av antagandet av en konstant omgivningstemperatur och framförallt vid beräkningar för kablar med större diametrar, därmed kommer denna modell ej användas vid fortsatta beräkningar. Vad gäller Lumped Heat Capacity Method ger kablarna i schaktet Bi > 0,1 varför inte heller denna modell kan användas vid fortsatta beräkningar. Däremot utförs beräkningar i FDS med känd och varierande omgivningstemperatur vilket anses vara en stor fördel, även då denna modell har vissa begränsningar har tidigare resultat visat sig vara adekvata för ett större spann kablar. Därmed kommer vidare beräkningar av de inre temperaturerna hos kablarna i schaktet ske med hjälp av FDS.

7.3 Kalibrering FDS

För att kunna utföra simuleringar med schaktets konfigurationer utan att felkällor som bland annat kabelavstånd och brännbara mängder uppkommer sker i följande avsnitt inledningsvis en kalibrering av kabelparametrar gentemot FIPEC-projektets fullskaleförsök. Vidare utförs en känslighetsanalys vilken syftar till att undersöka vilken eller vilka av dessa kabelparametrar som har störst inverkan på brandförloppet. Vid simuleringar i kabelschaktet kommer dessa parametrar därefter varieras för att även utvärdera hur de värsta respektive lindrigaste brandförloppen skulle kunna se ut.

För att utföra beräkningar avseende en brand i kabelschaktet på ett så bra sätt som möjligt beskrivs i detta avsnitt inledande simuleringar vilka utförs med syftet att programmet, vid fortsatta simuleringar i schaktet, skall kunna leverera tillfredsställande resultat. Dessa simuleringar utförs genom att i FDS bygga upp en modell i enighet med FIPEC-projektets fullskaleförsök, det vill säga en försöksuppställning enligt ISO 60332-3 med ökat luftflöde och optimerade kabelavstånd. För att kunna modellera den vertikala brandspridningen längs kablarna byggs de i FDS upp av en mängd små kabeldelar där parametrar som antändningstemperatur, effektutveckling per areaenhet och brinntid definieras för varje kabeldel, detta med målet att från FDS erhålla effektutvecklingskurvor som i största möjliga mån stämmer överens med de effektutvecklingskurvor som uppmättes vid FIPEC-

projektets försök. Kabelparametrarna skall alltså i FDS definieras för att så långt som möjligt likna kablarna vid de verkliga försöken.

Definiering av kabeldelarnas effektutveckling per areaenhet utförs genom att utgå från FIPEC-projektets erhållna resultat avseende maximala effektutvecklingar för kabelsorterna i fråga. För att modelleringarna skall utföras på ett korrekt sätt skall det även tas hänsyn till att bränslet på var och en av dessa kabeldelar tar slut efter en viss tid, detta beräknas med utgångspunkt från Ekvation 7.9 nedan (Karlsson & Quintiere, 2000). Från ekvationen nedan beräknas massavbrinningen vilket i sin tur gör det möjligt att beräkna hur länge varje kabeldel kommer att brinna.

$$\dot{Q} = \Delta H_c \cdot \chi \cdot \dot{m} \qquad \text{Ekvation 7.9}$$

För kablarna vid FIPEC-projektets tester gäller (Grayson et al, 2000)

Tabell 7.3 Maximal effektutveckling, total brännbar massa och antal kablar per kabelstege vid FIPEC-testerna (Grayson et al, 2000)

Kabel	Max HRR [kW]	m_{tot}/kabelstege [g]	Antal kablar/kabelstege
5	392	15815	5
24	250	4311	11

Från ovanstående data beräknas vidare massavbrinning, effektutveckling per areaenhet och brinntid för varje kabeldel. Dessa beräkningar kan dock ge något annorlunda värden än vad som gäller för de testade kabelsorterna. Det tabellerade värdet på förbränningsvärmet, ΔH_c, är ett generellt värde för PVC vilket betyder att det kan skilja sig något mellan olika sorters PVC-material. Förbränningseffektiviteten, χ, antas vara 0,7 vilket är ett vanligt värde för sotande bränslen, även detta värde kan skilja sig från det som gäller för kablarna vid FIPEC-projektets tester. Dessa osäkerheter medför att massavbrinningen hos kablarna från FIPEC-projektets tester kan skilja sig något från de beräknade värdena, vilket i sin tur kommer påverka brinntiden. Effektutvecklingen per areaenhet beräknas med utgångspunkt från kablarnas maximala effektutvecklingar och dess omslutningsareor, vid dessa beräkningar antas att alla kablar på kabelstegen står i brand på samma gång då den maximala effektutvecklingen uppnås, om detta inte är fallet kommer det beräknade värdet skilja sig något från verkligheten. Med underlag av dessa osäkerheter kommer de beräknade värdena vid behov varieras något vid kalibreringen för att vidare få effektutvecklingskurvor som stämmer överens med varandra, vilket också anses ge korrekta värden på de ingående parametrarna.

Efter diverse simuleringar med uppställning enligt FIPEC-projektets tester erhålls kabelparametrar enligt Tabell 7.4.

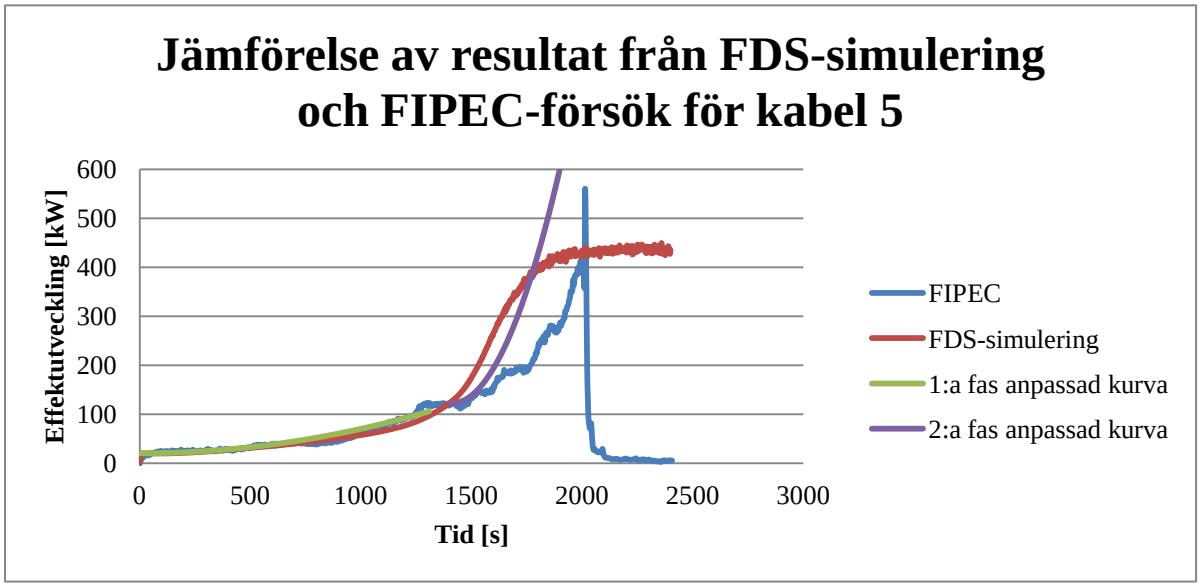
Tabell 7.4 Kabelparametrar för kablarna testade vid FIPEC-projektet

Kabelsort	Effektutveckling per areaenhet [kW/m^2]	Antändningstemperatur [°C]	Antändningstid [s]	Brinntid [s]
Kraftkablar	260	370	300	1200
Övriga kablar	150	180	1	150

Vilket ses i ovanstående tabell är effektutvecklingen per areaenhet betydligt högre hos kraftkablarna än hos övriga kablar, detta kan härledas till resultaten från FIPEC-projektets försök där den resulterande effektutvecklingen var betydligt högre för kraftkablarna. Det ska även noteras att antändningstemperaturerna skiljer sig från den tidigare definierade antändningstemperaturen på 218 °C, istället definieras en antändningstemperatur för varje kabelsort. Detta anses minska osäkerheterna

avseende antändning då de tidigare kriteriet valdes från en begränsad mängd testdata och då kablar kan bete sig på många olika sätt beroende på uppbyggnad och material. Antändningstid i ovanstående tabell anger tiden till antändning från dess att en kabeldel uppnår sin antändningstemperatur. Övriga kablar antänder direkt då de uppnår sin antändningstemperatur medan kraftkablarna antänder först efter 300 sekunder. Att antändningstiden ser ut på detta sätt för kraftkablarna anses kunna härledas till det tidigare berörda begreppet etablerad antändning. Etablerad antändning definieras som då flammor börjar uppstå och branden börjar växa. Tiden innan detta händer, benämnd t_0, beror både på bränslet i fråga samt på vilket sätt det antänds och definieras som tiden från antändning tills dess att flammor uppkommer, det vill säga när en signifikant mängd energi börjar avges (Karlsson & Quintiere, 2000). Innan detta sker kan bränslet fortfarande avge lite energi och på grund av att det har börjat pyra kan det även aktivera detektionssystem redan innan tillväxtfasen inletts (Karlsson & Quintiere, 2000). Vid FIPEC-projektets tester ligger tiden till etablerad antändning, t_0, hos kabel 5 på mellan 102-314 sekunder varför en antändningstid på 300 sekunder därför anses kunna vara ett rimligt värde (Grayson et al, 2000). Brinntiden är den tid varje kabeldel brinner innan den slocknar, det vill säga den tid varje kabeldel brinner tills dess att bränslet tar slut. Det ses att brinntiden för kraftkablarna är betydligt längre än för övriga kablar, detta beror på att kraftkablarna är betydligt större och därmed har mer brännbar mängd per längdenhet än övriga kablar.

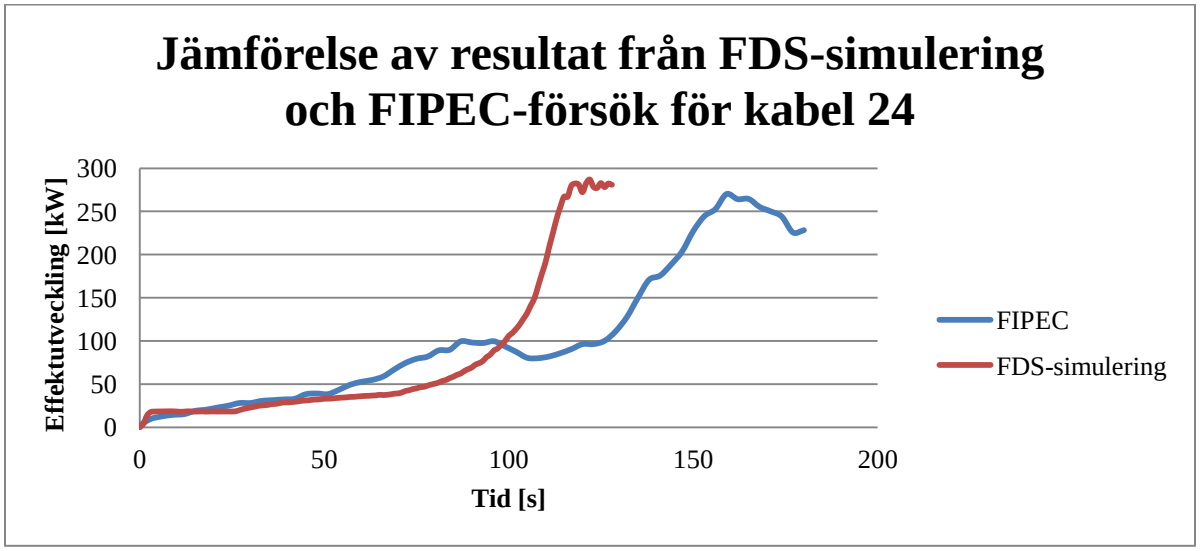
Kabelparametrarna i tabellen ovan resulterar i effektutvecklingskurvor för kabel 5 och kabel 24 i Figur 7.1 respektive 7.2 nedan.



Figur 7.1 Jämförelse av resultat från FDS-simulering och FIPEC-projektets test av kabel 5

I figuren ovan ses även de tidigare anpassade αt^2-kurvorna som togs fram för att hantera osäkerheten avseende skillnaderna i isoleringsmaterial mellan kabel 5 från FIPEC-projektets tester och de som anses vara de vanligast förekommande i schaktet. Det ses att då den andra fasen inleds ligger FDS-simuleringens och den anpassade kurvans lutningar på ungefär samma värde, vilket var det som eftersträvades. Dock stannar effektutvecklingsökningen av hos FDS-simuleringen efter ungefär 1800 sekunder, detta beror på att hela kabelstegen vid denna tidpunkt är brandutsatt och branden inte kunde sprida sig ytterligare för att därmed öka i effekt. Om kabelstegen varit längre skulle effektutvecklingen troligtvis fortsätta öka på samma sätt som den anpassade kurvan. Vid FIPEC-projektets effektutvecklingskurva ses att effektutvecklingen rasar ner till noll efter ungefär 2000 sekunder, detta beror på att kablarna vid denna tidpunkt släcktes manuellt. Detta medför att det är svårt att säga hur länge kablarna fortsatt brinna samt hur avsvalningsfasen sett ut om denna manuella släckning ej skett.

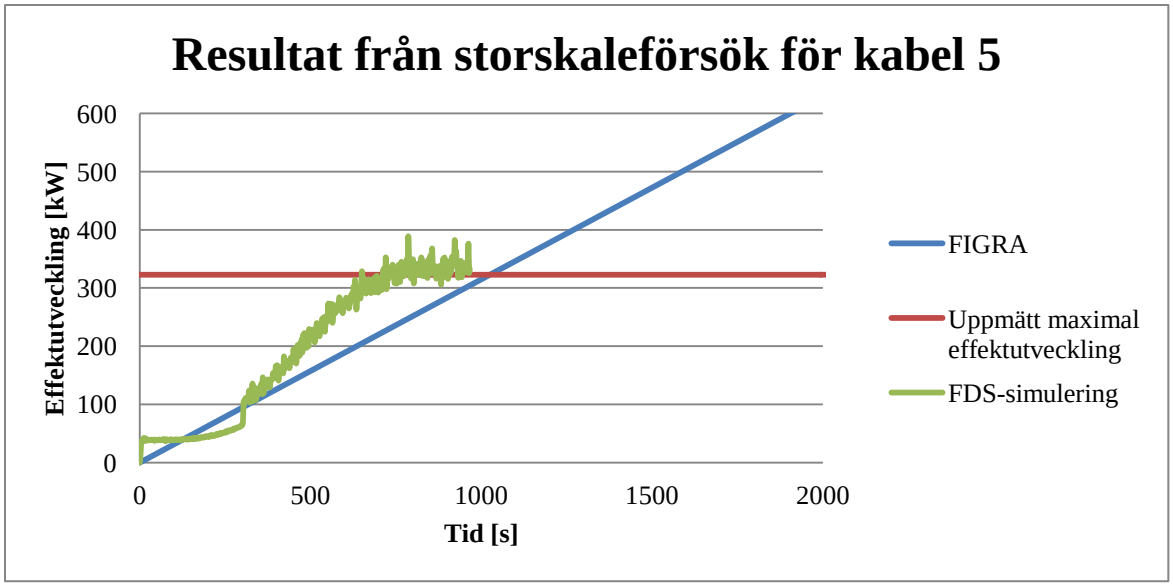
Även då det föreligger en viss osäkerhet kring den maximala effektutvecklingen vid FIPEC-projektets tester anses det ändå vara ett rimligt antagande att den maximala effektutvecklingen uppnåtts vid tidpunkten för släckning, detta då hela kabellängderna var skadade vid försöket. Vad gäller avsvalningsfasen ses, då brandscenariot från FDS-simuleringen observeras noggrannare i smokeview, att kablarna vid ungefär 2400 sekunder börjar slockna. Om simuleringen fortgått under en längre tid hade därmed effektutvecklingen börjat avta ungefär vid denna tidpunkt för att vidare gå ner mot noll.



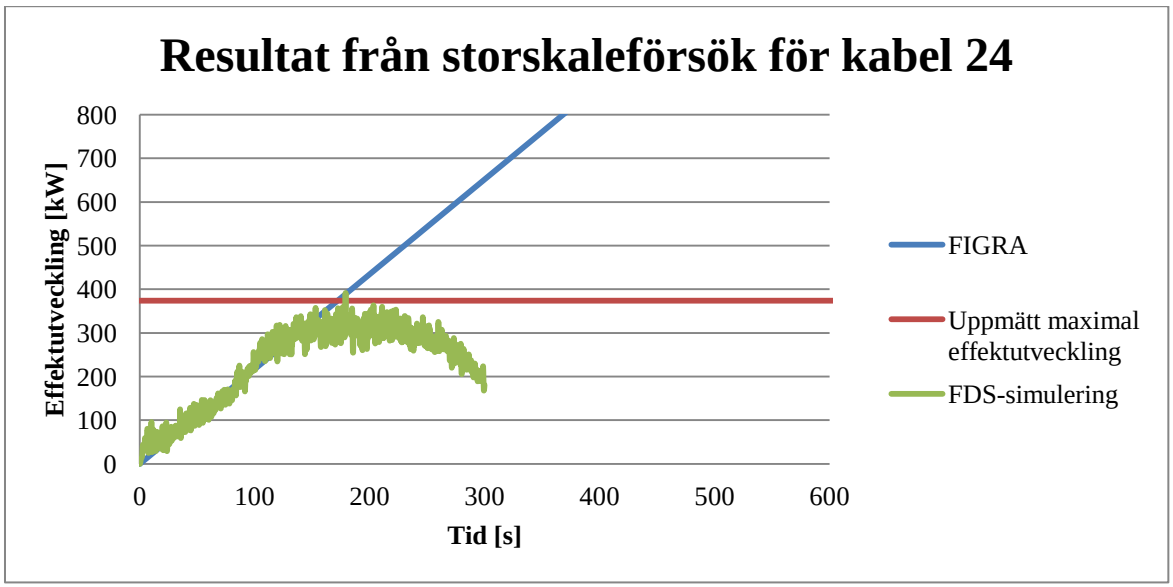
Figur 7.2 Jämförelse av resultat från FDS-simulering och FIPEC-projektets test av övriga kablar

I figuren ovan ses att tillväxten underskattas en del i det inledande skedet av förloppet för att sedan överskattas under den resterande delen av förloppet. Att utifrån simuleringarna få en effektutvecklingskurva vilken motsvarar de två topparna i FIPEC-kurvan var ej möjligt, den framtagna effektutvecklingskurvan anses ändå representera brandförloppet på ett adekvat sätt då skillnaderna kurvorna emellan tidsmässigt endast handlar om ett tiotal sekunder. Vad gäller avsvalningsfasen ses att FDS-simuleringens effektutvecklingskurva håller sig på sitt maxvärde något längre än kurvan vid FIPEC-projektets försök, dock ses i smokeview att kablarna börjar slockna efter ungefär 120 sekunder. Om simuleringen fortgått under en längre tid hade därmed effektutvecklingen börjat avta vid denna tidpunkt för att vidare gå ner mot noll, på samma sätt som kabel 24.

Det föreligger dock osäkerheter kring om dessa framtagna kabelparametrar endast gäller för det befintliga testet eller om de kan appliceras till andra konfigurationer och ändå ge giltiga resultat. För att kontrollera om kabelparametrarna är korrekta utförs ytterligare simuleringar med en uppställning enligt FIPEC-projektets storskaleförsök, det vill säga försök i en hörnkonfiguration. Vid dessa försök finns dock ej effektutvecklingskurvor över tid att tillgå, däremot finns uppmätta maximala effektutvecklingar och beräknade FIGRA-värden vilket medför att en ungefärlig jämförelse effektutvecklingskurvorna emellan ändå blir möjlig. Resultaten från simuleringarna med hörnkonfiguration för de två kabelsorterna åskådliggörs i Figur 7.3 och 7.4 nedan.



Figur 7.3 Effektutvecklingskurva från FDS-simulering, FIGRA-kurva och maximal effektutveckling vid storskaleförsök



Figur 7.4 Effektutvecklingskurva från FDS-simulering, FIGRA-kurva och maximal effektutveckling vid storskaleförsök

Det ses att de resulterande effektutvecklingskurvorna från FDS-simuleringarna mer eller mindre följer FIGRA-kurvorna och når dessutom upp till ungefär samma maximala effektutvecklingar. Det föreligger dock osäkerheter kring hur de verkliga effektutvecklingskurvorna vid FIPEC-projektets storskaleförsök ser ut, men de beräknade FIGRA-kurvorna i kombination med de uppmätta maximala effektutvecklingarna anses ändå vara förhållandevis bra skattningar. Med tanke på hur de, av FDS-simuleringarna, erhållna effektutvecklingskurvorna ser ut dras slutsatsen att de tidigare framtagna kabelparametrarna anses kunna ge adekvata resultat för de befintliga kablarnas brandförlopp, även då geometri och yttre förhållanden varieras.

Utförligare beskrivningar av beräkningar, försöksuppställningar, simuleringar, indatafiler och resultat för ovanstående kalibreringar finns att tillgå i Bilaga H.

7.3.1 Känslighetsanalys

Då ovanstående parametrar är framtagna för endast två sorters kablar och då det finns betydligt fler sorters kablar i schaktet utförs en känslighetsanalys med syftet att utvärdera vilken eller vilka kabelparametrar som har störst inverkan på slutresultatet. För utvärdering av kabelparametrarnas betydelse för ett eventuellt brandförlopp varieras de tidigare framtagna parametrarna med ± 10 % och ± 20 % kring dess framtagna värden. Detta resulterar i kabelparametrarna för kraftkablarna enligt Tabell 7.5 och för övriga kablar enligt Tabell 7.6. För att kunna utföra en korrekt utvärdering av deras betydelse utförs simuleringar enligt samma uppställning som tidigare, det vill säga enligt FIPEC-projektets fullskaleförsök.

Tabell 7.5 Variation av ingående kabelparametrar hos kraftkablar

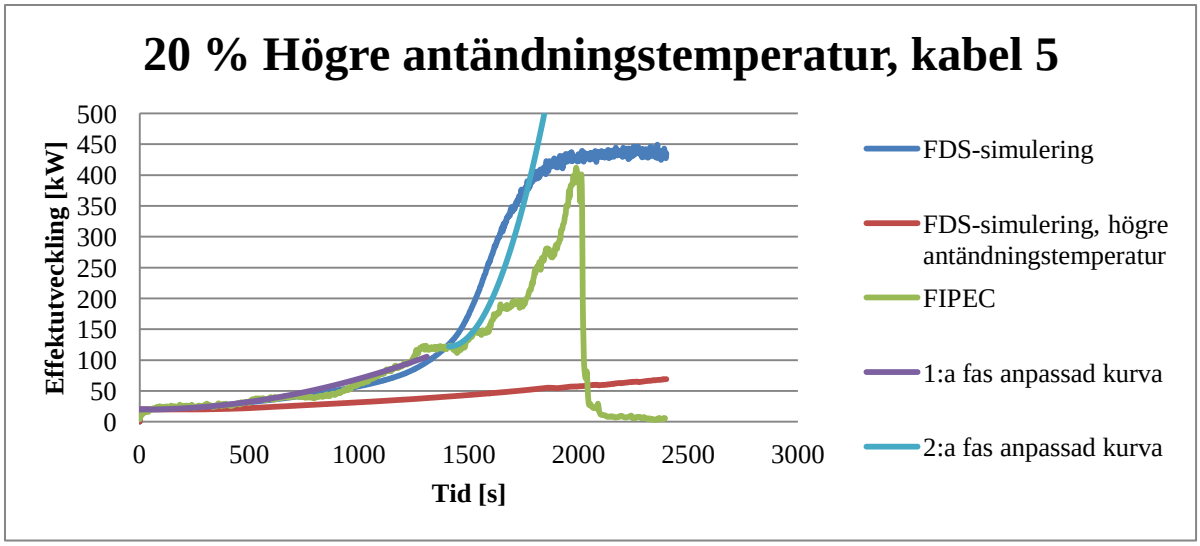
Kraftkablar	$HRRPUA_{min}$ [kW/m^2]	$HRRPUA_{max}$ [kW/m^2]	Antändnings $temp_{min}$ [°C]	Antändnings $temp_{max}$ [°C]	$Brinntid_{min}$ [s]	$Brinntid_{max}$ [s]
± 10 %	234	286	330	407	1080	1320
± 20 %	208	312	296	444	960	1440

Tabell 7.6 Variation av ingående kabelparametrar hos övriga kablar

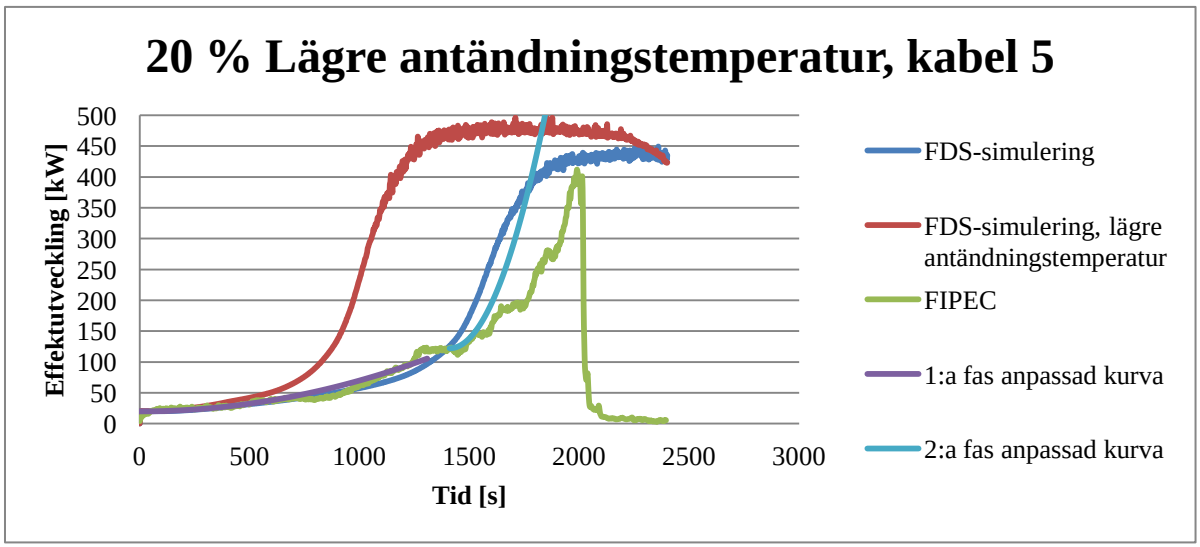
Övriga kablar	$HRRPUA_{min}$ [kW/m^2]	$HRRPUA_{max}$ [kW/m^2]	Antändnings $temp_{min}$ [°C]	Antändnings $temp_{max}$ [°C]	$Brinntid_{min}$ [s]	$Brinntid_{max}$ [s]
± 10 %	135	165	162	198	135	165
± 20 %	120	180	144	216	120	180

Ovanstående variationer av de ingående kabelparametrarna kommer medföra synliga skillnader på effektutvecklingskurvorna, ytterligare en parameter som kommer varieras men som ej kommer synas i effektutvecklingskurvorna är den inre temperaturen för kortslutning. Denna har tidigare satts till 180 °C, vid mätningar av de inre temperaturerna kommer även denna parameter varieras kring sitt ursprungsvärde, det vill säga mellan 144 och 216 °C. Detta under förutsättning att variationerna kommer medföra skillnader i slutresultatet.

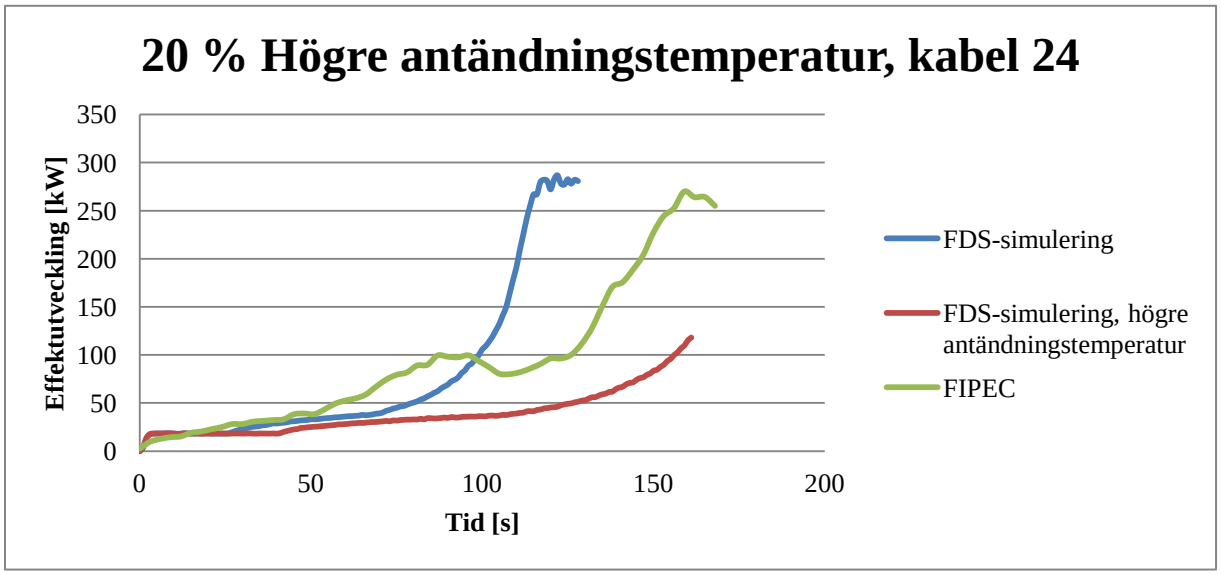
Simuleringar utförda med parametrar enligt Tabell 7.5 och 7.6 resulterar i att antändningstemperaturen har den största påverkan på brandförloppen, både avseende kraftkablar och övriga kablar. Det visar sig vara en betydande skillnad i effektutvecklingskurvans utseende vid bara en så liten skillnad som 10 % i antändningstemperatur. I figurerna 7.5-7.8 åskådliggörs de, av FDS, erhållna effektutvecklingskurvorna med variationer med 20 % kring de tidigare framtagna antändningstemperaturerna. Figurerna 7.5 och 7.6 åskådliggör effektutvecklingskurvorna för kraftkablarna och figurerna 7.7-7.8 för övriga kablar. I samtliga figurer är även de tidigare, av FDS, framtagna effektutvecklingskurvorna samt FIPEC-projektets effektutvecklingskurvor för kraft- respektive övriga kablar plottade, detta för att underlätta jämförelser av resultaten. Resultat och effektutvecklingskurvor för resterande simuleringar med variationer i indata enligt ovanstående tabeller finns att tillgå i Bilaga H.



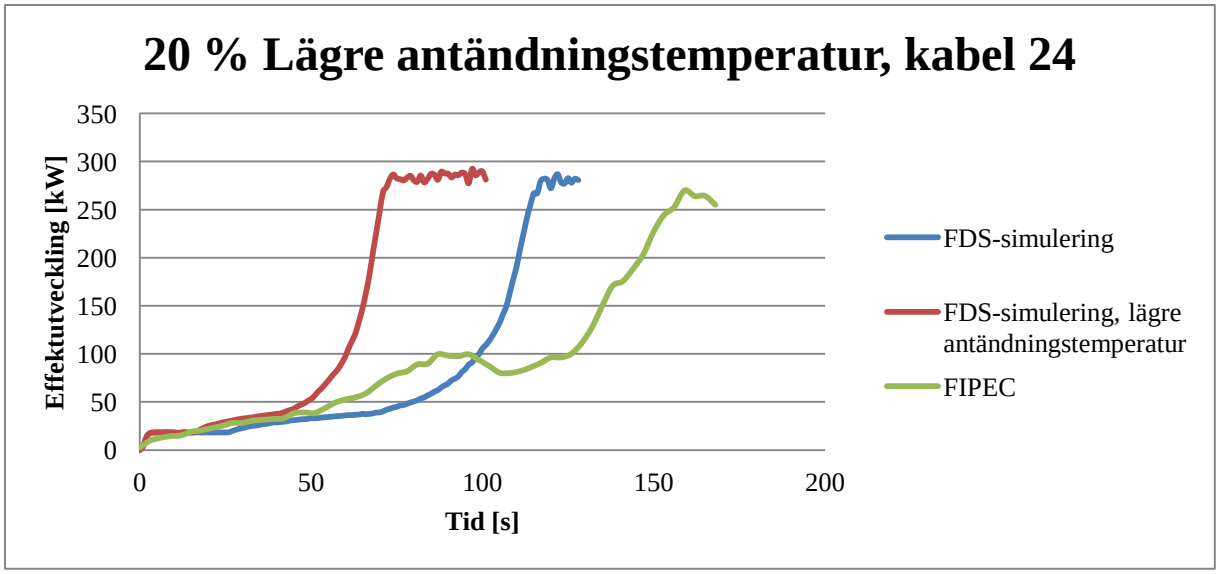
Figur 7.5 Effektutvecklingskurva för kraftkablar med 20 % högre antändningstemperatur



Figur 7.6 Effektutvecklingskurva för kraftkablar med 20 % lägre antändningstemperatur



Figur 7.7 Effektutvecklingskurva för övriga kablar med 20 % högre antändningstemperatur



Figur 7.8 Effektutvecklingskurva för övriga kablar med 20 % lägre antändningstemperatur

Då antändningstemperaturerna för kablarna har den påtagligt största inverkan på brandförloppet kommer simuleringar i kabelschaktet även utföras med variationer av dessa parametrar, detta för att utvärdera vilken möjlig inverkan på brandförloppen detta skulle kunna ha samt för att utvärdera de värsta möjliga scenarierna. Det ska dock tas en extra titt på de lägre värdena på antändningstemperaturerna hos övriga kablar, en reducering med 20 % ger antändningstemperaturen 144 °C, detta är en otroligt låg antändningstemperatur och frågan är om erhållna resultat med denna antändningstemperatur verkligen ens är rimliga. Vilket nämnts i tidigare kapitel har diverse försök visat på att antändningstemperaturerna för kablar ligger omkring 218-422 °C, dessa resultat är dock hämtade från ett begränsat antal försök vilket betyder att de mycket väl kan ligga på ett lägre värde. En antändningstemperatur på 180 °C för övriga kablar anses därmed kunna vara ett rimligt värde, men med underlag av litteraturstudien något konservativt. Då denna reduceras med 20 %, till 144 °C, vilket är ett än mer konservativt värde finns risken att denna temperatur är något låg för att ge några giltiga resultat. Detta framförallt vid fortsatta simuleringar i schaktet då omfattningen ökar vilket medför att ett potentiellt fel, som ger en liten skillnad i liten skala, visar sig desto tydligare i större skala. Ovanstående osäkerhet skall därför tas i beaktning vid kommande simuleringar i kabelschaktet.

7.4 Brandscenarion

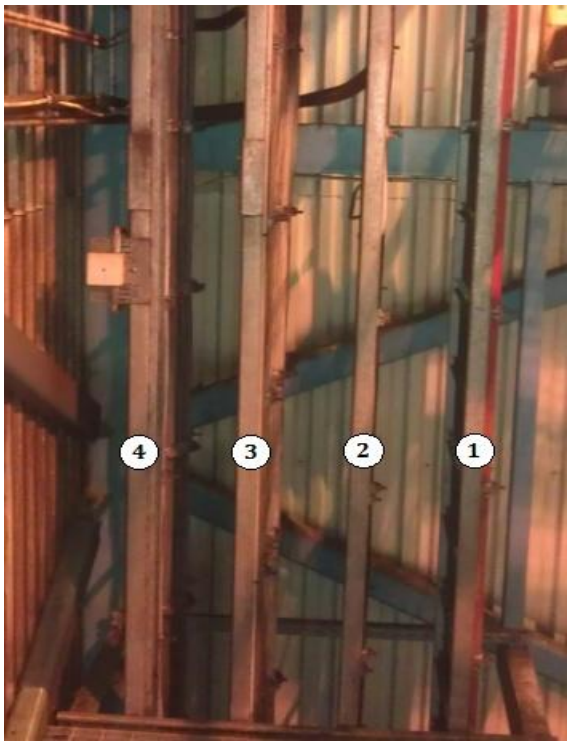
Den vanligaste orsaken till brand i kablar är elektriska fel, sådana som kortslutning eller överhettning (Göransson, 1992). Dessa fel kan uppkomma både i någon kontaktpunkt eller någonstans på ledningen, detta betyder i teorin att en brand kan uppkomma i princip var som helst på kablarna. Med detta faktum i beaktning väljs därför att identifiera ett antal potentiella brandförlopp som anses vara de mest utmanande, det vill säga de som anses kunna leda till de allvarligaste konsekvenserna i schaktet.

Som antändningskälla antas att en typ av elektriskt fel uppkommer i någon del av kablarna, rimligtvis antingen genom överhettning eller kortslutning. Brandstart i mindre föremål så som papperskorgar eller från någon sorts oljeläckage bedöms ej vara några troliga scenarion då det i princip enda brännbara materialet i schaktet är just kablarna. En annan typ av tändkälla skulle kunna vara anlagd brand, men då det krävs besökspass för att kunna vistas inom området och då risken för att någon anställd skulle tända på i schaktet anses som minimal kommer denna typ av tändkälla ej tas i beaktning till vid analysen. Om någon form av hett arbete utförs i schaktet föreligger självklart risken att kablarna skulle kunna antända, till exempel genom en svetsloppa eller liknande. Denna risk anses kunna innefattas i scenariot för elektriskt fel då antändning i båda fallen sker på liknande sätt. Även då de ovanstående diskuterade antändningskällorna kan vara av högre magnitud än en kortslutning eller överhettning anses de ändå kunna täckas in i scenarierna då tidigare effektutvecklingskurvor är framtagna med utgångspunkt från testmetoder där brännaren varit igång under hela testutförandet. Antändningskällorna som har använts för att ta fram effektutvecklingskurvorna anses därmed vara allvarligare än både den för kortslutning, för en svetsloppa eller eventuell anlagd brand. Då tändkällor av högre magnitud, enligt tidigare diskussion, ger allvarligare brandscenarion än tändkällor av lägre magnitud anses därmed också effektutvecklingskurvorna redan vara något konservativa. Effektutvecklingskurvorna anses alltså gälla för det värsta möjliga scenariot och anses kunna täcka in antändning genom hett arbete, anlagd brand och dylikt.

Vad gäller val av brandscenarion är målet att välja brandstartplatser som anses medföra de mest utmanande scenarierna. Då en brand snabbare sprider sig uppåt än neråt eller ut åt sidorna är det rimligt att placera brandstartplatsen långt ner i schaktet i en kabel monterad på en av de vertikala kabelstegarna. En ytterligare orsak till att definiera brandstart i den nedre delen av schaktet är att de nedre våningsplanen, upp till plan 6, innefattar betydligt fler kablar än de övre våningsplanen. För att ge ett än mer utmanande scenario kan startplatsen dessutom placeras på en plats i omedelbar närhet till någon eller några av de horisontella kabelsektionerna. Då branden växer kan, förutom de andra vertikala kabelstegarna, även dessa horisontella kabelsektioner antända vilket därmed torde ge de allvarligaste scenarierna. Utifrån dessa resonemang identifieras fyra potentiella brandscenarion som anses kunna resultera i de allvarligaste konsekvenserna. Dessa scenarion är som följer:

1. Brandstart i yttre kabelstege innefattande kraftkablar
2. Brandstart i inre kabelstege innefattande kraftkablar
3. Brandstart i inre kabelstege innefattande övriga kablar
4. Brandstart i yttre kabelstege innefattande övriga kablar

Vilken kabelstege som avses i vardera scenario åskådliggörs i Figur 7.9.

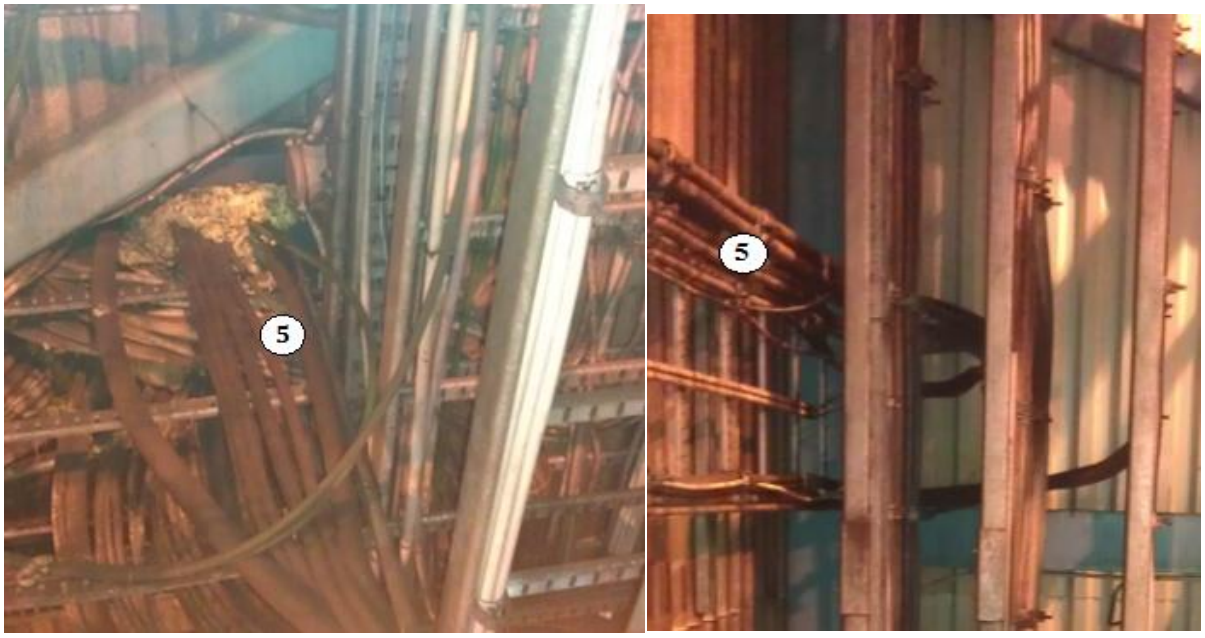


Figur 7.9 Kabelstegar som avses vid respektive scenario

För att även utvärdera hur en eventuell brand skulle uppföra sig om brandstart sker i en av de horisontellt monterade kabelsektionerna kommer även denna typ av scenario utvärderas, det vill säga

5. Brandstart i en horisontell kabelsektion innefattande kraft- och/eller övriga kablar

Även vid detta scenario antas att brandstart sker långt ner i schaktet, två potentiella platser för brandstart vid detta scenario åskådliggörs i Figur 7.10 nedan.



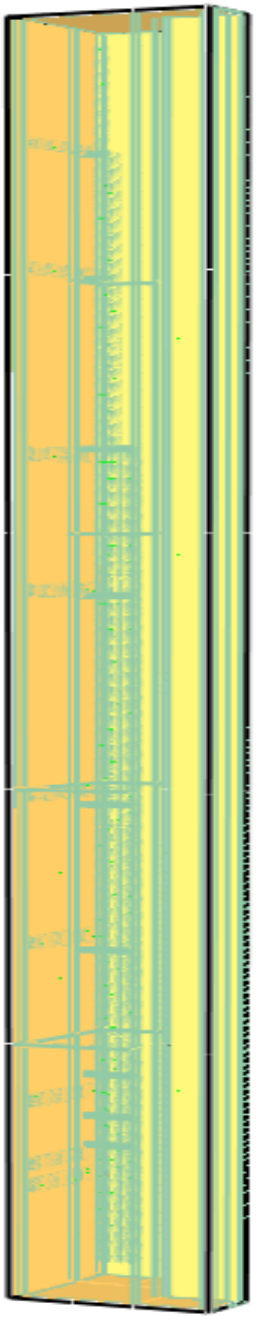
Figur 7.10 Potentiella brandstartspositioner för det femte scenariot

Inledningsvis kommer båda scenarierna att utvärderas, dock kommer endast det som visar sig vara det allvarligaste scenariot av dessa att analyseras vidare.

7.5 Simuleringar och resultat

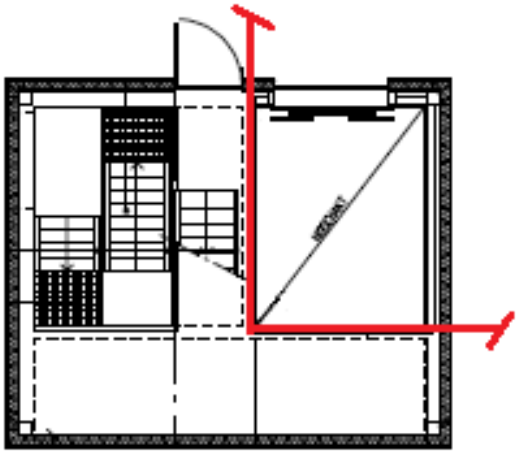
När ingående kabelparametrar definierats modelleras kabelschaktet med dess kabelkonfigurationer. Då kablarna i schaktet sitter så pass blandat och i olika konfigurationer ligger det en svårighet i att modellera det exakt så som det ser ut även då det finns en del fotografier att gå efter. Därför är modellen något förenklad i sitt utförande, dock med målet att den fortfarande ska vara så lik verkligheten som möjligt. Alla trappor i schaktet är dock borttagna, detta anses ha mindre inverkan på resultaten då trapporna, och även våningsplanen, ej är solida utan uppförda som gallerdurk. Kablarna i schaktet är, precis som vid tidigare simuleringar, uppdelade i mindre delar med definierade antändningstemperaturer, effektutvecklingar och brinntider. I modellen placeras även, i kablarnas längdriktningar, de tidigare beskrivna mätinstrumenten cable failure detectors för mätningar av kablarnas inre temperaturer över tid.

Av de fyra vertikala kabelstegarna innefattar den som är placerad närmst väggen endast övriga kablar och går ända upp till toppen av schaktet. Även nästa kabelstege innefattar endast övriga kablar, denna kabelstege sträcker sig dock inte ända upp till toppen utan endast till plan 8. De två yttre kabelstegarna innefattar endast kraftkablar och går båda upp till plan 6 där kablarna vidare leds ut till hydraulikrummet. På varje våningsplan finns två uppsättningar horisontella kabelsektioner placerade där en av dem går längs den inre väggen och den andra leds in i schaktet från den inre väggen och i nära anslutning till de vertikala kabelstegarna. Dessa horisontella kabelsektioner innefattar både kraft- och övriga kablar upp till plan 6, därefter innefattar kabelsektionerna som går längs den inre väggen endast övriga kablar och kabelsektionerna som leds in i schaktet i huvudsak övriga kablar men även ett mindre antal kraftkablar. I modellen finns totalt 22 kabelsektioner, 4 vertikala och 18 horisontella, fördelade i kabelschaktet. Grunduppställningen för FDS-simuleringarna åskådliggörs i Figur 7.11 nedan, utförligare beskrivningar av indata och uppbyggnad av modellen finns att tillgå i Bilaga H.



Figur 7.11 Grunduppställning för FDS-simuleringar i schaktet

Alla mått, väggmaterial och dylikt i schaktet är utförda enligt erhållna ritningar, med skillnaden att hisschaktet är borttaget. Denna begränsning har ingen inverkan på brandförloppen då detta utrymme är avskilt från resten av schaktet, den borttagna hissektionen åskådliggörs i Figur 7.12.



Figur 7.12 Översikt av kabelschaktet sett från ovan

Samtliga simuleringar av brandförlopp i kabelschaktet utförs med Lunds Tekniska Högskolas kluster Lunarc genom Alariksystemet. Vid tiden för detta arbete har systemet följande resurser (Lunarc, 2012):

- CPU: 2 AMD6220 (3,0 Ghz, 8-core)
- Memory: 32-64 Gb (2-4 GB/core)
- Linux distribution: CentOS 6.2 x86_64 (RHEL6 compatible)

Att utföra simuleringar med klustret medför en beräkningskapacitet som överstiger den hos en vanlig dator, detta betyder att simuleringar kan utföras betydligt snabbare och under en längre tid än vid en vanlig dator. Maxtiden för en simulering i Alariksystemet är sju dygn, samtliga simuleringar i kabelschaktet har simulerats under denna tid. Att nedanstående brandscenarion ändå fortgått olika långt tid beror på att ett allvarligare scenario medför fler beräkningar i varje kontrollvolym vilket i sin tur medför att det tar längre tid att beräkna varje tidssteg.

Vad gäller bedömningar av skadeomfattningar och återställningstider för kablarna i schaktet vid de olika scenarierna sker bedömningarna genom att i smokeview studera brandspridningens omfattning samt koppla detta till när en eventuell insats skulle kunna vara igångsatt och branden kan begränsas. Då det i dagsläget inte finns något aktivt släcksystem i kabelschaktet kommer räddningstjänstens insatstid att bli en viktig parameter om en brand skulle uppstå, denna insatstid skiljer sig något beroende på om industribrandkåren är i tjänst eller ej. Även aktiveringstiden hos detektorerna i kabelschaktet blir en viktig parameter, likväl denna tid kan skilja sig beroende på var i schaktet branden startar, detta kan vara allt från några centimeter till flera meter från närmsta detektor. Vilket nämnts tidigare ligger insatstiderna för industribrandkåren och kommunens brandförsvar på ungefär 15 respektive 15-20 minuter. Det ska tas i beaktning att dessa tider gäller från dess att en brand är upptäckt, därmed skall dessa tider ökas en aning. Då PVC producerar otroligt mycket brandrök kommer aktivering av rökdetektorer ändå ske förhållandevis tidigt även om det är en liten brand och om detektorerna är placerade ett par meter ovanför brandstartpositionen. En maximal tid på 5 minuter från dess att branden startar till dess att larm inkommer till berörd räddningstjänst anses vara ett rimligt antagande. Därmed kommer insatstiderna ovan att ökas med 5 minuter vilket ger att tiden från brandstart tills dess att en insats kan vara igångsatt är ungefär 20 respektive 20-25 minuter för industribrandkåren och den kommunala räddningstjänsten.

Vid utvärderingar av återställningstiderna kommer det göras bedömningar av ungefär hur stor andel av kablarna i kabelschaktet som är i behov av ersättning vid respektive brandscenario för att vidare, utifrån tidigare beskrivna återställningstider, göra uppskattningar av ungefärliga återställningstider. Enligt tidigare ligger återställningstiden för större delen av schaktets kablar i storleksordningen månader, i följande avsnitt anses större delen av kablarna innefattar tre fjärdedelar av kabelsektionerna i schaktet, det vill säga 17 stycken. Om skadeomfattningen överstiger 17 stycken kabelsektioner anses återställningstiden därmed ligga i storleksordningen månader, i annat fall adderas återställningstiderna per skadad kabelsektion för att få den totala återställningstiden.

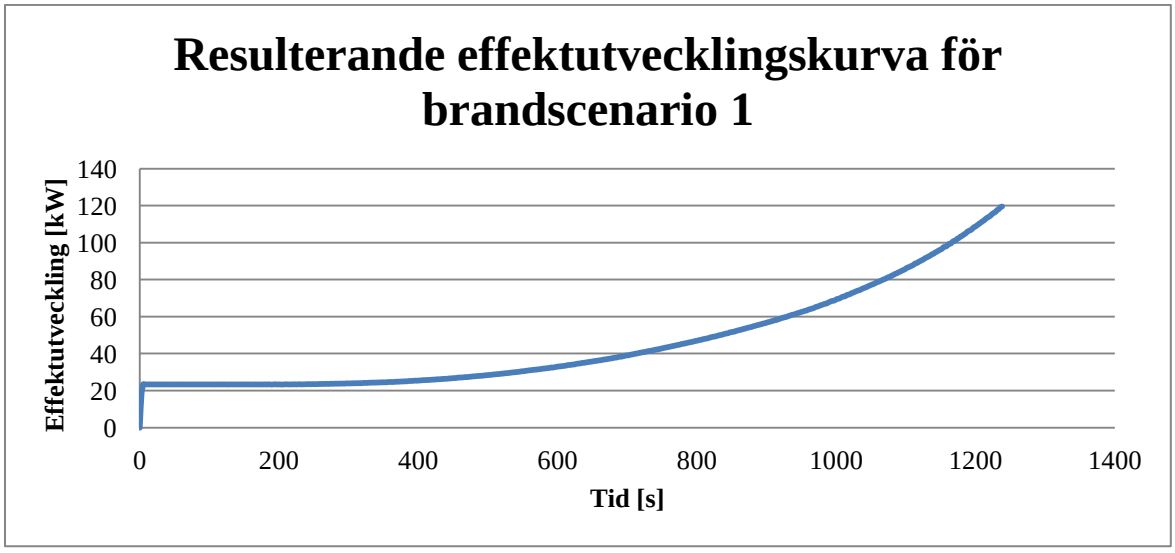
I följande avsnitt redogörs för resultaten från simuleringarna vid de olika brandscenarierna samt bedömningar av skadeomfattningar och återställningstider.

7.5.1 Scenario 1 - Brandstart i yttre kabelstege innefattande kraftkablar

Vid detta scenario sker brandstart i den yttre kabelstegen med kraftkablar, se Figur 7.9, brandens startposition är i en centralt monterad kabel på höjden 5 meter ovan golv. Inledningsvis redogörs för simuleringsresultaten, både för det befintliga scenariot och för känslighetsanalysen, för att vidare redogöra för bedömningar av skadeomfattningen för kablarna i schaktet.

7.5.1.1 Simuleringsresultat

I Figur 7.13 nedan åskådliggörs den resulterade effektutvecklingskurvan för det befintliga scenariot.

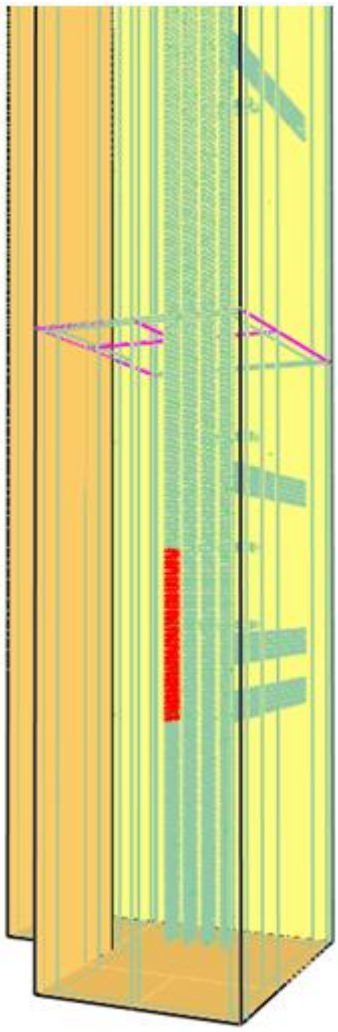


Figur 7.13 Effektutvecklingskurva för brandstart i den yttre kabelstegen innefattande kraftkablar

Vilket kan ses i ovanstående figur hinner effektutvecklingen inte öka i någon större omfattning under drygt 1200 sekunders brandförlopp, ungefär 20 minuter. Effektutvecklingskurvans lutning ser dock ut att öka med tiden och om en längre simuleringstid varit möjlig hade effektutvecklingskurvan troligtvis fortsatt stiga på detta sätt.

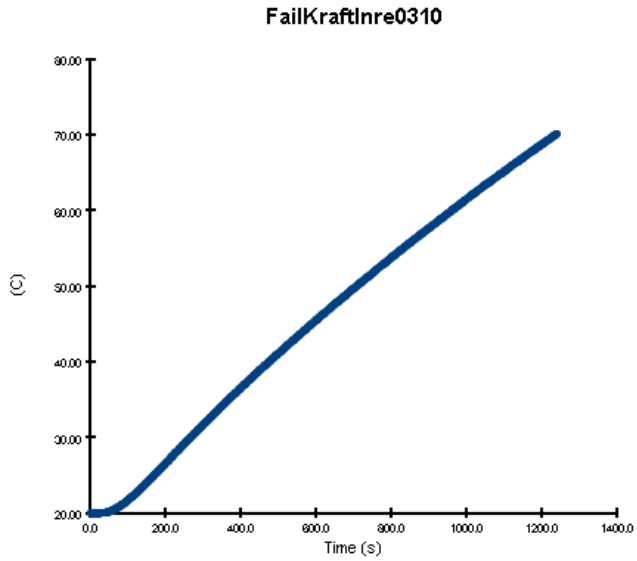
För att utvärdera brandspridningen och därmed skadorna på kablarna i schaktet studeras brandförloppet i smokeview. Det observeras att alla kablar på den brandutsatta kabelstegen är involverade i brandförloppet efter ungefär 450 sekunder, vid denna tidpunkt har branden spridit sig ungefär 1 meter upp längs kabelstegen. Vid simuleringens slut har branden tagit sig ungefär 3 meter upp längs kabelstegen, den har inte hunnit sprida sig till någon annan kabelsektion i schaktet. För att få en bättre uppfattning av brandspridningen åskådliggörs i Figur 7.14 en schematisk bild på dess omfattning i schaktet vid simuleringens slut. Notera att det endast är själva brandspridningen som åskådliggörs i figuren. Vid jämförelse av effektutvecklingskurvan ovan och effektutvecklingskurvan

erhållen vid simuleringarna med uppställning enligt FIPEC-projektets tester ses att deras tillväxt ser ut på i princip samma sätt, detta med skillnaden att ovanstående kurva har aningen lägre effekter. Detta anses vara rimligt då det i båda fallen endast är en fritt stående kabelstege som är brandutsatt och då brandspridningen inte överstigit 4 meter. Att värdena vid simuleringen enligt FIPEC-projektets uppställning är något högre beror på att det vid schaktets simuleringar inte fanns någon extern värmekälla i form av brännaren samt att kablarna inte är monterade på optimerade inbördes avstånd. Vilket diskuterats tidigare ger dessa parametrar ett något allvarligare brandförlopp. Om en längre simuleringstid varit möjlig antas att effektutvecklingen fortsatt öka på samma sätt som vid simuleringarna med uppställning enligt FIPEC-projektet, dock med skillnaden att effektutvecklingen ej hade avtagit vid ungefär 1800 sekunder utan fortsatt öka då den brännbara mängden i detta fall inte är en begränsande faktor. Detta såvida brandspridning till ytterligare kabelsektioner ej sker under denna tid, vid det fallet hade effektutvecklingskurvans lutning ökat än mer och brandförloppet blivit allvarligare.



Figur 7.14 Brandspridningens omfattning vid simuleringens slut

Vad gäller de inre temperaturerna för kortslutning uppnår inga kablar som inte är involverade i brandförloppet sina inre kortslutningstemperaturer under simuleringen. De högsta inre temperaturerna som registreras hos kablar i schaktet är drygt 70 °C, detta hos kraftkablarna på den närmsta vertikala kabelstegen. I Figur 7.15 åskådliggörs en inre temperatur-tid-kurva i den punkt på kraftkablarna monterade på den närmsta kabelstegen som uppvisade den högsta inre temperaturen.



Figur 7.15 Inre temperatur över tid hos en kraftkabel på närmsta kabelstegen med kraftkablar

7.5.1.2 Bedömning av skador och återställningstider

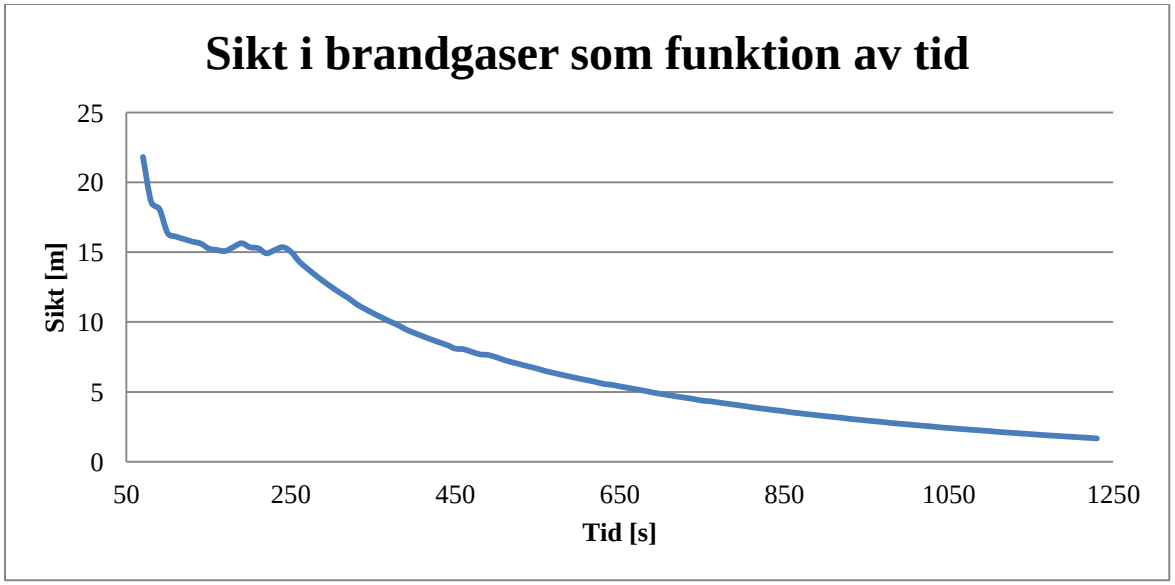
Vid detta scenario har branden på ungefär 1200 sekunder (20 minuter) endast hunnit sprida sig ungefär 3 meter uppåt längs den brandutsatta kabelstegen. Inga kablar som inte är involverade i brandförloppet har nått sina inre kortslutningstemperaturer. Efter ungefär 20 minuter anses att en insats hunnit komma igång vilket medför att brandspridningen kan begränsas och effektutvecklingen reduceras. Innan en insats anses ha kunnat komma igång är det alltså endast den yttre kabelstegen med kraftkablar som är skadad av själva branden. Dock anses att nästa kabelstege med kraftkablar samt två horisontella kabelsektioner som leds in i schaktet borde kontrolleras noga och helst ersättas. Detta med utgångspunkt från tidigare diskussion avseende att brandpåverkade kablar ofta visar sig vara allvarligt skadade redan innan de antänts eller kortslutits och då det finns osäkerheter kring hur länge brandpåverkade kablar fortsätter att fungera. Då de vertikala kabelstegarna står så pass nära varandra, 0,3 meter, och då de horisontella kabelsektionerna som avses löper i nära anslutning till de vertikala kabelstegarna anses det inte vara ett orimligt antagande att kabelsektionerna som avses blivit mer eller mindre flam- och strålningspåverkade. Dessutom kan de även bli påverkade under den tiden som insatsen pågår. Med detta menas att branden ej släcks direkt utan det kan ta en stund, under denna tid finns risken att de omgivande kabelsektionerna påverkas ytterligare av branden. Vid följande bedömningar av skadeomfattningar vid de olika brandscenarierna kommer denna parameter tas i beaktning varför bedömningarna kommer göras något konservativa.

Även brandröken skall tas i beaktning, vilket nämnts tidigare är väteklorid extremt korrosivt, därför rekommenderas att en noga utförd sanering och kontroll av schaktets kablar utförs. Med utgångspunkt från ovanstående resonemang ska alltså högst fyra kabelsektioner ersättas, två vertikala och två horisontella, detta medför en återställningstid på lite under 4 dygn.

7.5.1.3 Bedömningar av sikt och toxicitet

För bedömningar av sikt och toxicitet i kabelschaktet utgås från tidigare definierade ekvationer och ingångsvärden samt den från simuleringen erhållna effektutvecklingen över tid. Vid beräkningarna av sikten och toxiciteten i kabelschaktet erfordras volymen av brandgaserna, för att ta reda på detta studeras rökproduktionen i smokeview för att därmed se hur stor volym brandröken upptar vid varje tidssteg.

Vid detta scenario urskiljs i smokeview att ett tydligt brandgaslager bildas först efter ungefär 70 sekunder varför sikten och toxiciteten i brandgaserna kommer behandlas med utgångspunkt från denna tidpunkt. Brandgaslagret ligger vid 70 sekunder ungefär 17 meter ovan bottenplan, i höjd med tredje våningsplanet, upp till 40 meter ovan bottenplan, ungefär på sjätte våningsplanet. Efter 240 sekunder har brandgaslagret nått upp till toppen av schaktet och ner till ungefär 4 meter ovan golv. Vidare sjunker det ner mot golvet för att slutligen uppta hela schaktet vid tiden 760 sekunder. Efter beräkningar avseende hur sikten och toxiciteten förändras i schaktet över tiden får att sikten uppnår sitt kritiska värde, det vill säga 5 meters sikt genom brandgaserna, efter ungefär 660 sekunder medan gränsvärdena för toxiciteten ej uppnås under simuleringstiden. I Figur 7.16 nedan åskådliggörs hur sikten i brandgaserna förändras med tiden för det befintliga scenariot.



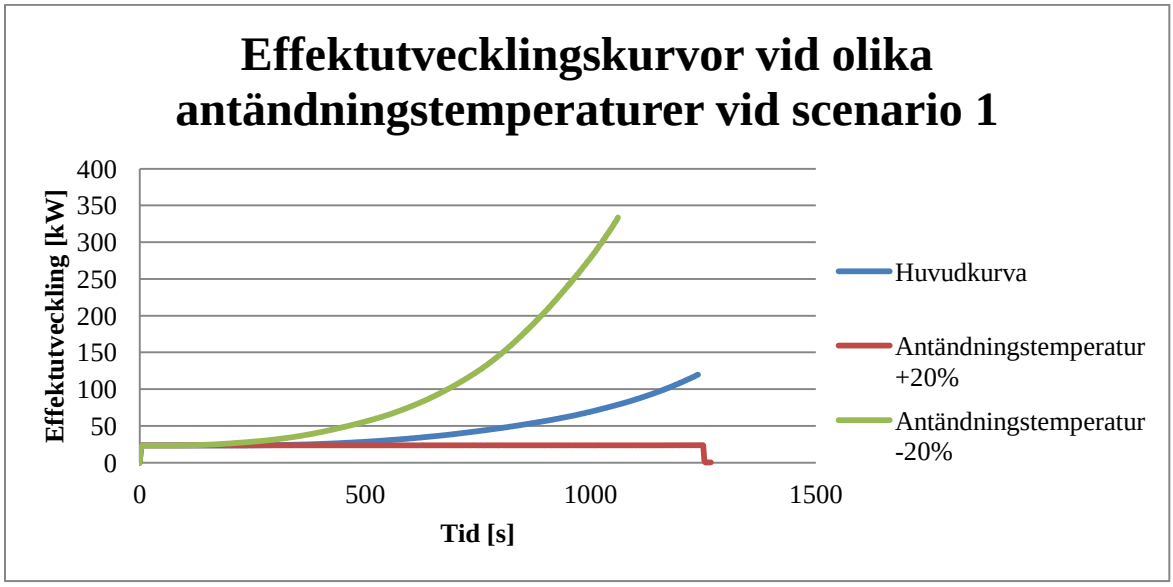
Figur 7.16 Sikt i brandgaserna som funktion av tiden

Sikten i brandgaserna understiger alltså 5 meter efter ungefär 660 sekunder, vid denna tidpunkt ligger brandgaslagret på höjden 1 meter ovan golv och når hela vägen upp till toppen, schaktet är alltså i princip helt rökfyllt.

Utförligare beskrivning av beräkningsgång och resultat avseende sikt och toxicitet i schaktet finns att tillgå i Bilaga E och Bilaga F.

7.5.1.4 Känslighetsanalys

Då antändningstemperaturen, enligt tidigare simuleringar, har den största inverkan på brandförloppen utförs ytterligare simuleringar där denna parameter varieras med 20 % kring ursprungsvärdena för båda kabelsorter. I Figur 7.17 åskådliggörs effektutvecklingskurvorna för den befintliga scenariot med tidigare valda ingångsvärden samt vid variationer av antändningstemperaturerna med ± 20 %.

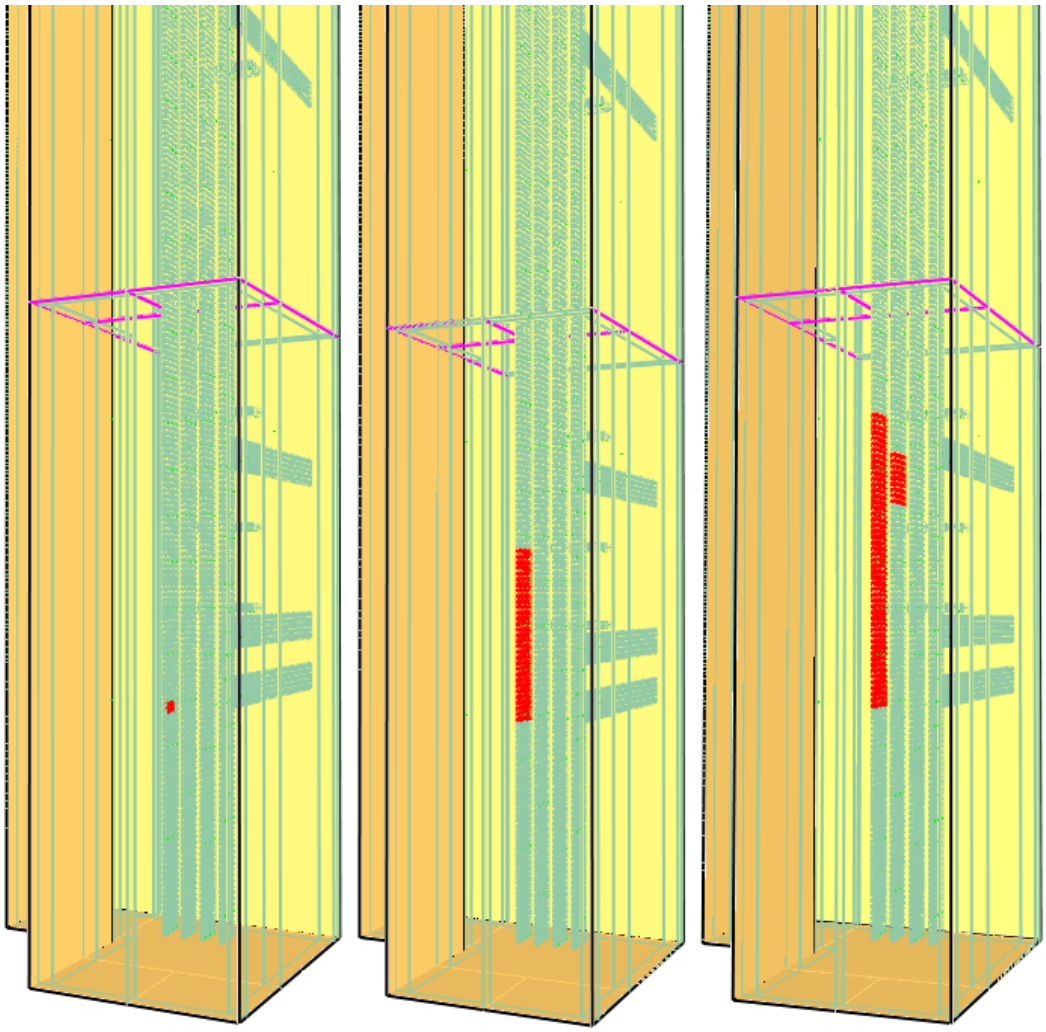


Figur 7.17 Effektutvecklingskurvor vid scenario 1 samt med antändningstemperaturer ±20 %

Vid 20 % högre antändningstemperaturer ses att den totala effektutvecklingen ligger kring samma värde under hela simuleringen fram till dess att effektutvecklingen går ner till noll och branden slocknar. Branden hann alltså ej hann sprida sig till någon annan kabeldel under de drygt 1250 sekunder, 21 minuter, som simuleringen fortgick. Efter 1250 sekunder är bränslet på den brandutsatta kabeldelen slut varpå den slocknar, då ingen av omgivande kabeldelar har uppnått sina antändningstemperaturer går även effektutvecklingen ner till noll.

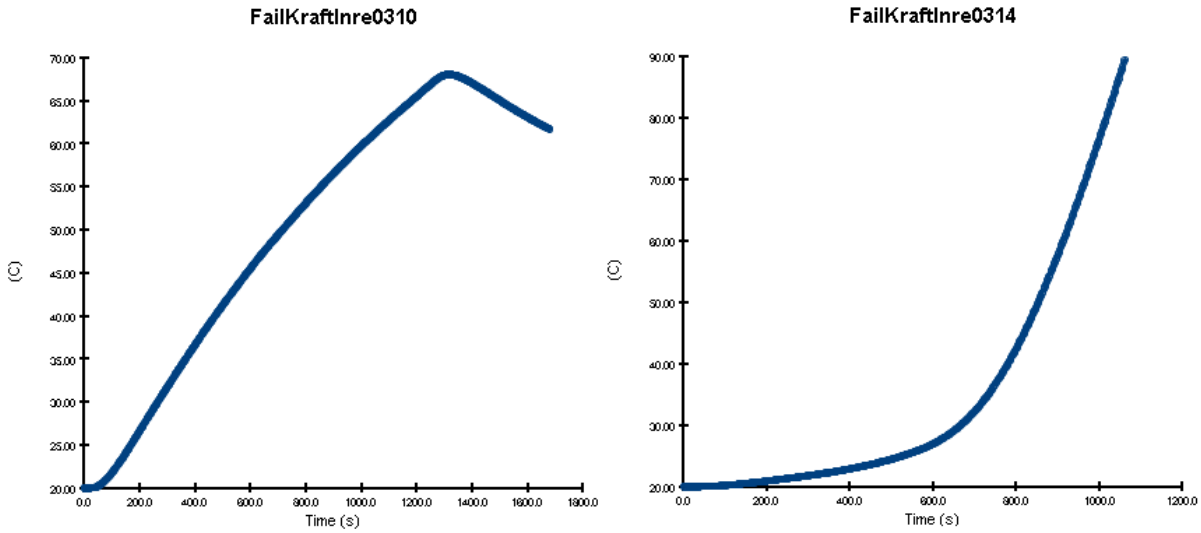
Då antändningstemperaturerna reduceras med 20 % ses att effektutvecklingen ökar med en betydligt högre hastighet än huvudkurvan. Då antändningstemperaturerna på varje kabeldel är lägre antänds de tidigare vilket därmed ger en snabbare tillväxt. I smokeview ses att branden sprider sig snabbare uppåt längs den brandutsatta kabelstegen och dessutom sprider sig till nästa kabelstege med kraftkablar, detta efter ungefär 1000 sekunder. Vid simuleringens slut har branden tagit sig ungefär 5 meter upp längs den yttre kabelstegen och ungefär en halv meter upp längs nästa brandutsatta kabelstege. Om simuleringen kunnat fortgå under en längre tid hade bränderna i båda kabelstegarna fortsatt ta sig uppåt med en tilltagande hastighet och troligtvis även spridit sig vidare till ytterligare kabelsektioner. Då det vid tidpunkten för simuleringens slut är två kabelstegar som är brandutsatta kommer dessa påverka varandra och därmed ge en snabbare spridning än om det endast vore en kabelstege som vore brandutsatt.

I Figur 7.18 åskådliggörs brandspridningen i rött vid de tre olika fallen för brandscenario 1. Till vänster med 20 % högre antändningstemperaturer, i mitten för huvudscenariot och till höger för 20 % lägre antändningstemperaturer. Notera att det endast är själva brandspridningen som åskådliggörs i figurerna.



Figur 7.18 Skador på kablar vid huvudscenariot samt vid antändningstemperaturer ±20 %

Vad gäller de inre temperaturerna för kortslutning uppnår inga kablar som inte är involverade i brandförloppen sina inre kortslutningstemperaturer för något av fallen. Vid 20 % högre antändningstemperaturer ligger de högsta inre temperaturerna på lite under 70 °C och vid 20 % lägre antändningstemperaturer ligger de högsta inre temperaturerna på drygt 90 °C. I båda fallen uppmättes dessa inre temperaturer på kablar monterade på den närmsta kabelstegen med kraftkablar. I Figur 7.19 åskådliggörs inre temperatur-tid-kurvor i punkterna med de högsta inre temperaturerna hos dessa kraftkablar. Till vänster för 20 % högre antändningstemperaturer och till höger för 20 % lägre antändningstemperaturer.



Figur 7.19 Inre temperaturer hos kraftkablar på den närmsta kabelstegen vid antändningstemperaturer ±20%

När det gäller skadeomfattningen vid fallen med varierande antändningstemperaturer ses att vid 20 % högre antändningstemperaturer sprider sig branden alltså inte alls från sin startposition, dock sker fortfarande en viss flam- och strålningspåverkan på den närmsta kabelstegen med kraftkablar och det produceras fortfarande en hel del brandrök. Därmed anses att denna kabelstege ska kontrolleras noga och helst ersättas. Detta betyder alltså att högst två vertikala kabelstegar skall ersättas vilket ger en återställningstid på ungefär 3 dygn.

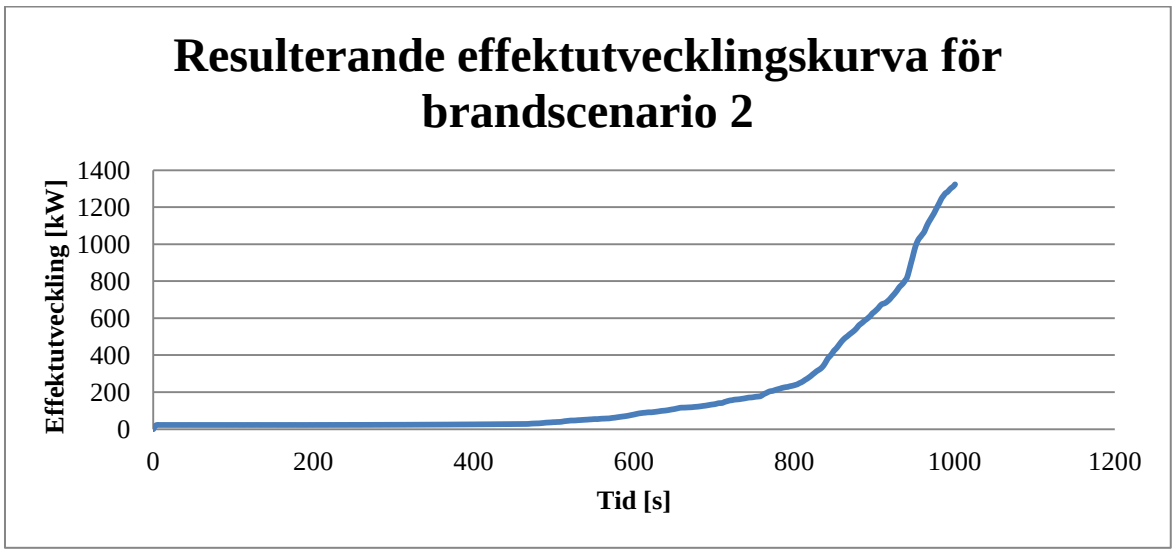
Vid 20 % lägre antändningstemperaturer sker brandspridning till nästa kabelstege med kraftkablar vid ungefär 1000 sekunder, 17 minuter. Detta är tre minuter innan dess att en insats antas kunna vara igångsatt. Efter 1000 sekunder är alltså två kabelstegar med kraftkablar brandutsatta, med samma anledning som ovan anses att de tre horisontella kabelsektioner som leds in i schaktet och förbi de brandutsatta kabelstegarna noga ska kontrolleras och helst ersättas. På de tre minuter som går innan dess att en insats antas kunna vara igångsatt anses att bränderna i kabelstegarna kan ha hunnit ta sig ytterligare en bit upp i kabelschaktet, dock ej så långt som till nästa horisontella kabelsektion, se den högra bilden i Figur 7.18. Dock anses branden i den inre kabelstegen med kraftkablar under denna tid påverkat den närmre kabelstegen med övriga kablar i sådan omfattning att den noga ska kontrolleras och helst ersättas. Det maximala antalet kabelsektioner som anses vara i behov av ersättning är i detta fall alltså högst sex stycken, tre vertikala och tre horisontella, vilket ger en återställningstid på ungefär 5,5 dygn.

7.5.2 Scenario 2 - Brandstart i inre kabelstege innefattande kraftkablar

Vid detta scenario sker brandstart i den inre kabelstegen med kraftkablar, brandens startposition är i en centralt monterad kabel på höjden 5 meter ovan golv. Inledningsvis redogörs för simuleringsresultaten, både för det befintliga scenariot och för känslighetsanalysen, för att vidare göra bedömningar av skadeomfattningarna och återställningstiderna.

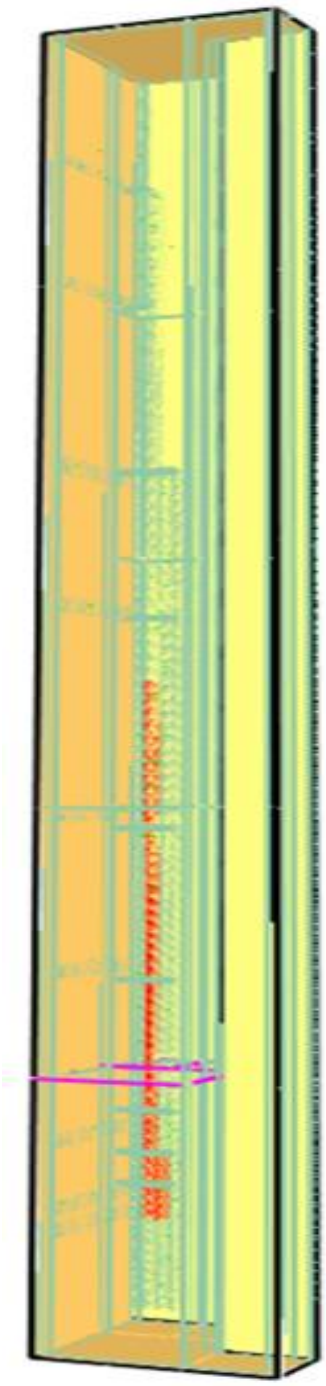
7.5.2.1 Simuleringsresultat

I Figur 7.20 nedan åskådliggörs den resulterande effektutvecklingskurvan för det befintliga scenariot.



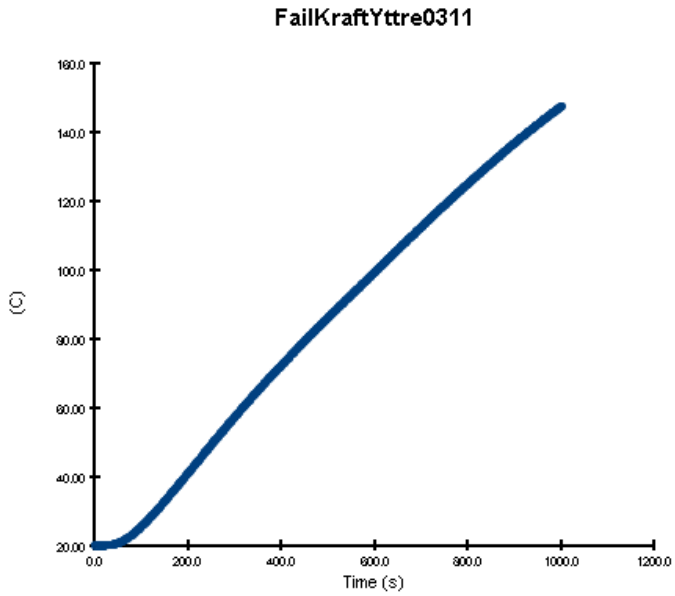
Figur 7.20 Effektutvecklingskurva för brandstart i den inre kabelstegen innefattande kraftkablar

Vilket kan ses i ovanstående figur sker en effektutvecklingsökning först efter ungefär 400 sekunder, vid denna tidpunkt sker alltså brandspridning till ytterligare kabeldelar. I smokeview ses att branden vid denna tidpunkt börjar ta sig uppåt och utåt sidorna på kabelstegen. Vid ungefär 550 sekunder sker spridning till den närmsta kabelstegen med övriga kablar varpå branden börjar ta sig uppåt längs denna kabelstege i snabb takt. Detta är anledningen till att effektutvecklingskurvans lutning är betydligt brantare än vid föregående scenario. Branden tar sig snabbare upp längs kabelstegen med övriga kablar då antändningstemperaturerna hos dessa kablar är något lägre än för kraftkablarna, detta stämmer överens med resultaten från FIPEC-projektets tester som visade på att tillväxthastigheten för övriga kablar var betydligt högre än den för kraftkablarna. Vid simuleringens slut har branden i kabelstegen med kraftkablar tagit sig drygt 3 meter upp från sin startposition medan branden i kabelstegen med övriga kablar tagit sig ungefär 25 meter upp från sin startposition. Under den simulerade tiden hinner branden inte sprida sig till någon annan kabelsektion utan det är endast de två mittersta vertikala kabelstegarna som är brandutsatta. I Figur 7.21 åskådliggörs en schematisk bild på brandspridningens omfattning i kabelschaktet vid simuleringens slut. Om simuleringen fortgått hade bränderna i kabelstegarna fortsatt ta sig uppåt i kabelschaktet, branden i kabelstegen med övriga kablar hade troligtvis tagit sig till toppen av schaktet efter några minuter och troligtvis även spridit sig till den inre kabelstegen med övriga kablar samt ett antal av de horisontella kabelsektionerna som leds in i schaktet. Så småningom hade spridning troligtvis även skett till den yttre kabelstegen med kraftkablar samt till ett antal av de övre horisontella kabelsektionerna längs kabelschaktets inre vägg.



Figur 7.21 Brandens omfattning vid simuleringens slut

Vad gäller de inre temperaturerna för kortslutning uppnår inga kablar som inte är involverade i brandförloppet sina inre kortslutningstemperaturer. De högsta inre temperaturerna som registreras hos de icke brandutsatta kablarna är drygt 150 °C, detta hos kraftkablar på den närmsta kabelstegen. Deras inre temperaturer ser dock ut att öka med en tilltagande hastighet. I Figur 7.22 åskådliggörs en inre temperatur-tid-kurva i den punkt på kraftkablarna på den närmsta kabelstegen som uppvisade den högsta inre temperaturen.



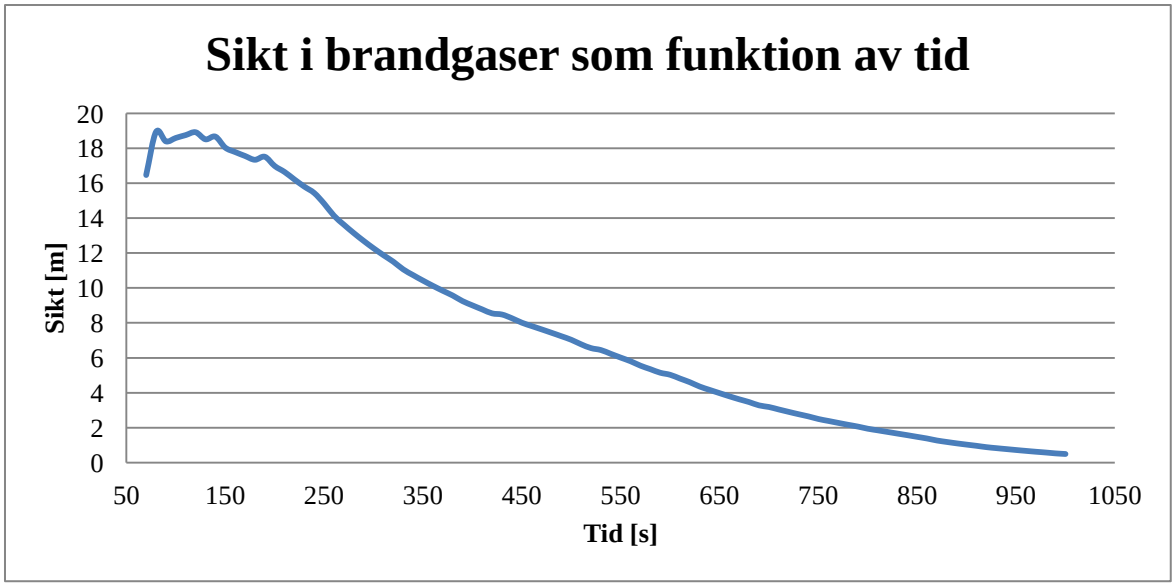
Figur 7.22 Inre temperatur över tid hos en kraftkabel på närmsta kabelstegen med kraftkablar

7.5.2.2 Bedömning av skador och återställningstider

Vid detta scenario har branden på ungefär 1000 sekunder (17 minuter) hunnit sprida sig uppåt ungefär 3 meter längs kabelstegen i vilken brandstart skedde, branden har även spridit sig till den närmsta kabelstegen med övriga kablar där den tagit sig ungefär 25 meter upp från sin startposition. Inga kablar som inte är involverade i brandförloppet har nått sina inre kortslutningstemperaturer. På de tre minuter som återstår innan en insats antas ha kunnat komma igång kommer branden hunnit sprida sig ytterligare längs de brandutsatta kabelstegarna, det anses inte vara orimligt att branden i kabelstegen med övriga kablar kan ha spridit sig förbi ytterligare två horisontella kabelsektioner som löper in i kabelschaktet och möjligtvis även till nästa kabelstege med övriga kablar. Innan en insats hunnit komma igång anses därmed att branden har spridit sig längre uppåt längs de vertikala kabelstegarna, möjligtvis till den inre kabelstegen med övriga kablar och förbi sju horisontella kabelsektioner som går in i schaktet, det anses inte vara orimligt att dessa kabelsektioner har blivit mer eller mindre flam- och strålningspåverkade vilket betyder att de borde kontrolleras noga och helst ersättas. Vidare anses även att de yttre vertikala kabelstegarna kommer vara i behov av kontroll och helst ersättning då även dessa anses ha blivit mer eller mindre brandpåverkade. Även i detta fall skall brandröken tas i beaktning, förutom ersättning av de skadade kabelsektionerna skall därför en noga utförd sanering och kontroll av schaktets kablar utföras. Med utgångspunkt från ovanstående resonemang ska alltså högst 11 kabelsektioner ersättas, fyra vertikala och sju horisontella, vilket ger en återställningstid på lite under 9 dygn.

7.5.2.3 Bedömning av sikt och toxicitet

Vid detta scenario ses i smokeview att ett tydligt brandgaslager bildas först efter ungefär 70 sekunder varför resultat avseende sikt och toxicitet i schaktet kommer behandlas med utgångspunkt från denna tidpunkt. Brandgaslagret ligger vid 70 sekunder ungefär på höjden 20 meter ovan golv, i höjd med fjärde våningsplanet, upp till 37 meter ovan golv, i höjd med sjätte våningsplanet. Efter 230 sekunder har rökgaslagret tagit sig upp till toppen av schaktet och ner till ungefär 5 meter ovan golv. Vidare sjunker rökgaslagret ner för att efter ungefär 700 sekunder uppta hela schaktet. Efter beräkningar avseende hur sikten och toxiciteten förändras med tiden erhålls att sikten uppnår sitt kritiska värde efter ungefär 600 sekunder medan gränsvärdena för toxiciteten ej uppnås under simuleringstiden. I Figur 7.23 nedan åskådliggörs hur sikten i brandgaslagret förändras med tiden vid det befintliga scenariot.



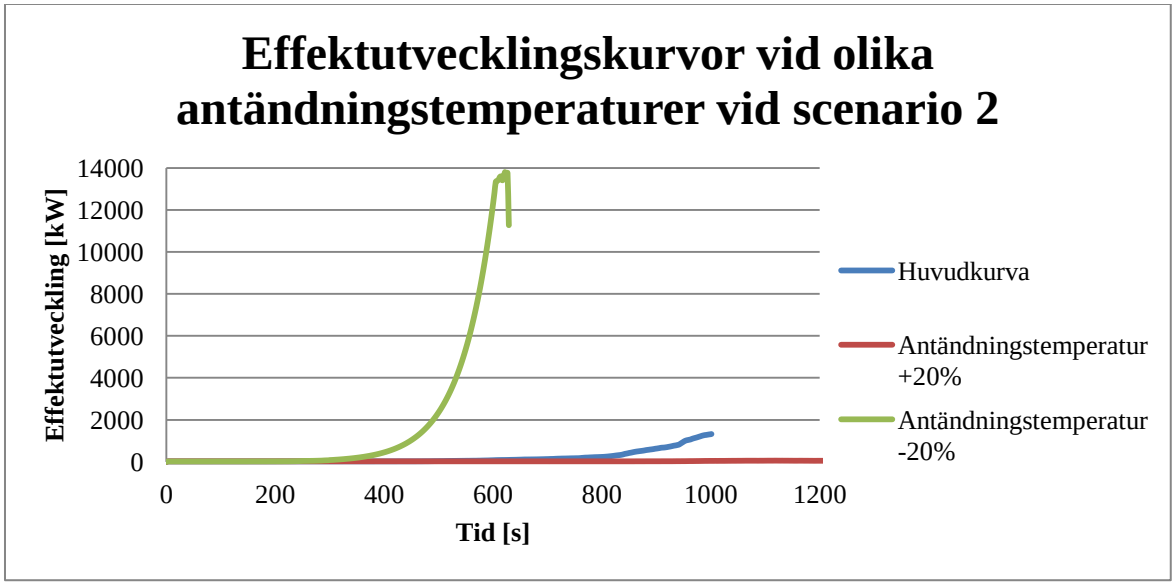
Figur 7.23 Sikt i brandgaserna som funktion av tiden

Sikten i brandgaserna understiger alltså 5 meter efter ungefär 600 sekunder, vid denna tidpunkt ligger brandgaslagret på höjden 1 meter ovan golv och når hela vägen upp till toppen, schaktet är alltså i princip helt rökfyllt.

Utförligare beskrivningar av beräkningsgång och resultat för sikt och toxicitet i schaktet finns att tillgå i Bilaga E och Bilaga F.

7.5.2.4 Känslighetsanalys

I Figur 7.24 åskådliggörs effektutvecklingskurvan för det befintliga scenariot samt erhållna effektutvecklingskurvor vid variationer av antändningstemperaturerna med ± 20 % för båda kabelsorter.



Figur 7.24 Effektutvecklingskurvor vid scenario 2 samt med antändningstemperaturer ±20 %

Vid 20 % högre antändningstemperaturer ses att den totala effektutvecklingen håller sig på ett lågt värde under hela simuleringen, dock ej så lågt som vid föregående scenario med högre antändningstemperaturer. I detta fall antänds ytterligare kabeldelar vid ungefär 900 sekunder, branden börjar alltså ta sig uppåt längs kabelstegen vid denna tidpunkt. Efter ytterligare 200 sekunder, det vill

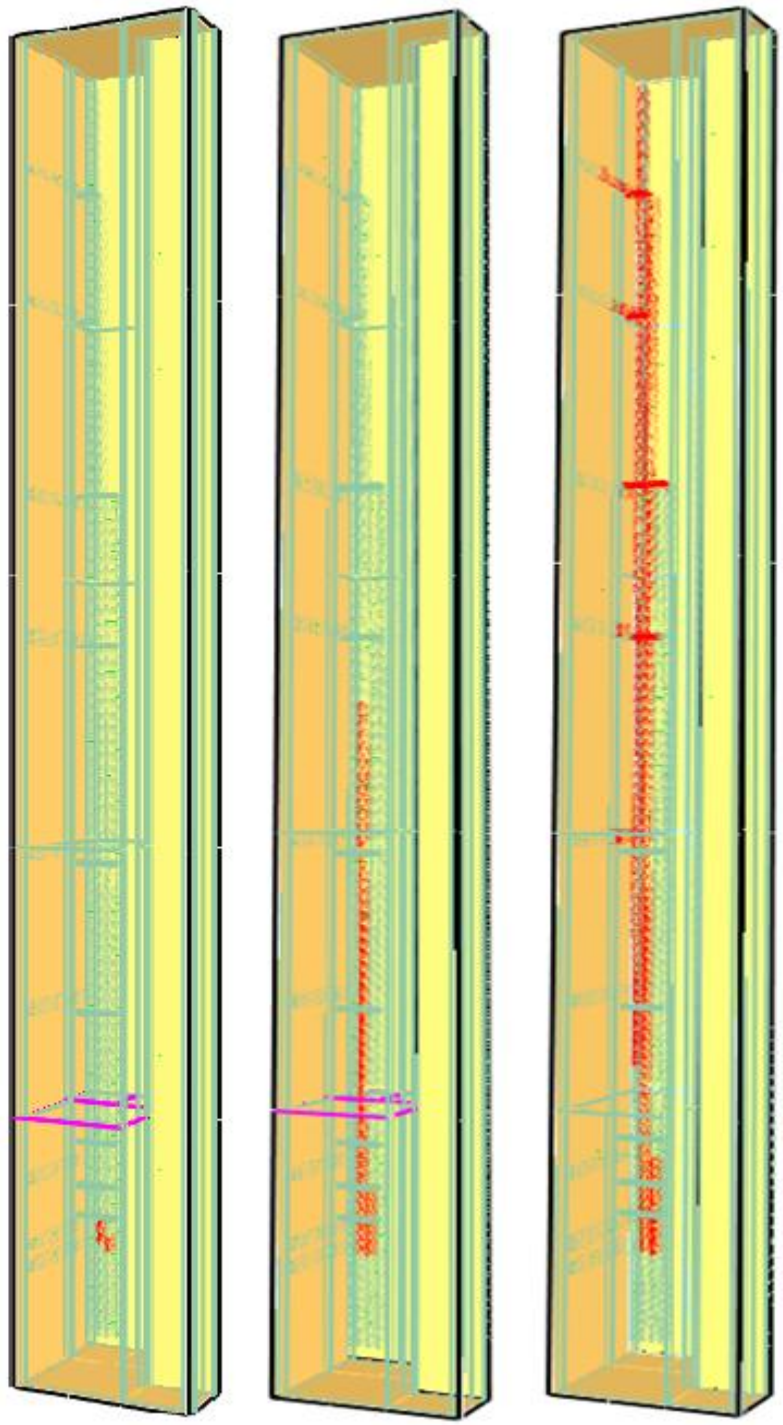
säga efter ungefär 1100 sekunder, sker även brandspridning till den närmsta kabelstegen med övriga kablar varpå branden i denna kabelstege börjar sprida sig uppåt. Vid simuleringens slut har branden i kabelstegen med kraftkablar tagit sig ungefär en halv meter upp från sin startposition medan branden i kabelstegen med övriga kablar tagit sig ungefär 2 meter upp från dess startposition. Om simuleringen kunnat fortgå under en längre tid hade branden troligtvis spridit sig vidare längs de två brandutsatta kabelstegarna med tilltagande hastigheter. Så småningom hade brandspridning troligtvis även skett till ytterligare kabelsektioner, inledningsvis till den närmsta kabelstegen med övriga kablar då dessa kablar har de lägsta antändningstemperaturerna. Men då brandtillväxten är så pass långsam och då antändningstemperaturerna är så pass höga hade detta tagit långt tid.

Vid 20 % lägre antändningstemperaturer ses att effektutvecklingen ökar markant efter drygt 400 sekunder för att ungefär 200 sekunder senare uppnå sitt maxvärde. I smokeview ses att brandspridning till den närmsta kabelstegen med övriga kablar sker efter ungefär 300 sekunder varpå branden i denna kabelstege börjar ta sig uppåt snabb takt. Efter ungefär 500 sekunder har branden i denna kabelstege tagit sig ungefär 35 meter upp från dess startposition varpå nästa kabelstege med övriga kablar antänder där branden även i denna kabelstege tar sig uppåt i snabb takt. Detta kan ses i effektutvecklingskurvan ovan att lutningen ökar drastiskt vid denna tidpunkt. Efter ungefär 600 sekunder har bränderna i båda kabelstegarna med övriga kablar tagit sig till toppen av schaktet, på vägen upp antänds dessutom sju stycken horisontella kabelsektioner, fyra stycken som går längs schaktets inre vägg och tre stycken som leds in i schaktet och förbi de vertikala kabelstegarna. Anledningen till den otroligt snabba effektutvecklingsökningen och det höga maxvärdet i kurvan ovan är alltså den höga spridningshastigheten uppåt längs de vertikala kabelstegarna i kombination med att de horisontella kabelsektionerna antänds i princip direkt då branden tar sig förbi. Effektutvecklingen håller sig ett par sekunder på dess maxvärde för att sedan avta, detta då bränslet hos kablarna i den nedre delen av schaktet har börjat ta slut och branden börjat slockna.

Vid fallet med de lägre antändningstemperaturerna uppkommer dock frågan om det verkligen är rimligt med en så pass stor känslighet och om det verkligen är rimligt att effektutvecklingen ökar så pass snabbt och till ett så pass högt värde. Att effektutvecklingen ökar till ett så högt värde anses kunna vara rimligt då det är så pass många kabelsektioner, 10 stycken, som samtidigt är inblandade i brandförloppet, vilket därmed ger en stor mängd brännbar massa. Vad gäller rimligheten av känsligheten och den höga tillväxthastigheten ses i smokeview att de inledande faserna av brandförloppen ser ungefär likadana ut för samtliga tre fall, dock med olika hastigheter. Vid huvudscenariot och vid fallet med 20 % högre antändningstemperaturer är branden fortfarande i tillväxtfasen då simuleringarna avbryts. Branden har vid dessa simuleringar varken hunnit sprida sig till toppen av den brandutsatta kabelstegen eller till den inre kabelstegen med övriga kablar, därmed inte heller till någon horisontell kabelsektion. Effektutvecklingskurvans branta stigning vid fallet med 20 % lägre antändningstemperaturer sker inledningsvis då den första kabelstegen med övriga kablar antänder, men främst då spridning sker till nästa kabelstege med övriga kablar, bränderna i dessa kabelstegar tar sig då otroligt snabbt upp till toppen av schaktet varpå flera horisontella sektioner antänder i princip samtidigt. Om de två andra simuleringarna hade kunnat fortgå under en längre tid hade dessa brandförlopp troligtvis artat sig på ungefär samma sätt, dock med lindrigare brandförlopp och betydligt lägre spridningshastigheter. Därmed förväntas även vid huvudscenariot och möjligtvis vid fallet med 20 % högre antändningstemperaturer förhållandevis branta ökningar av effektutvecklingskurvornas lutningar vid de tidpunkter då den inre kabelstegen med övriga kablar antänder. Vid fallet med 20 % lägre antändningstemperaturer anses alltså själva effektutvecklingstillväxten som sådan vara rimlig, dock ser hastigheten av denna tillväxt ut att vara otroligt hög. För att utvärdera om denna branta lutning ens är rimlig görs en jämförelse av den

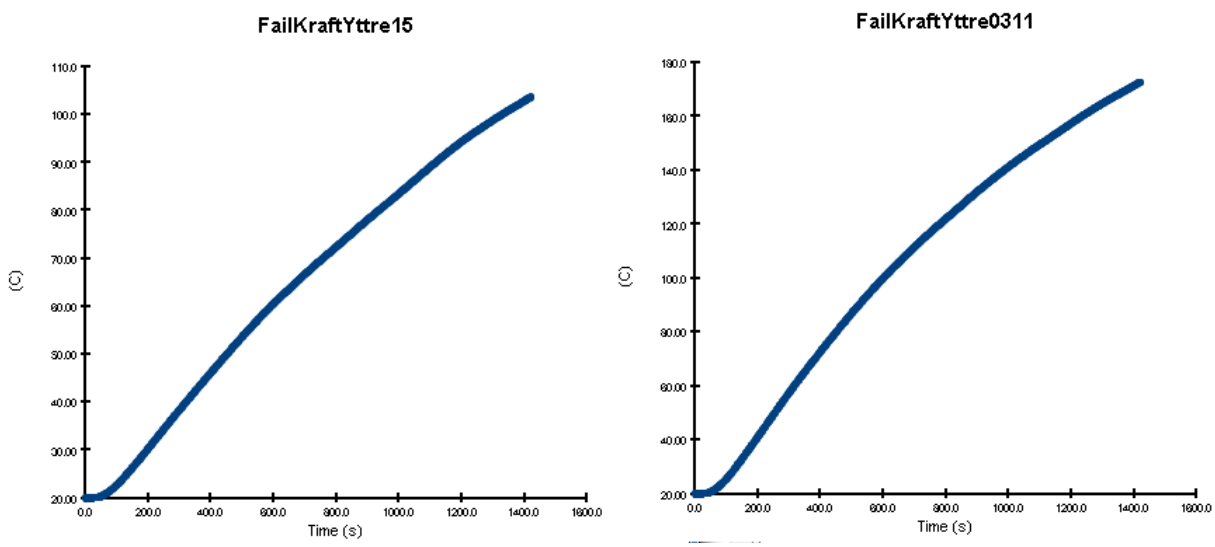
befintliga effektutvecklingskurvan med diverse αt^2-kurvor hämtade från Karlsson & Quintiere (2000). Då den befintliga kurvan anpassas till en αt^2-kurva ses att tillväxthastigheten för branden i schaktet ligger på omkring 0,16 kW/s^2. Detta värde ligger mellan tillväxthastigheterna fast och ultra fast vilka har α-värden på 0,047 respektive 0,19 kW/s^2 (Karlsson & Quintiere, 2000). Material med tillväxthastigheten fast är till exempel träpallar, spånskivegarderober och vissa typer av klädda möbler medan material med tillväxthastigheten ultra fast är till exempel en 1 meter i diameters pölbrand med bensin, kartonger med polyetenflaskor och vissa typer av möbler så som fåtöljer och liknande (Karlsson & Quintiere, 2000). Det finns dock material som har betydligt högre tillväxthastigheter än 0,19 kW/s^2, till exempel plywood som vid vissa tester har uppvisat tillväxthastigheter på upp emot 1,17 kW/s^2 (Karlsson & Quintiere, 2000). Därmed är tillväxthastigheten för branden i schaktet som sådan inte orimlig och även då den är otroligt snabb anses de låga antändningstemperaturerna i kombination med det allvarligare förloppet kunna rendera i denna tillväxthastighet. Dock är känsligheten fortfarande stor och frågan är om den verkligen är rimlig för det befintliga scenariot eller om det möjligtvis kan vara något fel i modellen. Det anses dock att istället för att det möjligtvis är något fel i själva modellen snarare är de låga antändningstemperaturerna hos övriga kablar som är orimliga. Vilket nämnts tidigare ansågs att en antändningstemperatur på 144 °C möjligtvis skulle vara för låg för att kunna ge några giltiga resultat, detta kunde dock ej säkerställas tidigare då simuleringarna med uppställningar enligt FIPEC-projektets tester utfördes i så pass liten skala. Även då själva effektutvecklingskurvan vid scenariot med lägre antändningstemperaturer anses kunna vara rimlig i sig anses den, med underlag av de två andra effektutvecklingskurvorna, visa på en helt för hög känslighet för att dessa resultat skall kunna anses vara rimliga för det befintliga scenariot.

I Figur 7.25 åskådliggörs brandspridningen i rött vid de tre olika fallen för brandscenario 2. Till vänster med 20 % högre antändningstemperaturer, i mitten för huvudscenariot och till höger för 20 % lägre antändningstemperaturer.



Figur 7.25 Skador på kablar vid huvudscenariot samt vid antändningstemperaturer ±20 %

Vad gäller de inre temperaturerna för kortslutning uppnår inga kablar som inte är involverade i brandförloppet sina inre kortslutningstemperaturer vid något av fallen. Vid 20 % högre antändningstemperaturer ligger de högsta inre temperaturerna på drygt 100 °C och vid 20 % lägre antändningstemperaturer ligger de högsta inre temperaturerna på drygt 170 °C. I båda fallen uppmättes dessa inre temperaturer på kablar monterade på den närmsta kabelstegen med kraftkablar. I Figur 7.26 åskådliggörs inre temperatur-tid-kurvor i punkterna med de högsta inre temperaturerna hos dessa kraftkablar. Till vänster för 20 % högre antändningstemperaturer och till höger för 20 % lägre antändningstemperaturer.



Figur 7.26 Inre temperaturer hos kraftkablar på den närmsta kabelstegen vid antändningstemperaturer ±20%

När det gäller skadeomfattningen vid dessa två fall ger känslighetsanalysen att vid 20 % högre antändningstemperaturer sprider sig branden på 1200 sekunder, 20 minuter, endast en liten bit uppåt längs kabelstegen med kraftkablar samt till nästa kabelstege med övriga kablar. Vid simuleringens slut antas att en insats hunnit komma igång varför dessa två kabelstegar är de enda som är brandutsatta. Bränderna i kabelstegarna har inte tagit sig upp förbi någon horisontell kabelsektion varför dessa ej anses vara påverkade. Dock anses de två yttre vertikala kabelstegarna ha blivit mer eller mindre flam- och strålningspåverkade varför dessa borde kontrolleras noga och helst ersättas, framförallt den närmre kabelstegen med kraftkablar vilken uppvisade inre kabeltemperaturer på drygt 100 °C. Därmed anses att högst fyra vertikala kabelstegar kommer vara i behov av ersättning vilket ger en återställningstid på ungefär 6 dygn.

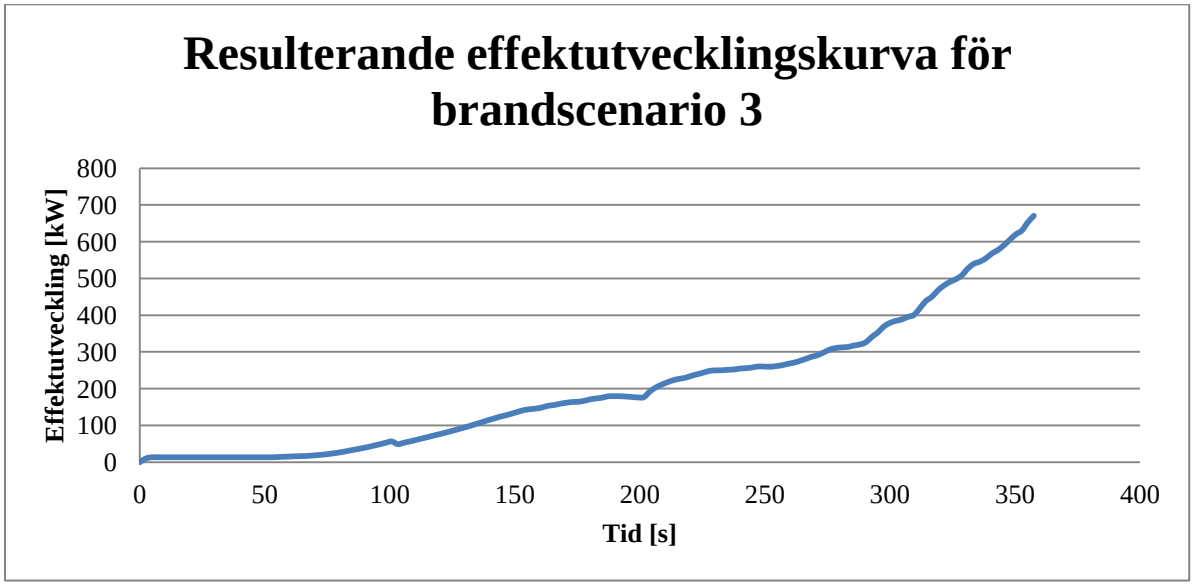
Vid 20 % lägre antändningstemperaturer når effektutvecklingen sitt maximala värde redan efter drygt 600 sekunder, 10 minuter. Vid denna tidpunkt står tre vertikala kabelstegar samt sju horisontella kabelsektioner i brand. Vidare avtar effektutvecklingen lika hastigt då bränslet hos kablarna i den nedre delen av schaktet har börjat ta slut, branden kommer därmed mer eller mindre hinna slockna innan dess att en insats antas kunna vara igångsatt 600 sekunder senare. Då effektutvecklingen ligger på sitt maximala värde anses det inte vara ett orimligt antagande att de horisontella kabelsektioner som branden tagit sig förbi och ej ännu har antänts är mer eller mindre flam- och strålningspåverkade, innan bränderna i de vertikala kabelstegarna slocknar helt är det mycket möjligt att dessa kabelsektioner även antänder. Även den vertikala kabelstegen med kraftkablar som inte antänts vid simuleringens slut skulle mycket väl kunna antända innan branden avtar helt, åtminstone kommer kablarnas inre temperaturer för kortslutning uppnås då de högsta uppmätta inre temperaturerna efter 600 sekunder ligger på drygt 170 °C. Enligt ovanstående kommer därmed 19 kabelsektioner vara i behov av ersättning vilket därmed ger en återställningstid i storleksordningen månader. Då endast 600 sekunders brandförlopp är simulerat föreligger dock svårigheter att bedöma skadeomfattningen i kabelschaktet, men då skadeomfattningen redan vid denna tidpunkt ger en återställningstid i storleksordningen månader har denna osäkerhet mindre inverkan på resultatet. Vilket diskuterats ovan medför dock de låga antändningstemperaturerna hos övriga kablar en känslighet som anses vara orimlig varpå denna stora skadeomfattning ej anses vara ett rimligt scenario.

7.5.3 Scenario 3 - Brandstart i yttre kabelstege innefattande övriga kablar

Vid följande scenario sker brandstart i en centralt placerad kabel på kabelstegen placerad näst närmst väggen, det vill säga den yttre kabelstegen med övriga kablar. Brandens startposition är placerad 5 meter ovan golv. Inledningsvis redogörs för simuleringsresultaten, både för det befintliga scenariot och känslighetsanalysen, för att vidare utföra en bedömning av skadeomfattningen för kablarna i schaktet.

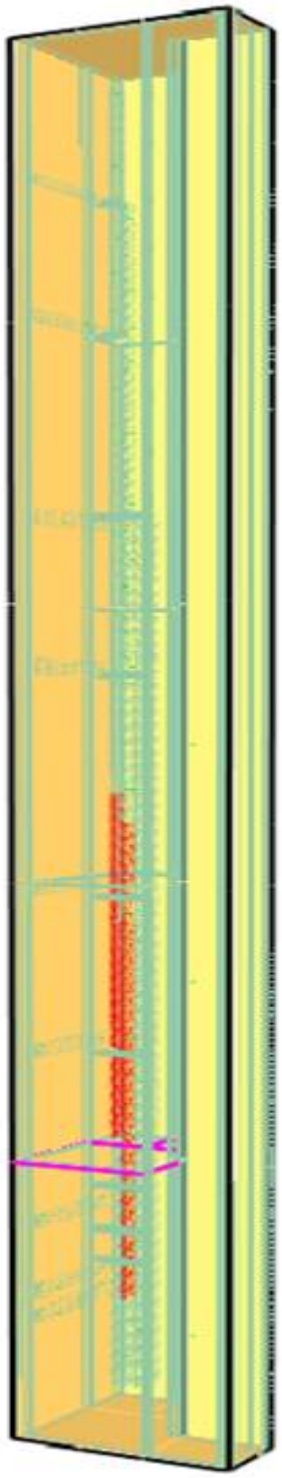
7.5.3.1 Simuleringsresultat

I Figur 7.27 nedan åskådliggörs den resulterande effektutvecklingskurvan för det befintliga scenariot.



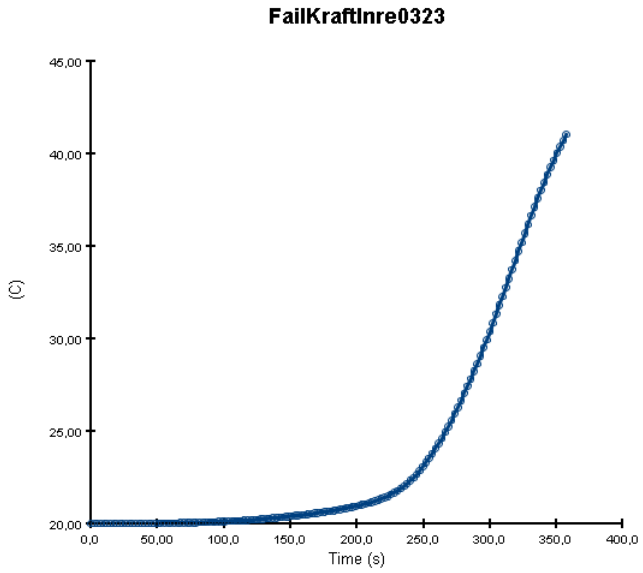
Figur 7.27 Effektutvecklingskurva för brandstart i den yttre kabelstegen innefattande övriga kablar

Vilket kan ses i ovanstående figur sker en effektutvecklingsökning först efter ungefär 70 sekunder, vid denna tidpunkt sker alltså spridning till omgivande kabeldelar. Det sker i detta fall en snabbare effektutvecklingsökning med tiden än vid föregående scenarier, detta på grund av att övriga kablar har betydligt lägre antändningstemperaturer än kraftkablarna. Då scenariot studeras i smokeview ses att branden vid ungefär 350 sekunder sprider sig till den inre kabelstegen med övriga kablar, branden i den första kabelstegen har vid denna tidpunkt nått ungefär 18 meter upp i schaktet. Under simuleringsförloppet når branden aldrig toppen på någon av kabelstegarna, den har vid simuleringens slut tagit sig ungefär 25 meter upp i schaktet hos båda kabelstegarna. Vid simuleringens slut har branden inte hunnit sprida sig till någon av de två vertikala kabelstegarna med kraftkablar, inte heller till någon horisontell sektion. I Figur 7.28 åskådliggörs en schematisk bild på brandspridningens omfattning i schaktet vid simuleringens slut. Om simuleringen kunnat fortgå längre hade branden med högsta sannolikhet tagit sig till toppen av de brandutsatta vertikala kabelstegarna vilket medfört att effektutvecklingen ökat ytterligare, detta med en tilltagande hastighet. Branden hade troligtvis även spridit sig till ett antal av de horisontella kabelsektionerna, både till de som leds in i schaktet och de som går längs schaktets inre vägg. Även den närmsta kabelstegen med kraftkablar kommer troligtvis antändas under det fortsatta brandförloppet. Det är dock svårt att dra några giltiga slutsatser avseende det fortsatta brandförloppet då simuleringen endast kunde fortgå drygt 350 sekunder och då branden vid simuleringens slut fortfarande är i sin tillväxtfas.



Figur 7.28 Brandens omfattning vid simuleringens slut

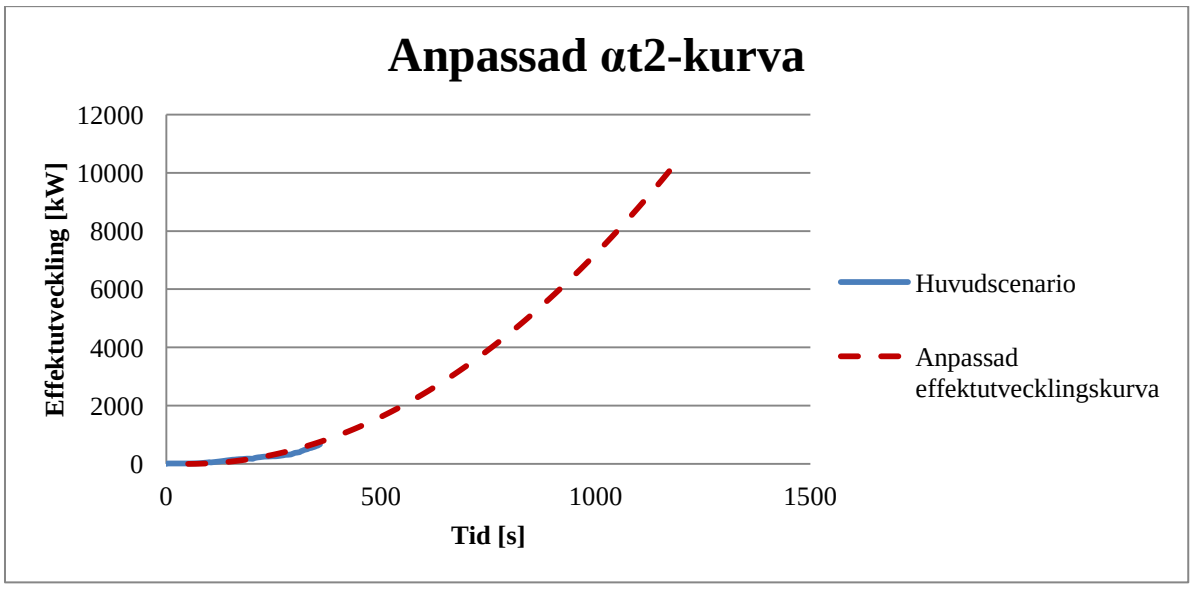
Vad gäller de inre temperaturerna för kortslutning uppnår inga kablar som inte är involverade i brandförloppet sina inre kortslutningstemperaturer. De högsta inre temperaturerna som registreras hos dessa kablar är drygt 40 °C, detta hos kraftkablarna på den närmsta kabelstegen. Deras inre temperaturer ökar dock med en tilltagande hastighet. I Figur 7.29 åskådliggörs en inre temperatur-tid-kurva i den punkt på kraftkablarna på den närmsta kabelstegen som uppvisade den högsta inre temperaturen.



Figur 7.29 Inre temperatur över tid hos en kraftkabel monterad på den närmsta kabelstegen med kraftkablar

7.5.3.2 Bedömning av skador och återställningstider

Vid detta scenario har branden på ungefär 350 sekunder (6 minuter) hunnit sprida sig till den inre kabelstegen med övriga kablar och tagit sig uppåt ungefär 25 meter längs båda kabelstegarna, branden kommer hinna fortgå ungefär 900 sekunder (15 minuter) till innan dess att en insats antas kunna vara igångsatt. Under denna tid kommer branden sprida sig längre upp längs de brandutsatta kabelstegarna och troligtvis även sprida sig till ytterligare kabelsektioner. Hur omfattande brandspridningen kommer vara under dessa 900 sekunder är dock svårt att säga något om. Ett riktvärde på brandspridningens omfattning anses dock kunna erhållas genom att anpassa effektutvecklingskurvan till en αt^2-kurva. Det ses att effektutvecklingsökningen vid tidigare scenarion kan liknas vid αt^2-kurvor, antydan till denna tillväxt ses även för detta scenario. Därmed sker en anpassning för att se hur mycket effektutvecklingen potentiellt skulle kunna öka under de 1200 sekunder som går innan dess att en insats antas skulle kunna vara igångsatt. Detta ger en tillväxthastighet för branden i schaktet på ungefär 0,008 kW/s^2, den anpassade αt^2-kurvan åskådliggörs i Figur 7.30 nedan.

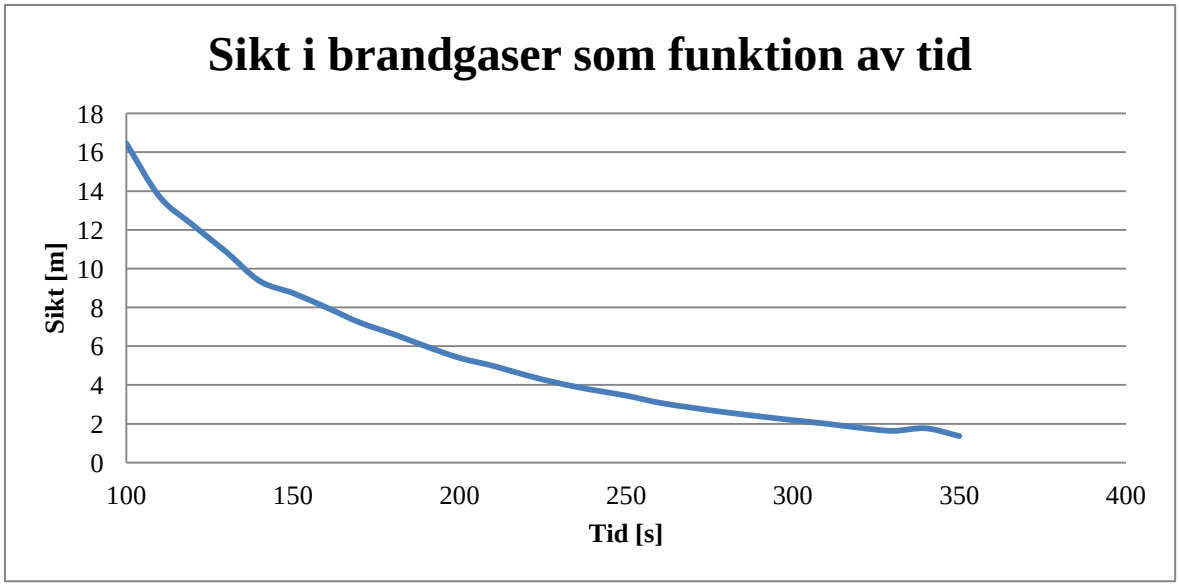


Figur 7.30 Effektutvecklingskurvan från simuleringen med anpassad αt^2-kurva

För att vidare göra en bedömning av den ungefärliga skadeomfattningen vid scenariot görs en jämförelse av ovanstående effektutvecklingskurva med effektutvecklingskurvan som erhålls vid fallet med lägre antändningstemperaturer, effektutvecklingskurvan vid det fallet redogörs för i kommande avsnitt. Detta på grund av att brandstart sker på samma plats, brandspridningen antas ske på ungefär samma sätt och då denna effektutvecklingskurva, vilket ses nedan, når upp till samma höga effektutvecklingar som αt^2-kurvan ovan, därmed anses att jämförelser kurvorna emellan kan utföras för att få ett ungefärligt riktvärde på brandspridningen. Det görs en jämförelse av den maximala effektutvecklingen i figuren ovan med skadeomfattningen vid samma effektutveckling vid scenariot med lägre antändningstemperaturer. Den potentiella effektutvecklingen vid 1200 sekunder för det befintliga scenariot ligger på drygt 10 000 kW. Vid scenariot med lägre antändningstemperaturer har branden denna tidpunkt spridit sig ungefär 45 meter uppåt längs båda kabelstegarna med övriga kablar samt till fyra stycken horisontella kabelsektioner, två som går längs den inre väggen och två som leds in i kabelschaktet och förbi de vertikala kabelstegarna. De kabelsektioner som branden tagit sig förbi och ännu inte antänts anses vara i behov av noga kontroll och helst ersättning, dessa kabelsektioner innefattar den närmsta kabelstegen med kraftkablar samt nio stycken horisontella sektioner, fyra stycken som går längs den inre väggen och fem stycken som leds in i schaktet. Detta medför att högst 15 kabelsektioner kommer vara i behov av ersättning, tre vertikala och 12 horisontella vilket ger en återställningstid på lite under 9 dygn. Självklart kan det vara så att branden tar sig så pass långsamt upp längs kabelstegarna att den hinner slockna innan dess att den höga effektutvecklingen ovan uppnås. Dessutom är det inte säkert att de horisontella kabelsektionerna hade antänts i detta fall då antändningstemperaturerna är högre, men då branden ändå tagit sig förbi dessa sektioner anses de dock ha blivit så pass flam- och strålningspåverkade att de kommer vara i behov av noga kontroll och helst ersättning. Ovanstående skadeomfattning får därför anses gälla för det värsta möjliga fallet. Även här skall brandröken tas i beaktning, förutom att ersätta de skadade kabelsektionerna skall därmed en noga utförd sanering och kontroll av schaktets kablar utföras.

7.5.3.3 Bedömning av sikt och toxicitet

Vid detta scenario ses i smokeview att ett tydligt brandgaslager bildas först efter ungefär 100 sekunder varför sikten och toxiciteten i brandgaserna kommer behandlas med utgångspunkt från denna tidpunkt. Brandgaslagret ligger vid 100 sekunder ungefär 17 meter ovan golv, i höjd med tredje våningsplanet, upp till 40 meter ovan golv, i höjd med sjätte våningsplanet. Efter 210 sekunder har brandgaslagret nått upp till toppen av schaktet och befinner sig ungefär 2 meter ovan golv. Vidare sjunker brandgaslagret ner mot golvet för att slutligen uppta hela schaktet efter ungefär 250 sekunder. Efter beräkningar avseende hur sikten och toxiciteten förändras i schaktet med tiden fås att sikten uppnår sitt kritiska värde, det vill säga 5 meters sikt genom brandgaserna, efter ungefär 210 sekunder medan gränsvärdena för toxiciteten ej uppnås under simuleringstiden. Då brandförloppet endast simulerats i 350 sekunder skulle givetvis gränsvärdena avseende toxicitet kunna uppnås en liten stund senare, dock uppnås den kritiska sikten inom dessa 350 sekunder varför det är denna parameter som utgås ifrån vid bedömningar av utrymningsförhållandena I Figur 7.31 nedan åskådliggörs hur sikten i brandgaserna förändras med tiden vid det befintliga scenariot.



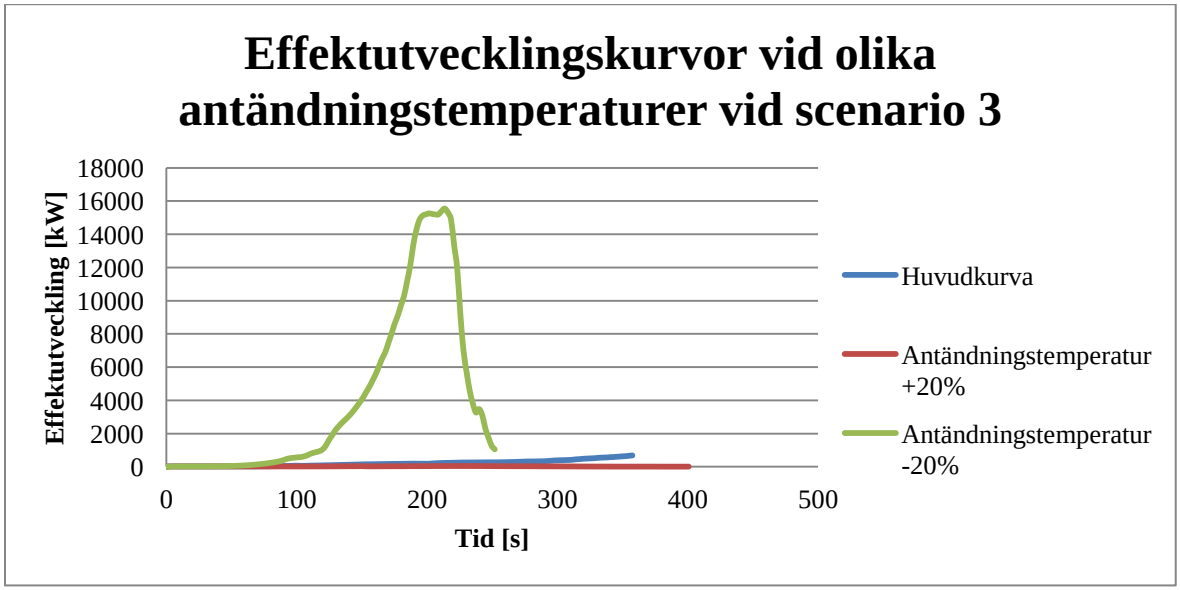
Figur 7.31 Sikt i brandgaserna som funktion av tiden

Sikten i brandgaserna understiger alltså 5 meter efter ungefär 210 sekunder, vid denna tidpunkt ligger brandgaslagret 2 meter ovan golv och når hela vägen upp till toppen, schaktet är alltså i princip helt rökfyllt.

Utförligare beskrivning av beräkningsgång och resultat för sikten och toxiciteten i schaktet finns att tillgå i Bilaga E och Bilaga F.

7.5.3.4 Känslighetsanalys

I Figur 7.32 åskådliggörs effektutvecklingskurvorna för det befintliga scenariot med tidigare valda ingångsvärden samt vid variationer av antändningstemperaturerna med ± 20 %.



Figur 7.32 Effektutvecklingskurvor vid scenario 3 samt med antändningstemperaturer ±20 %

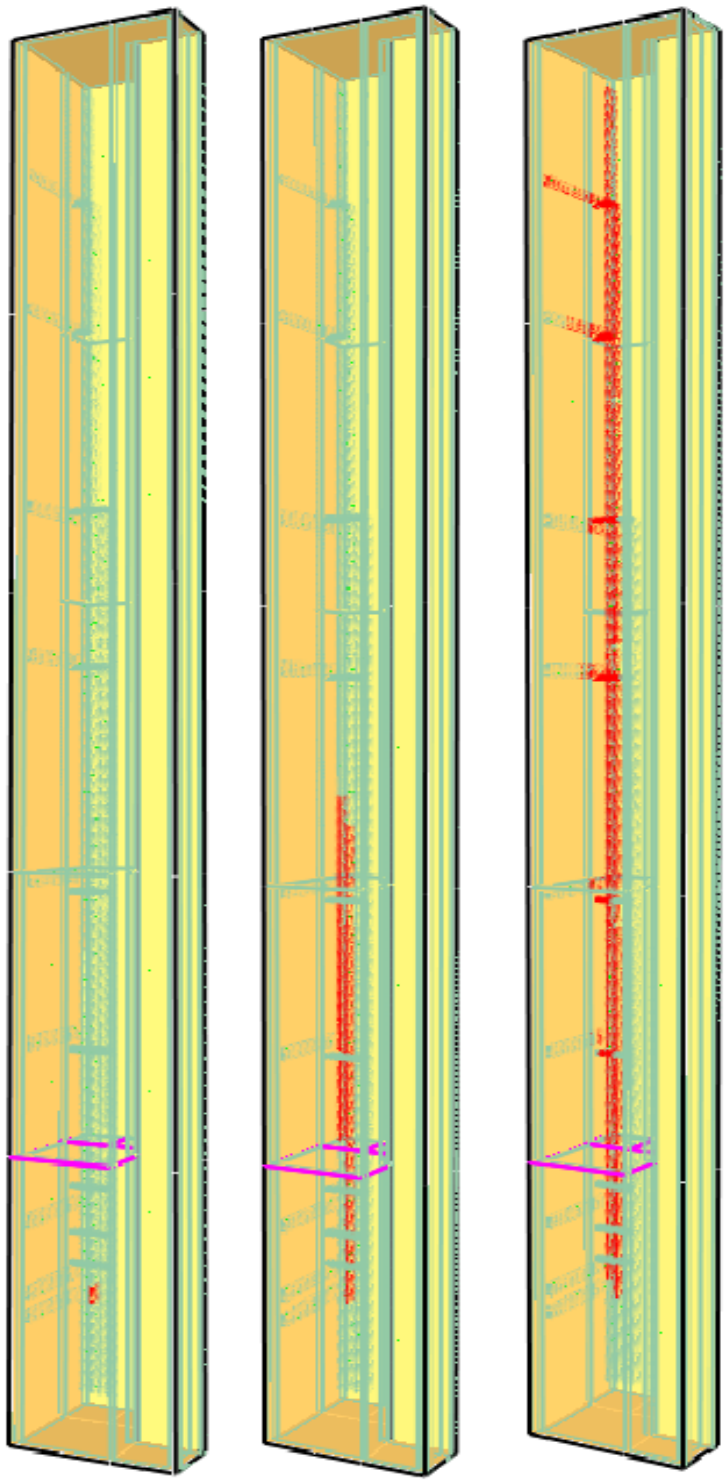
Vid 20 % högre antändningstemperaturer ses att effektutvecklingen håller sig på ett lågt värde under hela simuleringstiden. Det sker en viss effektutvecklingsökning efter ungefär 100 sekunder, upp till ungefär 45 kW, i smokeview ses att det vid denna tidpunkt sker en viss brandspridning uppåt längs kabelstegen. Branden hinner dock endast ta sig ungefär en halv meter upp längs kabelstegen innan den börjar slockna och effektutvecklingen går ner mot noll, detta efter ungefär 300 sekunder. De höga

antändningstemperaturerna i kombination med den korta brinntiden för kabeldelarna medför alltså att branden slocknar helt redan efter ungefär 300 sekunders brandförlopp.

Vid 20 % lägre antändningstemperaturer ses att effektutvecklingen ökar drastiskt efter drygt 100 sekunder för att ungefär 100 sekunder senare uppnå sitt maxvärde, effektutvecklingen ligger på detta värde ett par sekunder för att sedan avta lika hastigt. I smokeview ses att branden börjar ta sig uppåt längs den brandutsatta kabelstegen med en hög hastighet varpå spridning till den inre kabelstegen med övriga kablar sker efter ungefär 115 sekunder, vid denna tidpunkt har branden i den första kabelstegen tagit sig ungefär 12 meter upp från sin startposition. Den inre kabelstegen med övriga kablar antänds på flera ställen ungefär samtidigt vilket medför att det inom ett par sekunder är ungefär lika långa delar av båda kabelstegarna som står i brand, dessa bränder tar sig uppåt längs kabelstegarna med hög hastighet varpå de når toppen av schaktet efter ungefär 190 sekunder. Detta är anledningen till den tvära ökningen av effektutvecklingskurvan ovan. Då bränderna tar sig uppåt längs kabelstegarna antänds även alla utom de två nedersta horisontella kabelsektionerna som går längs schaktets inre vägg samt de fem övre horisontella kabelsektionerna som leds in i schaktet. Dock antänds ingen av kabelstegarna med kraftkablar under simuleringstiden. Efter drygt 200 sekunder avtar effektutvecklingen och går ner mot noll då bränslet hos kablarna i den nedre delen av schaktet har börjat ta slut och branden börjat slockna.

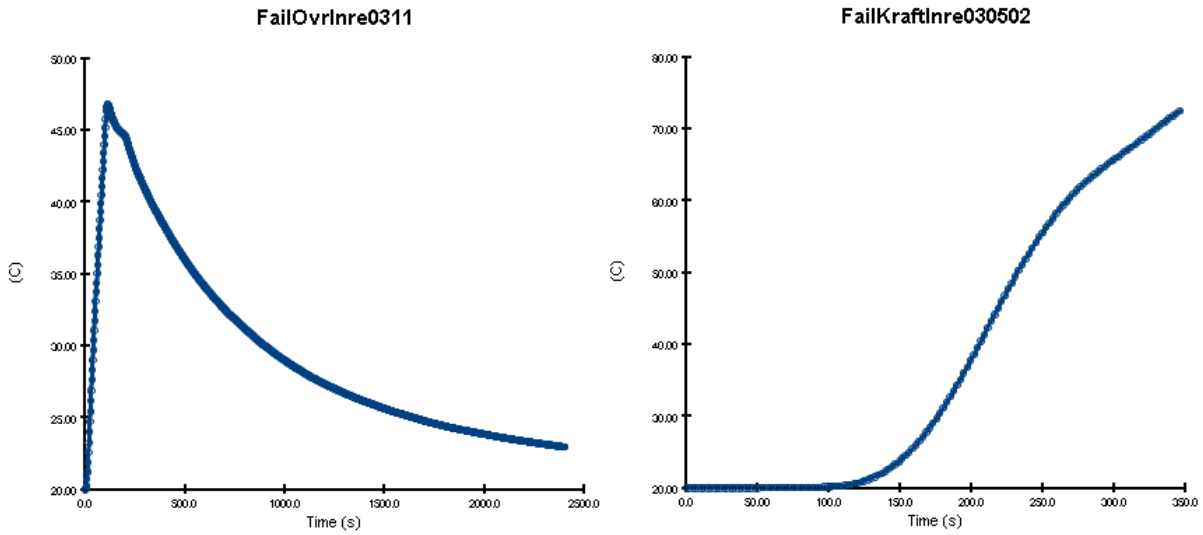
Även vid detta scenario med lägre antändningstemperaturer stiger effektutvecklingen otroligt mycket på kort tid, den ökar betydligt snabbare än vid föregående scenario. Att effektutvecklingen ökar till ett så pass högt värde anses dock även i detta fall vara rimligt då det även vid detta scenario är många kabelsektioner, 14 stycken, som samtidigt är involverade i brandförloppet. Vad gäller tillväxthastigheten fås, då ovanstående kurva anpassas till en αt^2-kurva, en tillväxthastighet på ungefär 1,1 kW/s^2, denna tillväxthastighet kan jämföras med tidigare nämnda försök med plywood som uppvisade α-värden på upp emot 1,17 kW/s^2 (Karlsson & Quintiere, 2000). Inte heller i detta fall är alltså själva tillväxthastigheten i sig orimlig, dock anses den vara orimlig för scenariot i fråga, detta grundar sig framförallt på grund av den höga känsligheten. Även i detta fall anses alltså effektutvecklingskurvan ovan visa på att antändningstemperaturerna för övriga kablar är något låga för att kunna ge några giltiga resultat.

I Figur 7.33 åskådliggörs brandspridningen i rött vid de tre olika fallen för brandscenario 3. Till vänster med 20 % högre antändningstemperaturer, i mitten för huvudscenariot och till höger för 20 % lägre antändningstemperaturer.



Figur 7.33 Skador på kablar vid huvudscenariot samt vid antändningstemperaturer ±20 %

Vad gäller de inre temperaturerna för kortslutning uppnår inga kablar som inte är involverade i brandförloppet sina inre kortslutningstemperaturer vid något av fallen. Vid 20 % högre antändningstemperaturer ligger de högsta inre temperaturerna på lite under 45 °C, detta hos kablar på den närmsta kabelstegen med övriga kablar. Vid 20 % lägre antändningstemperaturer ligger de högsta inre temperaturerna på lite under 80 °C, detta hos kablar på den närmsta kabelstegen med kraftkablar. I Figur 7.34 åskådliggörs inre temperatur-tid-kurvor i punkterna med de högsta inre temperaturerna hos dessa kablar. Till vänster för 20 % högre antändningstemperaturer och till höger för 20 % lägre antändningstemperaturer.



Figur 7.34 Inre temperaturer hos kablar på de olika kabelstegarna vid antändningstemperaturer ±20%

När det gäller skadeomfattningen ger känslighetsanalysen att vid 20 % högre antändningstemperaturer sprider sig branden ungefär en halv meter upp längs den brandutsatta kabelstegen innan den slocknar, detta efter ungefär 300 sekunder. Med tanke på att de vertikala kabelstegarna står så pass nära varandra anses dock att de omgivande kabelstegarna kan ha blivit så pass flam- och strålningspåverkade att de kommer vara i behov av noga kontroll och helst ersättning. Vid detta fall är det alltså högst tre vertikala kabelstegar som kommer vara i behov av ersättning vilket ger en återställningstid på ungefär 4,5 dygn.

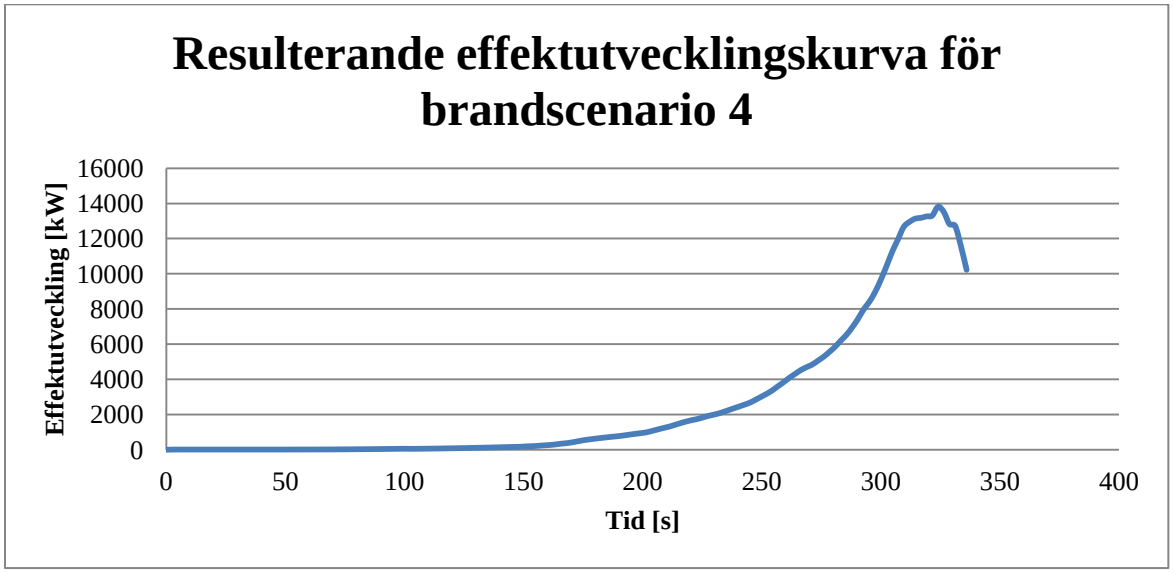
Vid 20 % lägre antändningstemperaturer når effektutvecklingen sitt maxvärde redan efter ungefär 200 sekunder, drygt 3 minuter. Vid denna tidpunkt står två vertikala och 11 horisontella kabelsektioner i brand. Effektutvecklingen börjar avta och gå ner mot noll efter drygt 200 sekunder varför branden därmed mer eller mindre kommer hinna slockna innan dess att en insats anses kunna vara igångsatt 1000 sekunder senare. Då effektutvecklingen uppnått sitt maximala värde anses det inte vara ett orimligt antagande att den närmsta kabelstegen med kraftkablar samt de horisontella kabelsektioner som branden tagit sig förbi och ej ännu antänts är mer eller mindre flam- och strålningspåverkade. Med detta antagande följer därmed att 20 kabelsektioner, tre vertikala och 17 horisontella, kommer vara i behov av ersättning vilket därmed ger en återställningstid i storleksordningen månader. Men som diskuterats tidigare medför dock de låga antändningstemperaturerna hos övriga kablar en känslighet som anses vara orimlig varför denna stora skadeomfattning ej anses vara rimlig för scenariot i fråga.

7.5.4 Scenario 4 - Brandstart i inre kabelstege innefattande övriga kablar

Vid detta scenario sker brandstart i den inre kabelstegen med övriga kablar, brandens startposition är i en centralt monterad kabel på höjden 5 meter ovan golv. På denna höjd sitter även en horisontell kabelsektion som går längs schaktets inre vägg. Inledningsvis redogörs för simuleringsresultaten, både för det befintliga scenariot och känslighetsanalysen, för att vidare utföra en bedömning av skadeomfattningen för kablarna i schaktet.

7.5.4.1 Simuleringsresultat

I Figur 7.35 nedan åskådliggörs den resulterade effektutvecklingskurvan för det befintliga scenariot.

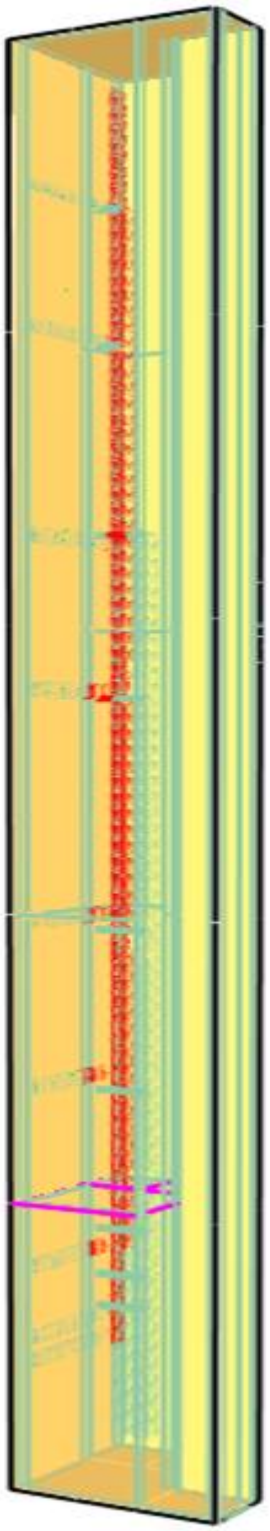


Figur 7.35 Effektutvecklingskurva för brandstart i den inre kabelstegen innefattande övriga kablar

Vilket kan ses i figuren ovan blir den totala effektutvecklingen otroligt hög och uppnår sitt maxvärde efter en kort tid. Då brandscenariot studeras i smokeview ses att det redan vid ungefär 170 sekunder sker spridning till två horisontella kabelsektioner längs den inre väggen, vid denna tidpunkt har branden i den vertikala kabelstegen tagit sig 10 meter upp från dess startposition. Vid ungefär 270 sekunder sker brandspridning till nästa kabelstege med övriga kablar, branden i den första kabelstegen har då tagit sig ungefär 20 meter upp från dess startposition samt spridit sig till ytterligare fyra horisontella kabelsektioner, tre stycken som går längs den inre väggen och en som leds in i schaktet. Vid ungefär 310 sekunder har branden i båda kabelstegarna med övriga kablar tagit sig till toppen av kabelschaktet, spridning har även skett till 11 horisontella kabelsektioner, åtta stycken längs den inre väggen och tre stycken som leds in i schaktet. Efter ungefär 330 sekunder börjar effektutvecklingen avta då bränslet hos kablarna i den nedre delen av schaktet börjat ta slut och branden börjat slockna. I Figur 7.36 åskådliggörs en schematisk bild på brandspridningens omfattning i schaktet vid simuleringens slut.

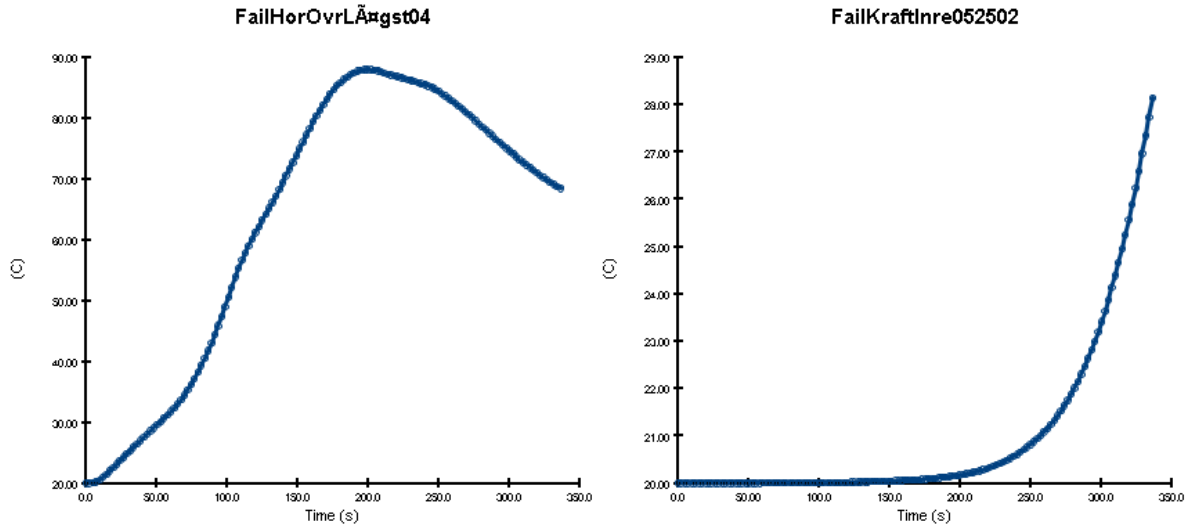
Vid detta scenario ses att tillväxthastigheten är hög och kan jämföras med tidigare scenarion vid fallen med 20 % lägre antändningstemperaturer. Vid anpassning av ovanstående effektutvecklingskurva med en αt^2-kurva fås en tillväxthastighet på ungefär 0,19 kW/s^2 vilken kan jämföras med den tidigare definierade tillväxthastigheten ultra fast. Att den resulterande effektutvecklingen når ett så pass högt värde anses vara rimligt då det är 13 kabelsektioner som står i brand då den maximala effektutvecklingen uppnås. Inte heller tillväxthastigheten anses vara orimlig för ovanstående scenario. Vid tidigare simuleringar har tillväxthastigheten ökat markant vid den tidpunkt då den inre kabelstegen med övriga kablar antänts. Detta då denna kabelstege står i hörnet av schaktet och är placerad endast 0,2 meter från de horisontella kabelsektionerna längs den inre väggen. Detta medför

dels att brandförloppet kommer bli allvarligare med tanke på att kabelstegen står i hörnet av schaktet och dels att de horisontella kabelsektionerna kommer antändas tidigt då dessa är placerade så pass nära varandra vilket ger ett än allvarligare förlopp. Både den höga effektutvecklingen och den snabba tillväxthastigheten anses alltså i detta fall vara rimlig för scenariot i fråga, vilket nämnts tidigare är dock antändningstemperaturerna för övriga kablar vid huvudscenarierna redan något konservativa vilket medför att detta brandförlopp får anses som för det värsta möjliga fallet.



Figur 7.36 Brandens omfattning vid simuleringens slut

Vad gäller de inre temperaturerna för kortslutning uppnår inga kablar som inte är involverade i brandförloppet sina inre kortslutningstemperaturer, de högsta inre temperaturerna som registreras hos dessa kablar är lite under 90 °C, detta hos övriga kablar på den enda horisontella sektionen längs schaktets inre vägg som inte blev brandutsatt. Vad gäller de inre temperaturerna för den närmsta kabelstegen med kraftkablar uppmättes de högsta inre temperaturerna till lite under 30 °C. Deras inre temperaturer ser dock ut att öka med en tilltagande hastighet, att de inre temperaturerna är så pass låga trots den höga effektutvecklingen antas bero på att branden endast fortgått i drygt 300 sekunder och att värmen på denna tid inte hunnit ta sig så långt in i kablarna. I Figur 7.37 åskådliggörs inre temperatur-tid-kurvor i de punkter på kablarna på den horisontella kabelsektionen, till vänster, samt den närmsta kabelstegen med kraftkablar, till höger, som uppvisade de högsta inre temperaturerna.



Figur 7.37 Inre temperaturer över tid hos kablar på en horisontell sektion respektive närmsta kraftkabelstege

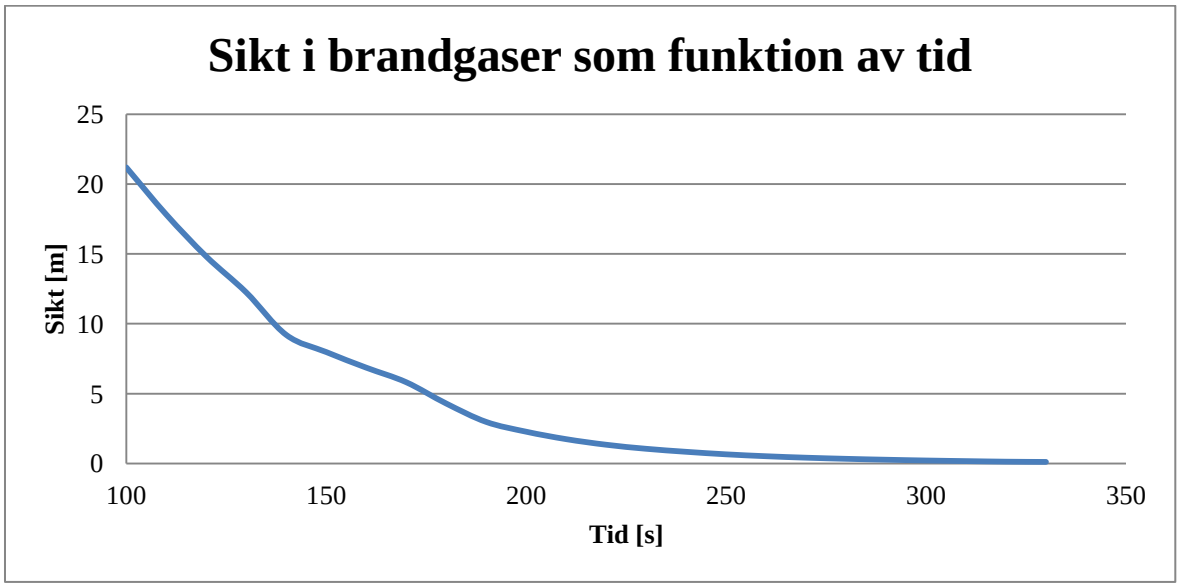
7.5.4.2 Bedömning av skador och återställningstider

Vid detta scenario har branden på ungefär 320 sekunder spridit sig till den närmsta vertikala kabelstegen med övriga kablar varpå bränderna i kabelstegarna tagit sig till toppen av schaktet, det har även skett brandspridning till 11 horisontella kabelsektioner. Vid denna tidpunkt börjar effektutvecklingen avta och branden slockna då bränslet i kablarna i nedre delen av schaktet har börjat ta slut. Branden kommer därmed mer eller mindre hinna slockna innan dess att en insats anses kunna vara igångsatt ungefär 900 sekunder, 15 minuter, senare. Då effektutvecklingen ligger på sitt maximala värde anses det inte vara ett orimligt antagande att den närmsta kabelstegen med kraftkablar samt de horisontella kabelsektioner som branden tagit sig förbi och ej ännu antänts är mer eller mindre flam- och strålningspåverkade vilket medför att dessa kommer vara i behov av noga kontroll och helst ersättning. Med utgångspunkt från ovanstående skall därmed högst 19 kabelsektioner ersättas, tre vertikala och 16 horisontella, detta är mer än tre fjärdedelar av det totala antalet kabelsektioner i schaktet vilket därmed ger en återställningstid i storleksordningen månader.

7.5.4.3 Bedömning av sikt och toxicitet

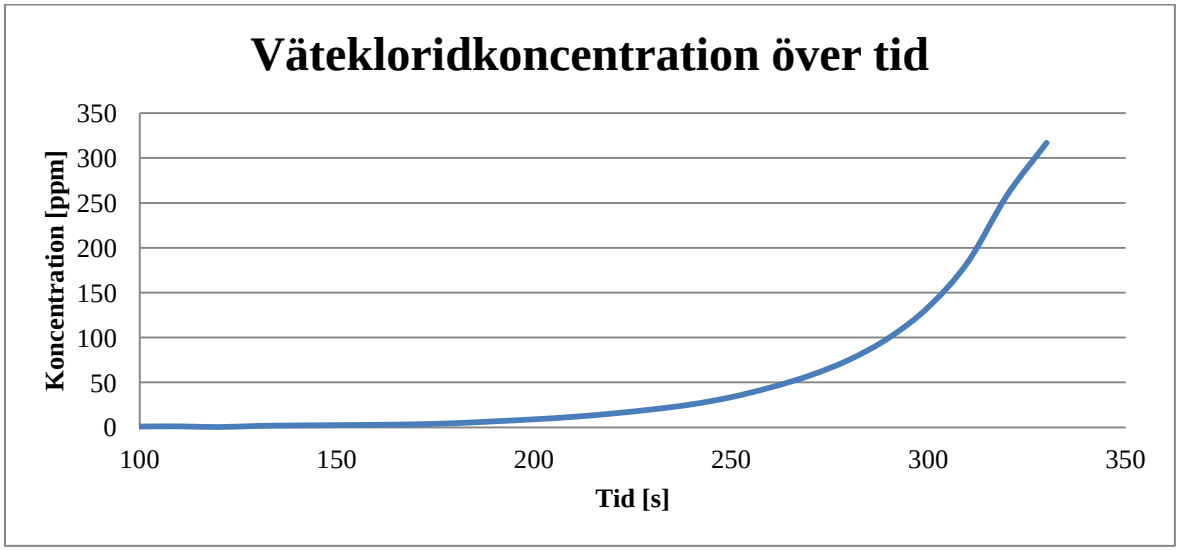
Vid detta scenario ses i smokeview att ett tydligt brandgaslager bildas först efter ungefär 100 sekunder varför sikten och toxiciteten i brandgaserna kommer behandlas med utgångspunkt från denna tidpunkt. Brandgaslagret ligger vid 100 sekunder ungefär 16 meter ovan golv, i höjd med tredje våningsplanet, upp till 45 meter ovan golv, i höjd med sjunde våningsplanet. Efter 170 sekunder har brandgaslagret nått upp till toppen av schaktet och befinner sig ungefär 10 meter ovan golv. Vidare sjunker brandgaslagret ner mot golvet för att slutligen uppta hela schaktet efter ungefär 250 sekunder. Efter beräkningar avseende hur sikten och toxiciteten förändras i schaktet med tiden fås att sikten uppnår sitt

kritiska värde, det vill säga 5 meters sikt genom brandgaserna, efter ungefär 170 sekunder medan gränsvärdet för vätekloridkoncentrationen, det vill säga >309 ppm, uppnås efter ungefär 325 sekunder, gränsvärdena för kolmonoxid och koldioxid uppnås ej under simuleringsförloppet. I Figur 7.38 och 7.39 nedan åskådliggörs hur sikten i brandgaserna samt vätekloridkoncentrationen förändras med tiden vid det befintliga scenariot.



Figur 7.38 Sikt i brandgaserna som funktion av tiden

Sikten i brandgaserna understiger alltså 5 meter efter ungefär 170 sekunder, vid denna tidpunkt ligger brandgaslagret ungefär 8 meter ovan golv och når hela vägen upp i schaktet.



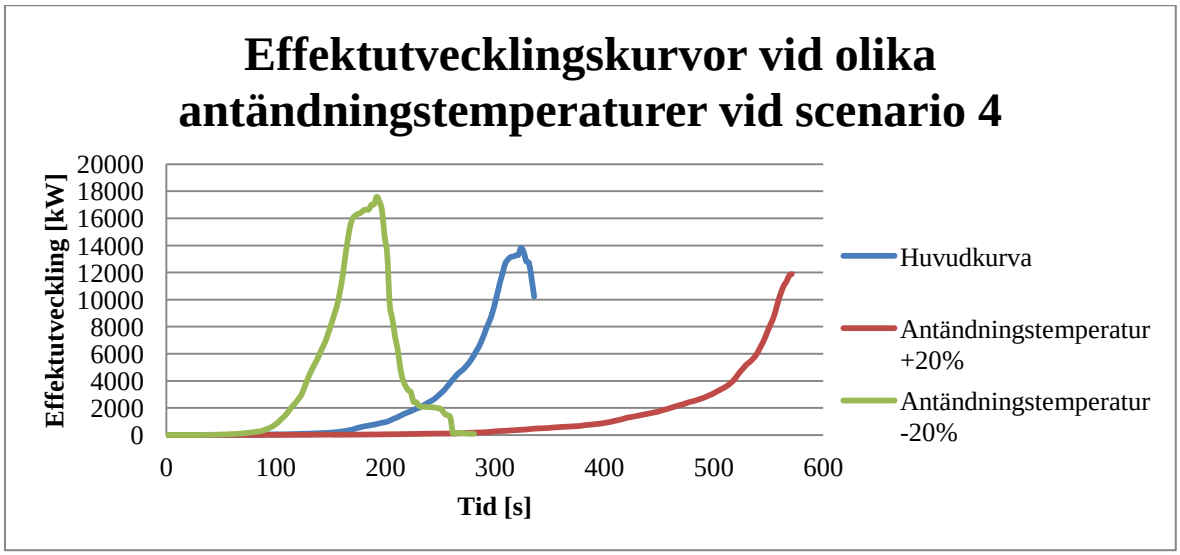
Figur 7.39 Vätekloridkoncentration i brandgaserna över tid

Vätekloridkoncentrationen i brandgaserna uppnår 309 ppm efter ungefär 325 sekunder, vid denna tidpunkt är schaktet helt rökfyllt.

Utförligare beskrivning av beräkningsgång och resultat för sikten och toxiciteten i schaktet finns att tillgå i Bilaga E och Bilaga F.

7.5.4.4 Känslighetsanalys

I Figur 7.40 åskådliggörs effektutvecklingskurvorna för det befintliga scenariot med tidigare valda ingångsvärden samt vid variationer av antändningstemperaturerna med ± 20 %.



Figur 7.40 Effektutvecklingskurvor vid scenario 4 samt med antändningstemperaturer ±20 %

Vilket kan ses i figuren ovan nås den maximala effektutvecklingen på mellan 200-600 sekunder vid variationer av antändningstemperaturerna för kablarna. Då de studeras i smokeview ses att brandförloppen ser ungefär likadana ut, med skillnaden att branden sprider sig med olika hastigheter.

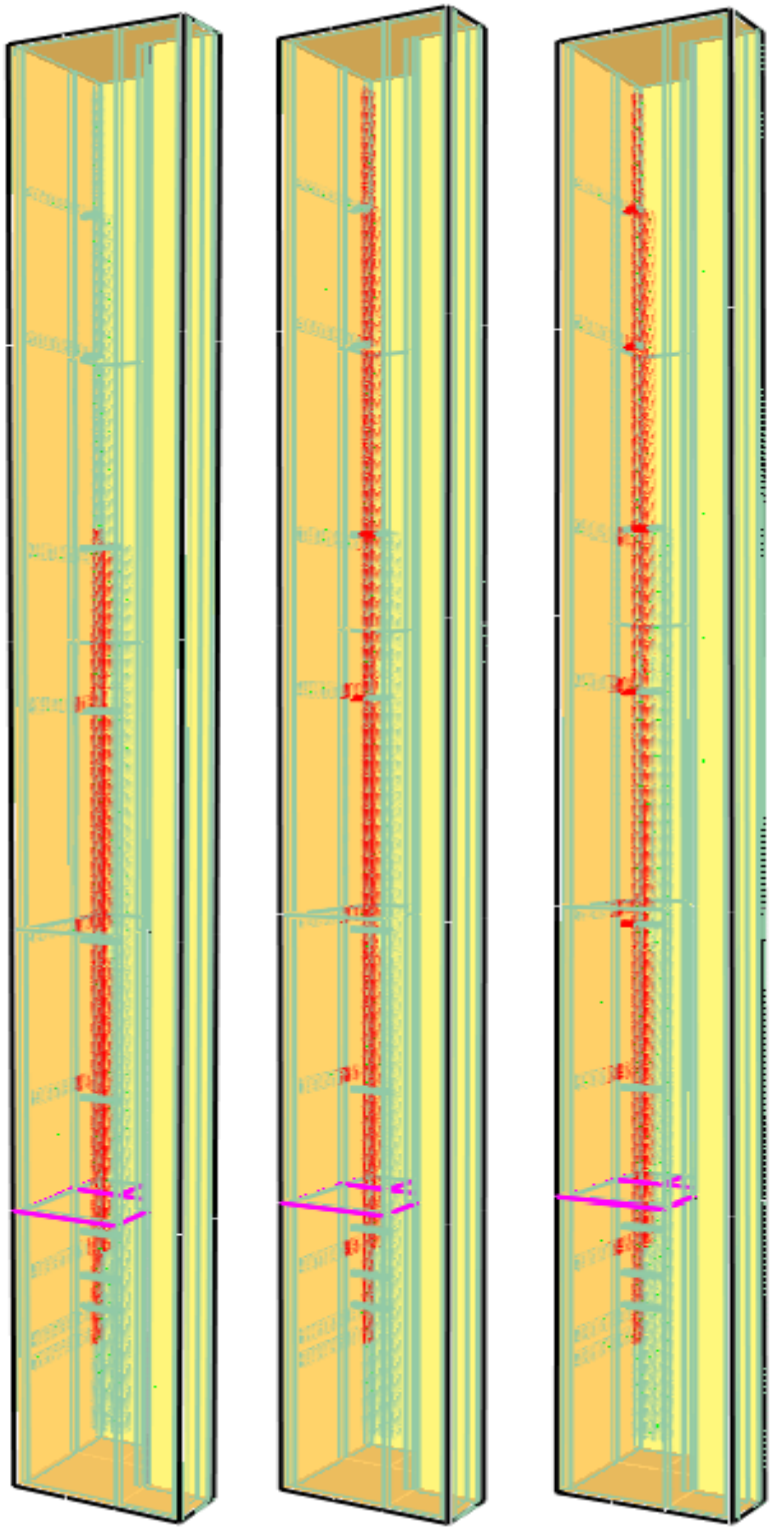
Vid 20 % högre antändningstemperaturer sker brandspridning till två horisontella kabelsektioner längs den inre väggen efter ungefär 410 sekunder varpå spridning till nästa kabelstege med övriga kablar sker efter ungefär 450 sekunder. Då branden tar sig uppåt längs dessa kabelstegar antänds även i detta fall ett antal horisontella kabelsektioner. Vid simuleringens slut har bränderna i kabelstegarna tagit sig ungefär 30 meter uppåt från dess startpositioner och spridit sig till åtta horisontella kabelsektioner, fem längs schaktets inre vägg och tre som leds in i schaktet. Vilket kan ses ur kurvan ovan är branden fortfarande i sin tillväxtfas då simuleringen avbryts, om den kunnat fortgå under en längre tid hade bränderna i de vertikala kabelstegarna troligtvis tagit sig till toppen av schaktet och möjligen antänt fler horisontella kabelsektioner på vägen upp.

Vid 20 % lägre antändningstemperaturer antänds de första horisontella kabelsektionerna redan efter ungefär 100 sekunder varpå den närmsta kabelstegen med övriga kablar antänds efter ungefär 115 sekunder. Branden sprider sig otroligt snabbt uppåt längs de vertikala kabelstegarna och når toppen av schaktet efter ungefär 170 sekunder. På brandens väg uppåt i kabelschaktet antänds 14 stycken horisontella kabelsektioner, samtliga kabelsektioner längs den inre väggen, 9 stycken, och 5 stycken kabelsektioner som leds in i schaktet. Efter ungefär 200 sekunder avtar effektutvecklingen och går ner mot noll då bränslet börjat ta slut och branden börjat slockna.

Även vid detta fall vid lägre antändningstemperaturer stiger effektutvecklingen otroligt mycket på kort tid. Att effektutvecklingen når ett så pass högt värde anses även i detta fall vara rimligt då det, precis som diskuterats tidigare, är så pass många kabelsektioner som är involverade i brandförloppet samtidigt. Vad gäller tillväxthastigheten fås, då ovanstående kurva anpassas till en αt^2-kurva, en tillväxthastighet på ungefär 1,1 kW/s^2 vilket innebär att tillväxthastigheten i sig inte är orimlig. Till skillnad från de tidigare scenarierna med lägre antändningstemperaturer är det vid detta fall inte lika stor känslighet, vid detta fallet anses själva känsligheten ej vara orimlig. Men med utgångspunkt från

tidigare simuleringar anses så låga antändningstemperaturer som 144 °C ej vara rimliga för kablarna varför detta därmed ej anses kunna ge några rimliga resultat. Även då både tillväxthastigheten och själva känsligheten anses vara rimliga anses alltså, med underlag av de låga antändningstemperaturerna för övriga kablar, resultaten ej vara rimliga för scenariot i fråga.

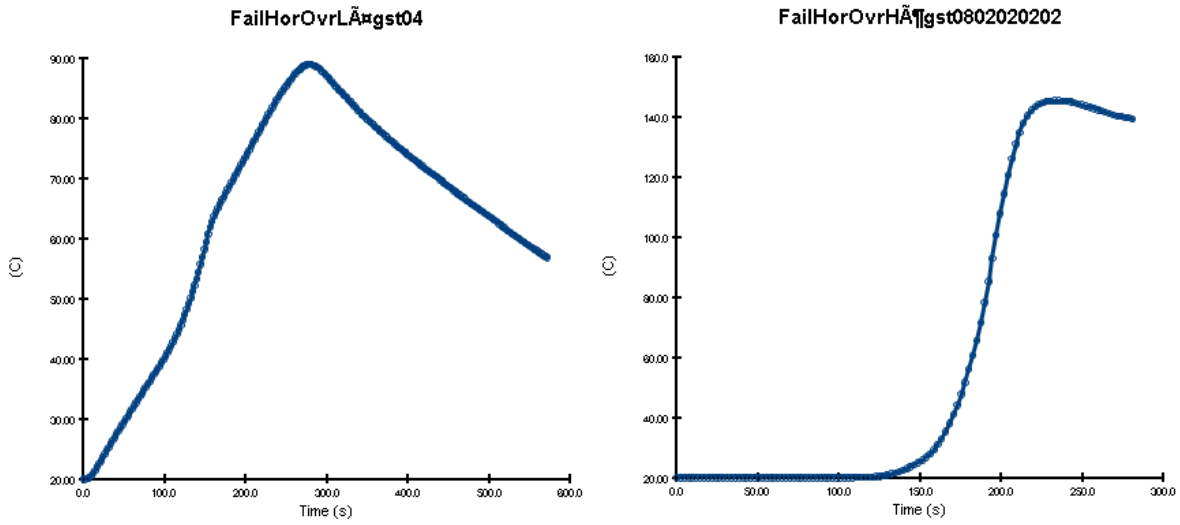
I Figur 7.41 åskådliggörs brandspridningen i rött vid de tre olika fallen för brandscenario 4. Till vänster med 20 % högre antändningstemperaturer, i mitten för huvudscenariot och till höger för 20 % lägre antändningstemperaturer.



Figur 7.41 Skador på kablar vid huvudscenariot samt vid antändningstemperaturer ±20 %

Vad gäller de inre temperaturerna för kortslutning uppnår inga kablar som inte är involverade i brandförloppet sina inre kortslutningstemperaturer för något av fallen. Vid 20 % högre antändningstemperaturer ligger de högsta inre temperaturerna på lite under 90 °C, detta är för kablar på en av de lägre horisontellt monterade kabelsektionerna. Vid 20 % lägre antändningstemperaturer ligger de högsta inre temperaturerna på drygt 150 °C, även detta för kablar monterade på en av de lägre horisontella kabelsektionerna. I Figur 7.42 åskådliggörs inre temperatur-tid-kurvor i punkterna

med de högsta inre temperaturerna hos dessa kablar. Till vänster för 20 % högre antändningstemperaturer och till höger för 20 % lägre antändningstemperaturer.



Figur 7.42 Inre temperaturer hos kablar på lägre horisontella kabelsektionerna vid antändningstemperaturer ±20%

När det gäller skadeomfattningen ger känslighetsanalysen att då antändningstemperaturerna ökas med 20 % sprider sig branden på ungefär 600 sekunder till den närmsta vertikala kabelstegen med övriga kablar samt till åtta horisontella sektioner, fem längs schaktets inre vägg och tre som leds in i schaktet. Bränderna i de vertikala kabelstegarna har tagit sig ungefär 30 meter upp från dess startpositioner. Vid simuleringens slut är branden fortfarande i sin tillväxtfas varför effektutvecklingen hade fortsatt öka om en längre simuleringstid varit möjlig. Innan en insats anses kunna vara igångsatt 600 sekunder senare anses bränderna i de vertikala kabelstegarna hinna ta sig till toppen av schaktet och troligtvis även sprida sig till fler horisontella kabelsektioner. Branden antas även mer eller mindre hinna slockna innan dess att en insats kan vara igångsatt. Även om fler horisontella kabelsektioner ej antänds på brandens väg uppåt i schaktet anses dessa ha blivit så pass flam- och strålningspåverkade att de kommer vara i behov av noga kontroll och helst ersättning. Detta medför att det även i detta fall kommer vara högst 19 kabelsektioner som kommer vara i behov av ersättning, tre vertikala och 16 horisontella, vilket medför en återställningstid i storleksordningen månader.

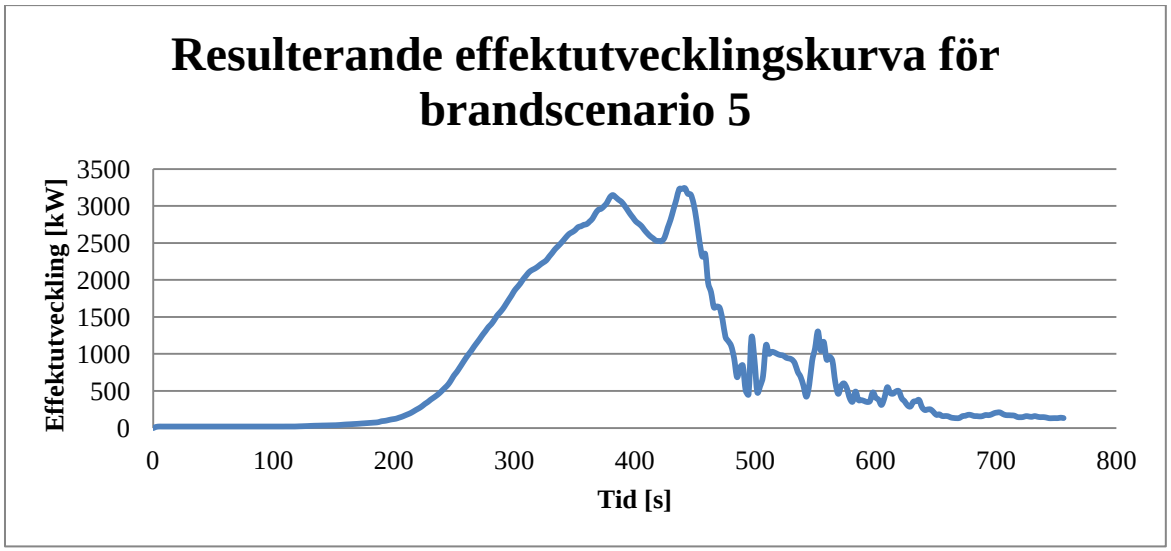
Vid 20 % lägre antändningstemperaturer når effektutvecklingen sitt maximala värde redan efter ungefär 200 sekunder, drygt 3 minuter. Vid denna tidpunkt står två vertikala kabelstegar och 14 horisontella kabelsektioner i brand. Efter detta börjar effektutvecklingen avta och gå ner mot noll då bränslet hos kablarna börjat ta slut. Redan innan 300 sekunders brandförlopp har effektutvecklingen gått ner till noll och branden slocknat. Även i detta fall anses att de kabelsektioner som branden tagit sig förbi och som ej ännu antänts kommer vara mer eller mindre flam- och strålningspåverkade vilket betyder att de kommer vara i behov av noga kontroll och helst ersättning. Detta betyder att högst 20 kabelsektioner kommer vara i behov av ersättning vilket därmed ger en återställningstid i storleksordningen månader. Men som diskuterats tidigare anses antändningstemperaturerna för övriga kablar i detta fall vara orimligt låga varför detta brandförlopp anses vara orimligt för scenariot i fråga.

7.5.5 Scenario 5 - Brandstart i horisontellt monterad kabelsektion

Brandscenario 5 utfördes i två versioner, en simulering där brandstart sattes i en horisontell kabelsektion som leds in i schaktet och en simulering där brandstart sattes i en horisontell kabelsektion som går längs schaktets inre vägg. Den senare simuleringen gav det allvarligaste resultatet varför detta redogörs för nedan. Inledningsvis redogörs för simuleringsresultaten, både för det befintliga scenariot och känslighetsanalysen, för att vidare göra en bedömning av skadeomfattningen och återställningstiden.

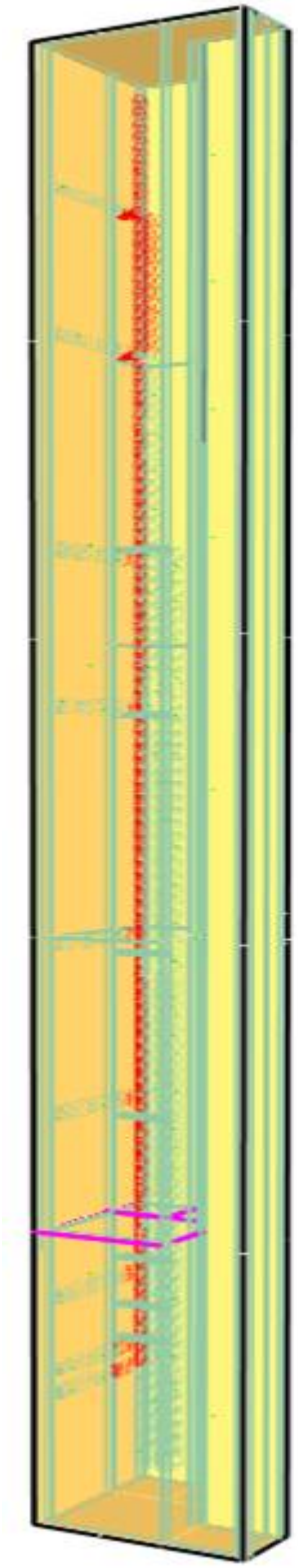
7.5.5.1 Simuleringsresultat

I Figur 7.43 nedan åskådliggörs den resulterande effektutvecklingskurvan för det befintliga scenariot.



Figur 7.43 Effektutvecklingskurva för brandstart i en horisontell kabelsektion

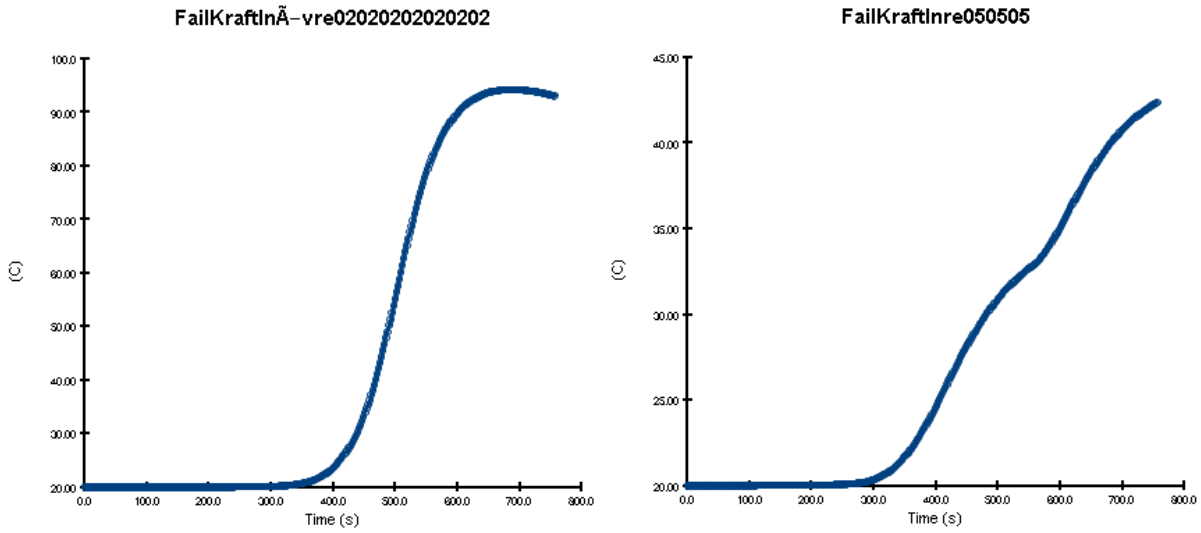
Vid detta scenario stiger effektutvecklingen till drygt 3000 kW varpå den avtar förhållandevis snabbt ner till ungefär 1000 kW där den håller sig ett tag för att vidare gå ner mot noll. Då brandscenariot studeras i smokeview ses att spridning till den närmsta kabelstegen med övriga kablar sker efter ungefär 190 sekunder varpå branden i denna kabelstege börjar ta sig uppåt i snabb takt. Branden tar sig till toppen av kabelstegen efter ungefär 390 sekunder och har på dess väg upp spridit sig till samtliga horisontella kabelsektioner längs schaktets inre vägg samt två kabelsektioner som leds in i schaktet. Efter ungefär 420 sekunder sprider sig branden även till den yttre kabelstegen med övriga kablar, detta är anledningen till den andra toppen i figuren ovan. Bränderna i de horisontella kabelsektionerna längs schaktets inre vägg sprider sig endast i liten omfattning ut åt sidorna, spridningen sker i princip endast uppåt från kabel till kabel. I Figur 7.44 åskådliggörs en schematisk bild på brandspridningens omfattning i schaktet vid simuleringens slut.



Figur 7.44 Brandspridningens omfattning vid simuleringens slut

Vad gäller de inre temperaturerna för kortslutning uppnår inga kablar som inte är involverade i brandförloppet sina inre kortslutningstemperaturer, de högsta inre temperaturerna som registreras hos dessa kablar är lite under 100 °C, detta hos kablar på en av de nedre horisontella kabelsektionerna som leds in i schaktet. Hos den närmsta kabelstegen med kraftkablar uppmättes de högsta inre temperaturerna till lite under 45 °C. Deras inre temperaturer ser dock ut att öka med en tilltagande

hastighet. I Figur 7.45 åskådliggörs inre temperatur-tid-kurvor i de punkter på kablarna på den horisontella kabelsektionen, till vänster, samt den närmsta kabelstegen med kraftkablar, till höger, som uppvisade de högsta inre temperaturerna.



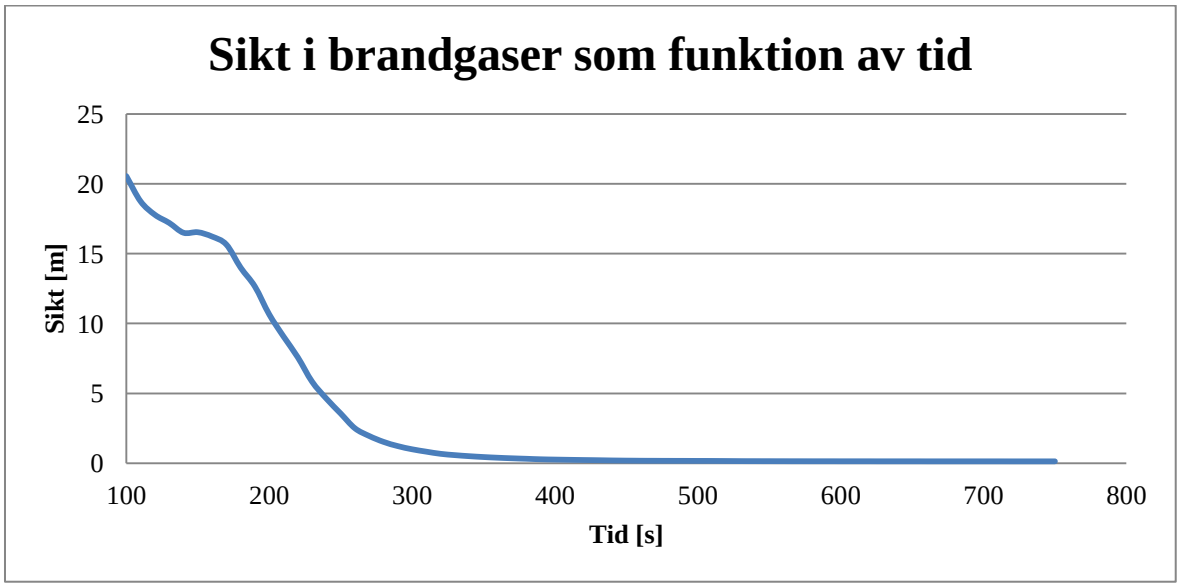
Figur 7.45 Inre temperaturer över tid hos kablar på en horisontell sektion respektive närmsta kraftkabelstege

7.5.5.2 Bedömning av skador och återställningstider

Vid detta scenario har branden på ungefär 450 sekunder spridit sig till den närmsta kabelstegen med övriga kablar samt 10 stycken horisontellt monterade kabelsektioner, åtta stycken längs schaktets inre vägg och två stycken som leds in i schaktet. Effektutvecklingen börjar sedan successivt avta för att slutligen ligga kring noll vid ungefär 780 sekunder, detta är ungefär 400 sekunder innan en insats antas kunna vara igångsatt vilket betyder att branden troligtvis mer eller mindre kommer hinna slockna innan dess. Då branden i kabelstegen med övriga kablar nått toppen av schaktet och då effektutvecklingen ligger på sitt maximala värde anses det ej vara ett orimligt antagande att den närmsta kabelstegen med övriga kablar samt de horisontella sektioner branden tagit sig förbi och ännu ej antänts är så pass flam- och strålningspåverkade att de kommer vara i behov av noga kontroll och helt ersättning. Detta medför att högst 20 kabelsektioner kommer vara i behov av ersättning, två vertikala och 18 horisontella, detta är fler än tre fjärdedelar av det totala antalet kabelsektioner i schaktet vilket därmed ger en återställningstid i storleksordningen månader.

7.5.5.3 Bedömning av sikt och toxicitet

Vid detta scenario ses i smokeview att ett tydligt brandgaslager bildas först efter ungefär 100 sekunder varför sikten och toxiciteten kommer behandlas med utgångspunkt från denna tidpunkt. Brandgaslagret ligger vid 100 sekunder ungefär 17 meter ovan golv, i höjd med tredje våningsplanet, upp till 45 meter ovan golv, i höjd med sjunde våningsplanet. Efter 250 sekunder har brandgaslagret nått upp till toppen av schaktet och befinner sig ungefär 1 meter ovan golv. Vidare sjunker brandgaslagret ner mot golvet för att slutligen uppta hela schaktet efter ungefär 270 sekunder. Efter beräkningar avseende hur sikten och toxiciteten förändras i schaktet med tiden fås att sikten uppnår sitt kritiska värde, det vill säga 5 meters sikt genom brandgaserna, efter ungefär 250 sekunder medan gränsvärdena för toxiciteten ej uppnås under simuleringsförloppet. I Figur 7.46 nedan åskådliggörs hur sikten i brandgaserna förändras med tiden vid det befintliga scenariot.



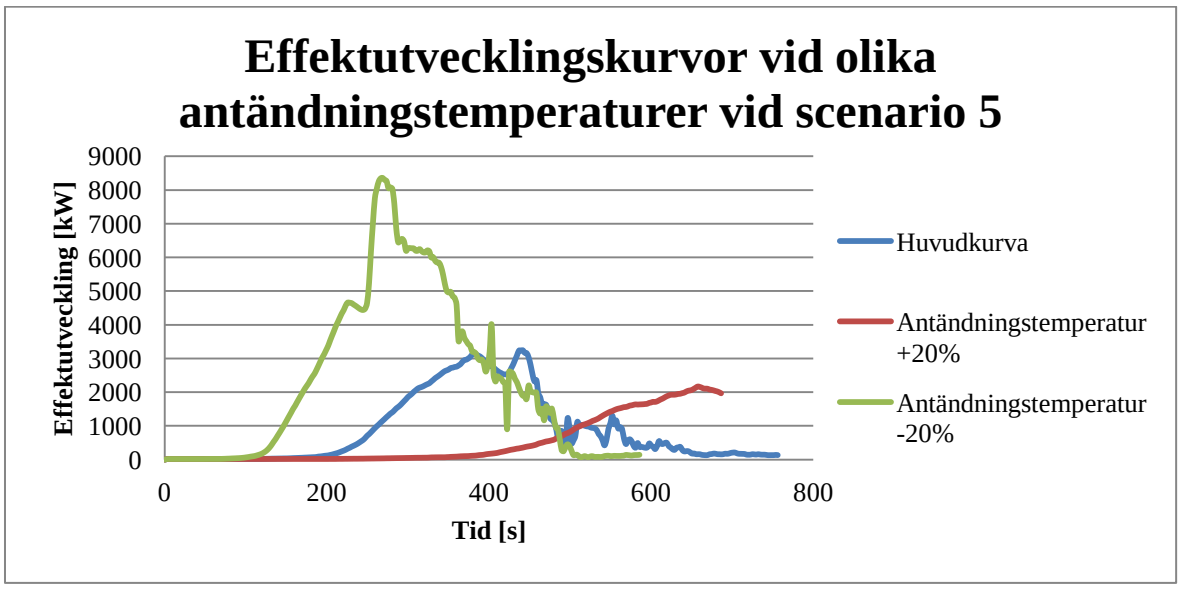
Figur 7.46 Sikt i brandgaserna som funktion av tiden

Sikten i brandgaserna understiger 5 meter efter ungefär 250 sekunder, vid denna tidpunkt ligger brandgaslagret på höjden 1 meter ovan golv och når hela vägen upp till toppen, schaktet är alltså i princip helt rökfyllt.

Utförligare beskrivning av beräkningsgång och resultat för sikten och toxiciteten i schaktet finns att tillgå i Bilaga E och Bilaga F.

7.5.5.4 Känslighetsanalys

I Figur 7.47 åskådliggörs effektutvecklingskurvorna för det befintliga scenariot med tidigare valda ingångsvärden samt vid variationer av antändningstemperaturerna med ± 20 %.



Figur 7.47 Effektutvecklingskurvor vid scenario 5 samt med antändningstemperaturer ±20 %

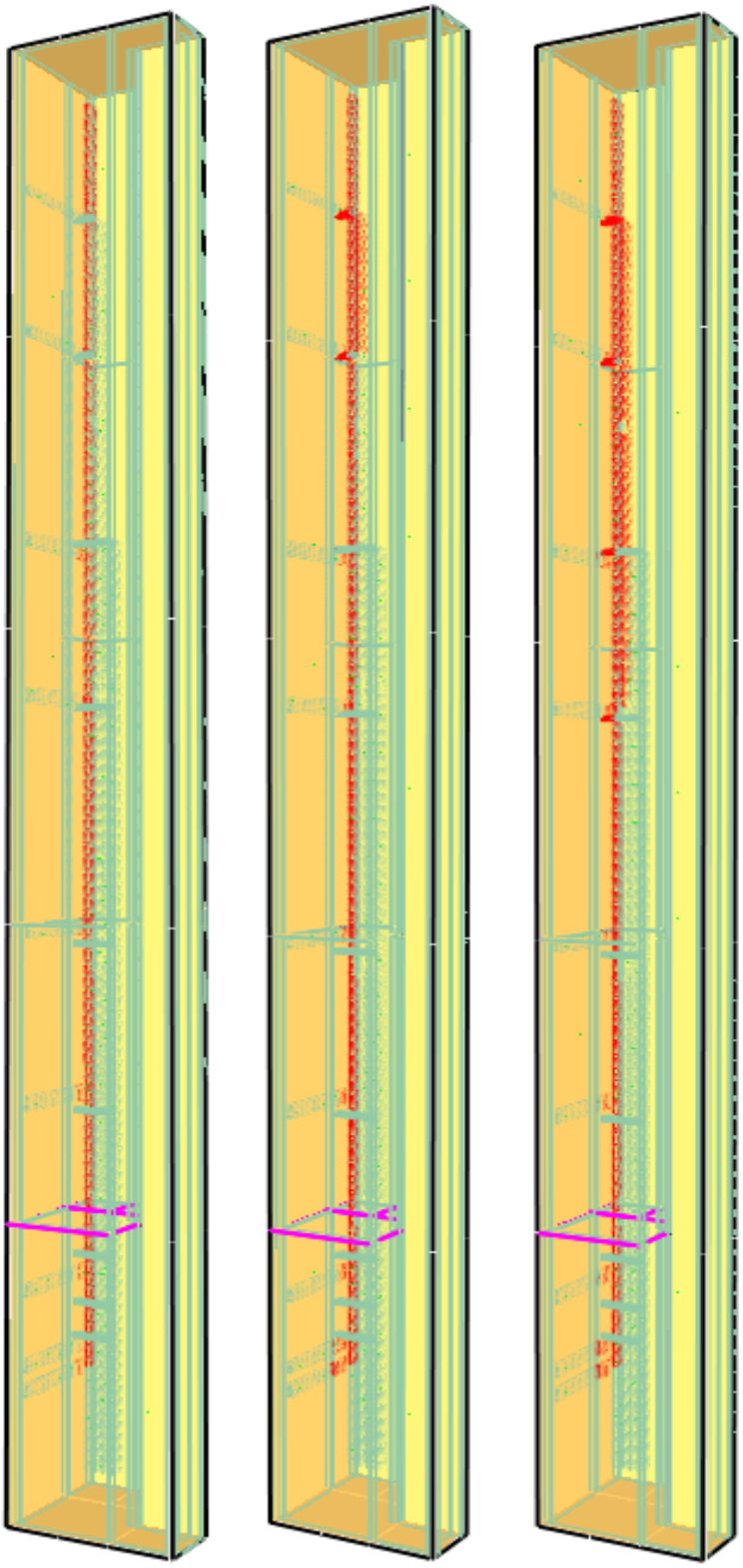
Vilket kan ses i figuren ovan sker det vid 20 % högre antändningstemperaturer en långsammare effektutvecklingsökning varpå den även ser ut att börja avta i simuleringens slutskede. I smokeview observeras att brandspridning sker till den närmsta kabelstegen med övriga kablar efter ungefär 400

sekunder varpå branden börjar ta sig uppåt längs kabelstegen. Branden har tagit sig upp till toppen av kabelstegen efter ungefär 650 sekunder, på dess väg upp har spridning skett till fyra av de horisontella kabelsektionerna längs schaktets inre vägg. Bränslet hos kablarna i den nedre delen av schaktet har vid denna tidpunkt även börjat ta slut varpå branden börjar slockna och effektutvecklingen avta.

Vid 20 % lägre antändningstemperaturer ses att effektutvecklingen ökar markant redan efter drygt 150 sekunder, vid denna tidpunkt sker spridning till den inre kabelstegen med övriga kablar varpå branden börjar ta sig uppåt längs denna kabelstege med hög hastighet. På dess väg upp antänds samtliga horisontella kabelsektioner längs schaktets inre vägg samt fyra horisontella kabelsektioner som leds in i schaktet. Efter ungefär 240 sekunder antänds även nästa kabelstege med övriga kablar vilket medför en ytterligare ökning av effektutvecklingen, vid denna tidpunkt har branden i den inre vertikala kabelstegen tagit sig till toppen av schaktet. Efterhand som bränslet hos kablarna i den nedre delen av schaktet börjar ta slut börjar branden slockna, effektutvecklingen börjar avta efter ungefär 300 sekunder för att efter ytterligare 200 sekunder ligga kring noll då bränslet hos större delen av kablarna i schaktet tagit slut.

Inte heller vid detta scenario med 20 % lägre antändningstemperaturer anses effektutvecklingens värde, dess tillväxthastighet eller känsligheten vara orimliga i sig. Dock anses, precis som tidigare, att en så låg antändningstemperatur hos övriga kablar som 144 °C ej vara något rimligt värde varför resultatet ej anses vara rimligt för scenariot i fråga.

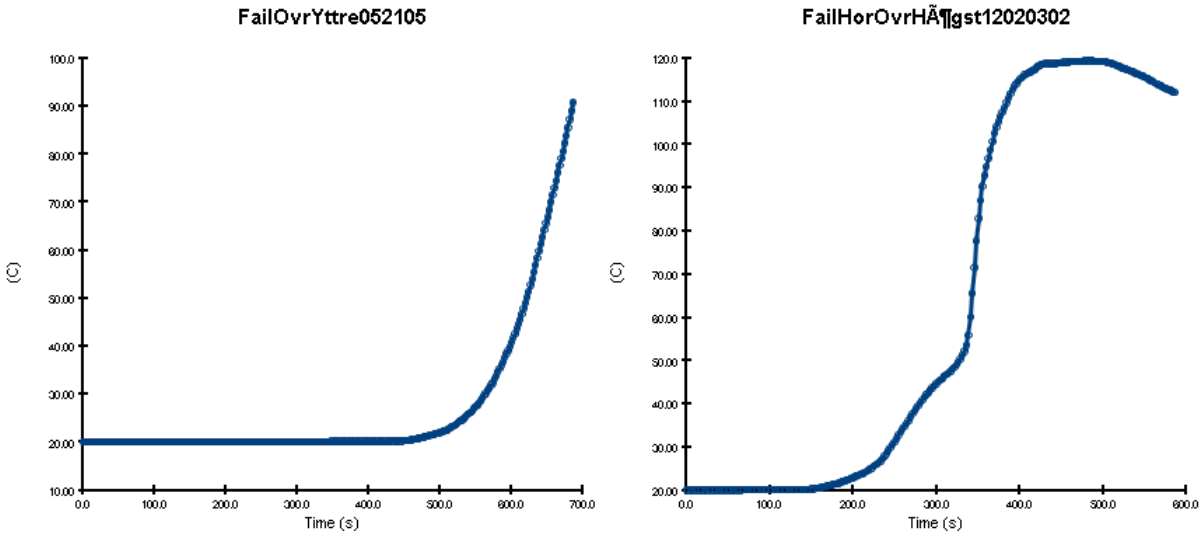
I Figur 7.48 åskådliggörs brandspridningen i rött vid de tre olika fallen för brandscenario 5. Till vänster med 20 % högre antändningstemperaturer, i mitten för huvudscenariot och till höger för 20 % lägre antändningstemperaturer.



Figur 7.48 Skador på kablar vid huvudscenariot samt vid antändningstemperaturer ±20 %

Vad gäller de inre temperaturerna för kortslutning uppnår inga kablar som inte är involverade i brandförloppet sina inre kortslutningstemperaturer för något av fallen. Vid 20 % högre antändningstemperaturer ligger de högsta inre temperaturerna på drygt 90 °C, detta är för kablar monterade på den yttre vertikala kabelstege med övriga kablar. Vid 20 % lägre antändningstemperaturer ligger de högsta inre temperaturerna på lite under 120 °C, detta för kablar

monterade på en av de lägre horisontella kabelsektionerna som leds in i schaktet. Vad gäller den närmsta kabelstegen med kraftkablar uppmättes de högsta inre temperaturerna till drygt 70 °C. I Figur 7.49 åskådliggörs inre temperatur-tid-kurvor i punkterna med de högsta inre temperaturerna hos dessa kablar. Till vänster för 20 % högre antändningstemperaturer och till höger för 20 % lägre antändningstemperaturer.



Figur 7.49 Inre temperaturer hos kablar på den vertikala kabelstegen samt den horisontella sektionen vid antändningstemperaturer ±20%

När det gäller skadeomfattningen ger känslighetsanalysen att då antändningstemperaturerna ökas med 20 % hinner branden på ungefär 700 sekunder sprida sig till den närmsta kabelsektionen med övriga kablar samt till fyra horisontella kabelsektioner längs schaktets inre vägg. I simuleringens slutskede ses att branden börjar slockna varför den antas mer eller mindre hinna slockna innan dess att en insats anses kunna sättas igång 500 sekunder senare. Då branden i den vertikala kabelstegen hunnit ta sig hela vägen upp i schaktet anses att nästa kabelstege med övriga kablar samt de horisontella kabelsektioner branden tagit sig förbi och som ännu ej antänts kommer vara mer eller mindre flam- och strålningspåverkade varför dessa kommer vara i behov av noga kontroll och helst ersättning. Detta medför att högst 20 kabelsektioner kommer vara i behov av ersättning, 2 vertikala och 18 horisontella, vilket ger en återställningstid i storleksordningen månader.

Vid 20 % lägre antändningstemperaturer når effektutvecklingen sitt maximala värde efter ungefär 300 sekunder, vid denna tidpunkt har branden spridit sig till båda kabelstegarna med övriga kablar samt 12 horisontella kabelsektioner. Brandspridningen i horisontalled hos de horisontella kabelsektionerna är mer omfattande än vid de två andra fallen. Vidare har branden mer eller mindre slocknat efter ungefär 500 sekunder. Även i detta fall anses att de kabelsektioner som branden tagit sig förbi och som ännu ej antänts kommer vara i behov av noga kontroll och helst ersättning, då även den yttre kabelstegen med övriga kablar blev brandutsatt vid detta fall innefattar denna kontroll eller ersättning även den närmsta kabelstegen med kraftkablar. Därmed kommer högst 21 kabelsektioner vara i behov av ersättning vilket ger en återställningstid i storleksordningen månader. Men som diskuterats tidigare anses de låga antändningstemperaturerna hos övriga kablar vid detta fall vara orimligt låga varför detta brandförlopp anses vara orimligt.

7.5.6 Sammanfattning återställningstider

I följande avsnitt ges en kort sammanfattning av de uppskattade återställningstiderna vid de olika brandscenarierna. Återställningstiderna är bedömda som de längsta möjliga vid respektive scenario.

I Tabell 7.7 nedan åskådliggörs de uppskattade återställningstiderna vid respektive brandscenario, i tabellen åskådliggörs dessutom uppskattningar av återställningstiderna vid 20 % högre respektive 20 % lägre antändningstemperaturer för kablarna.

Tabell 7.7 Uppskattade ungefärliga återställningstider vid respektive brandscenario

Återställningstider vid respektive brandscenario			
	Tidigare definierade antändningstemperaturer	Antändningstemperaturer +20 %	Antändningstemperaturer -20 %
Scenario 1	4 dygn	3 dygn	5,5 dygn
Scenario 2	9 dygn	6 dygn	Månader*
Scenario 3	9 dygn	4,5 dygn	Månader*
Scenario 4	Månader	Månader	Månader*
Scenario 5	Månader	Månader	Månader*

Vilket kan ses i tabellen ovan ligger återställningstiderna på mellan 4 dygn och månader beroende vilket scenario som avses. Det ses att de scenarier som renderar i de längsta återställningstiderna är då brandstart sker i övriga kablar placerade nära den inre väggen i schaktet, brandförloppen blir vid dessa fall otroligt omfattande och medför att större delen av schaktets kablar kommer vara i behov av ersättning. Vad gäller känslighetsanalysen anses, vilket diskuterats tidigare, att antändningstemperaturen 144 °C för övriga kablar är något låg för att simuleringarna skall kunna ge några rimliga resultat, återställningstiderna vid dessa fall anses därmed ej vara rimliga, dessa är markerade med en stjärna i tabellen ovan. Dessutom är antändningstemperaturerna vid huvudscenarierna redan något konservativa varför dessa återställningstider ändå får ses som vid de värsta möjliga fallen. Vid scenario 1 med 20 % lägre antändningstemperaturer spred sig dock branden ej till någon av kabelsektionerna med övriga kablar varför denna återställningstid kan anses vara rimlig. Vid jämförelser av återställningstider vid de fall där de anses som rimliga ses att den för de tre första scenarierna varierar kring ett antal dygn beroende på antändningstemperatur medan den för de sista två scenarierna är i storleksordningen månader oberoende av antändningstemperaturerna. Vid de två sista scenarierna ses att då antändningstemperaturerna ökas med 20 %, det vill säga till 218 °C, som enligt tidigare avsnitt var rekommenderad antändningstemperatur för kablar ligger återställningstiderna fortfarande i storleksordningen månader varför känsligheten vid dessa fall ej har någon större inverkan på slutresultatet. De allvarligaste scenarierna uppstår alltså då brandstart sker i övriga kablar monterade i närhet till den inre väggen i schaktet vilket ger återställningstider i storleksordningen månader, även vid förhöjda antändningstemperaturer. Kommande åtgärdsförslag kommer därmed göras i huvudsak med utgångspunkt från de scenarion som ger de allvarligaste konsekvenserna för kabelschaktet.

7.5.7 Sammanfattning utrymningsförhållanden

Vid utvärderingar av utrymningsförhållanden har det utförts beräkningar avseende hur sikt och toxicitet förändras över tid med underlag av tidigare uppställda beräkningar samt bedömningar av brandgaslagrets utbredning med tiden vid respektive scenario. Vid samtliga scenarion har sikten i brandgaslagret nått sitt kritiska värde innan toxiciteten varför fortsatta bedömningar avseende utrymningsförhållandena kommer göras med utgångspunkt från när sikten når sitt kritiska värde. Endast vid scenario 4 uppnås den kritiska nivån avseende toxicitet under simuleringstiden, detta för väteklorid som uppnår sin kritiska koncentration efter ungefär 325 sekunders brandförlopp. Beräkningsgång samt utförligare resultat från beräkningar av toxiciteten vid de olika brandscenarierna finns att tillgå i Bilaga F.

I Tabell 7.8 nedan åskådliggörs tider tills dess att sikten understiger 5 meter i brandgaslagret samt på vilken nivå det ligger på vid dessa tidpunkter för respektive brandscenario. Utförligare beräkningar och resultat finns att tillgå i Bilaga E.

Tabell 7.8 Tider till kritisk sikt vid de olika scenarierna samt brandgaslagrets höjd vid dessa tidpunkter

	Tid till sikt < 5 meter [s]	Brandgaslagrets höjd ovan golv [m]
Scenario 1	660	1
Scenario 2	600	1
Scenario 3	210	2
Scenario 4	170	8
Scenario 5	250	1

Vilket kan ses i tabellen ovan uppnås kritisk sikt i brandgaslagret på mellan 170-660 sekunder, ungefär 3-12 minuter, beroende på vilket scenario som avses. Vid scenario 4 befinner sig brandgaslagret vid tidpunkten för kritisk sikt på 8 meter ovan golv vilket enligt Boverket (2011) därmed skulle innebära att utrymning från bottenvåningen fortfarande är möjlig. Brandgaslagret når vid detta scenario höjden 2 meter ovan golv 50 sekunder senare vilket därmed innebär att utrymning från bottenvåningen ej längre är möjlig.

För att kunna göra bedömningar huruvida tiderna i tabellen ovan är acceptabla ur ett utrymningsperspektiv måste även tiden för utrymning från schaktet utvärderas. Beräkning av utrymningstiden utförs med underlag av Boverkets allmänna råd om analytisk dimensionering av byggnaders brandskydd, BFS 2011:27. Denna skrift anger att tiderna för utrymning bör inkludera tider för varseblivning, förberedelse samt förflyttning (Boverket, 2011). Med utgångspunkt från detta beräknas den maximala utrymningstiden från schaktet till 109 sekunder, dessa beräkningar redogörs för i Bilaga G. Detta betyder att utrymning är möjlig innan dess att kritiska förhållanden för sikt och toxicitet uppkommer vid samtliga brandscenarion.

Vilket nämnts tidigare kan rökpotentialen skilja sig markant beroende på yttre förhållanden, den kan bli uppemot sex gånger högre, därför utfördes även beräkningar avseende siktförändring med ett sex gånger högre värde på rökpotentialen. Beräkningarna ger att sikten blir kritisk i princip direkt då ett brandgaslager bildas i schaktet, detta sker för alla scenarion innan dess att en insats är möjlig. Det är därmed brandgaslagrets höjd som avgör var från schaktet utrymning kan ske, detta finns tabellerat i Bilaga E. För alla scenarion ligger brandgaslagret på omkring 14-17 meter ovan golv vid tiden 109 sekunder vilket medför att utrymning är möjlig från tredje våningen och nedåt. Denna höga rökpotential anses dock vara ett extremfall varför bedömningen är att en säker utrymning skall kunna ske innan dess att kritiska förhållanden uppstår vid samtliga brandscenarion.

Vid bedömningar av utrymningsförhållanden skall det även tas hänsyn till att de vertikala kabelstegarna är placerade i omedelbar närhet till trapporna. Detta skulle vid utrymning kunna medföra blockerad väg och att utrymmande personer blir direktpåverkade av branden vilket både kan leda till brännskador och fara för liv innan dess att kritiska förhållanden uppnås. Därför kontrolleras huruvida detta skulle kunna vara ett problem, det ses dock att brandförloppen vid samtliga brandscenarion ej har hunnit bli särskilt omfattande vid tiden 109 sekunder. Vid det allvarligaste scenariot, brandscenario 4, har branden endast tagit sig ungefär 1,5 meter upp längs kabelstegen. Dessa begränsande omfattningar av brandförloppen anses ej kunna medföra något utrymningsproblem.

Vad gäller brandgasluckan anses denna varken kunna påverka skadeomfattningar, återställningstider eller utrymning då denna endast öppnas manuellt. Brandgasluckan kommer därmed inte öppnas förrän räddningstjänsten är på plats och en insats är igångsatt.

8 Åtgärdsförslag

I följande avsnitt presenteras diverse åtgärdsförslag vilka syftar till att, vid en eventuell brand, begränsa det negativa händelseförloppet vid ett tidigt skede eller rent av förhindra att en brand överhuvudtaget skall kunna uppkomma. Inledningsvis redogörs för diverse passiva åtgärder för att vidare redogöra för diverse aktiva system vilka anses vara möjliga att installera i schaktet.

8.1 Passiva system

Nedan presenteras diverse passiva åtgärder för schaktet vilka har det huvudsakliga syftet att begränsa omfattningen av en eventuell brand i kabelschaktet.

8.1.1 Inbyggnad av kablar

Det rekommenderas att bygga in kablarna i ett eget utrymme, det vill säga att separera trappsektionen från kablarna. Vid beräkningar av huruvida kritiska förhållanden avseende sikt och toxicitet uppkommer visade känslighetsanalysen på att kritiska förhållanden i värsta fall kan uppkomma innan dess att utrymning kan ske. Vid inbyggnad av kablarna i ett eget utrymme kommer utrymningsförhållandena därmed ej påverkas vid en brand i kablarna. Åtgärden rekommenderas dock främst på grund av att den i kombination med diverse aktiva system kan medföra en tidigare detektion och bekämpning av en eventuell brand, detta diskuteras i kommande avsnitt. Vid införandet av denna åtgärd skall det dock tas hänsyn till att utforma utrymmet i sådan storlek att ersättning och reparation av kablar fortfarande skall vara möjligt utan att ingripa i konstruktionen.

8.1.2 Strålningsskärmar

För att fördröja, eller till och med förhindra, brandspridning mellan kabelsektioner rekommenderas att införa strålningsskärmar mellan kabelsektionerna. Dessa skall bestå av ett obrännbart material och skall vara utformade att både kunna stå emot direkt flampåverkan och strålningspåverkan, detta då kabelstegarna är placerade så pass nära varandra att strålningsskärmarna vid en brand kommer vara mer eller mindre direktpåverkade av branden. Strålningsskärmarna ska därmed vara uppförda enligt brandteknisk klass EW30, eller för att öka skyddet än mer EW60, vilket betyder att materialet skall ha förmågan att motstå brand på en sida utan att branden sprider sig till den oexponerade sidan genom läckage av lågor eller heta gaser samt tillse att värmestrålningen från den oexponerade sidan är under en viss nivå under 30 respektive 60 minuter (SP, 2012).

8.1.3 Brandskyddsfärg

Även applicering av brandskyddsfärg på kablarna är ett alternativ för att förhindra eventuell brandspridning. Brandskyddsfärgen medför att kablarna blir tåligare mot yttre brandpåverkan och förhindrar dessutom brandspridning i kablarna. Brandskyddsmålning av kablar skall även förhindra vätekloridproduktion från brinnande PVC (Elektroskandia, 2012). Det finns olika sorters brandskyddsfärger beroende på vilken sorts kablar som avses där de olika brandskyddsfärgerna är testade enligt olika provningsmetoder (Elektroskandia, 2012). För att få tag på rätt sorts brandskyddsfärger till de olika kablarna i schaktet rekommenderas att ta kontakt med leverantör eller tillverkare vilka kan vägleda i valet av brandskyddsfärg.

8.1.4 Halogenfria kablar

Vilket diskuterats i tidigare avsnitt har effektutvecklingen hos brinnande kablar visat sig vara avsevärt mycket högre för kablar med PVC-mantel till skillnad från kablar med HFFR-mantel, detta antas även gälla för isoleringsmaterialet. Dessutom kan halogenfria kablar stå emot både högre strålnings- och temperaturpåverkan än PVC-kablar innan kortslutning och/eller antändning sker och det produceras ingen väteklorid vid brand i denna typ av kablar. Därför rekommenderas att successivt ersätta alla PVC-kablar i schaktet med dess halogenfria alternativ.

8.2 Aktiva system

Nedan presenteras ett antal förslag på diverse aktiva system som anses kunna installeras i schaktet. Inledningsvis redogörs förslag vilka syftar till att få en tidig detektion av brand för att vidare redogöra för ett antal åtgärder vilka syftar till att begränsa eller till och med förhindra att en brand uppkommer.

8.2.1 Detektorer

Det finns i dagens läge finns ett antal rökdetektorer i schaktet, beroende på var branden startar kommer självklart detektionstiden skilja sig något. Men då brand i PVC producerar så pass mycket brandrök anses att aktiveringstiden ej kommer skilja sig nämnvärt även om branden startar på en ogynnsam position eller om det installeras fler detektorer i schaktet. Dock rekommenderas ändå att installera en sorts detektorsystem, detta under förutsättning att det sker inbyggnad av kablarna i ett eget utrymme och då det sker i kombination med ett släcksystem. Detta detektorsystem går under namnet detektorer i samplande system och redogörs för nedan.

8.2.1.1 Detektorer i samplande system

Ett samplande system fungerar genom att luft från lokalen kontinuerligt sugs ut genom ett rörsystem till en detektorenhet, vilken ofta består av en optisk ljusspridningsdetektor med en ljuskälla av laser (Uneram, 2009). Då laser har en betydligt högre intensitet en ljus från en vanlig ljuskälla medför detta en högre känslighet vilket därmed ger en tidig detektion av brand. Beroende på vad för sorts brand som förväntas kunna uppstå kan detektorsystemet ställas in att reagera på partiklar inom ett visst storleksintervall varför risken för falsklarm därmed kan reduceras (Nilsson & Holmstedt, 2008). Nackdelen med detta system är dock att det är dyrare än andra sorters detektorsystem (Uneram, 2009).

8.2.2 Släcksystem

Då det i dagens läge ej finns något automatiskt släcksystem i schaktet och då brandspridning kan ske vid ett tidigt skede rekommenderas att installera denna typ av system. Då huvuddelen av kablarna i schaktet är nödvändiga för den fortsatta verksamheten och då återställningstiderna i värsta fall kan vara i storleksordningen månader undersöks inledningsvis system vilka syftar till att brand ej skall kunna uppkomma. Vidare redogörs för släcksystem som anses kunna begränsa en eventuell brand vid ett tidigt skede.

8.2.2.1 Inerteringssystem

Med införandet av ett inerteringssystem kan brand överhuvudtaget ej uppkomma i kablarna, oberoende av förhållandet mellan bränsle och luft. Detta på grund av en sänkning av syrehalten i utrymmet som skall skyddas. Beroende på bränsle, inertgas, typ av flammor samt omgivningstemperatur varierar inerteringsgränsen varför gränsen för maximal syrehalt ställs in manuellt av tillverkare eller montör (Prevenex, 2011).

För att inerteringssystemet skall fungera skall detta införas i kombination med inbyggnad av kablarna i ett eget utrymme. Detta främst av två anledningar, den första är att då syrehalten sänks kommer detta påverka eventuell personal som befinner sig i schaktet. Redan då syrehalten sänks till 17-15 procent kan symptom som ökad hjärtfrekvens och trötthet uppstå varpå en ytterligare sänkning kan medföra att en person får svårt att ta sig från platsen och det kan föreligga risk för kvävning (AFS, 1993). Reducerad syrehalt har olika effekt på olika människor och beror på bland annat hälsa, ålder och kön. Som exempel är en syrehalt på 13 procent inte direkt hälsovådlig för en frisk person men kan vara farlig för en person som på grund av sjukdom eller någon annan anledning ej klarar av den låga syrehalten (ARAC, 2001). Den andra anledningen är att då schaktet i dagsläget ej är ett slutet utrymme och då det vid platsbesöket observerades att ett antal dörrar i kabelschaktet stod öppna medför detta problem, om inte en omöjlighet, för systemet att upprätthålla en konstant låg syrehalt.

Vid valet av vilken syrehalt som skall användas undersöks den lägsta syrenivån vid vilken polyvinylklorid ej kan antändas. Tester har visat att denna syrenivå ligger på omkring 16,9 vol% syre varpå systemet enligt vissa riktlinjer designas att ligga på en syrenivå 1 vol% under detta värde, det vill säga på 15,9 vol% syre (Nilsson & Van Hees, 2013). Dessa tester är dock utförda på ren PVC varför syrenivån för själva kablarna kan skilja sig något, dessutom finns det även andra sorters kabelmaterial som troligtvis har andra värden på den maximala syrehalten. I elskåp och dylikt föreligger en risk för högre temperaturer än omgivningen, temperaturerna kan dessutom öka drastiskt då elektriska fel uppstår. Vid högre temperaturer ökar brännbarhetsgränserna varför gränsen för maximal syrehalt därmed måste sänkas ytterligare för att hantera detta eventuella problem, FM Global rekommenderar en maximal syrenivå på 12-14 % för typisk elektrisk utrustning (Nilsson & Van Hees, 2013).

Om ett inerteringssystem införs och om det sker en inbyggnad av kablarna i ett eget utrymme uppkommer dock svårigheter vid det fall då kablar av någon anledning skall ersättas, både med avseende på den låga syrehalten och tillgänglig plats. Därför skall det finna tydliga rutiner för uppehälle i utrymmet och dessutom skall det, vilket nämnts tidigare, utformas så att ersättning av kablar skall kunna ske utan större problem.

Vid införandet av ett inerteringssystem rekommenderas att ta kontakt med återförsäljare för val av inertgas, korrekt dimensionering och bedömningar av maximal syrehalt.

8.2.2.2 Gassläcksystem

Ett gassläcksystem är utformat för att, vid aktivering, skapa en obrännbar atmosfär i hela utrymmet som skall skyddas, utrymmet inerteras. Ett gassläcksystem i kombination med ett detektorsystem med tidig aktivering, sådant som detektorsystemet diskuterat ovan, anses kunna vara ett effektivt sätt att vid ett tidigt skede släcka en brand i kablarna. För ett gassläcksystem krävs, med samma släckmedel, att syrehalten sänks mer än vid ett system med konstant inertering, detta beror på att det är en viss skillnad mellan släckning och förhindrande av brand. En befintlig brand medför ökad extern värme vilket därmed kräver att en större mängd släckmedel erfordras (Särdqvist, 2006). Det finns olika sorters släckmedel som kan användas för ett gassläcksystem, vilket också medför olika släckkoncentrationer. Vid brand i PVC- och PE-kablar ligger, med kvävgas som släckmedel, släckkoncentrationen på omkring 39,1 volymprocent kvävgas, detta betyder att syrehalten skall sänkas till ungefär 12,8 volymprocent (Moore & Yamada, 1998). Detta till skillnad från det kemiska släckmedlet Novec 1230 där det, enligt tillverkaren, räcker med en koncentration på ungefär 6 procent för att uppnå släckkoncentrationen (Dafo, 2012).

Då gassläcksystem, precis som inerteringssystem, är utformade för slutna utrymmen rekommenderas även i detta fall att kablarna byggs in i ett eget utrymme. Detta av samma anledningar som vid införandet av ett inerteringssystem samt för att kunna upprätthålla släckkoncentrationen under de 5-15 minuter som är den tid koncentrationen måste upprätthållas för att förhindra återantändning (Särdqvist, 2006).

Krav på utformning av gassläcksystem finns att tillgå i ett regelverk kallat SS-EN 15004 vilken är en europeisk standard för gassläcksystem utgiven år 2008 (Brandskyddsföreningen, 2009). Vid införandet av denna sorts släcksystem rekommenderas även i detta fall att ta kontakt med återförsäljare då mängden släckmedel, placering av munstycken, tryckavlastning och erfordrad plats beror på typ av släckmedel och geometrin av utrymmet som skall skyddas.

8.2.2.3.Sprinklersystem

Om inbyggnad av kablarna i ett eget utrymme ej är en möjlighet kan det istället installeras ett sprinklersystem. Då schaktet är så pass högt rekommenderas någon typ av nivåsprinklersystem eller motsvarande då det vid brand i den nedre delen av schaktet både medför lång aktiveringstid och lång transporttid av vattnet om sprinklerhuvuden endast placeras i toppen av schaktet. Aktiveringstemperaturerna för sprinklers kan ligga mellan 57-343 °C (Särdqvist, 2006), då en eventuell brand förhållandevis snabbt kan öka i intensitet rekommenderas att sprinklerhuvudenas aktiveringstemperaturer ligger på det lägre värdet, det vill säga 57 °C. För att få ett effektivt skydd mot brand skall det därför införas ett nivåsprinklersystem med strategiskt placerade sprinklerhuvuden och låga aktiveringstemperaturer.

Om systemet införs i kombination med strålningsskärmar anses skyddet kunna bli än bättre då en brand vid detta fall inte kommer påverka omgivande kabelsektioner, detta kan därmed medföra en markant reducering av återställningstiden.

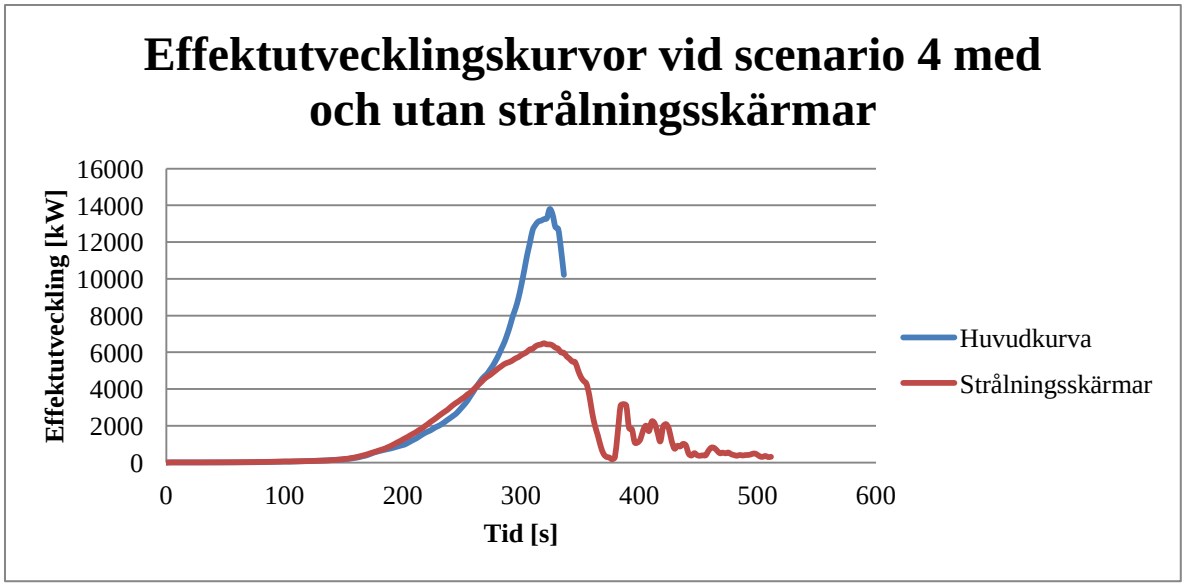
Nackdelen med denna typ av system är dock att det vid en brand just är PVC som brinner. Vilket nämnts tidigare bildas väteklorid vid brand i PVC-material som, förutom är hälsovådligt, även är otroligt korrosivt. Vätekloriden från branden förenar sig med vattenånga och kondenserar på i princip allt som brandgaserna kommer i kontakt med, detta medför att det är viktigt att efter en brand omgående påbörja sanering av det brandutsatta utrymmet för att begränsa skadorna (Palm, 2002). Därför rekommenderas att införa tydliga rutiner avseende saneringsarbete efter en brand i schaktet. För att även lösa detta problem kan systemet införas i kombination med brandmålning av kablarna alternativt att införa halogenfria flamskyddsmantlade kablar vilket medför att det inte produceras någon väteklorid vid brand i kablarna.

9 Bedömningar med införda åtgärder

I följande avsnitt görs grova bedömningar av hur införda åtgärder skulle kunna påverka ett eventuellt brandförlopp. Det görs bedömningar både av enskilda åtgärder samt åtgärder i kombination med varandra. Inledningsvis förs diskussion kring de passiva åtgärderna i form av strålningsskärmar, brandskyddsfärg och halogenfria kablar varpå det diskuteras kring de aktiva systemen samt kombinationer av de olika åtgärderna. Utrymning från schaktet förväntas kunna ske även då det ej installeras någon av de föreslagna åtgärderna, dock anses tidsmarginalen för säker utrymning kunna ökas markant vid införandet av diverse åtgärder. Vid samtliga bedömningar nedan utgås från det brandscenario som renderade i det allvarligaste förloppet och den största skadeomfattningen, det vill säga brandscenario 4.

9.1 Strålningsskärmar

Vid införandet av strålningsskärmar anses att en brand skall kunna hålla sig till den befintliga brandutsatta kabelsektionen vilket därmed, för de allvarligare brandscenarierna, kan reducera återställningstiden från storleksordningen månader till dygn. För att utvärdera hur införandet av strålningsskärmar skulle kunna påverka ett eventuellt brandförlopp utförs en simulering där strålningsskärmar placeras mellan samtliga kabelsektioner i schaktet. I simuleringen är strålningsskärmarna enkelt uppbyggda där dess ytor är definierade som inerta, det vill säga att de ej reagerar med omgivningen och har en konstant yttemperatur. Detta är självklart ej fallet i verkligheten då materialet kommer bli påverkat av branden och få en ökad yttemperatur. Simuleringen är dock endast ett grovt mått på vilken inverkan strålningsskärmar skulle kunna ha på ett eventuellt brandförlopp varför denna felkälla ej anses påverka helhetsbedömningen. Brandscenariot som simuleras är, som nämnt ovan, det scenario som renderade i det allvarligaste förloppet och den största skadeomfattningen, det vill säga brandscenario 4. I Figur 9.1 nedan åskådliggörs effektutvecklingskurvan från brandscenario 4 samt den effektutvecklingskurva som erhölls från simuleringen med strålningsskärmar.



Figur 9.1 Effektutvecklingskurvor vid brandscenario 4 med och utan strålningsskärmar

Vilket kan ses i figuren ovan reduceras effektutvecklingen till mindre än hälften vid införandet av strålningsskärmar. Vad gäller skadeomfattning och återställningstid kommer det endast vara den brandutsatta kabelstegen som kommer vara skadad av själva branden, då de andra kabelsektionerna ej blivit flam- och strålningspåverkade kommer dessa ej heller vara i behov av ersättning. Detta ger därmed ger en återställningstid på ungefär 1,5 dygn till skillnad från vid fallet utan strålningsskärmar

där återställningstiden ligger i storleksordningen månader. Dock produceras fortfarande en ansenlig mängd brandgaser vilket medför att en omgående och noga utförd sanering av hela schaktet fortfarande är nödvändig.

9.2 Brandskyddsfärg

Brandskyddsmålning av kablarna i schaktet medför, enligt tillverkaren, en fördröjd antändning och förlängd elektrisk funktion av kablar vid brand samt att både brandspridning och vätekloridproduktion från brinnande PVC förhindras (Elektroskandia, 2012). Testmetoderna som använts för att säkerställa detta är bland annat ISO 834, det vill säga standardbrandkurvan för en normal rumsbrand, samt IEC 60332-3 vilket enligt tidigare är testmetoden för kablar av den högsta brandklassen (Elektroskandia, 2012). Brandskyddsmålning av kablar medför alltså att även om en kabel skulle ta fyr ska spridning längs kabeln ej kunna ske och branden ska självslockna vid ett tidigt skede. Vad gäller skador på kablar vid en brand kommer det alltså endast vara den brandutsatta kabeln och möjligtvis de närmst omgivande kablarna som kommer vara påverkade och vara i behov av ersättning. Då en brand i en kabel förväntas bli så pass lindrig anses kablarna på närstående kabelsektioner ej bli nämnvärt påverkade, om detta ändå skulle ske medför detta att högst tre kabelsektioner kommer vara i behov av ersättning. Detta ger en återställningstid på mellan 1,5-4,5 dygn. För att eliminera problemet avseende påverkan på omgivande kabelsektioner är ett alternativ att i kombination med brandskyddsfärgen även införa de ovan nämnda strålningsskärmarna. Detta medför både att branden ej sprider sig i någon större omfattning längs den brandutsatta kabeln samt att omgivande kabelsektioner ej kommer vara i behov av kontroll och ersättning. Det kommer alltså vid detta fall vara högst en kabelstege som kommer vara i behov av ersättning vilket därmed ger en återställningstid på ungefär 1,5 dygn. Dessutom medför brandskyddsfärgen att vätekloridproduktionen förhindras vilket även betyder att saneringstiden kan reduceras avsevärt. Med avsaknaden av släcksystem kommer det dock ej ske någon aktiv släckning av branden vilket betyder att den kan pyra ett tag innan branden slutligen självslocknar, detta kommer dock troligtvis inte påverka skadeomfattningen eller återställningstiden. Även då brandskyddsfärgen skall medföra begränsad spridning anses det dock ej vara en omöjlighet att den i värsta fall ändå sprider sig uppåt och ökar i omfattning. Detta kan möjligtvis öka skadeomfattningen och därmed återställningstiden då den enda införda åtgärden är att brandskyddsmåla kablarna. Då brandskyddsfärgen kombineras med strålningsskärmar anses återställningstiden ej påverkas även då branden sprider sig längs den brandutsatta kabelsektionen. Införandet av ett aktivt släcksystem i kombination med föregående åtgärder kommer då endast medföra att branden slås ner vid ett tidigare skede.

9.3 Halogenfria kablar

Införandet av halogenfria kablar i hela schaktet medför en fördröjd antändning samt mindre total effektutveckling från de brinnande kablarna. Dessutom kommer det vid brand ej bildas väteklorid varför risken för korrosionsskador på elskåp och motsvarande i schaktet reduceras. Det finns även halogenfria kablar som är utrustade med en flamskyddad mantel, HFFR-mantel, vilka är uppförda att vara självslocknande och ej sprida brand. Med tanke på att denna sorts kablar ej består av PVC kommer det inte heller produceras någon väteklorid vid brand. Denna typ av mantel har alltså ungefär samma funktion som brandskyddsfärgen varför brandförloppet och därmed skadeomfattningen anses reduceras på ungefär samma sätt. Detta medför att det vid införandet av halogenfria flamskyddsmantlade kablar vid en brand kommer vara från en till högst tre kabelsektioner som kommer vara i behov av ersättning vilket ger en återställningstid på mellan ungefär 1,5-4,5 dygn. För att eliminera det möjliga problemet med brandpåverkan på omgivande kabelsektioner kan även denna åtgärd kombineras med strålningsskärmar vilket medför att branden inte kommer påverka omgivande kabelsektioner. Därmed kommer det vara högst 1 kabelstege som kommer vara i behov av ersättning

vilket ger en återställningstid på ungefär 1,5 dygn. Inte heller i detta fall kommer det produceras någon väteklorid vilket betyder att saneringstiden kan reduceras avsevärt. Precis som ovan gäller att det ej kommer ske någon aktiv släckning av branden, den kommer istället självslockna. Ett aktivt släcksystem kan därmed vara ett positivt inslag vid fallet då det endast installeras flamskyddsmantlade halogenfria kablar och en brand i värsta fall ändå ökar i omfattning. Vid fallet då ett aktivt släcksystem kombineras med flamskyddsmantlade halogenfria kablar tillsammans med strålningsskärmar kan branden slås ned vid ett tidigare skede, dock utan att ha någon inverkan på återställningstiden.

9.4 Detektorsystem

Införandet av det föreslagna detektorsystemet gäller främst vid det fall då kablarna separeras med trappsektionen och kombineras med gassläcksystemet. I annat fall anses införandet av denna detektortyp inte påverka skadeomfattningarna eller återställningstiderna nämnvärt vid något av scenarierna. Vid införandet av ett gassläcksystem anses detektionstiden bli en viktig parameter, ett samplande system har fördelen att det har en hög känslighet och kan ställas in att reagera på en viss partikelstorlek vilket därmed anses kunna medföra en tidigare detektion än vid fallet med punktdetektorer.

För ett samplande system anses att den längsta detektionstiden ligger på ungefär en minut, det ska dock tas i beaktning att detta endast är en grov uppskattning och att den verkliga detektionstiden kan skilja sig något.

9.5 Inerteringssystem

Vid införandet av ett inerteringssystem med konstant inertering hålls syrenivån på en så pass låg nivå att brand ej skall kunna uppstå. Därmed förväntas risken för skador på kablarna reduceras till noll vilket även eliminerar eventuell återställningstid. Vilket nämnts tidigare skall denna åtgärd kombineras med inbyggnad av kablarna i ett eget utrymme. Fördelen med ett inerteringssystem är att då det konstant är aktivt reduceras risken för utebliven aktivering hos både ett eventuellt detektor- och släcksystem (Nilsson & Van Hees, 2013). Vilket nämnts tidigare kan det dock uppkomma vissa problem då kablar av någon anledning skall ersättas, både med tanke på tillgänglig plats och på grund av den låga syrenivån. En annan svårighet med att införa denna typ av system är just bedömningen av den maximala syrenivån, denna beror till stor del på bränslet men kan behöva korrigeras bland annat på grund av geometri och förväntade temperaturökningar i elskåp och dylikt (Nilsson & Van Hees, 2013).

9.6 Gassläcksystem

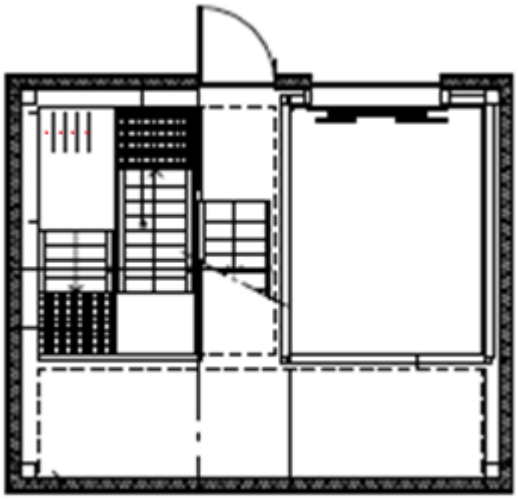
Vid införandet av denna åtgärd skall det ske inbyggnad av kablarna i ett eget utrymme, för att få en tidig aktivering skall åtgärden även kombineras med ett samplande detektorsystem. För gassläcksystem finns olika sorters släckmedel vilka därmed också har olika släckkoncentrationer. För inerta släckmedel, sådana som Argonite eller Inergen, gäller att 95 % av släckkoncentrationen skall uppnås efter maximalt 60 sekunder, för det kemiska släckmedlet Novec 1230 däremot gäller att 95 % av släckkoncentrationen skall uppnås på maximalt 10 sekunder[4]. Även då dessa släckmedel skall uppnå 95 % av sina släckkoncentrationer vid olika tidpunkter är själva tiden tills dess att en brand börjar slockna ungefär densamma, mellan 30-35 sekunder[4]. Med en aktiveringstid för det samplande detektorsystemet på en minut ger detta att branden, med något av ovanstående släckmedel, börjar slockna efter ungefär en och en halv minut, det vill säga efter ungefär 90-95 sekunder. Vid brandscenario 4 har branden efter denna tid tagit sig ungefär 1,5 meter upp längs kabelstegen, spridning har ej hunnit ske till någon annan kabelsektion. Då branden kan börja bekämpas är det alltså endast en kabelstege som hunnit bli brandutsatt. Med samma resonemang som tidigare avseende

[4] Mats Reis, Kidde, projektsäljare i västra Sverige, telefonsamtal, 2013-03-12

möjlig påverkan på omgivande kabelsektioner kommer det vara högst fyra kabelsektioner som kommer vara i behov av ersättning, två vertikala och två horisontella, vilket ger en återställningstid på lite under 4 dygn. Om detta system kombineras med strålningsskärmar kommer risken för påverkan på omgivande kabelsektioner förhindras varpå återställningstiden kan reduceras till 1,5 dygn. Huruvida strålningsskärmarna kan ha en negativ inverkan på möjligheten till släckmedlets spridning eller ej kan det inte sägas något om, det rekommenderas därmed att ta kontakt med leverantör för vidare bedömningar om hur systemet bör installeras.

9.7 Sprinklersystem

Införandet av ett sprinklersystem anses kunna utföras antingen med eller utan inbyggnad av kablarna i ett eget utrymme. För att systemet skall fungera optimalt är placeringarna av sprinklerhuvuden en viktig parameter. Då det är så pass högt i tak anses att det måste installeras någon typ av nivåsprinklersystem. Placeringarna av sprinklerhuvuden skall göras dels så att kablarnas hela ytor kan täckas in och dels så att en utlöst sprinkler ej kyler ner andra ännu icke utlösta sprinkler, det senare anses kunna lösas med inplacering av lämpliga skärmar eller dylikt. För att optimera placeringarna, täcka in samtliga kablar och följa gällande standarder avseende sprinklersystem rekommenderas att ta kontakt med leverantör. För att ändå göra en grov bedömning av dess möjliga effekt på ett brandförlopp utförs en simulering med sprinklerhuvuden placerade med 5 meters höjdskillnad och placering enligt Figur 9.1 nedan. Vid en verklig installation skall det dock monteras betydligt fler sprinklerhuvuden för att även täcka in de horisontella kabelsektionerna. Vid simuleringen är det närmsta sprinklerhuvudet placerat på maximalt avstånd från positionen där brandstart sker, det vill säga på avståndet 5 meter, detta för att utvärdera tiden till aktivering vid brandstart på den mest ogynnsamma positionen. Brandscenariot som studeras är, som tidigare nämnt, det scenario som gav det allvarligaste brandförloppet, det vill säga brandscenario 4.



Figur 9.1 Sprinklerhuvudenas placering vid simuleringen

Från simuleringen ges att den tidigaste tidpunkten för aktivering av systemet är efter ungefär 150 sekunder varpå resterande sprinklers som omgiver den brandutsatta kabelstegen aktiveras under nästkommande 2 minuter. Sprinklerhuvudet som aktiveras först är det som befinner sig närmst positionen för brandstart, det vill säga 5 meter ovan brandstartpositionen. Vid tidpunkten för sprinkleraktivering har branden tagit sig ungefär upp 5 meter längs kabelstegen och den totala effektutvecklingen ligger på ungefär 0,2 MW. Boverket (2012) anger allmänna råd avseende påverkan av automatiska släcksystem, det anges att för en brand med en effektutveckling mindre än 5 MW kan effektutvecklingen, med ett automatiskt sprinklersystem, reduceras enligt följande:

Efter sprinkleraktivering hålls effektutvecklingen konstant under en minut, därefter minskar effektutvecklingen till 1/3 av effekten vid tidpunkten för aktivering. Denna minskning sker under den påföljande minuten. Effektutvecklingen hålls sedan konstant på denna nivå (Boverket, 2012).

Detta innebär att brandspridning i stor mån kan förhindras vid tidpunkten för sprinkleraktivering och att effektutvecklingen ej kommer överstiga 0,2 MW. Vad gäller skadeomfattningen innebär detta att det endast kommer vara en kabelstege som blir brandutsatt, precis som tidigare anses dock att de omgivande kabelsektionerna kan ha blivit så pass flam- och strålningspåverkade att de kommer vara i behov av noga kontroll och helst ersättning. Detta medför en återställningstid på ungefär 4 dygn. Om åtgärden däremot kombineras med strålningsskärmar kommer det endast vara den brandutsatta kabelstegen som kommer vara i behov av ersättning. Även då denna kombination ger lika lång återställningstid som vid det fall då det endast installeras strålningsskärmar anses sprinklersystemet vara ett positivt inslag. Detta då både den totala effektutvecklingen och framförallt rökproduktionen reduceras markant vilket medför att eventuella korrosionsskador på omgivande konstruktion och komponenter i stor mån kan begränsas vilket även innebär att saneringsarbetet ej kommer bli lika omfattande. Innan sprinklersystemet aktiverats kommer det dock fortfarande hinna bildas en del väteklorid, som i kombination med vattnet från sprinklersystemet kan öka risken för korrosionsskador än mer. För att lösa detta problem kan ovanstående åtgärder kombineras med brandskyddsmålning av kablarna eller genom att ersätta kablarna med halogenfria flamskyddsmantlade kablar. Detta medför att en eventuell brand ej renderar i någon vätekloridproduktion samt att spridningen uppåt längs den brandutsatta kabelstegen begränsas. Då både brandskyddsfärgen och de halogenfria kablarna ska medföra begränsad spridning och att branden slocknar vid ett tidigt skede och då strålningsskärmarna förhindrar spridning till andra kabelsektioner kan dessa i kombination med sprinklersystemet tyckas vara att ta i. Sprinklersystemet anses dock kunna ses som en extra åtgärd för att säkerställa brandskyddet i schaktet.

Om placering av sprinklerhuvuden mellan alla kabelsektioner är praktiskt möjligt eller ej kan inte sägas något om. Därför rekommenderas att ta kontakt med leverantör som kan ge ytterligare information och råd avseende installation av denna sorts sprinklersystem.

9.8 Sammanfattning bedömning av åtgärder

I följande avsnitt ges en sammanfattning av de olika åtgärderna samt de olika kombinationerna av åtgärder som anses kunna införas i schaktet. Det ges för- och nackdelar för respektive åtgärd/åtgärdskombination samt hur de påverkar en eventuell återställningstid, detta åskådliggörs i Tabell 8.1 nedan. Precis som tidigare utgås från det scenario som renderade i störst skadeomfattning och allvarligaste brandförlopp, det vill säga brandscenario 4.

Tabell 9.1 Sammanfattning av föreslagna åtgärder för kabelschaktet

Åtgärd	Fördelar	Nackdelar	Påverkan på återställningstid
Strålningsskärmar	Brandpåverkan och brandspridning till omgivande kabelsektioner förhindras	Fortfarande hög effektutveckling och stor brandgas- och vätekloridproduktion	Från månader till ungefär 1,5 dygn
Brandskyddsfärg	Fördröjd antändning, förlängd elektrisk funktion, begränsad spridning, ingen vätekloridproduktion	Fortfarande risk för brandpåverkan på omgivande kabelsektioner	Från månader till mellan 1,5-4,5 dygn
Halogenfria flamskyddsmantlade kablar	Fördröjd antändning, lägre total effektutveckling, begränsad spridning, ingen vätekloridproduktion	Fortfarande risk för brandpåverkan på omgivande kabelsektioner	Från månader till mellan 1,5-4,5 dygn
Inertering	Brand ska ej kunna uppstå, reducerad risk för utebliven aktivering	Möjlig negativ påverkan på personal, möjliga problem vid ersättning av kablar, svårigheter att bedöma maximal syrenivå	Från månader till noll
Gassläcksystem & samplande detektorsystem	Snabb detektering och bekämpning av brand	Möjliga problem vid ersättning av kablar, risk för påverkan på omgivande kabelsektioner	Från månader till lite under 4 dygn
Sprinklersystem	Reducerar effektutvecklingsökningen vid ett tidigt skede	Produktion av väteklorid, påverkan på omgivande kabelsektioner, släcker inte branden	Från månader till ungefär 4 dygn
Strålningsskärmar & brandskyddsfärg	Brandpåverkan och brandspridning till omgivande kabelsektioner förhindras, fördröjd elektrisk funktion, begränsad spridning, ingen vätekloridproduktion	Ingen aktiv släckning av branden	Från månader till ungefär 1,5 dygn
Strålningsskärmar & halogenfria flamskyddsmantlade kablar	Brandpåverkan och brandspridning till omgivande kabelsektioner förhindras, fördröjd antändning, lägre	Ingen aktiv släckning av branden	Från månader till ungefär 1,5 dygn

	effektutveckling, begränsad spridning, ingen vätekloridproduktion		
Strålningsskärmar och gassläcksystem	Brandpåverkan och brandspridning till omgivande kabelsektioner förhindras, tidig bekämpning av branden	Möjliga problem vid ersättning av kablar	Från månader till ungefär 1,5 dygn
Strålningsskärmar & sprinklersystem	Brandspridning mellan kabelsektioner förhindras, reducering av effektutvecklingsökningen vid ett tidigt skede	Fortfarande produktion av väteklorid	Från månader till ungefär 1,5 dygn
Strålningsskärmar, brandskyddsfärg & sprinklersystem	Brandpåverkan och brandspridning till omgivande kabelsektioner förhindras, fördröjd elektrisk funktion, begränsad spridning, ingen vätekloridproduktion, reducering av effektutvecklingsökningen vid ett tidigt skede	Brandskyddet kan anses vara något överdimensionerat, sprinklersystemet medför ingen reducerad återställningstid.	Från månader till ungefär 1,5 dygn
Strålningsskärmar, halogenfria flamskyddsmantlade kablar & sprinklersystem	Brandpåverkan och brandspridning till omgivande kabelsektioner förhindras, fördröjd antändning, lägre effektutveckling, begränsad spridning, ingen vätekloridproduktion, reducering av effektutvecklingsökningen vid ett tidigt skede	Brandskyddet kan anses vara något överdimensionerat, sprinklersystemet medför ingen reducerad återställningstid.	Från månader till ungefär 1,5 dygn

Vilket ses i ovanstående tabell kan inerteringssystemet medföra att återställningstiden reduceras till noll, vilket självklart anses vara det bästa alternativet. Det finns dock ett antal parametrar att ta hänsyn till vid införandet av detta system, så som svårigheten att bedöma den maximala syrenivån, möjliga problem vid ersättning av kablar samt möjlig negativ inverkan på personal som vistas i utrymmet. För att hantera dessa problem rekommenderas att ta kontakt med tillverkare som kan ge utförligare information kring systemet samt förslag till lösningar på de identifierade problemen. Vid det fall då kablarna ej byggs in i ett eget utrymme rekommenderas att införa strålningsskärmar i kombination med antingen halogenfria flamskyddsmantlade kablar eller brandskyddsmålning av kablarna i schaktet. Dessa åtgärder anses kunna reducera återställningstiden till 1,5 dygn, strålningsskärmarna medför att brandspridning till omgivande kabelsektioner förhindras och brandskyddsfärgen eller de halogenfria kablarna skall medföra en begränsad spridning uppåt längs kablarna och samt att branden skall självslockna vid ett tidigt skede. Dessutom förhindras vätekloridproduktionen vilket medför ett underlättat saneringsarbete. För att säkerställa brandskyddet än mer och få en aktiv bekämpning av

branden istället för att låta den självslockna kan åtgärderna kombineras med ett sprinklersystem, detta kommer dock ej ha någon inverkan på återställningstiden.

10 Diskussion

Vid händelse av en brand i kabelschaktet kommer brandförloppet självklart se olika ut beroende på startposition samt vilken sorts kablar som är involverade i branden. För att kunna göra utvärderingar av eventuella brandförlopp har under arbetets gång ett antal förenklingar och antaganden varit nödvändiga att göra vilket därmed också föranlett ett antal osäkerheter. I följande avsnitt diskuteras därmed ett urval av dessa osäkerheter och dess möjliga inverkan på resultaten för att vidare diskutera kring resultaten i dess helhet samt återkoppla till de tidigare angivna frågeställningarna.

10.1 Litteraturstudie

Litteraturstudien utfördes med syfte att ta reda på vilka modeller avseende kabelbrand som finns att tillgå i dagens läge, vidare hur dessa kan tillämpas till kabelschaktet samt vad som kan göras för att minska osäkerheterna som förekommer i dessa modeller. Vid analys av skadekriterier hos kablar inhämtades data från olika rapporter där tester utförts med stora variationer av testmetoder, kablar, apparatur och så vidare. Resultaten från de olika rapporterna anses därmed gälla för den befintliga kabeln vid den befintliga försöksuppställningen vilket medför svårigheter att dra några generella slutsatser avseende skadekriterier hos kablar. Dessutom har kablarna vid huvuddelen av dessa rapporter även delats in i undergrupper benämnda klassade respektive oklassade kablar vilket försvårar bedömningarna ytterligare. Då kabeluppbyggnaden identifierades att ha den största inverkan på vid vilka inre respektive yttre temperaturer kablar kortsluter och/eller antänder kan det vara stora skillnader i resultat rapporter emellan även då kablarna är indelade i samma undergrupp. Detta visar sig tydligt i rapporten av Murphy (2004) där det drogs slutsatsen att oklassade kablar kortsluter vid inre temperaturer mellan 138-460 °C. Därmed föreligger osäkerheter avseende vilken påverkan på skadekriterierna olika material inom samma undergrupp har. Den begränsade mängden testdata, då testerna utförts med en parameter i taget, strålnings- eller temperaturpåverkan, samt då de utförts på endast en kabel i taget medför ytterligare svårigheter då det ej tidigare undersökts hur dessa parametrar skulle kunna påverka skadekriterierna.

Skadekriterierna valdes därför med utgångspunkt från de sämre kablarna då dessa kommer vara de begränsande faktorerna. Då det finns så pass många olika kablar i schaktet och då många av dessa troligtvis, vid en riktig brand, ej kommer fallera vid de definierade temperaturerna får bedömningarna avseende kabelfallering ses som konservativa. Detta gäller framförallt vid brandpåverkan på halogenfria kablar där resultat från diverse försök påvisat att denna sorts kablar kan stå emot ungefär 100 °C högre temperaturer än vad skadekriterierna är definierade som. Inom detta område anses det alltså finnas många parametrar som kräver ytterligare och mer utförliga studier för att kunna dra mer precisa slutsatser samt minska osäkerheterna avseende skadekriterier hos olika sorters kablar. Dessa studier innefattar bland annat att utföra undersökningar av hur olika sorters mantel-, fyllnads- och isoleringsmaterial påverkar skadekriterierna samt hur skadekriterierna påverkas vid inverkan av både termisk strålning och temperaturhöjning.

Vid undersökningar av tillgängliga modeller för brandspridning inhämtades data i huvudsak från FIPEC-projektets tester där det finns ett stort antal kvantitativa mätresultat från en stor mängd kablar vid olika konfigurationer och kabelavstånd att tillgå. Att kablarna i schaktet delades upp i två huvudgrupper, kraft- och övriga kablar, medför självklart begränsningar. Men då det finns en så pass stor mängd olika kablar i schaktet, som dessutom är placerade i olika konfigurationer, med olika inbördes avstånd, olika stora buntar med mera ansågs att det skulle vara en omöjlighet att modellera effektutvecklingskurvor för alla olika kablar i schaktet på ett korrekt sätt. Den stora variationen av kablar medför självklart även stora variationer i brandbeteende, vid valet av vilka kablar som skulle modelleras efter var målet därför att välja de kablar som anses vara de vanligaste i schaktet i

kombination med de som anses rendera i de allvarligaste brandförloppen. För både kraft- och övriga kablar identifierades de vanligaste kablarna i schaktet både ha mantel och isolering av PVC, då detta kabelmaterial även identifierades att rendera i de allvarligaste brandförloppen kunde båda ovanstående mål uppnås. Att välja de sämre kablarna i schaktet som referenskablar medförde också konservativa värden och att resultaten avseende brandspridning därmed anses gälla vid de värsta möjliga fallen.

Då de valda referenskablarna kopplades till kablar använda vid FIPEC-projektets tester vad det nödvändigt att göra en modifiering av effektutvecklingskurvan för kraftkablarna då isoleringsmaterialet skilde kabelsorterna åt. Då bedömningen av hur stor effekt på brandförloppet denna parameter skulle kunna ha endast utfördes genom egenhändiga bedömningar är denna effektutvecklingskurva förknippad med stora osäkerheter. Modifieringen anses dock vara utförd på ett sådant sätt att den är något konservativ varför det, på grund av denna parameter, ej anses föreligga någon risk att resultat avseende brandspridning i schaktet underskattas. Vid applicering till kabelschaktet tillkommer ytterligare osäkerheter, osäkerheter som i största möjliga mån har hanterats under arbetes gång. Då det valts att ej hantera de parametrar som medför att ett eventuellt brandförlopp i kabelschaktet överskattas kommer de erhållna resultaten från kabelschaktet vara konservativa, och då det föreligger så pass många osäkerheter vid appliceringen till kabelschaktet finns risken att resultaten kan vara något för konservativa. Det valdes dock att ändå gå tillväga på detta sätt varför erhållna resultat får ses gälla för de absolut värsta fallen. Vad gäller brandspridning hos kablar anses det även inom detta område finnas en hel del parametrar att utföra vidare studier på för att kunna producera mer adekvata resultat avseende brand i kablar. Detta innefattar bland annat utförligare analyser av vilka effekter mantel-, fyllnads- och isoleringsmaterialet kan ha på kabelbränder, mer genomgående analyser av hur olika infallande strålningsnivåer påverkar både tillväxthastigheter och maximala effekter hos kabelbränder samt hur brandförloppen påverkas av den geometriska konfigurationen.

10.2 FDS

Vid FDS-simuleringarna användes, vid anpassning av effektutvecklingskurvor från FIPEC-projektet, cellstorlekarna 0,03 m i närheten av kablarna och 0,04 m i resten av kammaren. Dessa cellstorlekar bedöms vara fina nog att inte missa några avgörande detaljer. Vid simuleringarna i kabelschaktet användes cellstorlekarna 0,05 m i närheten av kablarna och 0,10 m i resten av kabelschaktet. Även dessa cellstorlekar bedöms vara tillräckligt fina för att ge adekvata resultat, det kan dock i värsta fall innebära att extremvärden underskattas då FDS beräknar medelvärden för varje kontrollvolym. Men då det vid större delen av brandscenarierna handlar om förhållandevis höga effektutvecklingar anses denna potentiella felkälla spela mindre roll i det stora hela.

Vid kalibreringen av kabelparametrarna för de två olika kabelsorterna frångicks från tidigare definierad antändningstemperatur hos kablarna, de antändningstemperaturer som bestämdes utifrån FDS-simuleringarna anses dock vara bättre approximationer av hur kablarna i schaktet beter sig då dessa är framtagna med hjälp av tester av kablar som finns eller är lika de som finns i schaktet. Dessutom erhölls olika antändningstemperaturer för kraft- respektive övriga kablar till skillnad från den tidigare definitionen av en och samma antändningstemperatur för alla kablar i schaktet. Då det var en markant skillnad mellan antändningstemperaturerna för de två olika kabelsorterna anses en stor felkälla därmed ha undvikits.

Vid denna kalibrering fanns det självklart risken att de framtagna kabelparametrarna endast skulle gälla för det befintliga testet, det vill säga FIPEC-projektets fullskaleförsök. Därför utfördes ytterligare simuleringar enligt FIPEC-projektets storskaleförsök för att kontrollera huruvida det erhölls giltiga resultat även för denna försöksuppställning. Vid jämförelse av de erhållna effektutvecklingskurvorna med uppmätta maximala effektutvecklingar och FIGRA-värden från FIPEC-projektet gjordes

bedömningen att de framtagna kabelparametrarna kan anses gälla även för andra försöksuppställningar varför även resultaten från simuleringarna i kabelschaktet anses visa på rimliga resultat för kablarna i fråga.

Vad gäller erhållna resultat avseende inre temperaturer hos kablarna skall det tas i beaktning att beräkningsmodellen som används i programmet antar att kabeln endast består av ett material, att den är helt omringad av värmekällan samt att de termiska egenskaperna antas vara homogena och oberoende av temperaturen. Detta medför vissa osäkerheter då erhållna värden kan bli något konservativa, men då tidigare försök med olika sorters PVC-material visat på rimliga resultat för ett större spann av kablar anses att erhållna resultat ändå vara rimliga riktvärden. Dessutom skedde antändning av kablarna innan dess att deras inre falleringstemperaturer uppnåddes vid alla scenarier varför denna parameter ej påverkar skadeomfattningen. Om det däremot skulle ha skett en underskattning av den inre temperaturen hos kablarna anses inte heller detta påverka skadeomfattningen i någon större grad då bedömningarna av skadorna i schaktet är så pass konservativa.

Även då det i stor mån strävats efter att hantera de osäkerheter som tillkommit då brandscenarierna simulerats i FDS är det dock viktigt att ta i beaktning att det fortfarande råder en del osäkerheter kring simuleringarna, detta då FDS använder sig av modeller i sina beräkningar. Vid skapandet av dessa modeller bör självklart visionen vara att den till 100 % ska stämma överens med verkligheten, detta är dock ej praktiskt möjligt varför modellen är skapad för att så långt som möjligt efterlikna verkligheten. FDS anses ändå vara den bästa och mest giltiga metoden för att utvärdera ett brandförlopp i kabelschaktet både på grund av den omfattande geometrin samt då programmet bedöms kunna hantera fler osäkerheter än andra tillgängliga modeller, detta finns diskuterat i tidigare kapitel.

10.3 Resultat

Rimligheten av de resultat som erhålls från beräkningar och simuleringar kan alltid diskuteras då det är en omöjlighet att få resultat som till 100 % stämmer överens med verkligheten. Alla ingående parametrar i både beräkningar och simuleringar är därför valda med målet att erhålla så troliga värsta scenarion som möjligt. Arbetssättet med att välja så pass konservativa värden på de ingående parametrarna har skett med målet att en underskattning av riskbilden skulle undvikas, samtidigt som att undvika en överdimensionering av brandskyddet.

I scenarioanalysen valdes de brandscenarion som ansågs vara de mest utmanande och som skulle kunna ge de värsta möjliga konsekvenserna för kabelschaktet. De valdes också med målet att täcka in större delen av möjliga brandscenarion i kabelschaktet. Detta resulterade i fem olika brandscenarion, ett med brandstart på vardera vertikal kabelstege samt ett med brandstart på en horisontell kabelsektion.

För att fånga in osäkerheterna i analyserna av brandscenarierna utfördes en känslighetsanalys av ingående kabelparametrar. Denna visade på att antändningstemperaturerna hos kablarna hade den överlägset största inverkan på resultaten varför denna parameter varierades kring dess ursprungsvärden vid simuleringarna i kabelschaktet. Dock uppkom vid detta stadium frågetecken kring om en reducering av antändningstemperaturerna för övriga kablar verkligen skulle ge rimliga resultat då antändningstemperaturerna redan ansågs som konservativa. Detta visade sig för samtliga scenarion med lägre antändningstemperaturer då branden spridit sig till en kabelsektion med övriga kablar. Beslutet att denna antändningstemperatur var för låg för att kunna ge några rimliga resultat grundar sig främst på den stora skillnaden i både skadeomfattning och återställningstider, en ökning av återställningstiden från 9 dygn till storleksordningen månader vid en reducering av

antändningstemperaturen med 20 % anses inte vara rimligt. Men även då dessa fall bortses från anses det ej finnas någon risk för att skadeomfattningen i schaktet är underskattad, detta då huvuddelen av de ingående parametrarna redan är så pass konservativt valda.

Resultaten av simuleringarna visar på att brandens startposition i stor mån är avgörande om återställningstiderna resulterar i storleksordningen dygn eller månader. Det ses att desto närmre den inre väggen brandstart sker, desto värre blir också scenariot. Detta härleds dels till den brandutsatta kabelsektionens ingående kablar samt dess omgivning. Som exempel ses att den kabelstege som är placerad närmst den inre väggen endast innefattar övriga kablar och omges av kabelsektioner med i huvudsak övriga kablar, då dessa kablar har de lägsta antändningstemperaturerna medför detta även de allvarligaste scenarierna. För brandscenario 1-3 renderade bränderna i återställningstider på ungefär 3-9 dygn, detta borträknat scenario 2 och 3 med lägre antändningstemperaturer då dessa resultat anses som orimliga. För scenario 4 och 5 renderade bränderna i återställningstider i storleksordningen månader oavsett antändningstemperatur. Bedömningen av skadans storlek, som de fortsatta åtgärdsförslagen baserades på, gjordes utifrån brandscenario 4. Detta på grund av att brandscenario 4 gav de allvarligaste konsekvenserna för kablarna i schaktet, detta även vid fallet då antändningstemperaturen ökades med 20 %.

Avslutningsvis kan sägas att med tanke på de antaganden och osäkerheter som förekommer i rapporten, i kombination med de väl tilltagna bedömningarna avseende skadeomfattningar får de erhållna resultaten ses som värden för de värsta möjliga scenarierna. Resultaten anses ändå ge ett underlag för hur omfattande skador ett eventuellt brandscenario skulle kunna medföra. Även då PVC är ett ämne som är svårantändligt och brinner dåligt kan det ej uteslutas att en omfattande brand kan uppstå i kabelschaktet.

10.4 Åtgärder

Vid utformningen av åtgärder har ett antal förslag presenterats och vidare validerats, både var och ett för sig samt i kombination med varandra, sammanlagt presenteras 12 stycken åtgärder eller åtgärdskombinationer. Det ges för- och nackdelar för respektive åtgärd och åtgärdskombination samt hur de påverkar återställningstiderna, detta med utgångspunkt från brandscenario 4 då detta renderade i de allvarligaste konsekvenserna för kabelschaktet. Det ska noteras att åtgärderna är framtagna utifrån egna tankar och att det givetvis finns fler möjliga åtgärder och kombinationer av åtgärder än de 12 som presenterats. De åtgärder som presenteras anses dock ändå visa en stor del av de möjligheter som finns för att skydda kabelschaktet och vad som skulle kunna göras för att uppnå ett tillfredsställande brandskydd. Kostnaderna för de olika föreslagna åtgärderna har ej uppskattats, detta på grund av den bristande erfarenheten och kunskapen hos författaren kring vad dessa åtgärder kostar att införa. Det åligger därför SSAB att bedöma huruvida kostnaderna för de olika åtgärderna och åtgärdskombinationerna är rimliga eller ej.

11 Slutsatser

I nedanstående avsnitt återkopplas till tidigare angivna frågeställningar genom korta sammanfattningar av erhållna resultat från arbetet.

Hur väl kan dagens modeller avseende kabelbrand tillämpas för denna applikation?

Det finns förhållandevis mycket litteratur avseende kortslutning och antändning av kablar, både vad gäller temperatur- och strålningspåverkan. Dock är det en så pass stor variation av bland annat testmetoder och kabelsorter som används vilket medför stora skillnader i resultat, resultaten får därmed ses gälla för den befintliga kabeln vid den befintliga försöksuppställningen vilket gör att det ej direkt kan appliceras till kablarna i schaktet. Dessutom är större delen av testerna i litteraturen utförda genom att utsätta en kabel i taget för termisk strålning eller förhöjd temperatur vilket så ej kommer vara fallet vid en brand i schaktet. Det faktum att kablarna från testerna i litteraturen ofta delats upp i två undergrupper, klassade respektive oklassade, medför ytterligare problem då det är stora spann i resultat för kablar av samma undergrupp, till exempel antändningstemperaturerna för oklassade kablar som kunde skilja sig drygt 300 °C. Då kablarnas uppbyggnader i rapporterna ofta ej definieras ytterligare än att ange vilken undergrupp de tillhör är det svårt att bedöma ungefär var i temperaturintervallen kablarna i schaktet borde befinna sig, detta medför att det måste göras konservativa val för att inte riskera att underskatta skadorna i schaktet.

Vad gäller strålningspåverkan på kablar finns det en modell framtagen av Frank & Moeini (1986) som indikerar att det finns en kritisk strålningsnivå vid vilken en kabel kan utsättas för under en obegränsad tid. Denna modell är dock framtagen för att användas främst vid beräkningar av radioaktiv strålning. Vid jämförelse av denna modell med riktiga försök utförda av Andersson & Van Hees (2000) samt Andersson & Persson (2001) drogs slutsatserna att spridningen i resultat var så pass stora att ekvationen ej skulle kunna komma till någon praktisk användning för applikationen i fråga.

Även resultat avseende strålningspåverkan inhämtade från litteraturen anses ge allt för stora osäkerheter för att kunna appliceras till applikationen. Detta främst på grund av att den kritiska strålningsnivån anger den strålningsnivå en kabel skall kunna stå emot under obegränsad tid, om strålningsnivån överstiger detta värde kommer tiden till skada vara en viktig parameter. Vid jämförelser rapporter emellan anses det vid högre strålningsnivåer vara allt för stora tidsskillnader för att det skall kunna dras några giltiga slutsatser. Dessutom kommer strålningsnivån vid en riktig brand inte ligga på ett konstant värde vilket ökar osäkerheterna ytterligare då tiden till skada kommer minska med högre infallande strålningsnivå.

Vad gäller brandspridning i kablar anses att en kabels brandspridningsklass ej kan användas för att förutse hur brandspridningen kommer se ut. Detta då brandspridningsklassen ej ger några kvantitativa resultat utan delar endast in kablar i godkända eller icke godkända med utgångspunkt från specifika testutföranden. Därmed kan detta ej heller appliceras till kabelschaktet. Från FIPEC-projektet däremot finns det en stor mängd kvantitativa mätresultat för ett stort spann av kablar från försök vid olika konfigurationer, kabelavstånd, brännareffekter med mera. Dessutom är testerna utförda på samma sätt vilket medför att inbördes jämförelser av olika sorters kablars brandbeteende därmed är möjligt. Dock är testerna utförda med en kabelstege i taget, med en begränsad kabellängd samt under en begränsad tid vilket medför att direkta appliceringar av de erhållna resultaten till kablarna i schaktet ej kan utföras. Dock kan det utifrån dessa resultat dras slutsatser om diverse kabelparametrar för att vidare kunna ändra på kabelkonfigurationerna och ändå få adekvata resultat avseende brandspridning längs kablarna.

Sammanfattningsvis kan sägas att det generellt är svårt att direkt tillämpa resultat från tidigare försök till applikationer med andra kabelkonfigurationer och geometrier då resultat från huvuddelen av tidigare försök får anses gälla för det befintliga försöket vid den befintliga konfigurationen. För att kunna göra adekvata tillämpningar anses att diverse kabelparametrar, sådana som antändningstemperatur, massavbrinning och effektutveckling per areaenhet, för de berörda kablarna måste identifieras för att vidare kunna få giltiga resultat vid andra typer av konfigurationer.

Vad kan göras för att minska osäkerheterna i dagens modeller?
Inom området kabelbrand finns det många parametrar som föreslås att undersöka vid framtida forskning för att därmed kunna göra bättre appliceringar av erhållna resultat till verkliga situationer. Detta innefattar bland annat att utföra en genomgående analys av ett stort antal kablar där det utförs både strålnings- och temperaturmätningar vid ett och samma försök och där tider till kortslutning och antändning vid flera olika strålningsnivåer utvärderas. Denna typ av tester skall även utföras med kabelstegar monterade bredvid varandra för att därmed kunna dra slutsatser om hur denna parameter skulle kunna påverka brandförloppen.

Det rekommenderas att utföra mer omfattande analyser av vilka effekter en kabels mantel-, isolerings- och fyllnadsmaterial har på både skadekriterierna och brandförloppet för att därmed kunna utvärdera vilka parametrar som har störst inverkan. För att även kunna dra slutsatser avseende maximala effektutvecklingar rekommenderas att utföra tester både med längre kabelprover och under längre tidsintervall.

Vid definitionen av en kabels brandspridningsklass rekommenderas att även inkludera kvantitativa mätresultat för att därmed kunna göra inbördes jämförelser av olika sorters kabelsorter och för att få en bättre uppfattning om hur kablarna antänds och underhåller brand.

Avslutningsvis rekommenderas även att utföra fler studier avseende horisontellt monterade kabelsektioner för att kunna göra bättre utvärderingar av hur denna typ av brandförlopp ser ut och då det i dagsläget finns få undersökningar som behandlar detta.

Vad finns det för möjliga brandscenarion och vad kan vara troliga tändkällor?
Då det i kabelschaktet ej finns något annat brännbart material än kablarna anses att en möjlig brand kommer starta i någon eller några kablar. Den vanligaste orsaken till brand i kablar är på grund av elektriska fel sådana som kortslutning eller liknande. De troligaste tändkällorna anses därmed vara någon typ av elektrisk fel i kablarna. Detta betyder att en brand anses kunna utbryta i princip var som helst på vilken kabel som helst. Då kabelschaktet ej är tillgängligt för obehöriga anses risken för en anlagd brand vara liten, denna möjliga tändkälla kan dock ej helt elimineras.

Hur stora blir skadorna på kablarna i händelse av brand?
Skadeomfattningen i schaktet i händelse av brand beror till stor del på var branden startar. Det ses att desto närmre den inre väggen i kabelschaktet brandstart sker desto allvarligare blir också scenariot. Detta härleds till den brandutsatta kabelsektionens ingående kablar samt dess omgivning, på de kabelsektioner som finns längs den inre väggen finns i huvudsak övriga kablar, då dessa kablar har de lägsta antändningstemperaturerna ger detta också de allvarligaste scenarierna. Skadorna på kablarna i schaktet går från mellan tre och sex stycken kabelsektioner vid brandscenario 1 till ungefär 19 stycken vid brandscenario 4. Detta ger återställningstider på mellan 3-5,5 dygn till storleksordningen månader.

Hur påverkas utrymningssäkerheten i kabelschaktet i händelse av brand?
Vid observerade brandscenarion beräknas att kritiska nivåer avseende utrymningssäkerheten uppnås som tidigast efter 170 sekunder varpå en eventuell utrymning från schaktet beräknas vara genomförd efter högst 109 sekunder, detta betyder att utrymning anses kunna vara möjlig vid samtliga brandscenarion.

Vilka möjligheter finns att skydda detta utrymme?
Det finns många olika möjligheter att, vid en eventuell brand, begränsa det negativa händelseförloppet eller till och med förhindra att en brand överhuvudtaget uppkommer, detta innefattar både aktiva och passiva system. I arbetet har det föreslagits 12 olika åtgärder och åtgärdskombinationer, givetvis finns det fler möjligheter att skydda detta utrymme men de föreslagna åtgärderna anses ändå kunna representera en stor del av vad som skulle kunna göras för att skydda utrymmet. Åtgärdsförslagen innefattar bland annat inerteringssystem, gassläcksystem, strålningsskärmar och brandskyddsfärg. Utförligare beskrivningar av åtgärder, dess för- och nackdelar samt dess inverkan på ett eventuellt brandförlopp finns beskrivet i kapitel 8 och 9.

Hur stora blir skadorna på kablarna i händelse av brand med föreslagna åtgärder?
Införandet av ett inerteringssystem medför att en brand överhuvudtaget ej kan uppkomma vilket reducerar skadeomfattningen och därmed även återställningstiden till noll. Resterande åtgärder och åtgärdskombinationer medför att kabelskadorna kan reduceras från ungefär 19 kabelsektioner, vid brandscenario 4, till mellan 1-3 kabelsektioner. Detta medför återställningstider på mellan 1,5-4,5 dygn.

I första hand rekommenderas att införa ett inerteringssystem, vilket eliminerar eventuell återställningstid, och i andra hand rekommenderas att införa strålningsskärmar i kombination med antingen halogenfria flamskyddsmålade kablar eller brandskyddsmålning av kablarna i schaktet, dessa åtgärdskombinationer ger en återställningstid på ungefär 1,5 dygn.

Hur påverkas utrymningssäkerheten i kabelschaktet med föreslagna åtgärder?
Utrymning från kabelschaktet bedöms kunna vara möjlig att utföra även då inga föreslagna åtgärder installeras. Vid införandet av någon eller några av de föreslagna åtgärderna kommer dock tidsmarginalen för säker utrymning ökas vilket anses vara ett positivt inslag.

Litteraturförteckning

Addison Tech. (n d). *Fire Performance Standard.* (Elektronisk). Tillgänglig: < http://www.addison-tech.com/cabling-system-catalog-en-download/addison/Fiber%20performance%20standard.pdf> (2012-09-05)

AFS. (2003). *Arbete i slutet utrymme.* (Elektronisk). Tillgänglig: <http://www.av.se/dokument/afs/AFS1993_03.pdf> (2012-12-06)

AGA. (2012). *Inertering.* (Elektronisk). Tillgänglig: <http://www.aga.se/international/web/lg/se/like35agase.nsf/docbyalias/nav_inerting> (2012-11-09)

Andersson, P. & Persson, B. (2001). *Performance of Cables Subjected to Elevated Temperatures.* SP Rapport 2001:36. Borås: SP.

Andersson, P. & Van Hees, P. (2000). *Performance of Cables Subject to Thermal Radiation.*. SP Rapport 2000:24. Borås: SP.

Andersson, P. & Van Hees, P. (2005). *Performance of Cables Subjected to Elevated Temperatures.* Fire Safety Science - Proceedings of the Eighth International Symposium. ss. 1121-1132.

ARAC, Aviation Rulemaking Advisory Committee. (2001). *Fuel Tank Inerting Harmonization Working Group - Final report*. (Elektronisk). Tillgänglig: <http://www.fire.tc.faa.gov/pdf/systems/2001ARACInertingWG.pdf> (2012-11-09).

Axelsson, J., Van Hees, P. & Blomqvist, P. (2002). *Cable fire in difficulty accessible areas.* SP Rapport 2002:12. Borås: SP.

Babrauskas, V. (2005). *Mechanisms and Modes for Ignition of Low-Voltage PVC Wires, Cables, and Cords.* (Elektronisk). Tillgänglig: <http://www.doctorfire.com/PVCwiring.pdf> (2012-10-20)

Babrauskas, V., Peacock, R.D., Braun, E., Bukowski, R.W. & Jones, W.W. (1991). *Fire performance of wire and cable: Reaction-to-Fire Tests-A Critical Review of the Existing Methods and of New Concepts.* Gaithersburg: NIST.

Bengtsson, L-G. (2001). *Inomhusbrand.*. Karlstad: Räddningsverket

Beyler, C. (2002). *Handbook of Fire Protection Engineering, 3rd Edition, Section Two, Chapter 7.* Quincy, MA: NFPA.

Boverket. (2006). *Utrymningsdimensionering.* Boverket.

Boverket. (2011). *Boverkets Allmänna Råd om Analytisk Dimensionering av Byggnaders Brandskydd, BFS 2011:27, BBRAD 1.* Boverket.

Brandskyddsföreningen. (2009). *Gassläcksystem.* (Elektronisk). Tillgänglig: <http://www.brandskyddsforeningen.se/pa-arbetet/valj-omrade-har/regler-och-normer/brandlarm/sprinkler/gasslacksystem> (2012-11-15)

Brandteknik. (2007). *VBR022 Brandkemi och Explosioner, Formel- och Tabellsamling.* Lund: Avdelningen för Brandteknik och Riskhantering, Lunds Tekniska Högskola.

Breulet, H. & Steenhuizen, T. (2005). *Fire testing of cables: Comparison of SBI with FIPEC/Europacable tests.* Polymer Degradation and Stability vol. 88. ss. 150-158.

Carslaw, H.S. & Jaeger, J.C. (1959). *Conduction of Heat in Solids, Second Edition, Appendix IV Table III.* Oxford: Clarendon Press.

CSE Cables. (n d). *Voltage Definition*. (Elektronisk). Tillgänglig: <http://www.csecables.com/nexans/voltage-definition.asp> (2012-09-04)

Dafo. (2012). *Gassläcksystem för rumsskydd.* (Elektronisk). Tillgänglig: <http://www.dafo.se/sv/products/fasta_slackanlaggningar/gasslacksystem> (2012-11-15)

Dervos, C.T. & Vassiliou, P. (1998). *Effects of Fire Combustion Products on Degradation of Cable Insulation.* Journal of Fire Sciences vol. 16. ss. 206-221.

Doe, J.E. (1987). *The Combustion Toxicology of Polyvinylchloride revisited.* Journal of Fire Sciences vol. 5. ss. 228-247.

Draka. (2012a). *Kraftkablar 1kV*. (Elektronisk). Tillgänglig: <http://www.draka.se/Startsida/Produkter/Kraftkablar1kV.aspx> (2012-09-04)

Draka. (2012b). *Kraftkablar 1 kV AKKJ 0,6/1 kV*. (Elektronisk). Tillgänglig: <http://www.draka.se/Portals/0/Produkter/Pdf/AKKJ_0_61_kV.pdf> (2012-09-04)

Draka. (2012c). *Kraftkablar 12 kV*. (Elektronisk). Tillgänglig: <http://www.draka.se/Startsida/Produkter/Kraftkablar12kV.aspx> (2012-09-04)

Draka. (2012d). *Installationskabel*. (Elektronisk). Tillgänglig: <http://www.draka.se/Startsida/Produkter/Installationskabel.aspx?&&&&> (2012-09-15)

Draka. (2012e). *Kraftstyrkablar - FKFR 300/500 V*. (Elektronisk). Tillgänglig: <http://www.draka.se/Startsida/Produkter/Kraftstyrkablar.aspx?productid=91144> (2012-09-05)

Drysdale, D. (1999). *An Introduction to Fire Dynamics.* West Sussex: John Wiley & Sons.

Elektroskandia. (2012). *FS-Universal brandskyddsfärg för kabel.* (Elektronisk). Tillgänglig: <http://www4.elektroskandia.se/KatalogKategori.aspx?rid=38667> (2012-12-03)

Frank. M. & Moieni, P. (1986). *A Probalistic Model for Flammable Pool Fire Damage in Nuclear Power Plants.* Reliability Engineering 16. ss. 129-152.

Grayson, S.J., Van Hees, P., Vercellotti, U., Breulet, H. & Green, A. (2000). *Fire Performance of Electric Cables - New test Methods and Measurement Techniques.* Greenwich, London: Interscience Communication.

Gyppaz, F. (2012). *Flame Spread Behaviour of Electric Cable: Round-robin characterization of the IEC/EN 60332-1 tests.* Journal of Fire Sciences vol. 30. ss. 404-412.

Göransson, U. (1992). *Brandförlopp i kabelstråk.*. SP Rapport 1992:20. Borås: SP.

Hasegawa, H.K. (1990). *Characterization and toxicity of smoke.* Philadelphia: American Society of Testing and Materials.

Houwire. (2004). *Cable Flame Tests.* (Elektronisk). Tillgänglig: <http://www.houwire.com/pdf/cable_flame.pdf> (2012-09-20)

Huggett, C. & Levin, B.C. (1987). *Toxicity of the Pyrolysis and Combustion Products of Poly (Vinyl Chlorides): A Literature Assessment.* Fire and Materials vol. 11. ss. 131-142.

Hull, T.R., Krzysztof, L., Pezzani, M. & Messa, S. (2008). *Comparsion of toxic product yields of burning cables in bench and large-scale experiments.* Fire Safety Journal vol. 43. ss. 140-150.

Höst, M., Regnell, B. & Runeson, P. (2006). *Att genomföra examensarbete.* Lund: Studentlitteratur.

Infared Services Inc. (2000). *Emissivity Values for Common Materials.* (Elektronisk). Tillgänglig: <http://www.infrared-thermography.com/material-1.htm> (2012-10-29)

Jönsson, R., Bengtsson, S. & Frantzich, H. (red) (2005). *Brandskyddshandboken - En Handbok för Projektering av Brandskydd i Byggnader*. Lund: Avdelningen för Brandteknik och Riskhantering, Lunds Tekniska Högskola.

Karlsson, B. & Quintiere, J.G. (2000). *Enclosure Fire Dynamics*. Florida: CRC Press.

Konsultsupporten. (2007). *Kabelbeteckningar*. (Elektronisk). Tillgänglig: <http://www.konsultsupporten.com/PDF/Kabelbeteckningar-2007.pdf> (2012-09-04)

Lappusa. (2012). *UNITRONIC LiYCY*. (Elektronisk). Tillgänglig: <http://www.lappusa.com/Spec_Template3.asp?nGroupID=6020> (2012-09-16)

Larsson, I. & Lönnemark, A. (2002). *Utsläpp från Bränder - Analyser av Brandgaser och Släckvatten.* SP Rapport 2002:24. Borås: SP.

Lukens, L.L. (1982). *Nuclear Power Plant Electrical Cable Damageability Experiments.* Albuquerque, NM: NRC.

LUNARC. (2012). *Alarik.* (Elektronisk). Tillgänglig: <http://www.lunarc.lu.se/lunarc/Systems/AlarikDetails> (2012-12-03)

Miltronic. (n d). *Ölflex 140/140 CY.* (Elektronisk). Tillgänglig: <http://mtron.spprod.com/country/3/jsp/product.jsp?productid=1729&categoryid=157&pagetodisplay=techdata&source=&section=&level=&searchword=> (2012-09-18)

Moore, T.A. & Yamada, N. (1998). *Nitrogen Gas as a Halogen Replacement.* Gaithersburg: NIST.

Murphy, J. (2004). *Determination of Failure Criteria for Electric Cables Exposed to Fire for Use in a Nuclear Power Plant Risk Analysis.* Albuquerque, NM: Worcester Polytechnic Institute.

Nexans. (2012a). *Kraftkablar*. (Elektronisk). Tillgänglig: <http://www.nexans.se/eservice/Sweden-sv_SE/navigate_210353/Kraftkablar.html> (2012-09-04)

Nexans. (2012b). *AXQJ LT 12 kV*. (Elektronisk). Tillgänglig: <http://www.nexans.se/eservice/Sweden-sv_SE/navigate_219131/AXQJ_LT_12_kV.html#top> (2012-09-05)

Nexans. (2012c). *Signalkablar*. (Elektronisk). Tillgänglig: <http://www.nexans.se/eservice/Sweden-sv_SE/navigate_212474/Signalkablar.html> (2012-09-16)

Nexans. (2012d). *FKAR-PG 150/250 V*. (Elektronisk). Tillgänglig: <http://www.nexans.se/eservice/Sweden-sv_SE/navigate_212708/FKAR_PG_150_250_V.html#top> (2012-09-16)

Nexans. (2012e). *Brandspridningsklasser*. (Elektronisk). Tillgänglig: <http://www.nexans.se/eservice/Sweden-sv_SE/fileLibrary/Download_540072457/Sweden/files/Brandspridningsklasser%20A4_110815_2.pdf > (2012-09-04)

Nilsson, D. & Holmstedt, G. (2008). *Kompendium i Aktiva System - Detektion.* Rapport 7030. Lund: Avdelningen för Brandteknik och Riskhantering, Lunds Tekniska Högskola.

Nilsson, M. & van Hees, P. (2013). *Advantages and Challenges with using Hypoxic Air Venting as Fire Protection.* (Elektronisk). Tillgänglig: < http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/fam.2197/full> (2013-11-13)

NIST. (2010). *Fire Dynamics Simulator (Version 5) User's Guide*. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology.

NUREG-1805. (2004). *Fire Dynamics Tool: Quantitative Fire Hazard Analysis Methods for the U.S. Nuclear Regulatory Commission Fire Protection Inspection Program, Appendix A.* Washington DC: U.S. Nuclear Regulatory Commission

NUREG-1824. (2007). *Verification and Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Applications, Vol. 7: Fire Dynamics Simulator (FDS).* Washington DC: U.S. Nuclear Regulatory Commission.

NUREG-6850. (2005). *Fire PRA Methodology for Nuclear Power Facilities, Vol 2, Appendix H.* Washington DC: U.S. Nuclear Regulatory Commission.

Nystedt, F. & Frantzich, H. (2011). *Kvalitetsmanual för Brandtekniska Analyser vid Svenska Kärntekniska Anläggningar.* Rapport 3160. Lund: Avdelningen för Brandteknik och Riskhantering, Lunds Tekniska Högskola.

Palm, M. (2002). *Gränsnivåer för Klorider efter PVC-bränder.* SP Rapport 2002:16. Borås: SP

Prevenex. (2011). *Prevenex Controller*. (Elektronisk). Tillgänglig: <http://altitudetraining.com/prevenex/products/controller> (2012-11-19)

Purser, D.A. (2002). *Handbook of Fire Protection Engineering, 3rd Edition, Section Two, Chapter 6.* Quincy, MA: NFPA.

Reka Kabel. (n d). *Brandspridningsklasser*. (Elektronisk). Tillgänglig: <http://www.reka.fi/swe/products/895> (2012-09-05)

School of Electronic and Communications Engineering. (2008). *Table of Bessel Functions.* (Elektronisk). Tillgänglig: < http://www.electronics.dit.ie/staff/ptobin/bessel.pdf> (2012-11-02)

Solar. (2006). *Brandspridningsklasser*. (Elektronisk). Tillgänglig: <http://www.solar.se/Menu/Produkter/Kabel/Brands%C3%A4kra/SolarCable367-368> (2012-09-05)

SP. (2012). *Brandtekniska klasser*. (Elektronisk). Tillgänglig: <http://www.sp.se/sv/index/services/fire_classes/sidor/default.aspx> (2012-11-30)

SP. (n d). *ISO 5660 - Konkalorimeter*. (Elektronisk). Tillgänglig: <http://www.sp.se/sv/index/services/firetest_building/firetest_bu%C3%ADlding/iso_5660_konkalorimeter/sidor/default.aspx> (2012-11-29)

SP Fire Database. (2012). *SP Fire Database*. (Elektronisk). Tillgänglig: <http://www.sp.se/fire/fdb> (2012-10-20)

SSAB (n d). *Om oss*. (Elektronisk). Tillgänglig: <http://www.ssab.com/sv/Produkter--Tjanster/Om-SSAB/SSAB-pa-90-sekunder/> (2012-08-28)

Sundström, B. (2007). *The Development of a European Fire Classification System for Building Products, Test Methods and Mathematical Modelling*. Lund: Department of Fire Safety Engineering.

Särdqvist, S. (2006). *Vatten och Andra Släckmedel*. Kalmar: Räddningsverket.

Thunderhead Engineering. (2011). *Pyrosim*. (Elektronisk). Tillgänglig: < http://www.thunderheadeng.com/pyrosim/> (2012-11-20)

Uneram, C. (2009). *Skydd mot Brand - Före, Under och Efter Räddningsinsats*. Karlstad: Myndigheten för samhällsskydd och beredskap.

Van Hees, P., Axelsson, J., Green, A.M. & Grayson, S.J. (2001). *Mathematical modelling of fire development in cable installations*. Fire and Materials vol. 25. ss. 169-178.

Van Hees, P. & Thureson, P. (1996). *Burning behaviour of cables - Modelling of flame spread*. SP Rapport 1996:30. Borås: SP.

Wickström, U. (2012). *Heat Transfer in Fire Technology*. Borås: SP Fire Technology

Widlund, D. (2009). *Elektricitet och bränder - med inriktning på brandutredning*. Karlstad: Myndigheten för samhällsskydd och beredskap.

Bilaga A Grundbeteckning enligt svensk standard SS 424 17 01

En kabel har alltid en grundbeteckning som talar om dess uppbyggnad och i vissa fall var de kan monteras. Grundbeteckningen består, beroende på kabel, av 2-5 bokstäver. Tabell A.1 nedan åskådliggör vad som avses med respektive bokstav i grundbeteckningen.

Tabell A.1 Kabelbeteckningar enligt svensk standard SS 424 17 01 (Konsultsupporten, 2007)

	1:a bokstaven Ledare	2:a bokstaven Isolering	3:e bokstaven Ledningshölje eller annan konstruktionsdetalj	4:e bokstaven Konstruktionsdetalj eller ledningshölje	5:e bokstaven Konstruktions detalj eller användning
A	Aluminium utan ytbeläggning		Skärm av aluminiumband/folie eller av annat metallband	Skärm av aluminiumband/folie	
B	Aluminiumlegering		Blymantel	Förbindningstråd	
C	Brons	Papper	Koncentrisk skärm av koppar	Kabel med i manteln ingjuten bärlina	Kabel med i manteln ingjuten bärlina
D	Glas/plast, fiber	Gummi, med yttre gummimantel	Kabel bestående av endast dielektriskt material	Kabel bestående av endast dielektriskt material	
E	Koppar, entrådig	EP (Etenpropengummi)	Individuellt skärmade parter	Förstärkt utförande eller lågkapacitetskabel	Förstärkt utförande eller lågkapacitetskabel
F	Koppar, fåtrådig		Fläta av koppartrådar	Fläta av koppartrådar	
G	Glas/glas, fiber	Termoplastisk polyester elastomer	Metallfri förstärkning av fläta, omspinning eller dragavlastare	Metallfri förstärkning av fläta, omspinning eller dragavlastare	Metallfri förstärkning av fläta, omspinning eller dragavlastare
H	Fiberknippe	Silikongummi	Parter lagda kring en bäring	Parter lagda kring en bärlina eller hisskabel	Parter lagda kring en bärlina
I		PUR (Polyuretan)	PUR-mantel	PUR-mantel	PUR-mantel
J	Kopparklädd ståltråd eller ståltråd	Fiber utan sekundärt skydd	Armering av stålband	Kabel som får förläggas i jorden eller armering av stålband	
K	Koaxialtub	PVC (Polyvinylklorid)	PVC-mantel	PVC-mantel	PVC-mantel
L	Ledande plast	PE (Polyeten)	PE-mantel eller skärm av plastbelagt aluminiumband	PE-mantel	PE-mantel
M	Koppar, mångtrådig	PP (Propenplast)	Metallmantel, orillad	Metallmantel, orillad	
N		PA (Amidplast)	PA-mantel	PA-mantel	PA-mantel

O		Kloroprengummi	Mantel av kloroprengummi		
P	Plast/plastfiber	Papper, oimpregnerat	Armering av förzinkade stålband	Armering av förzinkad ståltråd	Armering av förzinkad ståltråd
Q		Flamskyddad termoplastisk polyolefin (Halogenfri)	Flamskyddad termoplastisk polyolefin (Halogenfri)		
R	Koppar, extra mångtrådig		Armering av plastbelagt aluminiumband	Signalkabel eller styrkabel	
S	Koppar, fintrådig			Självbärande kabel	
T	Koppar, extra fintrådig	Fluoretenplast	Armering av ståltråd eller förzinkad ståltråd	Tung anslutningskabel eller förzinkad ståltråd	
U	Spinnsledare	Etencellplast	Saknar yttre mantel		
V		Gummi utan yttermantel	EP (Etenpropengummi)	Kabel som får förläggas i vatten eller gummimantel	
W			Metallmantel, rillad	Metallmantel, rillad	Metallmantel, rillad
X		PEX (Tvärbunden etenplast)	PVC-mantel med ovalt tvärsnitt	Kabel utan krav på väderbeständighet	Kabel utan krav på väderbeständighet
Y		TPE (Termoplastiska elastomerer)	TPE-mantel		
Z			Skärm av kopparband	Kabel för neonanläggningar, skärm av kopparband	

Bilaga B Kabelbeskrivningar och testresultat från FIPEC-projektet

Nedan åskådliggörs inledningsvis materialdata för de kablar som använts vid FIPEC-projektet och som refereras till i rapporten. Vidare åskådliggörs en sammanfattning av testresultaten från tester med vertikala konfigurationer från stor- och fullskaleförsöken följt av testresultat från tester med horisontell konfiguration vid fullskaleförsöken.

B.1 Kabeldata

Figur B.1 åskådliggör kabeldata för kablarna 1, 2 och 5, Figur B.2 åskådliggör kabeldata för kablarna 6, 7 och 24 från FIPEC-projektet.

Cable number	1	2	5
Cable type	Medium Voltage 12/20 kV	Medium Voltage 12/20 kV	Low Voltage 0.6/1 kV
Conductor size	3×1×150 mm²	3×1×150 mm²	3×1×150 mm²
Screen	Aluminium	Aluminium	None
Armour	Aluminium	Aluminium	None
Conductor	Aluminium	Aluminium	Copper
Insulation	XLPE 2	XLPE 2	XLPE1
Filler Mass	None	None	36.3 g/m
Sheath	PVC 2	PE 2	PVC 1
Combustible Vol.	2.342 l/m	3.234 l/m	0.573 l/m

Figur B.1 Materialdata för kabel 1, 2 och 5 använda vid FIPEC-projektet (Grayson et al, 2000; reproducerat med tillåtelse av Interscience)

Cable number	6	7	24
Cable type	Low Voltage 0.6/1 kV	Low Voltage 0.6/1 kV	Data Cable
Conductor size	3×1×150 mm²	3×1×150 mm²	12×2×0.5 mm²
Screen	None	None	None
Armour	None	None	None
Conductor	Copper	Copper	Copper
Insulation	XLPE 1	XLPE 1	PVC 7
Filler Mass	36.5 g/m	36.2 g/m	None
Sheath	RPPVC 1	Polyolefin 1	PVC 8
Combustible Vol.	0.592 l/m	0.547 l/m	0.071 l/m

Figur B.2 Materialdata för kablarna 6, 7 och 24 använda vid FIPEC-projektet (Grayson et al, 2000; reproducerat med tillåtelse av Interscience)

B.2 Sammanfattning testresultat

Följande avsnitt sammanfattar testresultaten vid FIPEC-projektet för de i rapporten refererade kablarna. I tabellerna avser

Peak HRR	Maximal effektutveckling
THR	Total effektutveckling
Peak SPR	Maximal rökproduktion
TSP	Total rökproduktion
FIGRA	Linjär brandtillväxthastighet
SMOGRA	Rökproduktionshastighet

B.2.1 Fullskaleförsök

I Tabell B.1åskådliggörs en sammanfattning av testresultaten för de kablar som refereras till i rapporten vid fullskaleförsöken med vertikal konfiguration.

Tabell B.1 Testresultat vid fullskaleförsöken med vertikal kabelkonfiguration (Grayson et al, 2000)

Cable	Time to ignition [s]	Peak HRR [kW]	THR [MJ]	Peak SPR [m^2/s]	TSP [m^2]	FIGRA [kW/s]	SMOGRA [cm^2/s^2]	Damaged length [m]	Vol. of comb. material [l/m ladder]
1	46	704	299.3	4.85	3058	0.374	29.1	4	7.1
2	136	41	43.9	0.11	45	0.017	0.3	1.9	11.5
5	102	392	167.8	4.0	3045	0.196	18.6	4	2.9
6	132	367	195.1	3.81	3243	0.140	15.6	4	3.0
7	144	149	50.0	0.20	79	0.062	0.8	4	2.7
24	36	250	32.8	2.82	439	1.298	120.4	4	0.7

B.2.2 Storskaleförsök

I Tabell B.2 åskådliggörs en sammanfattning av testresultaten för de kablar som refereras till i rapporten vid storskaleförsöken med vertikal konfiguration.

Tabell B.2 Testresultat vid storskaleförsöken med vertikal kabelkonfiguration (Grayson et al, 2000)

Cable	Time to ignition [s]	Peak HRR [kW]	THR [MJ]	Peak SPR [m^2/s]	TSP [m^2]	FIGRA [kW/s]	SMOGRA [cm^2/s^2]	Vol. of comb. material [l/m ladder]
5	314	323	196.3	8.3	3932	0.315	78.7	2.9
6	241	284	182.7	6.5	3703	0.234	82.5	3.0
7	217	404	241.7	1.2	426	0.346	7.0	2.7

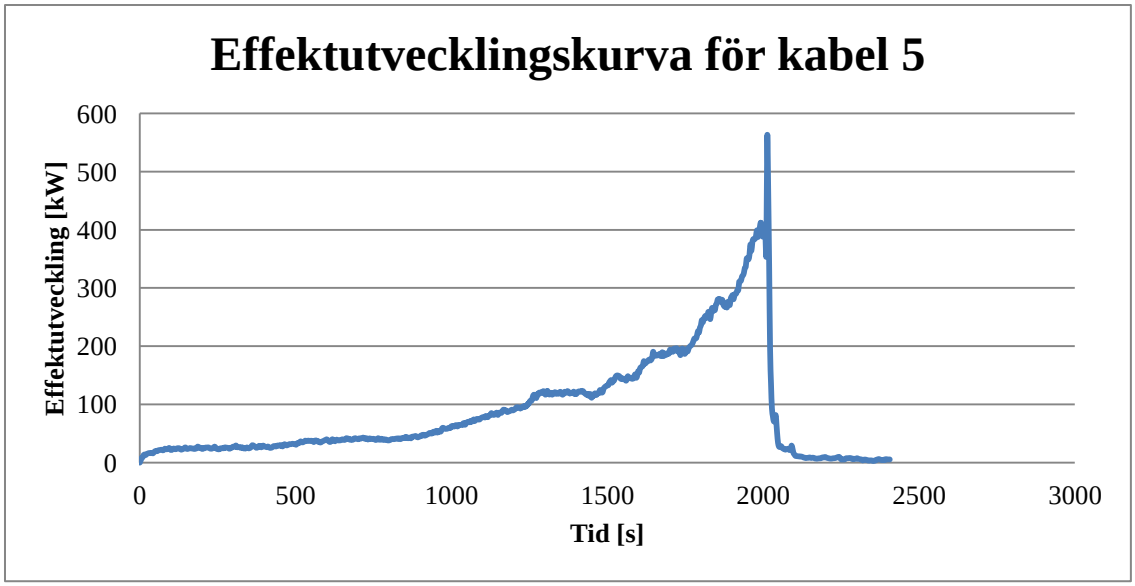
Bilaga C Anpassning av effektutvecklingskurva för kabel 5

Vid anpassning av effektutvecklingskurvan för kraftkablarna i schaktet väljs att hämta resultat från FIPEC-projektets tester av en kabel benämnd kabel 5. Uppbyggnaden av denna kabel åskådliggörs i Figur C.1 nedan.

Cable number	5
Cable type	Low Voltage 0.6/1 kV
Conductor size	3×1×150 mm^2
Screen	None
Armour	None
Conductor	Copper
Insulation	XLPE1
Filler Mass	36.3 g/m
Sheath	PVC 1
Combustible Vol.	0.573 l/m

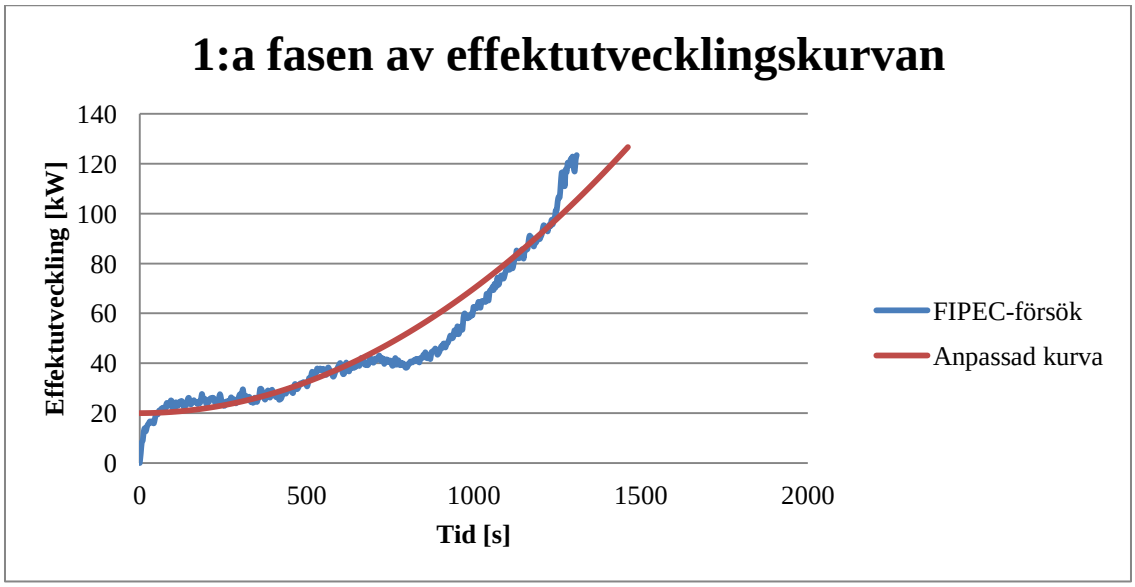
Figur C.1 Uppbyggnad av kabel 5 (Grayson et al, 2000; reproducerat med tillåtelse av Interscience)

De kraftkablar som anses vara de vanligaste förekommande i kabelschaktet har aluminiumledare, PVC-isolering och PVC-mantel. Både ledar- och isoleringsmaterialet hos de kablar som anses vara de vanligaste förekommande i schaktet skiljer sig alltså från uppbyggnaden av kabel 5 ovan. Skillnaden i ledarmaterial anses ha mindre inverkan på ett brandförlopp medan skillnaden i isoleringsmaterial däremot anses kunna ha en påtaglig inverkan på brandförloppet. Detta då tidigare tester har visat på att kablar med PVC-mantel renderar i något allvarligare brandförlopp än kablar med andra sorters mantelmaterial, detta anses även gälla för isoleringsmaterialet. Från FIPEC-projektet finns det dock inga kablar av samma storlekar, med samma sorts mantelmaterial och olika sorts isoleringsmaterial vilket medför att det ej kan sägas något om hur effektutvecklingskurvan påverkas vid brand i en kabel med PVC-isolering kontra en kabel med XPLE-isolering. Då det ej kan göras några jämförelser för att ta reda på hur stor inverkan olika sorters isoleringsmaterial har på brandförloppet måste det därför utföras en egen bedömning av hur denna parameter skulle kunna inverka. Vilket diskuterats i tidigare kapitel sker effektutvecklingstillväxten för kablar i två faser, inledningsvis då endast mantelmaterialet brinner och vidare då även isoleringsmaterialet blir involverat i branden. Detta kan ses i effektutvecklingskurvorna som två olika tillväxtfaser. I effektutvecklingskurvan för kabel 5, som åskådliggörs i Figur C.2 nedan, ses att den första fasen sker fram till ungefär 1400 sekunder varpå effektutvecklingen ligger förhållandevis konstant fram till ungefär 1500 sekunder då nästa effektutvecklingsfas inleds.

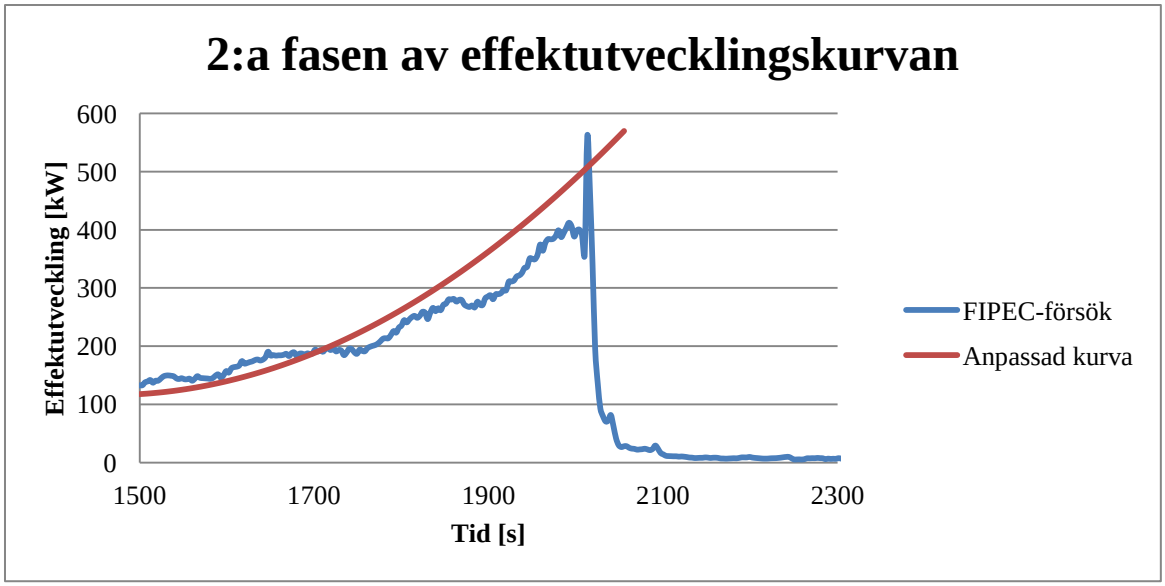


Figur C.2 Effektutvecklingskurva för kabel 5

Då effektutvecklingskurvan har två olika faser delas effektutvecklingskurvan upp i två olika delar för att vidare anpassa en αt^2-kurva till var och en av faserna. Detta resulterar i ett α-värde på 0.00005 kW/s^2 för den första fasen och 0.001 kW/s^2 för den andra fasen. De uppdelade effektutvecklingskurvorna med tillhörande αt^2-kurvor åskådliggörs i Figur C.3 och Figur C.4 nedan.

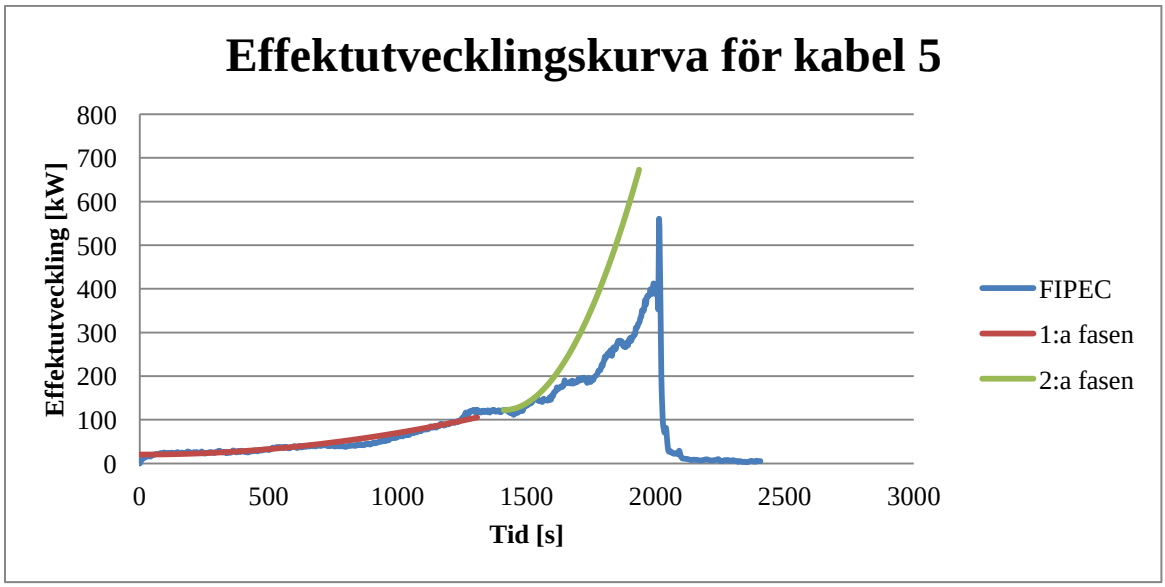


Figur C.3 1:a fasen av effektutvecklingskurvan för kabel 5



Figur C.4 2:a fasen av effektutvecklingskurvan för kabel 5

Då det är isoleringsmaterialet som skiljer sig mellan den valda kabelsorten vid FIPEC-projektets tester och den valda kabelsorten för schaktet är det således den andra fasen som är något underskattad. Då det, som nämnts ovan, ej är möjligt att göra jämförelser kablar emellan för att se hur mycket materialskillnaden påverkar måste det istället göras en egenhändig bedömning av hur mycket denna parameter skulle kunna påverka effektutvecklingskurvans lutning, en bedömning som därigenom självklart blir förenad med osäkerheter. Den nya tillväxthastigheten väljs därmed med målet att vara något konservativ. Därmed väljs att dubblera tillväxthastigheten för den andra fasen, det vill säga till ett α-värde på 0,002 kW/s^2, denna tillväxt skall inledas efter att effektutvecklingen legat på ett konstant värde i 50 sekunder, till skillnad från effektutvecklingskurvan från FIPEC-projektets försök där den ligger förhållandevis konstant i drygt 100 sekunder. Detta ger en αt^2-kurva för den andra fasen enligt Figur C.5 nedan.



Figur C.5 Modifierad effektutvecklingskurva för kabel 5

Självklart är detta förknippat med stora osäkerheter, både det faktum att effektutvecklingskurvan delas upp i två olika αt^2-kurvor samt att bedömningen av tillväxthastigheten för kablarna i schaktet är gjord utan att grunda sig på tidigare undersökningar. Uppdelningen av effektutvecklingskurvan i två αt^2-

kurvor har dock visat sig kunna stämma bra överens med en större del av de kablar från FIPEC-projektets försök som uppvisar dessa två faser i sitt brandbeteende. En andra fas med något brantare lutning än den första fasen. Därmed anses denna uppdelning vara en förhållandevis bra skattning av effektutvecklingskurvor hos kablar med denna sorts uppbyggnad. Den modifierade tillväxthastigheten för den andra fasen i kurvan ovan är vald med målet att erhålla ett konservativt värde på tillväxten, en dubblering av α-värdet anses kunna uppfylla detta mål varför det ej anses vara någon risk att effektutvecklingen för kablarna i schaktet underskattas. Det ska dock noteras att denna ökning är utförd genom en egenhändig bedömning varför det föreligger osäkerheter kring hur pass konservativt detta värde är.

Bilaga D Modell för beräkning av inre temperatur hos en kabel

I rapporten "Performance of cables subjected to elevated temperatures" av Andersson & Persson (2001) beräknas den inre temperaturen i en kabel genom en analytisk lösning för värmeledning i cylindriska geometrier. Följande dimensionslösa variabler introduceras (Andersson & Persson, 2001):

$$\theta = \frac{T-T_0}{T_u-T_0}$$ Ekvation D.1

$$\tau = \frac{\kappa t}{r^2}$$ Ekvation D.2

$$A = \frac{hr}{k}$$ Ekvation D.3

Temperaturen i kabeln kan vidare beräknas med följande ekvation

$$\theta_0 = 1 - 2\sum_{n-1}^{\infty} \frac{J_0\,(r\beta_n/R)}{(\beta_n^2+A^2)J_0(\beta_n)} \cdot e^{-\beta_n^2\cdot\tau}$$ Ekvation D.4

där $\beta_1$är roten till ekvationen

$$\beta J_1(\beta) = AJ_0(\beta)$$ Ekvation D.5

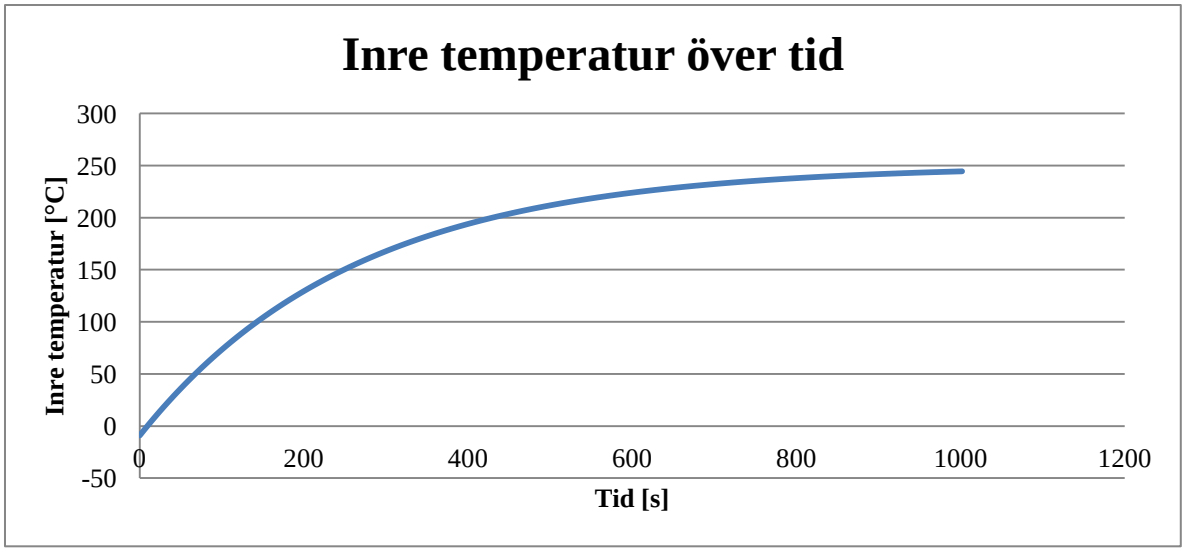
med J_n som representerar den n:e Besselfunktionen av den första sorten. Om θ_0 representerar temperaturen i centrum av kabeln och besselserien avbryts efter den första termen ges

$$\theta_0 = 1 - \frac{2A\cdot e^{-\beta_n^2\cdot\tau}}{(\beta_1^2+A^2)J_0(\beta_1)}$$ Ekvation D.6

I rapporten av Andersson & Persson (2001) används en värmeledningskoefficient, h, på 10 kW/m^2, termisk konduktivitet, k, för PVC på 0.16 W/m/K och en kabel med radien 0.0048 m vilket ger A=0.3. Detta ger β=0.75 vilket i sin tur ger $J_0(\beta_1)$=0.86, insättning av dessa värden i Ekvation D.6 ger (Andersson & Persson, 2001).

$$\theta_0 = 1 - 1.07 \cdot e^{-0.563\cdot\tau}$$ Ekvation D.7

För kabeln vilken som avses ser temperaturkurvan över tid ut enligt Figur D.1, detta är med en konstant omgivningstemperatur på 250 °C vilken var ugnstemperaturen vid utförda tester (Andersson & Persson, 2001).



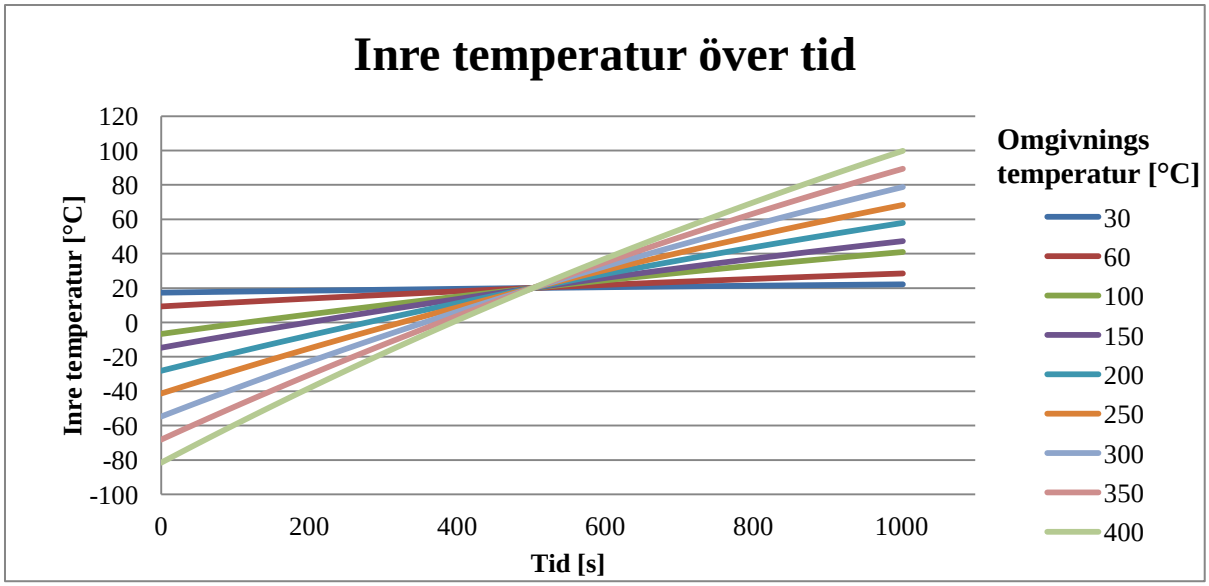
Figur D.1 Inre temperatur över tid hos en kabel

Vilket ses i figuren ovan är ligger kabelns begynnelsetemperatur under 20 °C vilket inte är korrekt vid ett verkligt scenario. Att kurvan ser ut på detta sätt härleds till att θ_0 är negativt fram till ett visst tidssteg, i detta fall 33 sekunder, vid denna tidpunkt når kabelns inre temperatur också 20 °C.

Metoden testas för en av kraftkabelsorterna i schaktet, metoden testas för en kabel med diametern 0.042 meter samt en begynnelsetemperatur på 20 °C. Med samma värde på värmeledningskoefficienten och den termiska konduktiviteten ger detta A=1.316, ur tabell avseende besselfunktionen kan därefter avläsas vilket värde på β detta motsvarar. Efter interpolering erhålls värdet β=1.38 (Carslaw & Jaeger, 1959). Från ytterligare en tabell avläses vilket värde på $J_0(\beta_1)$ som β=1.38 motsvarar, efter interpolering erhålls värdet $J_0(\beta_1)$=0.57 (School of Electronic and Communications Engineering, 2008). Insättning av ovanstående värden i Ekvation D.6 ger:

$$\theta_0 = 1 - 1.267 \cdot e^{-1.912 \cdot \tau} \qquad \text{Ekvation D.8}$$

Denna ekvation testas för olika konstanta omgivningstemperaturer. Även vid dessa fall ligger den inre temperaturen hos kabeln under 20 °C fram till dess att θ_0 blir positivt vilket sker vid ett senare tillfälle än för den föregående kabeln. Detta härleds till kabelns storlek, en större radie medför att A blir större vilket i sin tur medför att termen till höger om 1:an i Ekvation D.8 är större än 1 under ett längre tidsintervall. Enligt ekvationen ovan medför en ökad omgivningstemperatur en lägre begynnelsetemperatur, kabelns inre temperatur över tid vid olika omgivningstemperaturer åskådliggörs i Figur D.2. Inte förrän efter ungefär 500 sekunder blir θ_0 positivt och den inre temperaturen når 20 °C. Det verkar alltså som en större kabel medför fel under ett längre tidsintervall, och desto högre omgivningstemperatur desto större blir också felet. Med underlag av att dessa beräkningar ger så pass stort fel samt då metoden är framtagen för konstanta omgivningstemperaturer väljs att ej använda denna metod vid beräkningar av kablarnas inre temperaturer. Med tanke på resultatet från beräkningarna är förslaget att utföra en utvärdering av denna beräkningsmodell med målet att bedöma för vilka kabelstorlekar denna beräkningsmodell är giltig.



Figur D.2 Innertemperatur hos en kabel över tid vid olika omgivningstemperaturer

Bilaga E Beräkningar siktförhållanden

Siktbarheten beräknas enligt Ekvation E.1 nedan (Jönsson et al, 2005)

$$Sikt\ i\ meter = \frac{10}{D_{L,10log}} \qquad \text{Ekvation E.1}$$

Sikten 10 meter motsvarar 1 obscura, för att uppfylla de ställda kraven för utrymning ska sikten vara 5 meter, detta motsvarar 2 obscura.

Vid beräkningar av siktförhållanden används resultat från en metod framtagen av Rasbash & Phillips (1978) där olika ämnens rökproduktion mäts vid förbränning i ugn. Metoden resulterade i en ekvation för ett materials rökpotential och beräknas enligt Ekvation E.2 (Drysdale, 1999).

$$D_0 = D_L \cdot \frac{V}{m_f} \qquad \text{Ekvation E.2}$$

Då beräkningar utförs med enheten obscura som mått på sikten modifieras föregående ekvation enligt följande (Nilsson & Holmstedt, 2008).

$$D_{0,10log} = D_{L,10log} \cdot \frac{V}{m_f} \qquad \text{Ekvation E.3}$$

För uppskattningar av effektutvecklingar hos olika ämnen används Ekvation E.4 (Karlsson & Quintiere, 2000).

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot \chi \cdot \Delta H_c \qquad \text{Ekvation E.4}$$

Vid beräkning av den förbrända massan modifieras föregående ekvation till

$$m_f = \int_0^t \frac{\dot{Q}}{\chi \cdot \Delta H_c} \cdot dt = \int_0^t \frac{\dot{Q}}{\Delta H_{eff}} \cdot dt \qquad \text{Ekvation E.5}$$

I ekvationen ovan sätts $\dot{Q}$ som den, av FDS, erhållna effektutvecklingen vid ett givet tidssteg, vidare adderas resultaten för varje tidssteg för att därmed erhålla den totala producerade massan över tid.

För PVC gäller (Drysdale, 1999; Karlsson & Quintiere, 2000).

$D_{0,10log} = 1.7\ ob\ m^3/g$, denna parameter sätts även till $10.2\ ob\ m^3/g$ enligt tidigare diskussion.

$\Delta H_c = 16.4\ kJ/g$

Förbränningseffektiviteten för PVC antas till 0.7, vilket är ett vanligt värde för sotande bränslen (Karlsson & Quintiere, 2000). Detta ger

$\Delta H_{eff} = 11.5\ kJ/g$

Beräkningsgången för hur sikten i schaktet förändras med tiden utförs enligt följande

1. Den sammanlagda volym som rökgaserna tar upp i schaktet erhålls genom att i smokeview studera på vilken höjd rökgaslagret ligger vid olika tidpunkter för det valda scenariot
2. Ett uttryck för massa förbränd PVC tas fram med hjälp av Ekvation E.5
3. Den optiska densiteten beräknas enligt Ekvation E.3
4. Siktbarheten beräknas sedan enligt Ekvation E.1 och redovisas som funktion av tiden

Beräkningarna utförs i MS Excel och redovisas ej i rapporten.

E.1 Scenario 1 - Brandstart i yttre kabelstege innefattande kraftkablar

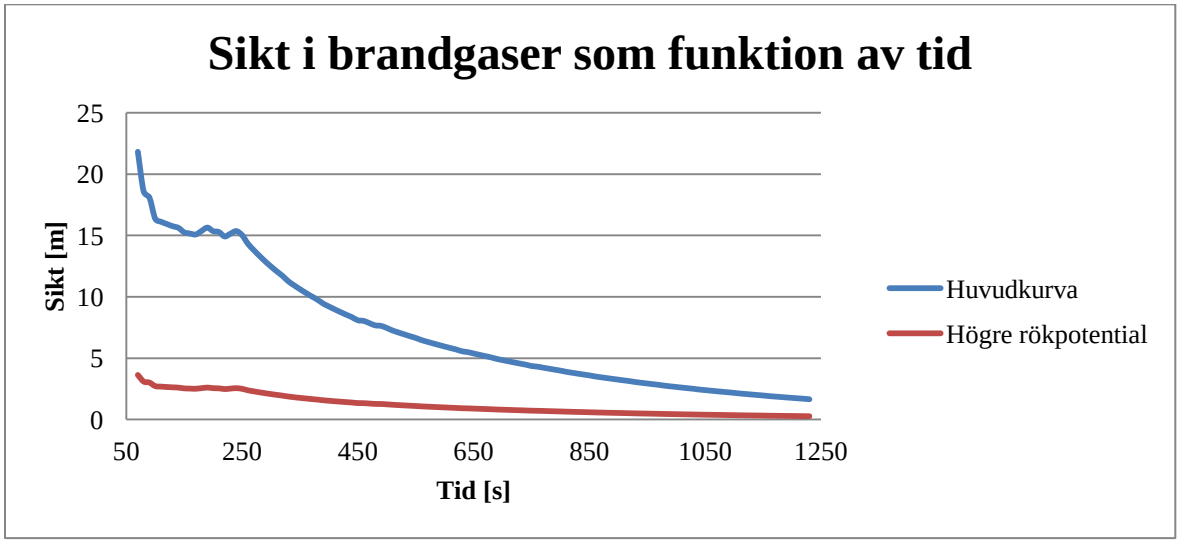
Nedan redovisas hur sikten påverkas med avseende på tiden vid brandscenario 1 där branden startar i den yttre kabelstegen innefattande kraftkablar. Observera att beräkningarna avseende sikten för samtliga brandscenarion gäller för sikten i brandgaserna. Bedömningar av brandgasernas utbredning i kabelschaktet har vid samtliga brandscenarion utförts genom att studera brandförloppen och dess rökproduktion i smokeview varpå brandgasernas höjd ovan golv samt dess totala volym därmed också kunnat utvärderas.

Då brandscenario 1 studeras noggrannare i smokeview urskiljs ett tydligt brandgaslager först efter ungefär 70 sekunder. Vid denna tidpunkt har brandgaserna nått ungefär 40 meter upp i schaktet, kring på sjätte våningsplanet, och ner till ungefär 17 meter ovan golv, kring tredje våningsplanet. Efter 240 sekunder har brandgaserna nått till toppen av kabelschaktet och tagit sig ner till höjden 4 meter ovan golv. Beräkningar avseende sikten har utförts från 70 sekunder och framåt då det var först vid denna tidpunkt ett tydligt brandgaslager kunde observeras och en volymuppskattning därmed var möjlig. I smokeview uppskattas brandgaslagrets volym och dess höjd ovan golv i tiosekundersintervaller, resultaten från dessa skattningar åskådliggörs i Tabell E.1. Observera att vid tiden 250 sekunder sjunker brandgaslagret så pass långsamt att det når 2 meter ovan golv först efter ungefär 460 sekunder, 1 meter ovan golv efter ungefär 490 sekunder för att slutligen vara helt rökfyllt efter ungefär 760 sekunder.

Tabell E.1 Brandgaslagrets uppskattade volym och höjd ovan golv i tiosekundersintervaller

Tid [s]	Brandgaslagrets volym [m^3]	Brandgaslagrets höjd över golv [m]	Tid [s]	Brandgaslagrets volym [m^3]	Brandgaslagrets höjd ovan golv [m]
70	524	17	**200**	1071	7
80	524	17	**210**	1117	6
90	570	16	**220**	1140	5
100	570	16	**230**	1208	4
110	615	15	**240**	1276	3
120	661	15	**250**	1299	3
130	706	14	⋮	⋮	⋮
140	752	13	**460**	1322	2
150	798	12	⋮	⋮	⋮
160	843	11	**490**	1345	1
170	889	10	⋮	⋮	⋮
180	957	9	**760**	1367	0
190	1026	8	⋮	⋮	⋮

Vidare utförs de tidigare angivna beräkningsstegen för att därmed ta fram en kurva på hur sikten förändras med tiden, dessa beräkningar renderar i kurvan som åskådliggörs i Figur E.1.

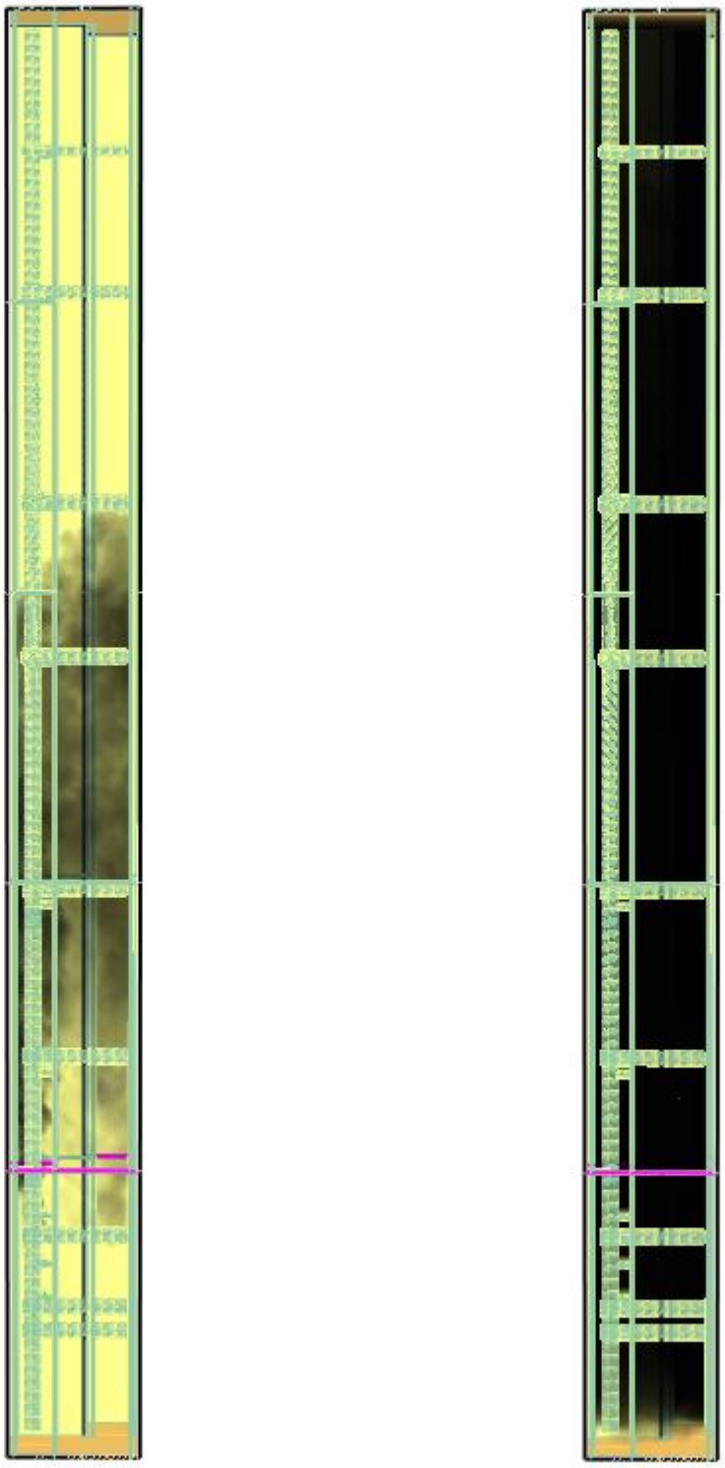


Figur E.1 Siktförändring i brandgaserna med avseende på tiden

Figuren ovan visar att sikten i brandgaserna understiger 5 meter efter ungefär 680 sekunder. Vid denna tidpunkt når brandgaslagret upp till toppen av kabelschaktet och ner till ungefär 1 meter ovan golv. Efter 680 sekunder är utrymning från kabelschaktet alltså ej längre möjlig.

Beräkningar utförda med ett sex gånger högre värde på rökpotentialen visar att sikten i brandgaserna understiger 5 meter direkt då ett tydligt brandgaslager kan urskiljas i kabelschaktet. Från och med denna tidpunkt är utrymning alltså ej möjlig från någon del av schaktet där brandgaslagret befinner sig, brandgasernas utbredning ges av Tabell E.1.

Figur E.2 åskådliggör brandgaslagrets utseende efter 70 respektive 680 sekunder vid simuleringen.



Figur E.2 Rökfyllnad i schaktet efter 70 respektive 680 sekunder

Enligt Figur E.1 är sikten i brandgaserna för den vänstra figuren ovan drygt 20 meter och för den högra figuren ungefär 5 meter.

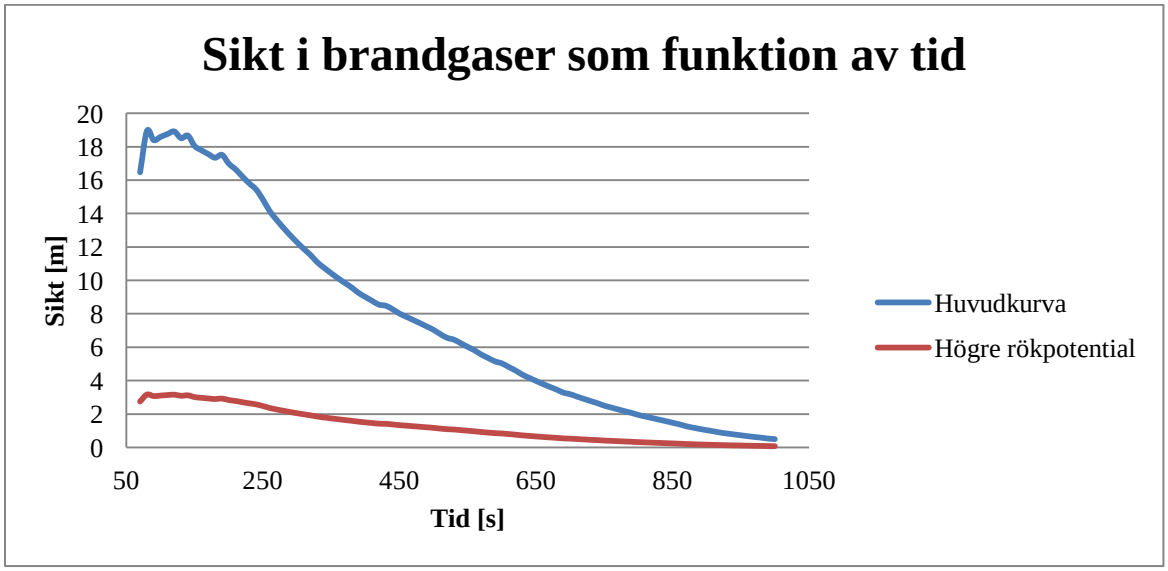
E.2 Scenario 2 - Brandstart i inre kabelstege innefattande kraftkablar

Då brandscenario 2 studeras noggrannare i smokeview urskiljs ett tydligt rökgaslager först efter ungefär 70 sekunder. Vid denna tidpunkt har brandgaserna nått ungefär 37 meter upp i schaktet, lite under sjätte våningsplanet, och ligger ungefär 20 meter ovan golv, lite under fjärde våningsplanet. Vid tiden 230 sekunder har brandgaserna nått upp till toppen av schaktet och tagit sig ner till 5 meter ovan golv. Beräkningar avseende sikten har utförts från 70 sekunder och framåt då det först var vid denna tidpunkt ett tydligt brandgaslager kunde observeras och en volymuppskattning var möjlig. Precis som vid föregående scenario uppskattas brandgaslagrets volym och höjd ovan golv i tiosekundersintervaller, resultaten från dessa skattningar åskådliggörs i Tabell E.2.

Tabell E.2 Brandgaslagrets uppskattade volym och höjd ovan golv i tiosekundersintervaller

Tid [s]	Brandgaslagrets volym [m^3]	Brandgaslagrets höjd över golv [m]	Tid [s]	Brandgaslagrets volym [m^3]	Brandgaslagrets höjd ovan golv [m]
70	387	20	**200**	1162	6
80	524	17	**210**	1208	5
90	570	16	**220**	1231	5
100	638	15	**230**	1253	5
110	706	14	**240**	1276	4
120	775	13	⋮	⋮	⋮
130	820	12	**430**	1299	3
140	889	11	⋮	⋮	⋮
150	934	10	**530**	1321	2
160	980	9	⋮	⋮	⋮
170	1026	8	**600**	1345	1
180	1071	7	⋮	⋮	⋮
190	1140	6	**700**	1367	0

Vidare utförs de tidigare angivna beräkningsstegen för att därmed ta fram en kurva på hur sikten förändras med tiden, dessa beräkningar renderar i kurvan som åskådliggörs i Figur E.3.



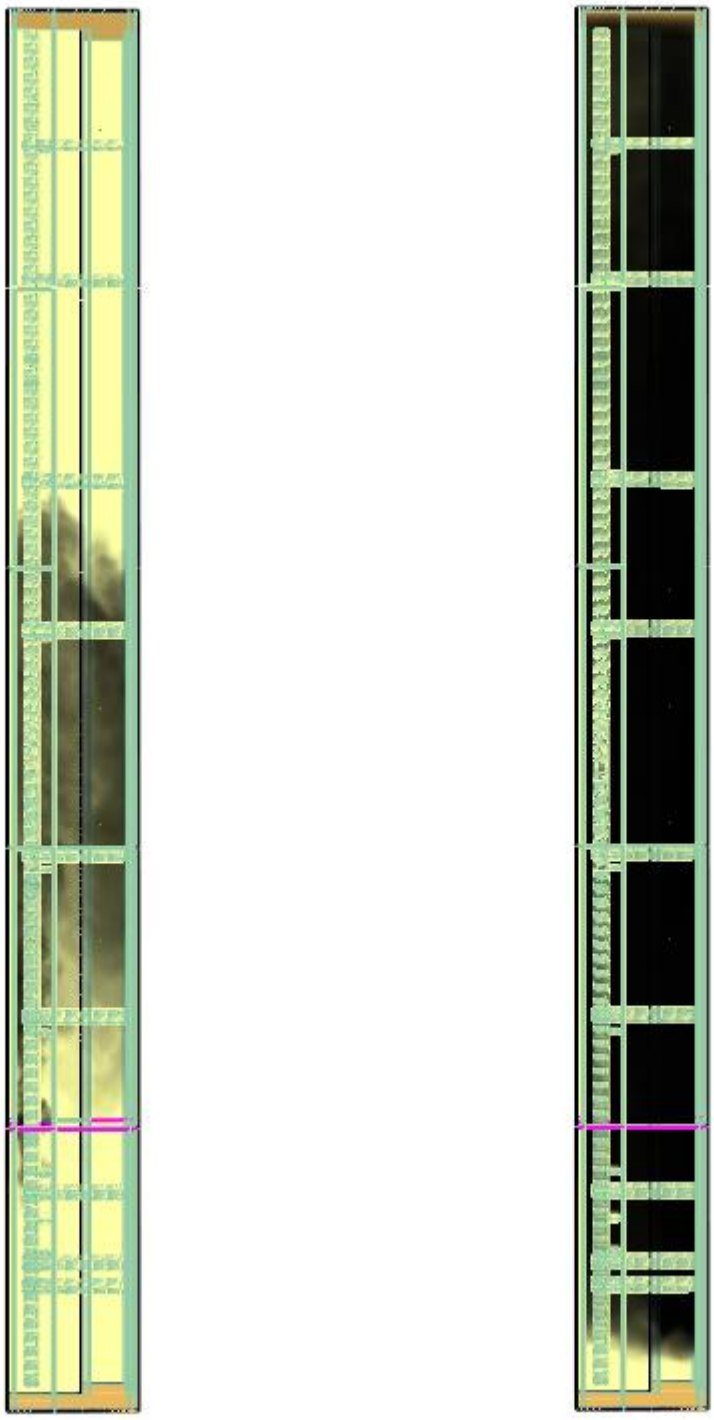
Figur E.3 Siktförändring i brandgaserna med avseende på tiden

Figuren ovan visar att sikten i brandgaserna understiger 5 meter efter ungefär 600 sekunder. Vid denna tidpunkt har brandgaserna tagit sig upp till toppen av schaktet och ligger ungefär 1 meter ovan golv.

Efter denna tidpunkt är alltså utrymning från kabelschaktet ej längre möjlig. Att sikten i brandgaserna ökar lite i kurvans inledande skede, mellan 70 och 80 sekunder, beror på att vid ungefär 70 sekunder finns en större mängd sot per volymenhet än vid den senare tidpunkten.

Beräkningar utförda med ett sex gånger högre värde på rökpotentialen ger att sikten i brandgaserna understiger 5 meter direkt då ett tydligt brandgaslager kan urskiljas i kabelschaktet. Från och med denna tidpunkt är alltså utrymning ej möjlig från någon del av schaktet där brandgaserna befinner sig, brandgasernas utbredning ges av Tabell E.2.

Figur E.4 åskådliggör brandgaslagrets utseende efter 70 respektive 600 sekunder vid simuleringen.



Figur E.4 Rökfyllnad i schaktet efter 70 respektive 600 sekunder

Enligt Figur E.3 är sikten i brandgaserna för den vänstra figuren ovan drygt 16 meter och för den högra figuren ungefär 5 meter.

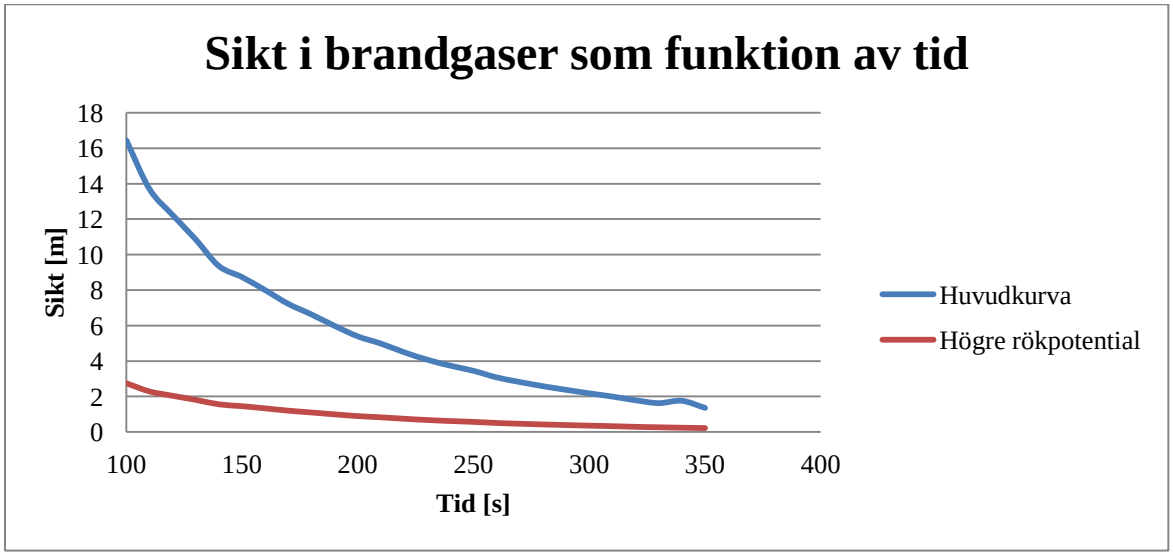
E.3 Scenario 3 - Brandstart i yttre kabelstege innefattande övriga kablar

Då brandscenario 3 studeras noggrannare i smokeview urskiljs ett tydligt brandgaslager först efter ungefär 100 sekunder. Vid denna tidpunkt har brandgaserna nått ungefär 40 meter upp i schaktet, kring sjätte våningsplanet, och ner till ungefär 17 meter ovan golv, kring det tredje våningsplanet. Vid tiden 210 sekunder har brandgaserna nått upp till toppen av kabelschaktet och tagit sig ner till höjden 4 meter ovan golv. Beräkningar avseende sikten har utförts från 100 sekunder och framåt då det var först vid denna tidpunkt ett tydligt brandgaslager kunde observeras och en volymuppskattning var möjlig. Precis som tidigare uppskattas brandgaslagrets volym och höjd ovan golv i tiosekundersintervaller, resultaten från dessa skattningar åskådliggörs i Tabell E.3.

Tabell E.3 Brandgaslagrets uppskattade volym och höjd ovan golv i tiosekundersintervaller

Tid [s]	Brandgaslagrets volym [m^3]	Brandgaslagrets höjd över golv [m]	Tid [s]	Brandgaslagrets volym [m^3]	Brandgaslagrets höjd ovan golv [m]
100	524	17	**230**	1345	1
110	547	17	**240**	1345	1
120	615	17	**250**	1367	0
130	684	16	**260**	1367	0
140	775	15	**270**	1367	0
150	888	13	**280**	1367	0
160	980	10	**290**	1367	0
170	1048	8	**300**	1367	0
180	1117	6	**310**	1367	0
190	1162	5	**320**	1367	0
200	1276	4	**330**	1367	0
210	1299	2	**340**	1367	0
220	1321	1	**350**	1367	0

Vidare utförs de tidigare angivna beräkningsstegen för att därmed ta fram en kurva på hur sikten förändras med tiden, dessa beräkningar renderar i kurvan som åskådliggörs i Figur E.5.

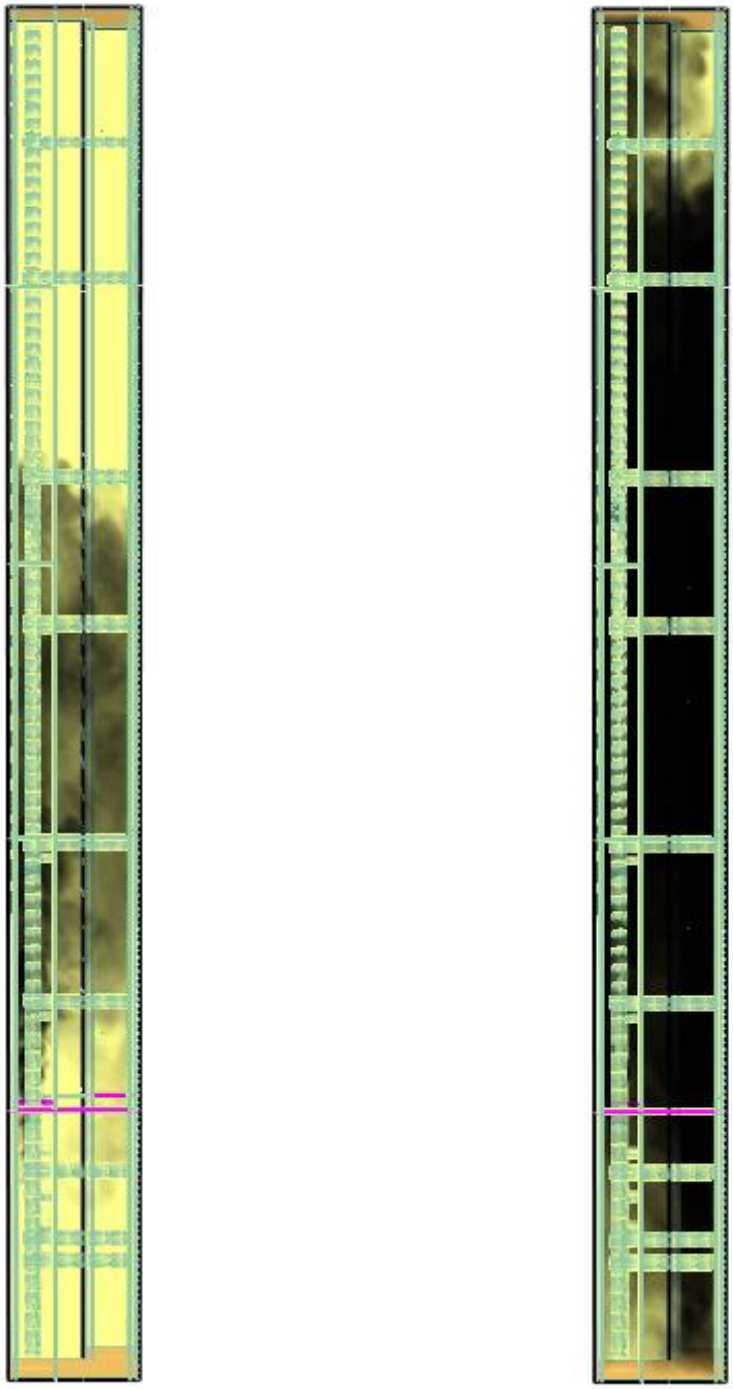


Figur E.5 Siktförändring i brandgaserna med avseende på tiden

Figuren ovan visar att sikten i brandgaserna understiger 5 meter efter ungefär 210 sekunder. Vid denna tidpunkt når brandgaslagret upp till toppen av kabelschaktet och ner till ungefär 2 meter ovan golv. Efter 210 sekunder är utrymning från bottenplanet fortfarande möjlig, dock ej från någon annan plats i kabelschaktet. Tio sekunder senare, efter 220 sekunder, har brandgaslagret nått ner till 1 meter ovan golv varför utrymning ej längre är möjlig från något våningsplan.

Beräkningar utförda med ett sex gånger högre värde på rökpotentialen visar att sikten i brandgaserna understiger 5 meter direkt då ett tydligt brandgaslager kan urskiljas i kabelschaktet. Från och med denna tidpunkt är alltså utrymning ej möjlig från någon del av schaktet där brandgaslagret befinner sig, brandgasernas utbredning ges av Tabell E.3.

Figur E.6 åskådliggör brandgaslagrets utseende efter 100 respektive 210 sekunder vid simuleringen.



Figur E.6 Rökfyllnad i schaktet efter 100 respektive 210 sekunder

Enligt Figur E.5 är sikten i brandgaserna för den vänstra figuren ovan drygt 16 meter och för den högra figuren ungefär 5 meter.

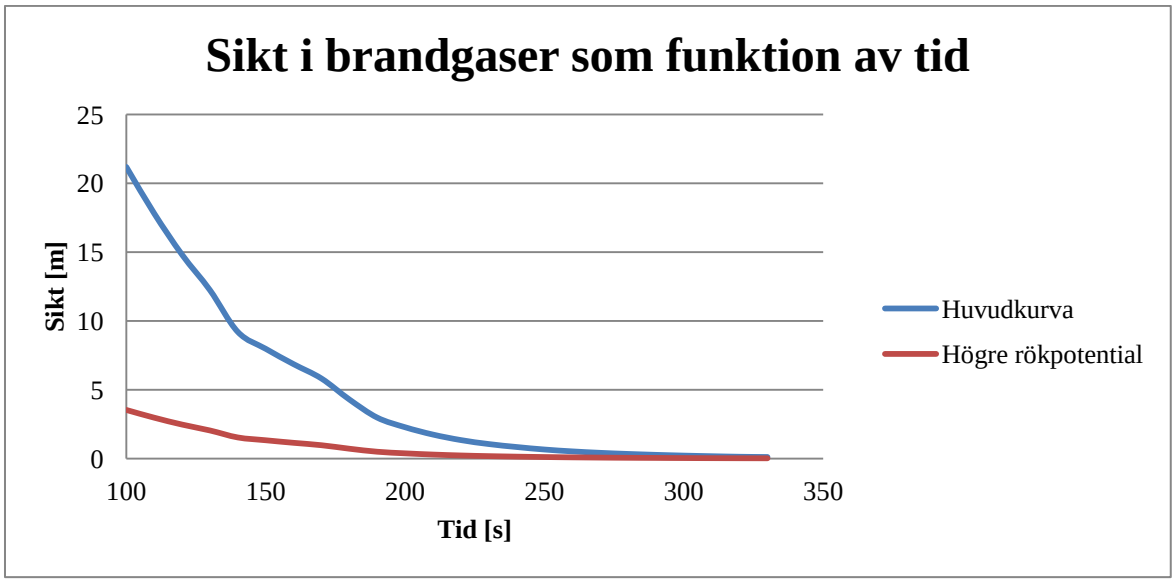
E.4 Scenario 4 - Brandstart i inre kabelstege innefattande övriga kablar

Detta scenario var det som gav den största resulterande effektutvecklingen. Då scenariot studeras noggrannare i smokeview urskiljs ett tydligt brandgaslager först efter ungefär 100 sekunder, vid denna tidpunkt har brandgaserna tagit sig ungefär 45 meter upp i kabelschaktet, kring sjunde våningsplanet, och ner till ungefär 16 meter ovan golv, lite under tredje våningsplanet. Efter 180 sekunder har brandgaserna tagit sig upp till toppen av kabelschaktet och ner till höjden 6 meter ovan golv. Beräkningar avseende sikten har utförts från 100 sekunder och framåt då det först var vid denna tidpunkt ett tydligt brandgaslager kunde observeras och en volymuppskattning var möjlig. Precis som tidigare uppskattas brandgaslagrets volym och höjd ovan golv i tiosekundersintervaller, resultaten från dessa skattningar åskådliggörs i Tabell E.4.

Tabell E.4 Brandgaslagrets uppskattade volym och höjd ovan golv i tiosekundersintervaller

Tid [s]	Brandgaslagrets volym [m^3]	Brandgaslagrets höjd över golv [m]	Tid [s]	Brandgaslagrets volym [m^3]	Brandgaslagrets höjd ovan golv [m]
100	660	16	**220**	1288	3
110	706	16	**230**	1299	2
120	752	16	**240**	1310	1
130	798	15	**250**	1367	0
140	820	15	**260**	1367	0
150	912	13	**270**	1367	0
160	1025	10	**280**	1367	0
170	1185	8	**290**	1367	0
180	1230	6	**300**	1367	0
190	1253	5	**310**	1367	0
200	1265	4.5	**320**	1367	0
210	1276	4	**330**	1367	0

Vidare utförs de tidigare angivna beräkningsstegen för att därmed ta fram en kurva på hur sikten förändras med tiden, dessa beräkningar resulterar i kurvan som åskådliggörs i Figur E.7.



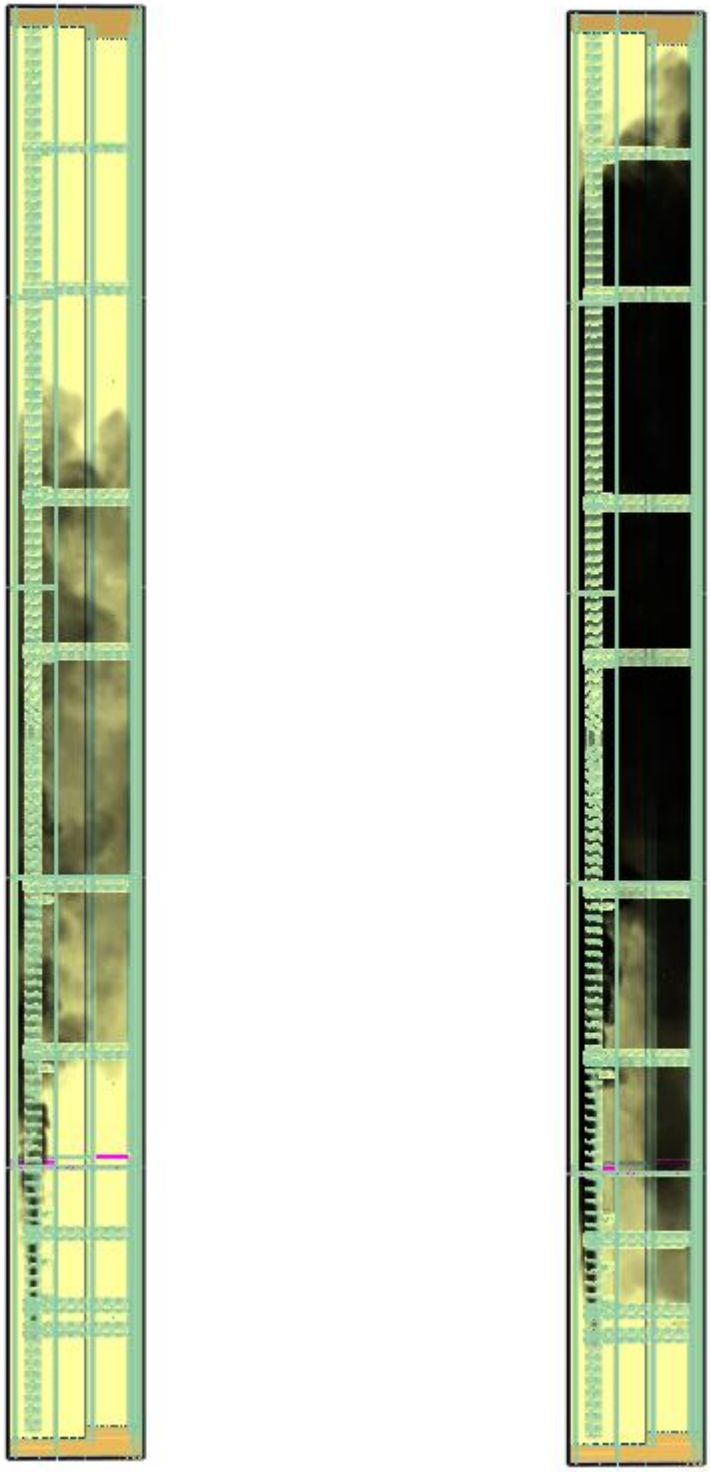
Figur E.7 Siktförändring i brandgaserna med avseende på tiden

Figuren ovan visar att sikten i brandgaserna understiger 5 meter efter ungefär 170 sekunder. Vid denna tidpunkt når brandgaslagret upp till 2 meter från toppen av kabelschaktet och ner till ungefär 8 meter

ovan golv. Efter 170 sekunder är alltså utrymning från våning 2 och nedåt fortfarande möjlig, dock ej från någon annan plats i kabelschaktet. Efter ungefär 240 sekunder har brandgaslagret nått ner till 1 meter ovan golv varför utrymning ej längre är möjlig från något våningsplan.

Beräkningar utförda med ett sex gånger högre värde på rökpotentialen visar att sikten i brandgaserna understiger 5 meter direkt då ett tydligt brandgaslager kan urskiljas i kabelschaktet. Från och med denna tidpunkt är alltså utrymning ej möjlig från någon del av schaktet där brandgaslagret befinner sig, brandgasernas utbredning ges av Tabell E.4.

Figur E.8 åskådliggör brandgaslagrets utseende efter 100 respektive 170 sekunder vid simuleringen.



Figur E.8 Rökfyllnad i schaktet efter 100 respektive 170 sekunder

Enligt Figur E.7 är sikten i brandgaserna för den vänstra figuren ovan drygt 20 meter och för den högra figuren ungefär 5 meter.

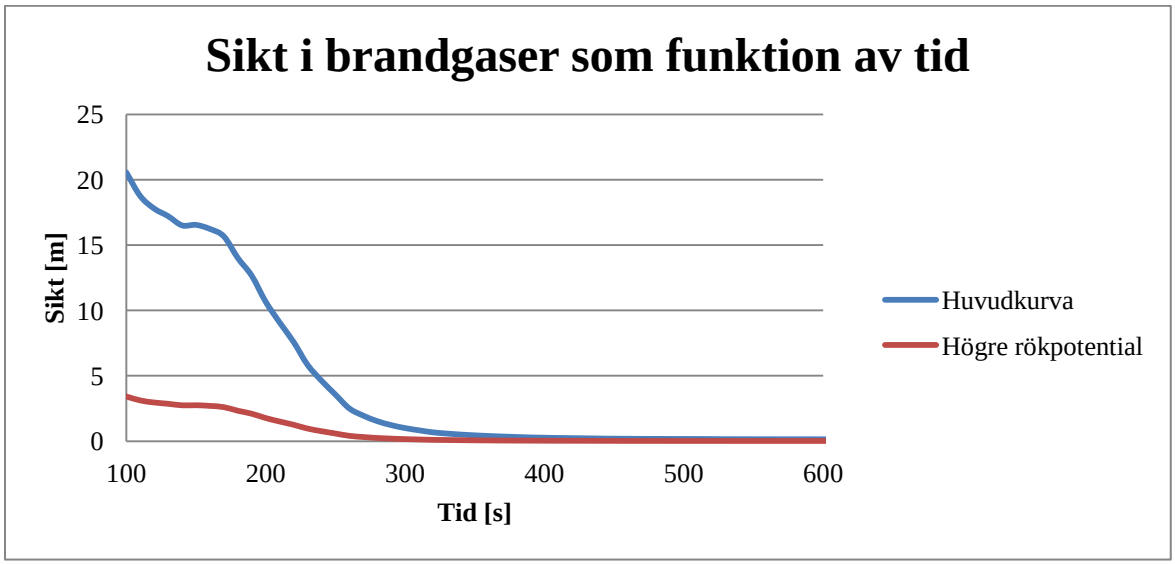
E.3 Scenario 5 - Brandstart i horisontell sektion med båda sorters kablar

Nedan redogörs för scenariot där brandstart skedde i en horisontell kabelsektion som löper längs schaktets inre vägg, startpositionen är satt i en centralt placerad kabel på en kabelsektion 5 meter ovan golv. Då scenariot studeras noggrannare i smokeview urskiljs ett tydligt brandgaslager först efter ungefär 100 sekunder. Vid denna tidpunkt har brandgaserna nått ungefär 45 meter upp i kabelschaktet, kring sjunde våningsplanet, och ner till ungefär 17 meter ovan golv, kring tredje våningsplanet. Efter 250 sekunder har brandgaserna nått upp till toppen av kabelschaktet och tagit sig ner till 1 meter ovan golv. Beräkningar avseende sikten har utförts från 100 sekunder och framåt då det först var vid denna tidpunkt ett tydligt brandgaslager kunde urskiljas och en volymuppskattning var möjlig. Precis som tidigare uppskattas brandgaslagrets volym och höjd ovan golv i tiosekundersintervallet, resultaten från dessa skattningar åskådliggörs i Tabell E.5.

Tabell E.5 Brandgaslagrets uppskattade volym och höjd ovan golv i tiosekundersintervaller

Tid [s]	Brandgaslagrets volym [m^3]	Brandgaslagrets höjd över golv [m]	Tid [s]	Brandgaslagrets volym [m^3]	Brandgaslagrets höjd över golv [m]
100	638	17	**220**	1276	2
110	638	17	**230**	1276	2
120	661	17	**240**	1322	1
130	706	16	**250**	1345	1
140	775	14	**260**	1345	1
150	866	12	**270**	1367	0
160	957	10	**280**	1367	0
170	1048	8	**290**	1367	0
180	1071	7	**300**	1367	0
190	1117	6	**310**	1367	0
200	1162	5	⋮	⋮	⋮
210	1208	4	**750**	1367	0

Vidare utförs de tidigare angivna beräkningsstegen för att därmed ta fram en kurva på hur sikten förändras med tiden, dessa beräkningar resulterar i kurvan som åskådliggörs i Figur E.9.

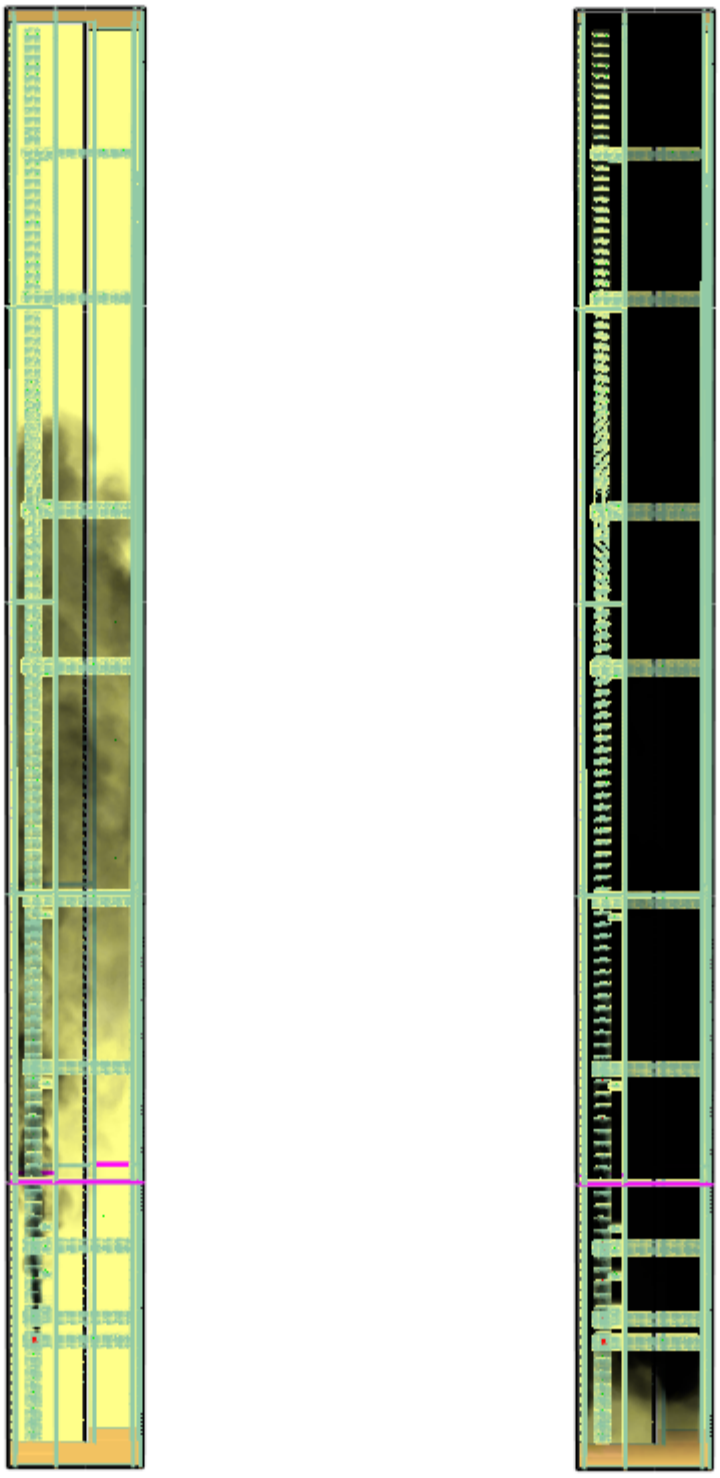


Figur E.9 Siktförändring i brandgaserna med avseende på tiden

Figuren ovan visar att sikten i brandgaserna understiger 5 meter efter ungefär 250 sekunder. Vid denna tidpunkt når brandgaslagret upp till toppen av kabelschaktet och ner till ungefär 1 meter ovan golv. Efter 250 sekunder är alltså utrymning från kabelschaktet ej längre möjlig.

Beräkningar utförda med ett sex gånger högre värde på rökpotentialen visar att sikten i brandgaserna understiger 5 meter direkt då ett tydligt brandgaslager kan urskiljas i kabelschaktet. Från och med denna tidpunkt är utrymning alltså ej möjlig från någon del av schaktet där brandgaslagret befinner sig, brandgasernas utbredning ges av Tabell E.5.

Figur E.10 åskådliggör brandgaslagrets utseende efter 100 respektive 250 sekunder vid simuleringen.



Figur E.10 Rökfyllnad i schaktet efter 100 respektive 250 sekunder

Enligt Figur E.9 är sikten i brandgaserna för den vänstra figuren ovan ungefär 20 meter och för den högra figuren ungefär 5 meter.

Bilaga F Beräkningar toxicitet

Vid beräkningar av de massor av olika ämnen som bildas vid förbränning används uttrycket yield, detta kan beskrivas som massa producerat ämne per massa förbränt bränsle och skrivs som (Karlsson & Quintiere, 2000)

$$y_i = \frac{m_i}{m_f} \qquad \text{Ekvation F.1}$$

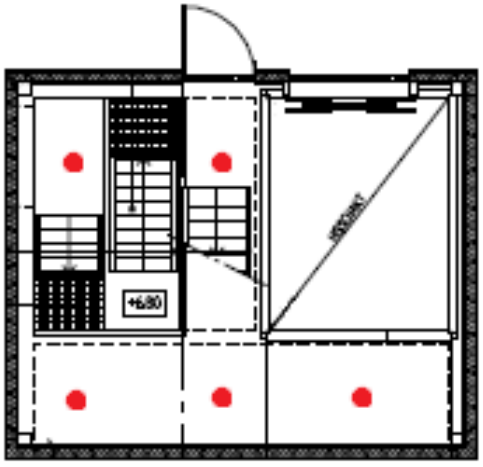
Mängden förbränt bränsle beräknas på samma sätt som i föregående bilaga med utgångspunkt av Ekvation F.2

$$m_f = \int_0^t \frac{\dot{Q}}{\chi \cdot \Delta H_c} \cdot dt \qquad \text{Ekvation F.2}$$

För att kunna beräkna koncentrationer av kolmonoxid, koldioxid och väteklorid i den omgivande luften krävs vetskap om hur stora volymer respektive gas upptar. Dessa volymer beräknas med allmänna gaslagen, Ekvation F.3, vilket innebär att brandgaserna antas vara ideala gaser vid beräkningarna.

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T \qquad \text{Ekvation F.3}$$

Vid beräkningarna antas att det råder normalt lufttryck, det vill säga 101 300 Pascal. Temperaturen erhålls genom att beräkna medeltemperaturen hos rökgaserna i schaktet, detta utförs genom att placera diverse termoelement på olika höjder i schaktet vid simuleringarna och avläsa temperaturerna hos de termoelement som befinner sig i rökgaslagret vid olika tidpunkter. Termoelementen är placerade var 5:e meter i höjdled och har horisontella positioner enligt Figur F.1.



Figur F.1 Placering av termoelement i schaktet

Ideala gaslagen ger följande ekvation för volymen av respektive gas

$$V_{gas} = \frac{m \cdot R \cdot T}{p \cdot M} \qquad \text{Ekvation F.4}$$

När dessa volymer är kända beräknas koncentrationerna av varje gas enligt

$$vol\%_{gas} = \frac{V_{gas}\,(t)}{V_{schakt}} \qquad \text{Ekvation F.5}$$

Beräkningsgången ser ut som följer

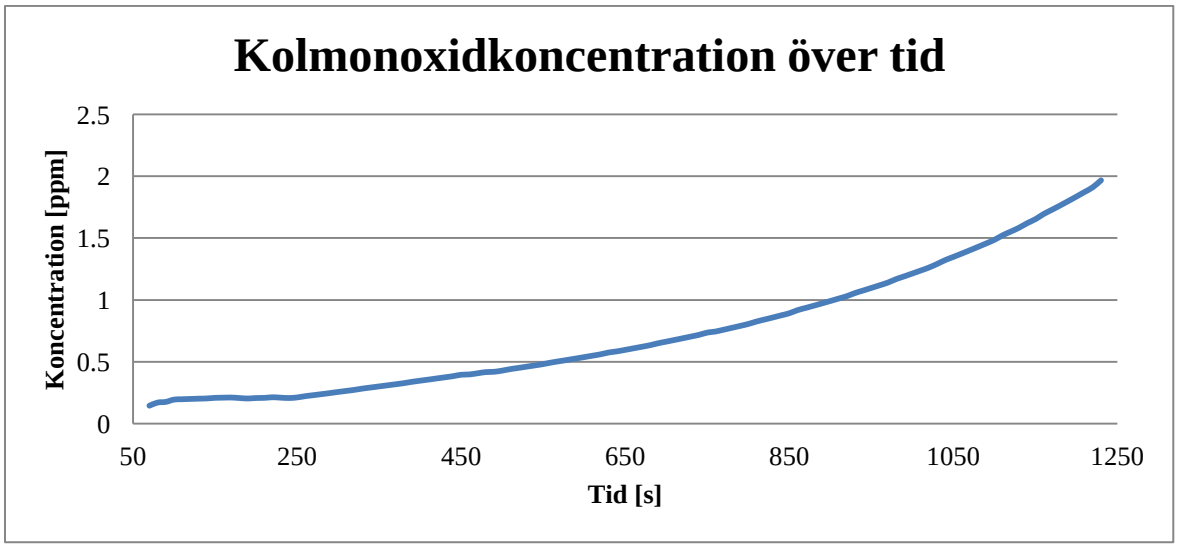
1. Förbränningsvärme för PVC samt den förbrända massan hämtas från beräkningar i föregående bilaga
2. Vid välventilerade förhållanden gäller följande värden på yielderna (Karlsson & Quintiere, 2000)
   $y_{CO} = 0{,}063$
   $y_{CO_2} = 0{,}46$
   $y_{HCl} = 0{,}5$
   $y_s = 0{,}14$
3. Volymer av de producerade ämnena beräknas enligt Ekvation F.4
4. Koncentrationerna av de producerade ämnena beräknas enligt Ekvation F.5 och redovisas som funktion av tiden

Beräkningarna utförs i MS Excel och presenteras ej i rapporten.

F.1 Scenario 1 - Brandstart i yttre kabelstege innefattande kraftkablar

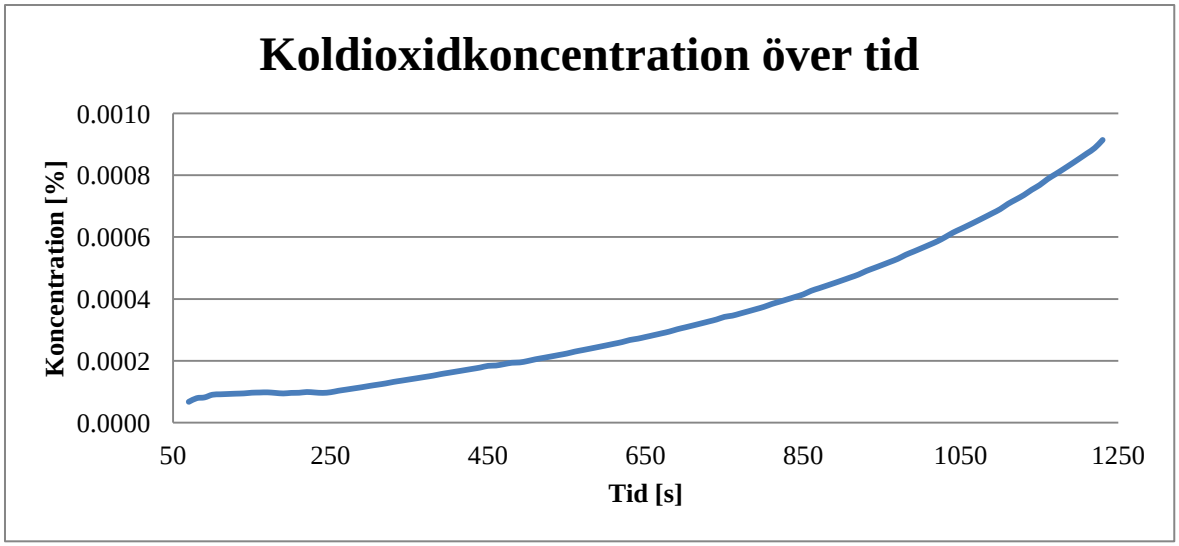
I följande avsnitt åskådliggörs koncentrationer av kolmonoxid, koldioxid och väteklorid i brandgaserna vid de olika brandscenarierna. Precis som vid beräkningarna av siktförhållandena gäller följande beräknade värden koncentrationerna i brandgaserna.

Vid brandscenario 1 dröjde det ungefär 70 sekunder innan dess att ett tydligt brandgaslager kunde urskiljas i smokeview, därmed åskådliggörs i följande figurer gaskoncentrationerna från och med denna tidpunkt. Vid detta brandscenario var hela kabelschaktet rökfyllt efter ungefär 760 sekunder. Figurerna F.2-F.4 åskådliggör koncentrationerna av kolmonoxid, koldioxid och väteklorid över tid i brandgaserna.



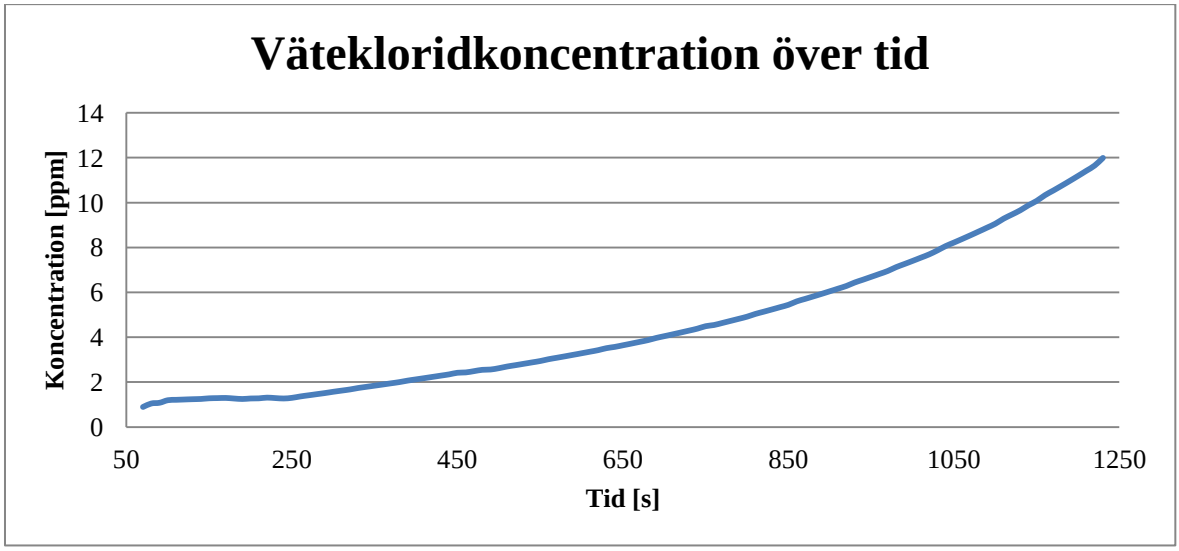
Figur F.2 Kolmonoxidkoncentration i brandgaserna över tid

Kolmonoxidkoncentration > 2 000 ppm uppnås ej under simuleringsförloppet.



Figur F.3 Koldioxidkoncentration i brandgaserna över tid

Koldioxidkoncentration > 5 % uppnås ej under simuleringsförloppet.

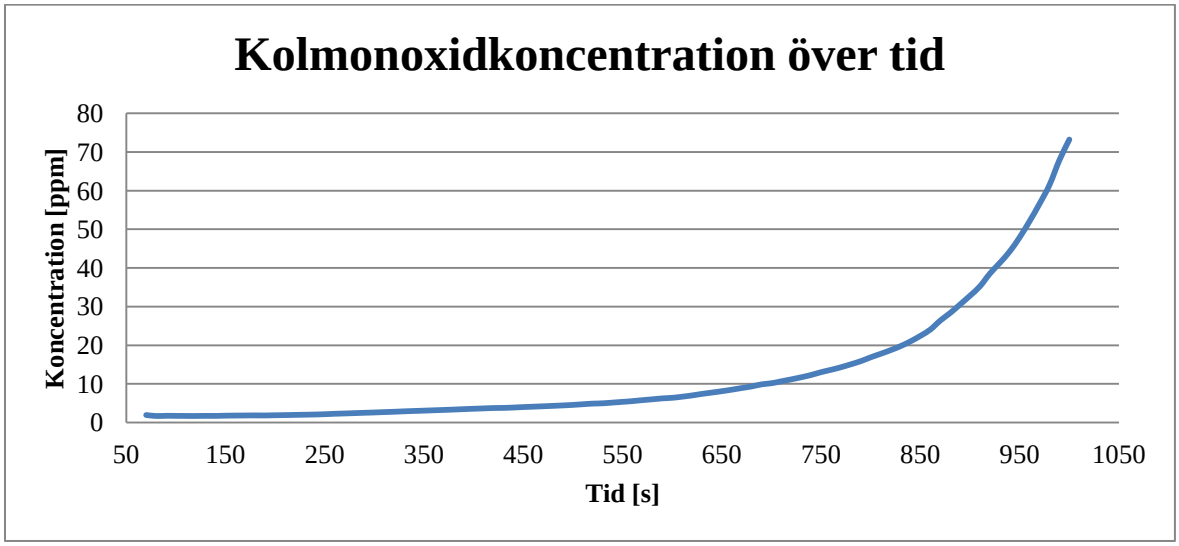


Figur F.4 Vätekloridkoncentration i brandgaserna över tid

Vätekloridkoncentration > 309 ppm uppnås ej under simuleringsförloppet.

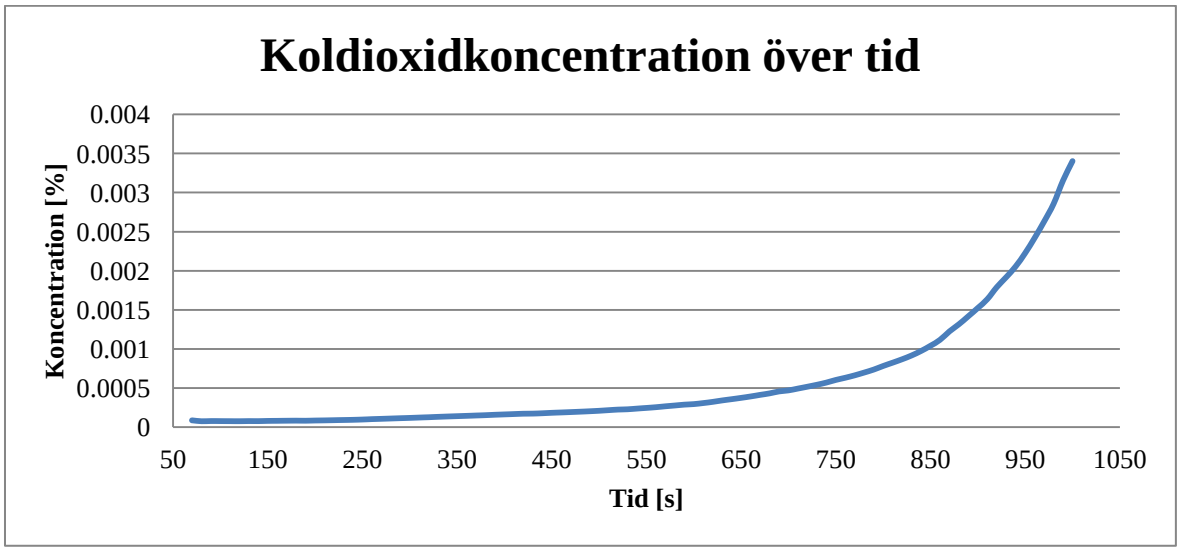
F.2 Scenario 2 - Brandstart i inre kabelstege innefattande kraftkablar

Vid brandscenario 2 dröjde det ungefär 70 sekunder innan ett tydligt brandgaslager kunde urskiljas i smokeview, därmed åskådliggörs i följande figurer gaskoncentrationerna från och med denna tidpunkt. Vid detta scenario var hela kabelschaktet rökfyllt efter ungefär 700 sekunder. Figurerna F.5-F.7 åskådliggör koncentrationerna av kolmonoxid, koldioxid och väteklorid över tid i brandgaserna.



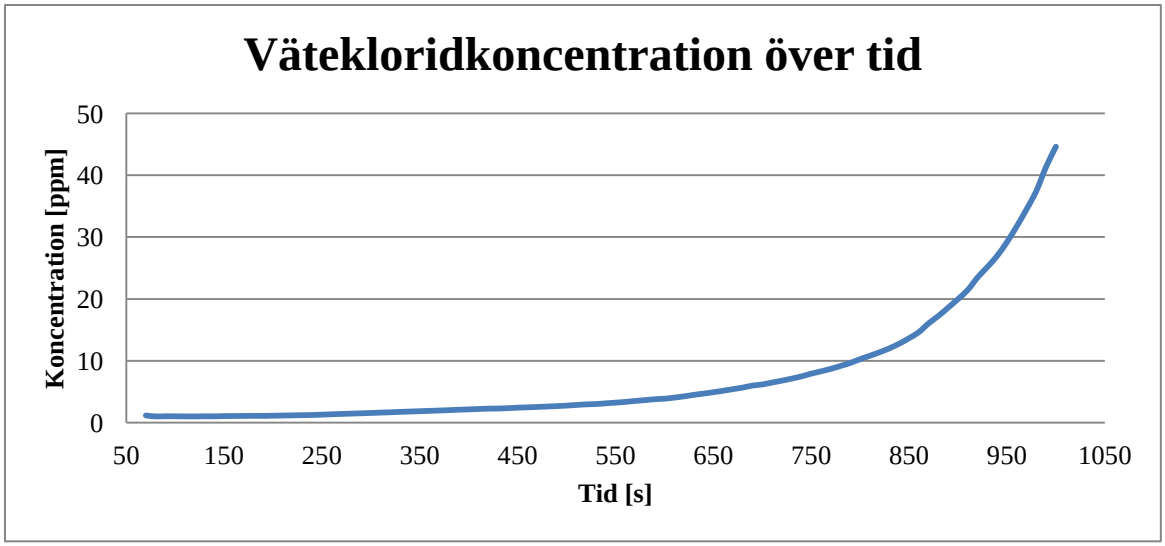
Figur F.5 Kolmonoxidkoncentration i brandgaserna över tid

Kolmonoxidkoncentration > 2 000 ppm uppnås ej under simuleringsförloppet.



Figur F.6 Koldioxidkoncentration i brandgaserna över tid

Koldioxidkoncentration > 5 % uppnås ej under simuleringsförloppet.

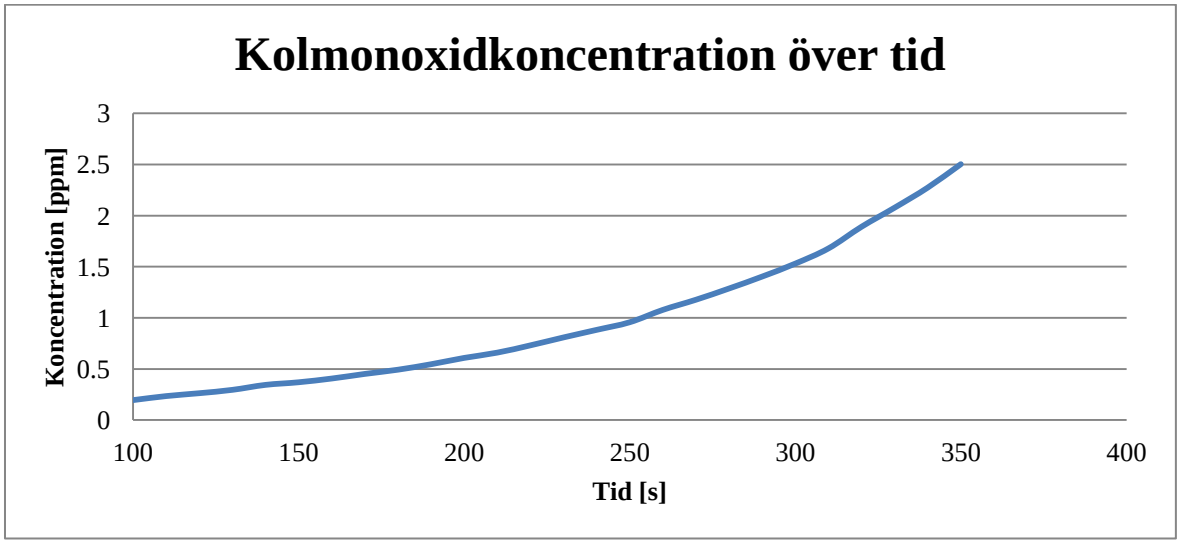


Figur F.7 Vätekloridkoncentration i brandgaserna över tid

Vätekloridkoncentration > 309 ppm uppnås ej under simuleringsförloppet.

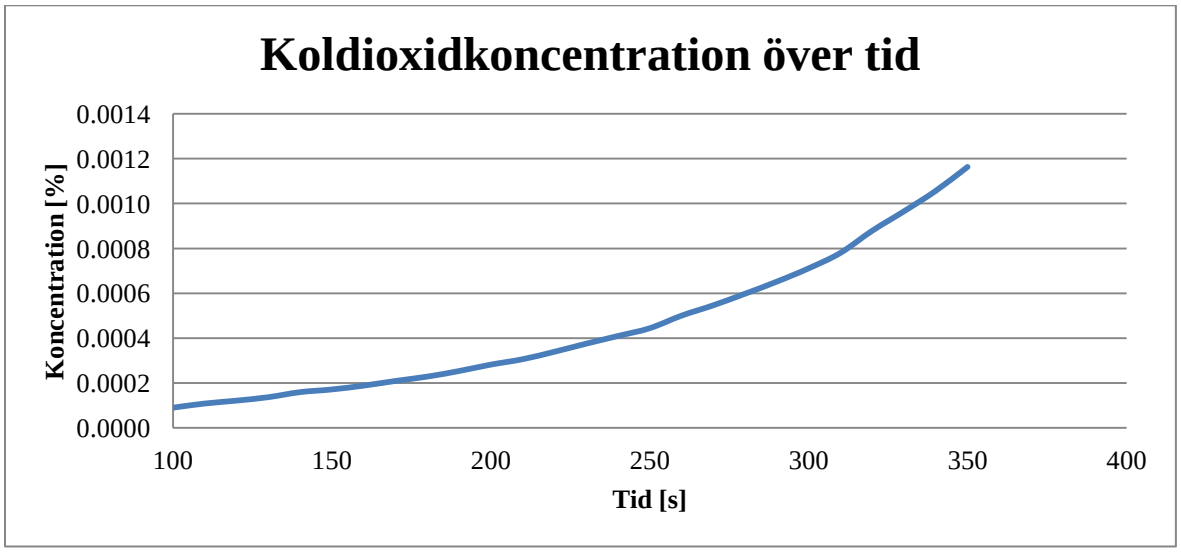
F.3 Scenario 3 - Brandstart i yttre kabelstege innefattande övriga kablar

Vid brandscenario 3 dröjde det ungefär 100 sekunder innan ett tydligt brandgaslager kunde urskiljas i smokeview, därmed åskådliggörs i följande figurer gaskoncentrationerna från och med denna tidpunkt. Vid detta scenario var hela kabelschaktet rökfyllt efter ungefär 250 sekunder. Figurerna F.8-F.10 åskådliggör koncentrationerna av kolmonoxid, koldioxid och väteklorid över tid i brandgaserna.



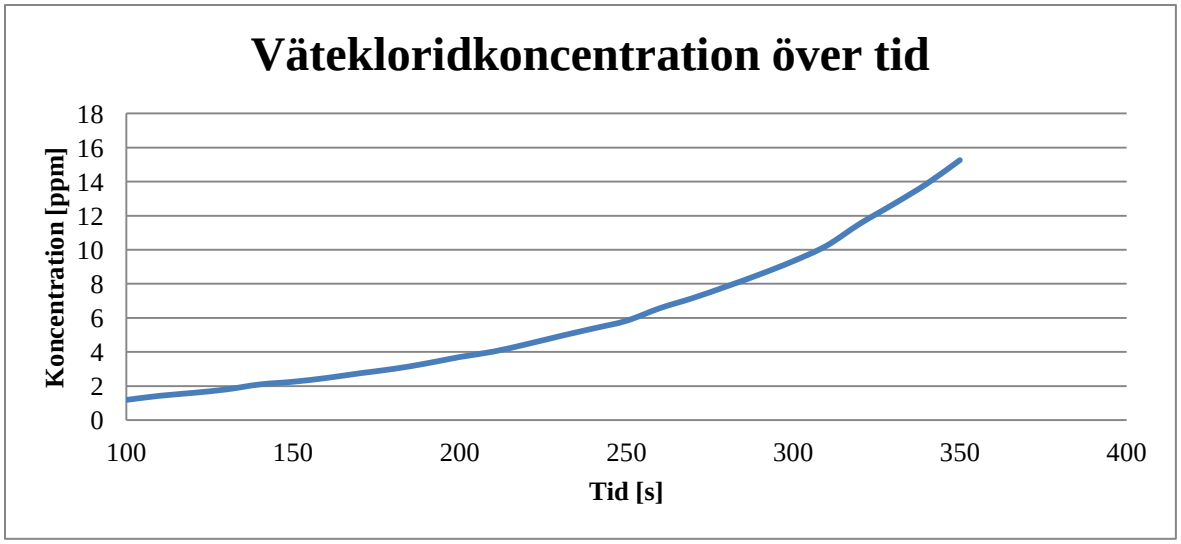
Figur F.8 Kolmonoxidkoncentration i brandgaserna över tid

Kolmonoxidkoncentration > 2 000 ppm uppnås ej under simuleringsförloppet.



Figur F.9 Koldioxidkoncentration i brandgaserna över tid

Koldioxidkoncentration > 5 % uppnås ej under simuleringsförloppet.

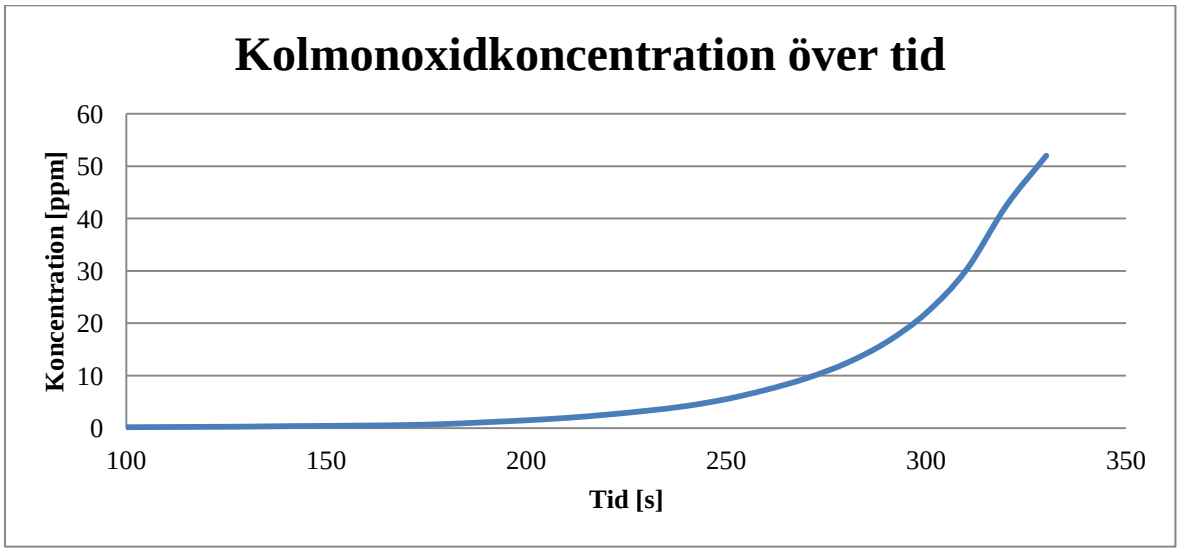


Figur F.10 Vätekloridkoncentration i brandgaserna över tid

Vätekloridkoncentration > 309 ppm uppnås ej under simuleringsförloppet.

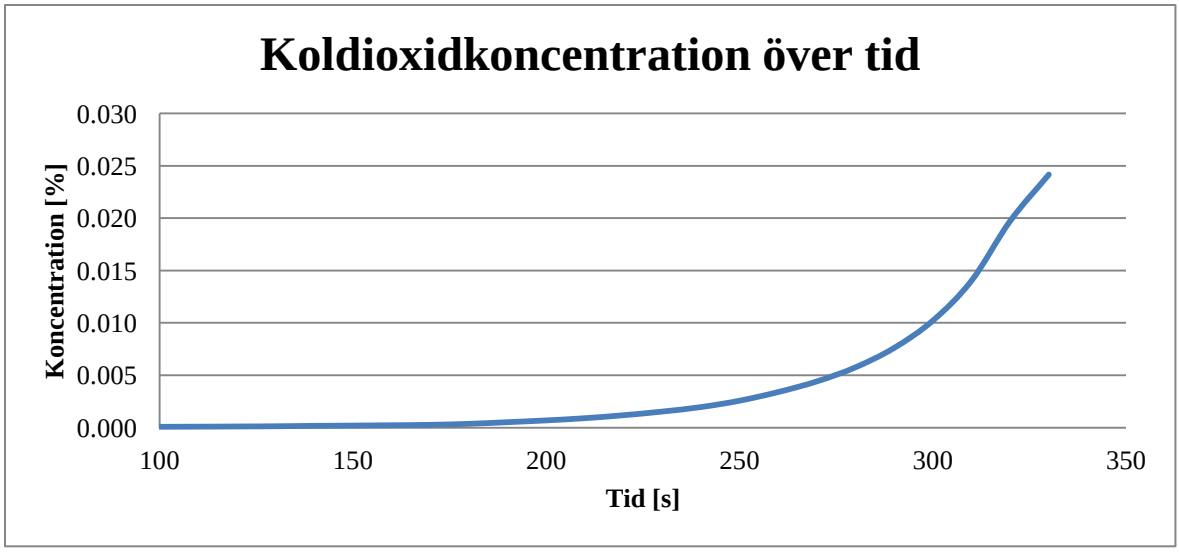
F.4 Scenario 4 - Brandstart i inre kabelstege innefattande övriga kablar

Vid brandscenario 4 dröjde det ungefär 100 sekunder innan ett tydligt brandgaslager kunde urskiljas i smokeview, därmed åskådliggörs i följande figurer gaskoncentrationerna från och med denna tidpunkt. Vid detta scenario var hela kabelschaktet rökfyllt efter ungefär 250 sekunder. Figurerna F.11-F.13 åskådliggör koncentrationerna av kolmonoxid, koldioxid och väteklorid över tid i brandgaserna.



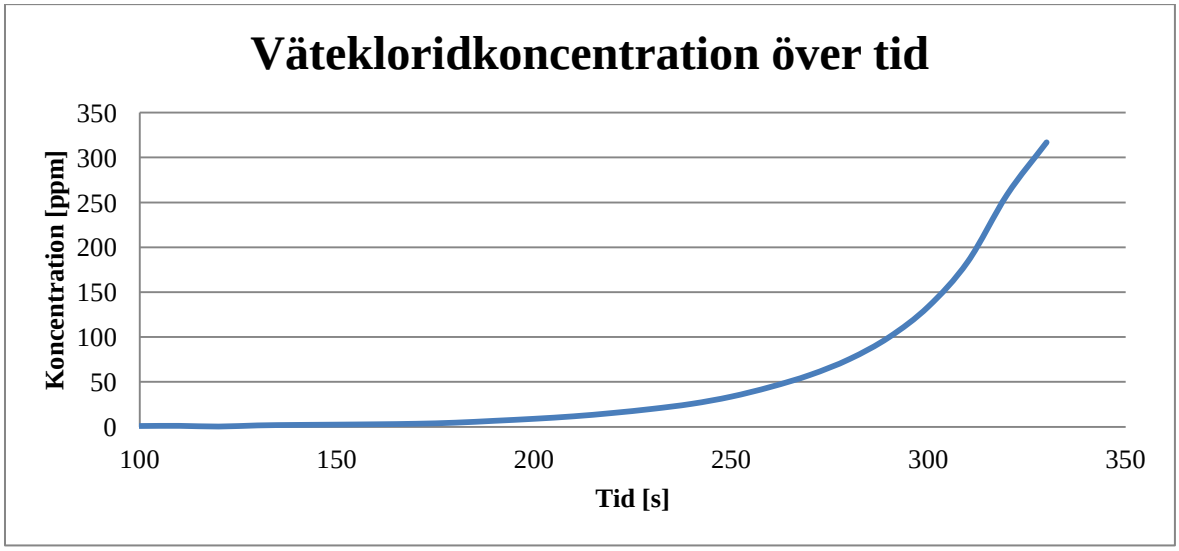
Figur F.11 Kolmonoxidkoncentration i brandgaserna över tid

Kolmonoxidkoncentration > 2 000 ppm uppnås ej under simuleringsförloppet.



Figur F.12 Koldioxidkoncentration i brandgaserna över tid

Koldioxidkoncentration > 5 % uppnås ej under simuleringsförloppet.

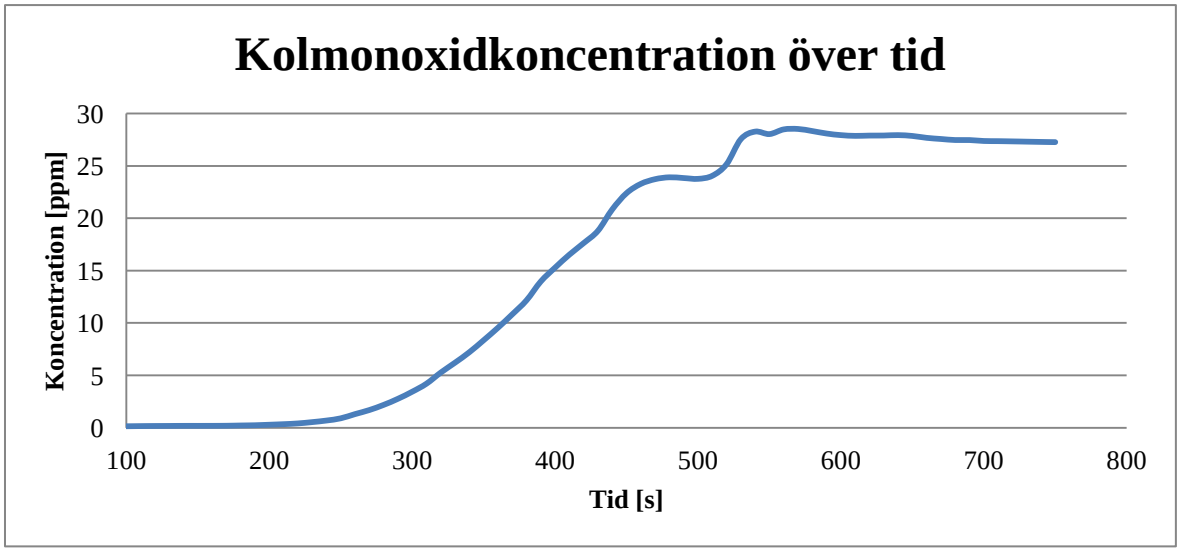


Figur F.13 Vätekloridkoncentration i brandgaserna över tid

Vätekloridkoncentration > 309 ppm uppnås efter ungefär 325 sekunder, vid denna tidpunkt är schaktet helt rökfyllt.

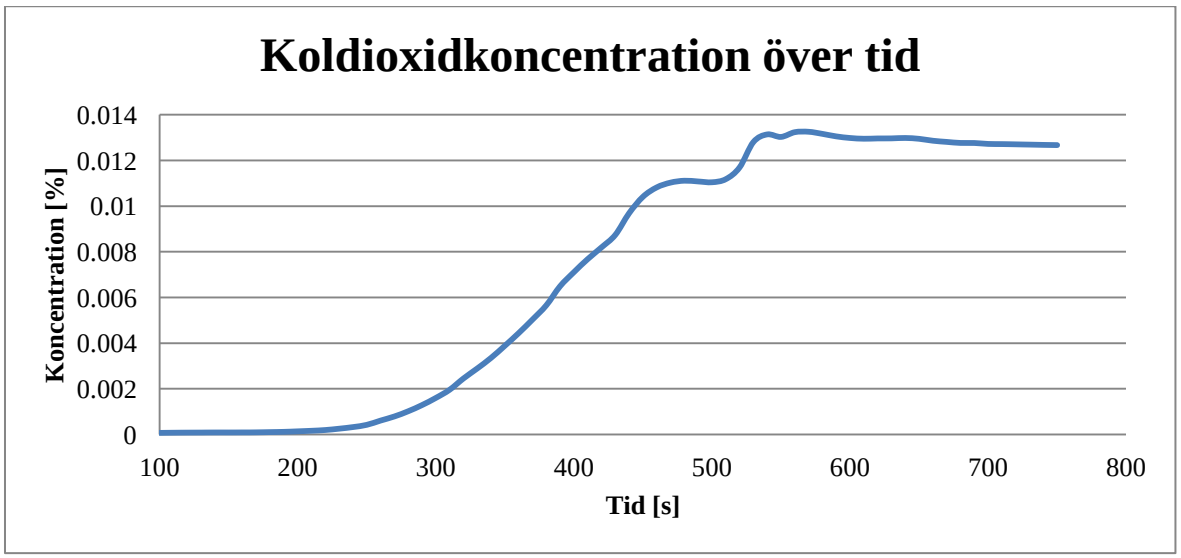
F.5 - Scenario 5 - Brandstart i horisontell sektion med båda sorters kablar

Nedan redogörs för brandscenario 5 där brandstart skedde i en horisontell kabelsektion med båda sorters kablar. Brandens startposition är satt i en centralt placerad kabel på en kabelsektion som löper längs kabelschaktets inre vägg, på höjden 5 meter ovan golv. Vid följande brandscenario dröjde det ungefär 100 sekunder innan ett tydligt brandgaslager kunde urskiljas i smokeview, därmed åskådliggörs i följande figurer gaskoncentrationerna från och med denna tidpunkt. Vid detta scenario var kabelschaktet helt rökfyllt efter ungefär 270 sekunder. Figurerna F14-F.16 åskådliggör koncentrationerna av kolmonoxid, koldioxid och väteklorid över tid i brandgaserna.



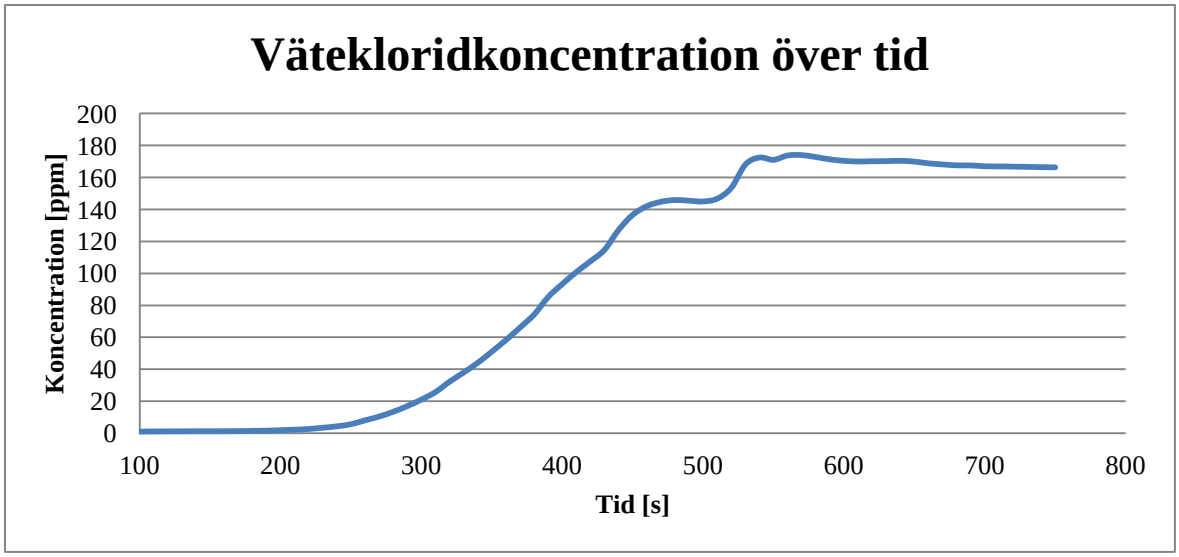
Figur F.14 Kolmonoxidkoncentration i brandgaserna över tid

Kolmonoxidkoncentration > 2 000 ppm uppnås ej under simuleringsförloppet.



Figur F.15 Koldioxidkoncentration i brandgaserna över tid

Koldioxidkoncentration > 5 % uppnås ej under simuleringsförloppet.



Figur F.16 Vätekloridkoncentration i brandgaserna över tid

Vätekloridkoncentration > 309 ppm uppnås ej under simuleringsförloppet.

Bilaga G Beräkningar av utrymningstid från schaktet

För att bedöma huruvida utrymning kan ske innan dess att kritiska förhållanden uppstår utförs i följande avsnitt en grov bedömning av den maximalt möjliga utrymningstiden från schaktet. Beräkningar av utrymningstiden från schaktet utförs med utgångspunkt från Boverkets allmänna råd om analytisk dimensionering av byggnaders brandskydd, BFS 2011:27. Denna anger att tiden för utrymning bör inkludera tider för varseblivning, förberedelse samt förflyttning (Boverket, 2011). Vid analys av utrymningsmöjligheterna bör den tillgängliga tiden för utrymning överstiga utrymningstiden för samtliga scenarier där hänsyn bör tas till de beteendemönster som kan förväntas vid den aktuella verksamheten (Boverket, 2011).

G.1 Dimensionerande personantal

Utvärderingen av utrymningsmöjligheterna vid brand bör grundas på det maximala antalet personer som kan förväntas befinna sig i lokalen (Boverket, 2011).

Normalt vistas ej personer i schaktet och vid de fall då personer befinner sig i schaktet är det endast en eller enstaka personer. Detta medför att parametern personantal ej kommer påverka utrymningstiden då denna parameter börjar spela in först då personantalet är i sådan omfattning att det till exempel kan bli trängsel eller köbildning i utrymningsvägarna.

G.2 Varseblivningstid

Varseblivningstid definieras som tiden fram tills dess att en person upptäcker att det brinner. Varseblivningstiden för personer som ser branden bör ej vara kortare än 30 sekunder. Om byggnaden är försedd med ett utrymningslarm kan varseblivningstiden för personer som inte ser branden bestämmas utifrån den tidpunkt då utrymningslarmet startar (Boverket, 2011).

Det finns ett antal detektorer installerade i schaktet vilket därmed anses kunna ge en tidig indikation på brand. Då kabelschaktet är förhållandevis smalt och har gallertrappor är det möjligt att i princip se rakt igenom schaktet. Då en eventuell brand även producerar mycket brandrök anses det vara ett rimligt antagande att den maximala varseblivningstiden kan ligga omkring 30 sekunder.

G.3 Förberedelsetid

Förberedelsetiden är den tid det tar från dess att en person ska förstå att det brinner och förbereda sig för förflyttning tills dess att förflyttningen kan påbörjas. Det finns diverse yttre faktorer som kan påverka denna tid, sådana som talande utrymningslarm, synliga utgångar, utrymningsskyltar, om personer är vakna eller ej med mera (Boverket, 2006). Dessa yttre faktorer är dock inga som spelar in för den befintliga utrymningssituationen.

Då det endast är anställda som rör sig i schaktet och de högst troligt är väl införstådda med hur brandlarmet låter anses förberedelsetiden ligga på ett lågt värde. Boverket anger i BFS 2011:27 en tabell med förslag till förberedelsetider för ett antal verksamheter. Då schaktet ej är lik någon av dessa verksamheter är det svårt att göra någon jämförelse. Dock anges för en mindre lokal med larmdom i lokalen en förberedelsetid på en minut. Med tanke på lokalkännedomen för de personer som rör sig i schaktet anses förberedelsetiden ej överstiga detta värde. Den maximala förberedelsetiden sätts därmed till en minut.

G.4 Förflyttningstid

Den sista parametern, förflyttningstid, är den tid det tar från dess att en person börjat gå tills dess att denne är ute ur lokalen. Även denna parameter är beroende av ett antal faktorer, sådana som vilka

personer det är fråga om, dess hjälpbehov, förmåga att förflytta sig med mera (Boverket, 2006). Inte heller dessa parametrar kommer spela in vid en utrymning från schaktet.

Boverket anger i BFS 2011:27 en tabell med förslag till gånghastigheter för utrymmande personer. Dessa gånghastigheter anges i Tabell G.1 nedan.

Tabell G.1 Gånghastigheter för utrymmande personer (Boverket, 2011)

Förbindelse	Gånghastighet [m/s]
Horisontell	1,5
Uppför trappa	0,6
Nedför trappa	0,75

Vid beräkning av förflyttningstiden utgås från att en person är placerad på en position i schaktet vid vilken personen i fråga har den längsta möjliga sträckan att ta sig ut. Då det finns dörrar ut till det fria på varje våningsplan placeras därmed personen mellan de två våningsplan vilka har störst höjdskillnad och därmed längst gångavstånd. Efter observationer av befintliga ritningar samt beräkningar av gångavstånd dras slutsatsen att en utrymmande person har längst sträcka att tillryggalägga då denne befinner sig mellan bottenplanet och våningen ovanför. Personen har i detta fall 15 meters gångsträcka oavsett vilket håll denne än tar. Av denna sträcka är 9 meter trappor och 6 meter horisontell väg, med utgångspunkt från tabellen ovan ger detta förflyttningstiderna 19 och 16 sekunder för utrymning uppåt respektive neråt. Då förflyttningstiden är längst vid det fall då utrymning sker uppåt används denna vid beräkning av den totala utrymningstiden.

G.5 Total utrymningstid

Den totala utrymningstiden från schaktet blir därmed 30+60+19 = 109 sekunder, alltså lite under två minuter. Det är därmed denna tid som kommer användas vid bedömningar av utrymningsmöjligheterna från schaktet, då de olika deltiderna bedöms som de högst möjliga ger detta att utrymningstiden ej anses kunna vara längre än 109 sekunder.

Bilaga H FDS & Pyrosim

Fire Dynamics Simulator, FDS, är ett program som utför simuleringar av luft- och brandgasflöden enligt Computational Fluid Dynamics. Programmet arbetar i dos-format och simuleringen som ska utföras kodas manuellt via en textfil som innefattar den information som krävs för simulering. Modellen delar in ett brandrum i ett fördefinierat antal kontrollvolymer där programmet genom algoritmer löser en enklare form av Navier-Stokes ekvationer för flöden i varje kontrollvolym. Enklare visualiseringar av resultat och geometrier ges via tilläggsprogrammet Smokeview. Både FDS och Smokeview är utvecklade av NIST och kan hämtas kostnadsfritt via deras hemsida (NIST, 2010).

Pyrosim är ett grafiskt interface till FDS där modellen istället kan ritas upp vilket därmed ger en grafisk överblick. Alla ingående värden som krävs för simulering kan hanteras i programmet vilket sedan även automatiskt skriver koden som vid simulering behandlas av FDS. Pyrosim är ett kommersiellt program utvecklat av Thunderhead Engineering (Thunderhead Engineering, 2011). I rapporten har alla geometrier och ingående värden genererats med detta program.

H.1 Felkällor och begränsningar i FDS

Då modellen styrs genom, av användaren, angivna indata krävs att denne har omfattande kunskap om branddynamik samt modellen i sig. Dessutom har varken FDS eller Smokeview någon funktion som meddelar om resultaten från simuleringarna är otillförlitliga vilket medför att det även är användaren som måste utföra dessa bedömningar (Nystedt & Frantzich, 2011). Detta medför att erhållna resultat måste kvalitetssäkras innan de används för vidare analyser.

Även programmet i sig har ett antal begränsningar vilka användaren ej kan styra över, dessa är viktiga att ta i beaktning vid analysering av resultat.

FDS har vissa svårigheter att modellera en flamma, både avseende plymtemperatur och flamhöjd, detta kan leda till något otillförlitliga resultat avseende värmestrålning och temperatur i brandens närområde. Det leder även till svårigheter att modellera spridning och brandtillväxt i fasta material. Således behövs en användarspecificerad effektutveckling med avseende på tid för att programmet ska kunna leverera tillfredsställande resultat. Modellen har även svårigheter att bedöma sotproduktion då fördefinierade värden avseende detta gäller för välventilerade förhållanden. Då en flamma går in i övre brandgaslagret renderar detta i en felkälla då den vid detta fall liknar en underventilerad brand med ökad sotproduktion som följd (Nystedt & Frantzich, 2011). Även storleken av kontrollvolymerna är en viktig parameter att ta hänsyn till. Då simuleringar utförs med för stora kontrollvolymer uppkommer framförallt problem relaterade till (Nystedt & Frantzich, 2011):

- Luftinblandning i plymen; vid för stora kontrollvolymer blir luftinblandningen för dålig vilket kan resultera i en allt för hög plymtemperatur
- Flöden genom öppningar; flöde genom öppningar kan vid för stora kontrollvolymer begränsas på ett orealistiskt sätt
- För mycket medelvärden; då FDS för varje kontrollvolym beräknar medelvärden resulterar detta i att extremvärden underskattas då kontrollvolymerna är för stora

En annan begränsning avseende simulering av kabelbränder är att i FDS antas alla obstruktioner överensstämma med den rätlinjiga meshen och alla avgränsande ytor antas vara plana. Många föremål så som kablar, rör och ledningar är dock ej platta utan cylindriska. Men även om dessa objekt i FDS måste representeras som "boxar" kan värmeledningsekvationerna för cylindriska objekt ändå utföras på föremålen vid användandet av kommandot 'CYLINDRICAL' för dessa objekt, detta kommando har använts vid simuleringarna (NIST,2010).

H.2 Modellering i FDS

Följande avsnitt behandlar hur effektutvecklingskurvor och skadekriterier hos kablarna överförts till FDS. Inledningsvis anges för hur antändning och brandspridning behandlas i FDS varpå det anges hur inre temperaturer av kablar modelleras.

H.2.1 Simuleringsutförande

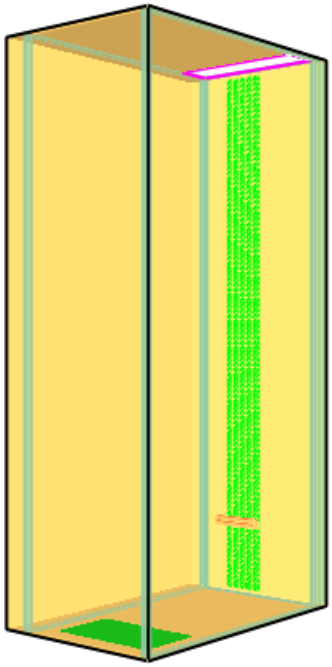
Vilket diskuterats i tidigare avsnitt kommer anpassning av FIPEC-projektets effektkurvor till αt^2-kurvor ej ge adekvata resultat, framförallt då spridning mellan kabelstegar är ett faktum då bland annat återstrålning mellan kabelstegarna kommer medföra att effektutvecklingskurvorna kommer att se annorlunda ut. Indata till simuleringarna måste därför anpassas så att programmet tar hänsyn till att brandförloppet hos en kabelstege som det skett spridning till även kommer påverkas av den första kabelstegens brandförlopp. För att hantera detta kan kablarna delas upp i ett antal lika stora delar som alla har en specifik antändningstemperatur och brinntid. Detta medför därmed att fler och fler kabeldelar blir involverade längre in i brandförloppet vilket i sin tur medför att andra kabeldelar uppnår sina antändningstemperaturer snabbare och snabbare. Vid simuleringar med detta tillvägagångssätt kommer därmed den resulterande effektutvecklingskurvan anta formen av en αt^2-kurva. I detta fall är begränsningen avseende spridning mellan kabelstegar hanterad, till skillnad från det fall då en befintlig αt^2-kurva definieras i programmet. För att få rätt indata avseende framförallt antändningstemperatur och brinntid för kabeldelarna måste det inledningsvis utföras någon form av kalibrering med utgångspunkt från tidigare utförda försök. Detta utförs genom att försöka matcha de, av FDS, resulterande effektutvecklingskurvorna med tillgängliga effektutvecklingskurvor från FIPEC-projektet.

H.2.2 Anpassning till framtagna effektutvecklingskurvor

För att erhålla giltiga resultat från simuleringar av en potentiell brand i schaktet där kabelstegarna innefattar olika antal kablar med olika avstånd sinsemellan modelleras inledningsvis brandspridning i en kabelstege med utgångspunkt av tidigare framtagna effektutvecklingskurvor. Detta utförs genom att utföra simuleringar med försöksuppställning i linje med FIPEC-projektets fullskaleförsök, det vill säga ISO 60332-3-tester med optimerade kabelavstånd och ökat luftflöde. Hur den exakta försöksuppställningen skall uppföras finns att tillgå i Grayson et al (2000), nedan anges för de huvudsakliga parametrarna i försöksuppställningen (Grayson et al, 2000):

- Testkammarens inre mått skall vara (2 000 ± 100) mm * (1 000 ± 100) mm * (4 000 ± 100) mm (l*b*h)
- Väggarna består av en inre 2 mm tjock stålplatta följt av en 65 mm tjock mineralullsisolering, detta skall ge en värmeöverföringskoefficient på ungefär 0.7 W/(m^2·K)
- Kabelstege (500 ± 5) mm bred monterad (150 ± 10) mm från den inre väggen, kablarnas lägsta punkt skall vara ungefär 100 mm ovan golv
- Brännaren skall ha effekten 20 kW med en flamproducerande yta på 341*30 mm, placerad (75 ± 5) mm från kablarna och (600 ± 5) mm ovan golv
- Luftintag i golvet (800 ± 20) mm * (400 ± 10) mm placerad 150 ± 10 mm från främre vägg, detta skall förse kammaren med ett luftflöde på (8 000 ± 800) l/min
- Luftuttag i taket (300 ± 30) mm * (1 000 ± 100) mm placerat längs med inre väggen

Försöksuppställningen, sedd i Smokeview, åskådliggörs i Figur H.1.



Figur H.1 Försöksuppställning för kabeltesterna

I figuren ovan är de främre väggarna borttagna vilket så ej är fallet vid tester och simuleringar. Vad gäller kablarnas monterig skall kablar med diametrar > 20 mm monteras med ett inbördes avstånd av 20 mm, kablar med diametrar 5-20 mm skall monteras med en kabeldiameters avstånd och kablar med diametrar < 5 mm skall monteras i 10 mm stora buntar med 10 mm inbördes avstånd mellan buntarna (Grayson et al, 2000). Antalet kablar, N, som skall monteras på en kabelstege beräknas för kablar med diametrar > 20 mm med Ekvation H.1 och för kablar med diametrar 5-20 mm med Ekvation H.2 (Grayson et al, 2000). För beräkning av montering av kablar med diametrar < 5 mm hänvisas till Grayson et al (2000).

$$N = int\left(\frac{300+20}{d_c+20}\right) \qquad \text{Ekvation H.1}$$

$$N = int\left(\frac{300+d_c}{2d_c}\right) \qquad \text{Ekvation H.2}$$

där d_c är diametern på en kabel angett i mm och *int* anger att värdet inom parenteserna skall avrundas nedåt. För kraftkablarna, vilka approximeras som kabel 5, skall det monteras fem stycken kablar per kabelstege och för övriga kablar, vilka approximeras som kabel 24, skall det monteras 11 stycken kablar per kabelstege.

För att anpassa de framtagna effektutvecklingskurvorna med utdata från FDS delas varje kabel upp i 4 cm stora delar där bland annat kriterium för antändning, effektutveckling per areaenhet samt brinntid hos delarna varieras tills dess att de erhållna effektutvecklingskurvorna stämmer överens med de tidigare definierade kurvorna. För att modelleringarna i FDS ska utföras på ett korrekt sätt skall det tas hänsyn till att bränslet hos varje kabeldel tar slut efter en viss tid. För beräkning av hur länge varje kabeldel brinner utgås från Ekvation H.3 (Karlsson & Quintiere, 2000)

$$\dot{Q} = \Delta H_c \cdot \chi \cdot \dot{m} \qquad \text{Ekvation H.3}$$

Ur ovanstående ekvation beräknas den genomsnittliga massavbrinningen hos kablarna i fråga. Detta beräknas genom att utgå från den uppmätta maximala effektutvecklingen hos de olika kabelsorterna. Då båda kabelsorter hade 4 meter skadad längd görs antagandet att då den maximala effektutvecklingen uppnås står alla kablar på kabelstegen i brand, från detta kan därmed den genomsnittliga totala massavbrinningen för alla kablar på en kabelstege beräknas.

För PVC gäller (Drysdale, 1999; NUREG-1824, 2007)

$\Delta H_c = 16.4\ kJ/g$
$\rho = 1380\ kg/m^3$

Förbränningseffektiviteten antas, som tidigare, till 0.7 vilket är ett vanligt värde för sotande bränslen (Karlsson & Quintiere, 2000).

Med vetskap om andelen brännbart material per kabeldel kan, utifrån antagandet ovan, därmed brinntid för varje kabeldel tas fram. Ingående värden samt resultat för massavbrinning och brinntid finns att tillgå i Tabell H.1.

Tabell H.1 Indata och resultat avseende beräkningar av brinntid för varje kabeldel

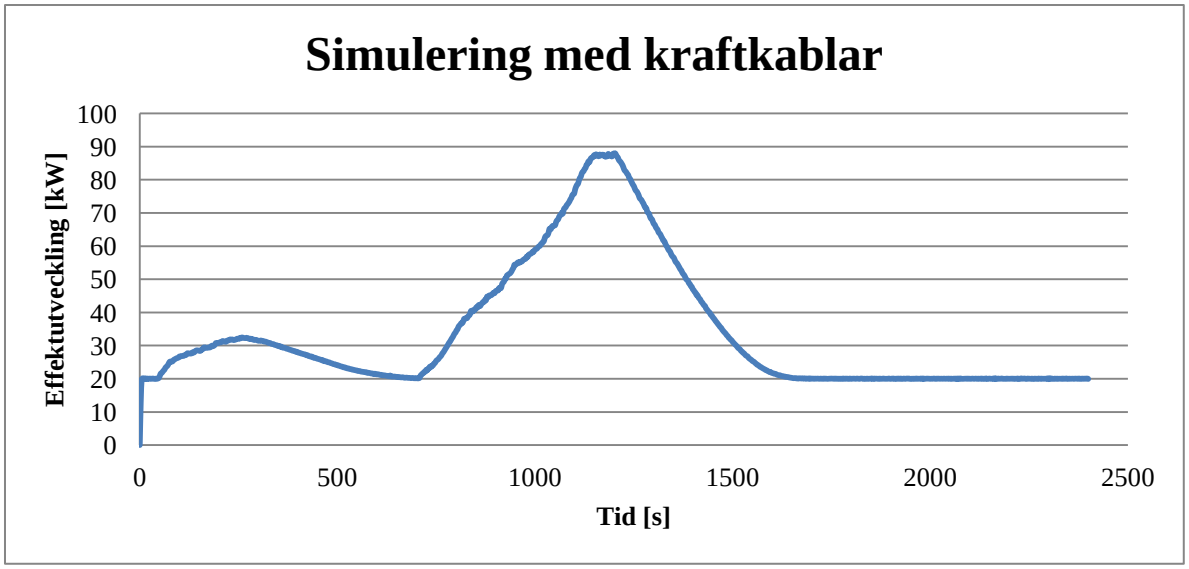
	Max HRR [kW]	m_{tot} /kabelstege [g]	Antal kablar per kabelstege	Antal delar per kabel	$\dot{m}_{c,\ tot}$ [g/s]	$\dot{m}_{c,\ del}$ [g/s]	Brinntid [s]
5	392	15815	5	95	34.15	0.0719	463
24	250	4311	11	95	21.78	0.0208	198

Även effektutvecklingen per areaenhet hos kablarna måste definieras, detta utförs genom att återigen använda den maximala effektutvecklingen för kablarna som sedan kopplas till kablarnas omslutningsarea, vidare kan effektutvecklingen per areaenhet hos varje kabeldel beräknas. Detta ger:

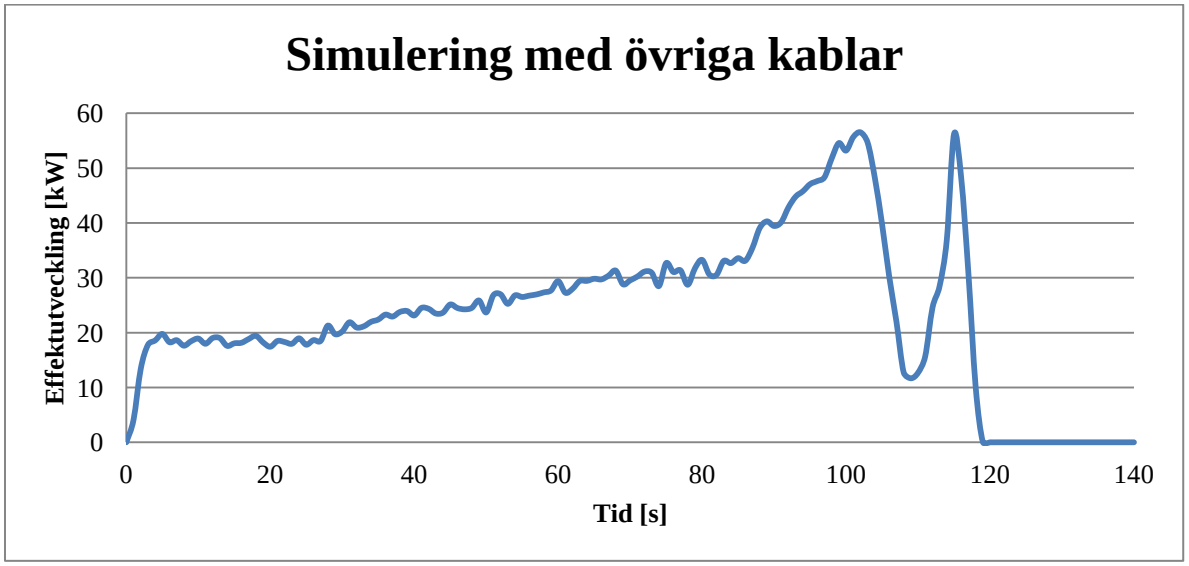
$HRRPUA_{kraft} = 164.1\ kW/m^2$

$HRRPUA_{övriga} = 135.9\ kW/m^2$

Vid insättning av dessa parametrar i programmet erhålls effektkurvor som är vitt skilda från de effektutvecklingskurvor som erhållits från FIPEC-projektets försök, de erhållna effektutvecklingskurvorna från FDS-simuleringarna åskådliggörs i Figur H.2 och Figur H.3, där antändningstemperaturerna ligger på 300 och 200 °C för kraft- respektive övriga kablar.



Figur H.2 Resultat från FDS-simulering av kraftkablar med försöksuppställning enligt FIPEC-försöken



Figur H.3 Resultat från FDS-simulering av övriga kablar med försöksuppställning enligt FIPEC-försöken

Då brandscenarierna studeras noggrannare i Smokeview ses att de kabeldelar som befinner sig under brännaren ej är involverade i brandförloppen, dessutom är inte heller kablarnas hela omslutningsareor involverade i förloppen utan i huvudsak kablarnas framsidor. Detta förklarar varför de maximala effektutvecklingarna som erhålls från simuleringarna är får låga. Efter noggrann observation av hur stor del av kablarna som är involverade i brandförloppen utförs nya beräkningar enligt ovan för att få fram nya värden på kablarnas effektutvecklingar per areaenhet. Detta ger för kraftkablarna ungefär 250 kW/m^2 och för övriga kablar ungefär 150 kW/m^2. Vidare simuleringar utförs därmed med effektutvecklingar per areaenheter kring dessa värden. Vid detta skede föreligger dock fortfarande en del osäkerheter, både avseende kablarnas antändningstemperaturer och brinntider. Då tidigare försök visat på stora skillnader i antändningstemperaturer även då kablarna tillhör samma undergrupp kan de befintliga kablarnas antändningstemperaturer skilja sig betydligt från varandra, och därmed även från den tidigare definierade antändningstemperaturen. Brinntiden för kabeldelarna är beräknad med antaganden om förbränningsvärme, densitet och förbränningseffektivitet vilket betyder att det föreligger en del osäkerheter även här, brinntiden för de befintliga kabeldelarna kan därför mycket väl skilja sig en del från de beräknade värdena. Därmed kommer dessa parametrar varieras något kring de

beräknade värdena med målet att erhålla effektutvecklingskurvor som kan liknas med effektutvecklingskurvorna från FIPEC-projektets försök.

Efter diverse simuleringar med variering av ovanstående parametrar erhålls slutligen effektutvecklingskurvor för de båda kabelsorterna som kan liknas vid de effektutvecklingskurvor som erhållits från FIPEC-projektets försök. Ingående kabelparametrar för de två kabelsorterna åskådliggörs i Tabell H.2 nedan.

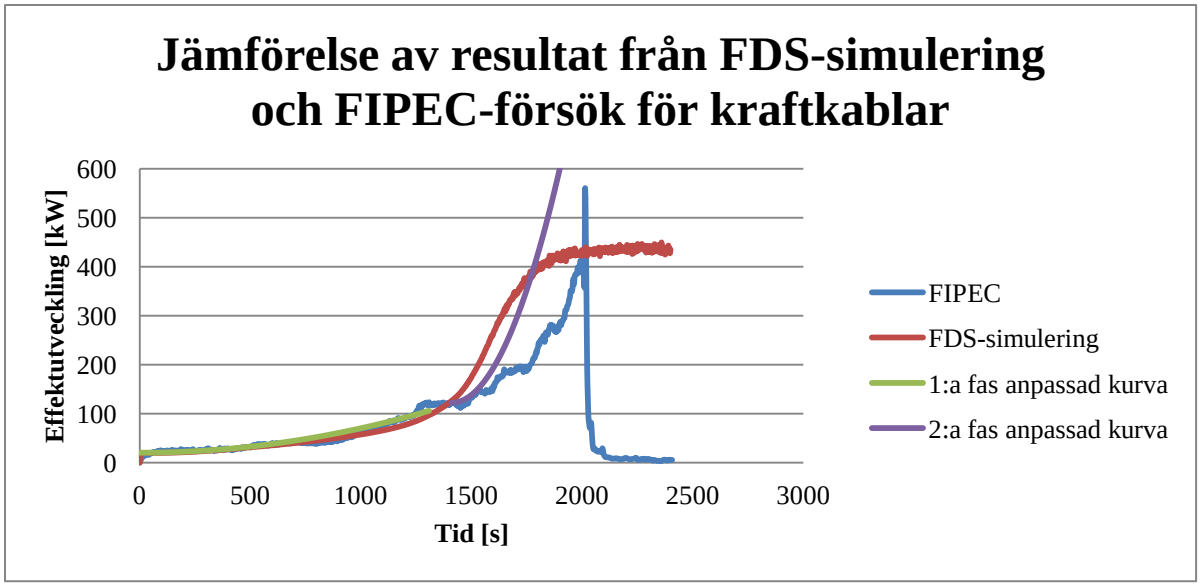
Tabell H.2 Ingående variabler vid fortsatta simuleringar för de olika kabelsorterna

Kabelsort	Effektutveckling per areaenhet [kW/m^2]	Antändningstemperatur	Antändningstid	Brinntid
Kraft	260	370	300	1200
Övriga	150	180	1	150

Det ses i tabellen ovan att kabeldelarnas effektutvecklingar per areaenhet ligger omkring de värden som beräknades för de båda kabelsorterna ovan. För kraftkablarna är effektutvecklingen per areaenhet något högre än den framräknade, detta på grund av att målet med denna simulering var att få en något allvarligare effektutvecklingskurva än FIPEC-projektets på grund av kabelns uppbyggnad.

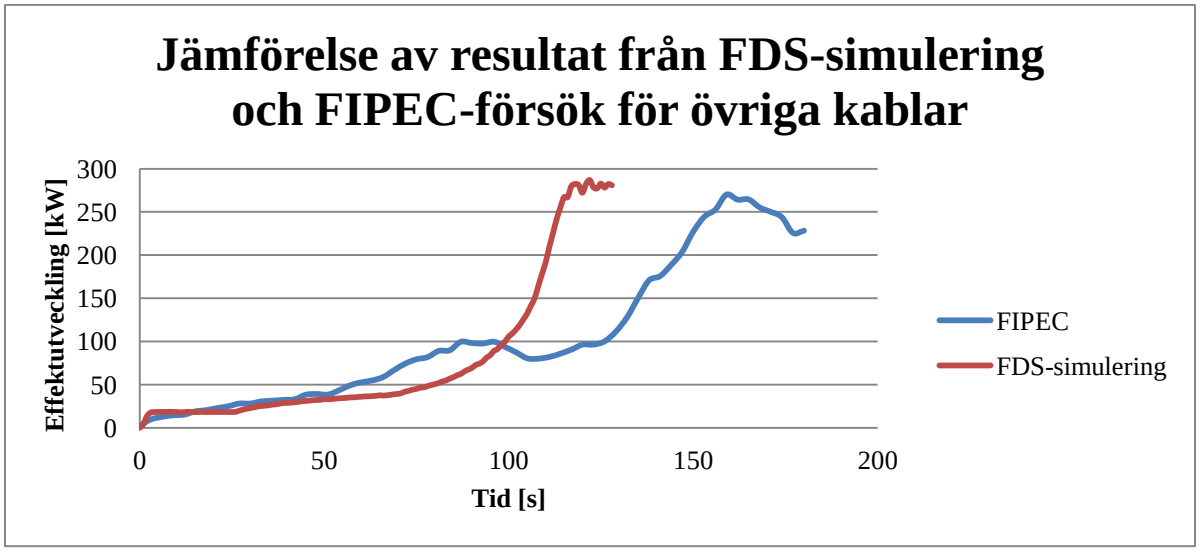
Enligt tidigare avsnitt ligger antändningstemperaturen, vid närvaro av pilotlåga, för både klassade och oklassade kablar på mellan 218-422°C. Antändningstemperaturen för kraftkablarna landar inom detta intervall, dock är antändningstemperaturen för övriga kablar betydligt lägre. Intervallet ovan är dock framtaget från en begränsad mängd testdata och då olika kabelsorter kan bete sig på många olika sätt beroende på uppbyggnad och material anses att antändningstemperaturen för övriga kablar mycket väl kan ligga på detta värde. Antändningstid i tabellen ovan anger den tid från dess att en kabel uppnår sin antändningstemperatur tills dess att den antänder och då flammor uppkommer. Detta kan härledas till begreppet etablerad antändning vilket definieras som tiden från antändning tills dess att flammor uppkommer och när en signifikant mängd energi börjar avges (Karlsson & Quintiere, 2000). För kraftkablarna visar sig denna stämma förhållandevis bra överens med resultaten från FIPEC-projektets försök där tiden till etablerad antändning låg på mellan 102-314 sekunder (Grayson et al, 2000). Brinntiden, det vill säga den tid varje kabeldel brinner, är för kraftkabeldelarna är betydligt längre än den tidigare framräknade, men som nämnts ovan är beräkningen förenat med en del osäkerheter vilket betyder att brinntiden mycket väl anses kunna ligga på detta värde. För övriga kablar ses att de antänder direkt då de uppnår sin antändningstemperatur och att brinntiden ligger förhållandevis nära den tidigare beräknade.

Figur H.3 och Figur H.4 nedan åskådliggör de framtagna effektutvecklingskurvorna från FIPEC-projektets försök samt de erhållna kurvorna från FDS-simuleringarna med ingående variabler enligt ovan. I Figur H.3 åskådliggörs även den tidigare modifieringen av effektutvecklingskurvan vilken var den kurva som simuleringen utfördes att efterlikna.



Figur H.3 Jämförelse av resultat från FDS-simulering och FIPEC-försök för kraftkablar

I figuren ovan ses att tillväxten är aningen snabbare vid simuleringen än vid kurvan från FIPEC-projektets försök, vilket även var målet. Det ses att tillväxten för FDS-simuleringens effektutvecklingskurva stämmer bra överens med den anpassade kurvans tillväxt. Dock stannar effektutvecklingsökningen av hos FDS-simuleringen efter ungefär 1600 sekunder, detta beror på att hela kabelstegen vid denna tidpunkt är brandutsatt och branden inte kan sprida sig ytterligare för att därmed öka i effekt. Om kabelstegen skulle varit längre skulle effekten troligtvis fortsätta öka på samma sätt som den anpassade kurvan.



Figur H.4 Jämförelse av resultat från FDS-simulering och FIPEC-försök för övriga kablar

I figuren ovan ses att tillväxten underskattas en del i det inledande skedet av förloppet för att sedan överskattas under den resterande delen av förloppet. Att utifrån simuleringarna få en effektutvecklingskurva som motsvarar de två topparna i FIPEC-kurvan var ej möjligt, den framtagna effektutvecklingskurvan anses ändå representera brandförloppet på ett adekvat sätt då skillnaderna kurvorna emellan tidsmässigt endast handlar om ett tiotal sekunder.

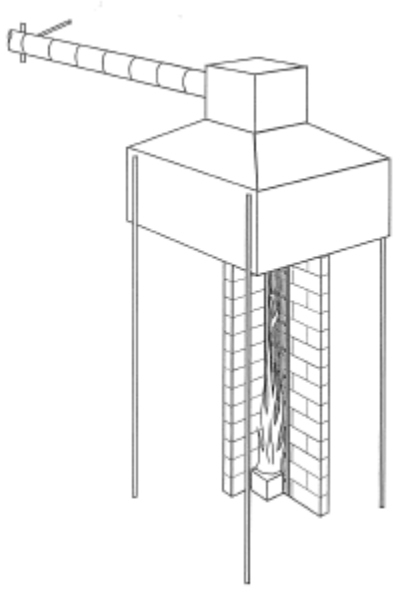
H.2.3 Kontroll av kabelparametrar

Vid ovanstående simuleringar finns självklart risken att de framtagna kabelparametrarna endast kommer gälla för den befintliga geometrin vid det befintliga försöket varför en ändring av de yttre

förhållandena i värsta fall därmed kan medföra inkorrekta resultat. För att säkerställa att de framtagna kabelparametrarna ger korrekta resultat även vid andra uppställningar utförs ytterligare simuleringar där försöksuppställningen ändras till FIPEC-projektets storskaleförsök. Dessa försök utfördes enligt nedanstående försöksuppställning (Grayson et al, 2000):

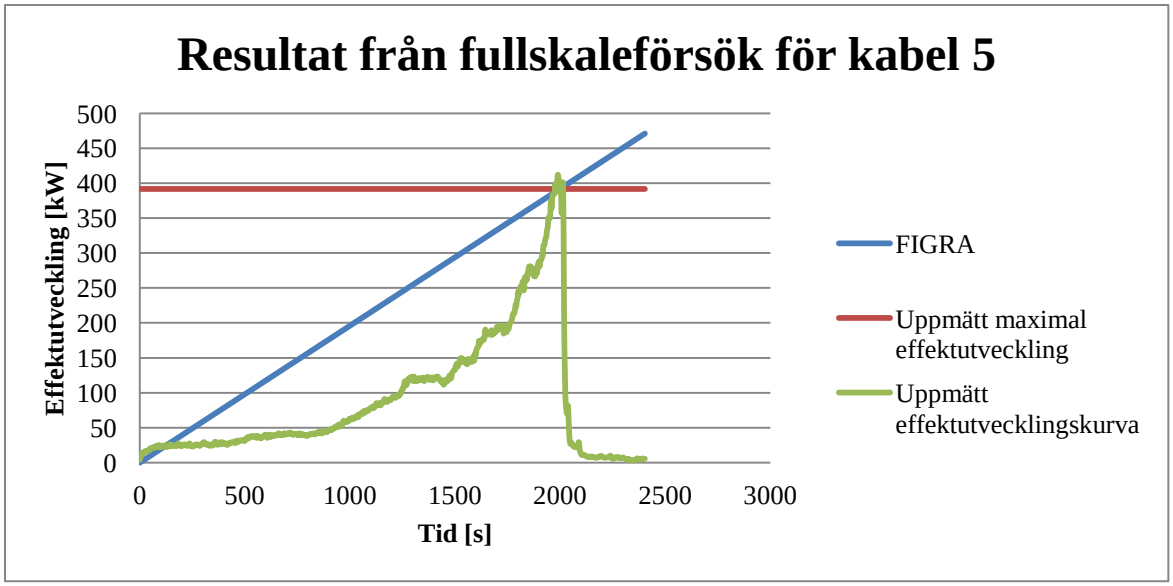
- Semistängd vertikal konfiguration (hörnkonfiguration)
- Ingen ventilation
- Brännarprogram 3 (40-100-300 kW)
- En kabelstege med kablar monterade med en halv kabeldiameters inbördes avstånd, dock maximalt 2 centimeter

Brännarprogram 3 utförs genom att kablarna exponeras för 40 kW under 5 minuter, 100 kW under nästkommande 10 minuter och 300 kW under resterande 10 minuter. Effektökningen sker dock endast om ingen flamspridning observeras under föregående period. Försöksuppställningen vid dessa försök åskådliggörs i Figur H.5 nedan.

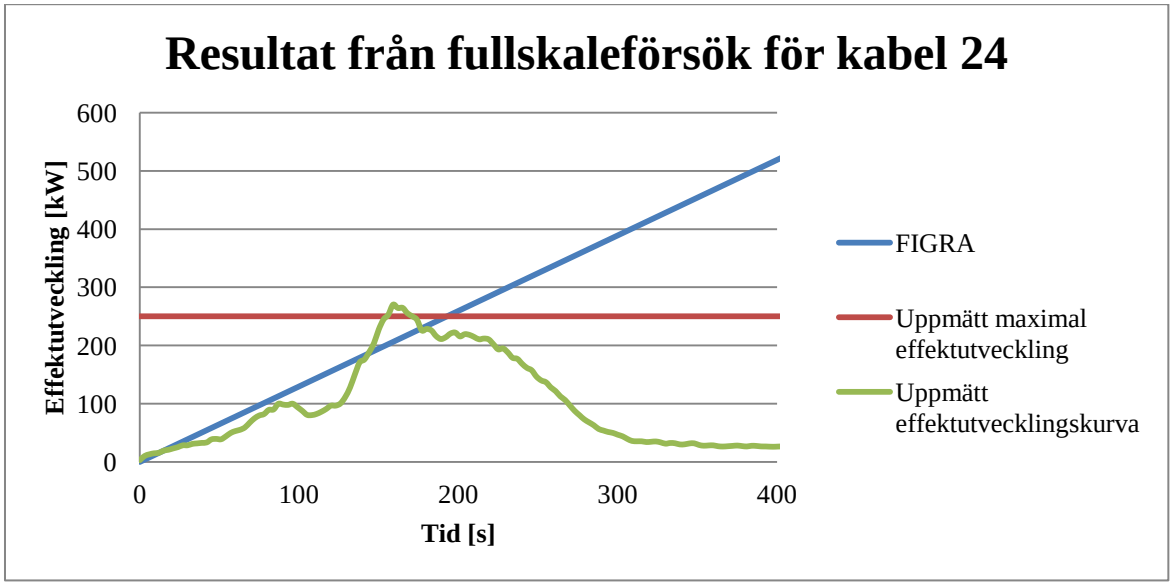


Figur H.5 Scematisk bild över försöksuppställningen vid det befintliga testet (Grayson et al, 2000; reproducerat med tillåtelse av Interscience)

Från fullskaleförsöken finns effektutvecklingar över tid att tillgå på SP Fire Database (2012), detta finns dock ej från storskaleförsöken varför jämförelser av FDS-simuleringarnas resultat istället måste göras med beräknade FIGRA-värden i kombination med de uppmätta maximala effektutvecklingarna hos de befintliga kablarna. För att utvärdera hur bra denna skattning är jämfört med den uppmätta effektutvecklingskurvan analyseras inledningsvis fullskaleförsökens resultat för de två olika kabelsorterna. Detta åskådliggörs i Figur H.6 och H.7 nedan.

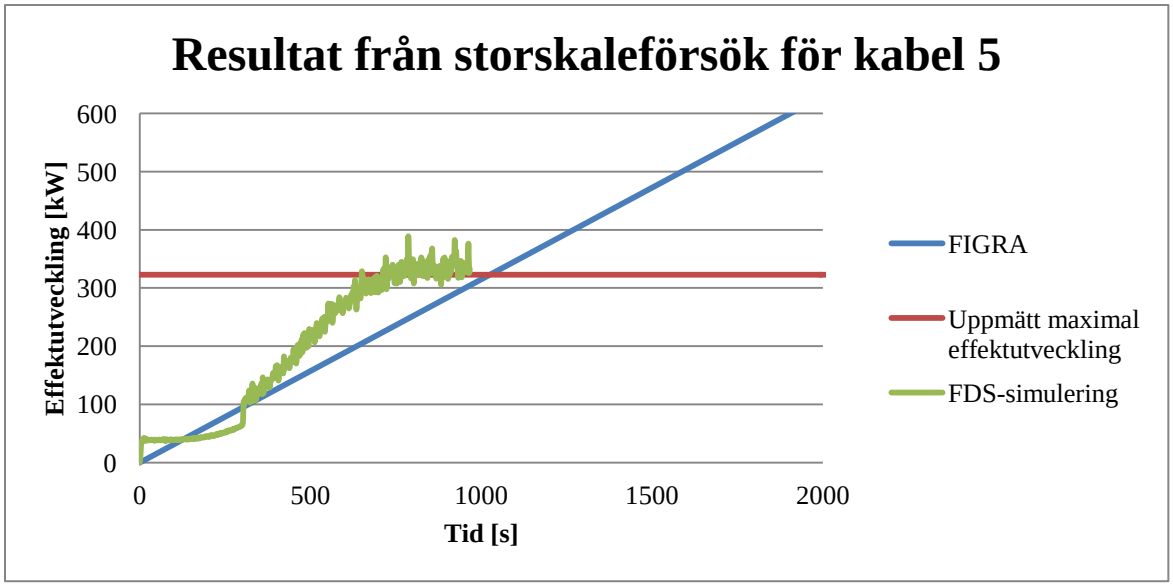


Figur H.6 Uppmätt effektutvecklingskurva, FIGRA-värde och maximal effektutveckling för kabel 5 (SP Fire Database, 2012)

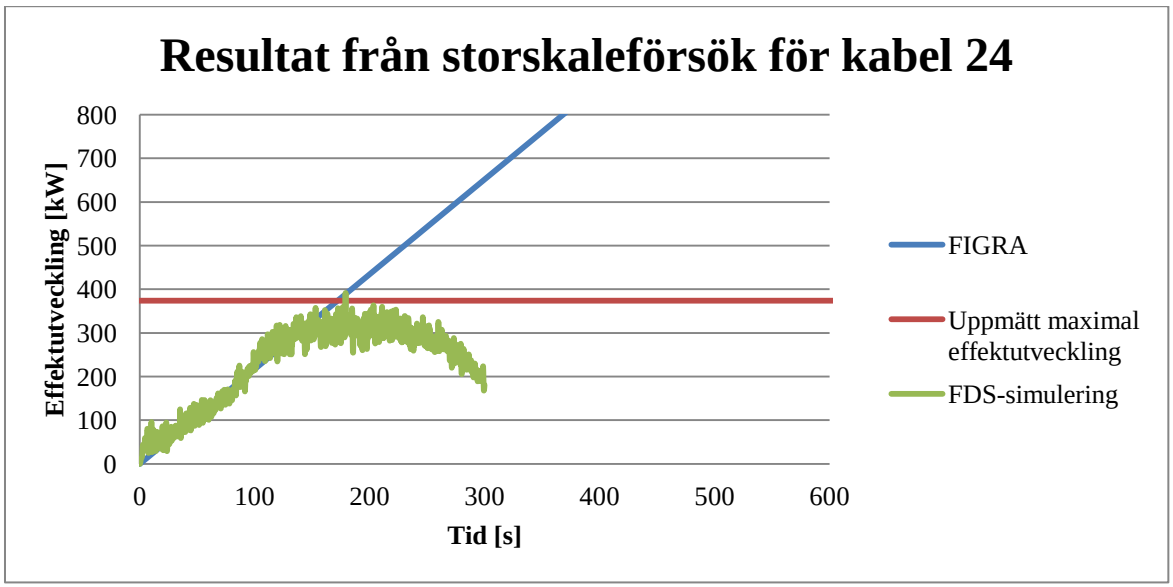


Figur H.7 Uppmätt effektutvecklingskurva, FIGRA-värde och maximal effektutveckling för kabel 24 (SP Fire Database, 2012)

För båda kabelsorterna ses att FIGRA-värdet överskattar effektutvecklingen något under större delen av förloppen för att vidare mer eller mindre sammanfalla med skärningen av de två andra kurvorna. FIGRA-värdet är alltså ingen exakt skattning men den ger, i kombination med vetskap om den maximala effektutvecklingen, ändå ett ungefärligt riktvärde på hur effektutvecklingskurvan ser ut. I Figur H.8 och H.9 nedan åskådliggörs FIGRA-kurvan och den uppmätta maximala effektutvecklingen från FIPEC-projektets storskaleförsök samt effektutvecklingskurvan som erhölls vid FDS-simuleringarna med tidigare definierade kabelparametrar.



Figur H.8 Effektutvecklingskurva från FDS-simulering, FIGRA-kurva och maximal effektutveckling vid storskaleförsöken



Figur H.9 Effektutvecklingskurva från FDS-simulering, FIGRA-kurva och maximal effektutveckling vid storskaleförsöken

Vilket kan ses i ovanstående figurer följer, de av FDS-simuleringarna, framtagna effektutvecklingskurvorna FIGRA-kurvorna förhållandevis bra och har även maxvärden som stämmer ganska bra överens med de av FIPEC-projektet uppmätta. Det föreligger dock fortfarande vissa osäkerheter kring hur de verkliga effektutvecklingskurvorna ser ut, men FIGRA-värdet får ändå ses som ett bra riktvärde på hur effektutvecklingskurvan ser ut. Med tanke på hur de resulterande effektutvecklingskurvorna ser ut dras slutsatsen att de tidigare framtagna kabelparametrarna anses kunna ge adekvata resultat för de befintliga kablarnas brandförlopp, även då geometri och yttre förhållanden ändras.

H.2.4 Inre temperatur

För att avgöra om kablar kortsluts på grund av att dess inre temperatur överstiger skadekriteriet, det vill säga då den inre temperaturen hos en kabel överstiger 180 °C, används mätinstrument som benämns cable failure detectors. Dessa mätinstrument mäter inre temperaturer hos kablar med en metod kallad THIEF (Thermally-Induced Electrical Failure) som är en metod utvecklad av Andersson

& Van Hees (2005). Vid denna metod beräknas den inre temperaturen hos en kabel med hjälp av endimensionella värmeöverföringsekvationer, under förutsättning att kabeln behandlas som en homogen cylinder (Andersson & Van Hees, 2005). Med denna metod följer dock ett antal antaganden (NIST, 2010):

- Värmeledningen in i kabeln sker i stort sett endast radiellt. Detta är konservativt då det medför antagandet att kabeln är helt omringad av värmekällan.
- Kabeln antas endast bestå av ett material.
- De termiska egenskaperna antas homogena i kabeln och oberoende av temperaturen. Detta är ej fallet i verkligheten då både konduktivitet och specifik värme är temperaturberoende.
- Det antas att ingen nedbrytning sker inuti kabeln under dess uppvärmning. Inte heller antändning eller förbränning hanteras i modellen.
- Fallering sker då temperaturen direkt innanför manteln når den förutbestämda falleringstemperaturen.

Även då det är ett antal antaganden som skall tas i beaktning vid denna modellering har det ändå visat sig att resultat från olika sorters PVC-material kan vara adekvata för analyser av ett större spann av kablar (NIST, 2010).

Då metoden beräknar temperaturen direkt innanför manteln sätts manteltjockleken därmed att motsvara både mantel och isolering för kablarna. För beräkning av denna tjocklek utgås från kablarnas diametrar samt andelen brännbart material per meter kabel, där allt brännbart material på kablarna antas sitta utanför ledaren. Resultat från dessa beräkningar samt övrig indata för mätinstrumenten finns att tillgå i Tabell H.3.

Tabell H.3 Indata för cable failure devices vid simuleringarna (Draka 2), (Grayson et al, 2000)

	Kraftkablar	Övriga kablar
Brännbart material per meter kabel [kg/m]	2.419	0.25
Inre falleringstemperatur [°C]	180	180
Kabeldiameter [m]	0.0421	0.014
Yttre lagrets tjocklek [m]	0.0052	0.0019

H.2.5 Känslighetsanalys

Känslighetsanalysen utförs med syfte att utvärdera vilken eller vilka kabelegenskaper som har störst inverkan på brandförloppet samt hur mycket tiden till skada och brandspridning kan skilja sig beroende på val av indata för kablarna. Inledningsvis undersöks parametrar som påverkar brandförloppet, dessa parametrar varieras med 10 respektive 20 % kring dess framtagna värden. Vidare utförs simuleringar inledningsvis med uppställning i linje med FIPEC-projektets försök, detta för att kunna utvärdera vilken eller vilka parametrar som har störst inverkan på brandförloppet. Den eller de parametrar som anses ha störst inverkan på brandförloppet används sedan vid simuleringarna i schaktet. Vid dessa simuleringar kontrolleras även om variationer av den inre temperaturen för skada hos kablarna kommer ha inverkan på skadeomfattningen. Variationerna av indata åskådliggörs i Tabell H.4 och Tabell H.5 varpå variationerna för den inre temperaturen åskådliggörs i Tabell H.6 nedan.

Tabell H.4 Variation av ingående kabelparametrar hos kraftkablar

Kraftkablar	$HRRPUA_{min}$ [kW/m^2]	$HRRPUA_{max}$ [kW/m^2]	Antändnings $temp_{min}$ [°C]	Antändnings $temp_{max}$ [°C]	$Brinntid_{min}$ [s]	$Brinntid_{max}$ [s]
± 10 %	234	286	330	407	1080	1320
± 20 %	208	312	296	444	960	1440

Tabell H.5 Variation av ingående kabelparametrar hos övriga kablar

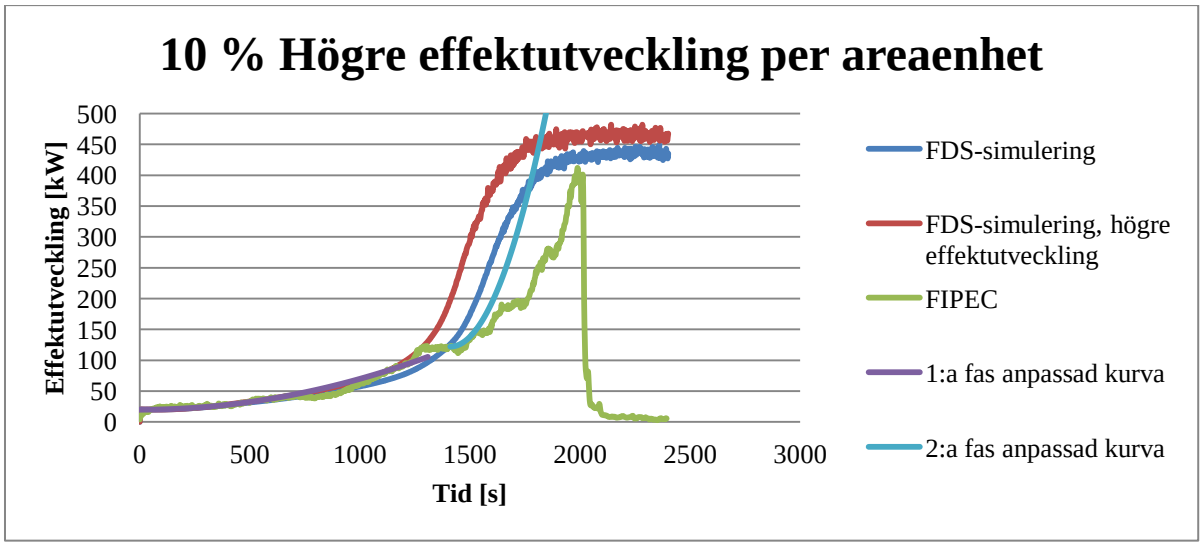
Övriga kablar	HRRPUA$_{min}$ [kW/m^2]	HRRPUA$_{max}$ [kW/m^2]	Antändnings temp$_{min}$ [°C]	Antändnings temp$_{max}$ [°C]	Brinntid$_{min}$ [s]	Brinntid$_{max}$ [s]
± 10 %	135	165	162	198	135	165
± 20 %	120	180	144	216	120	180

Tabell H.6 Variation av inre temperatur för fallering hos alla kablar

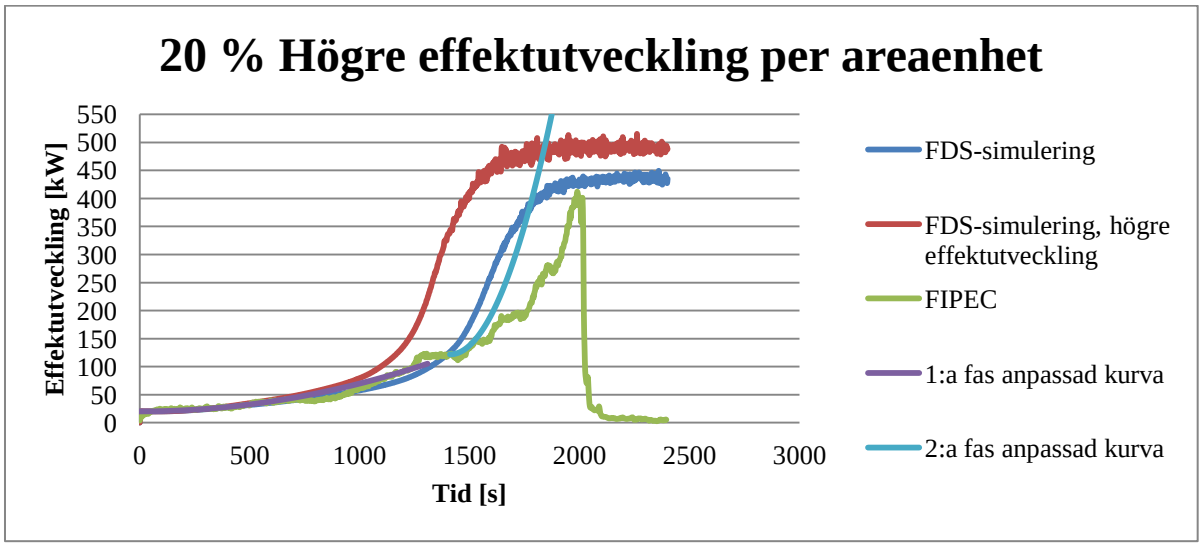
	Inre falleringstemperatur$_{min}$ [°C]	Inre falleringstemperatur$_{max}$ [°C]
± 10 %	162	198
± 20 %	144	216

H.2.5.1 Kraftkablar

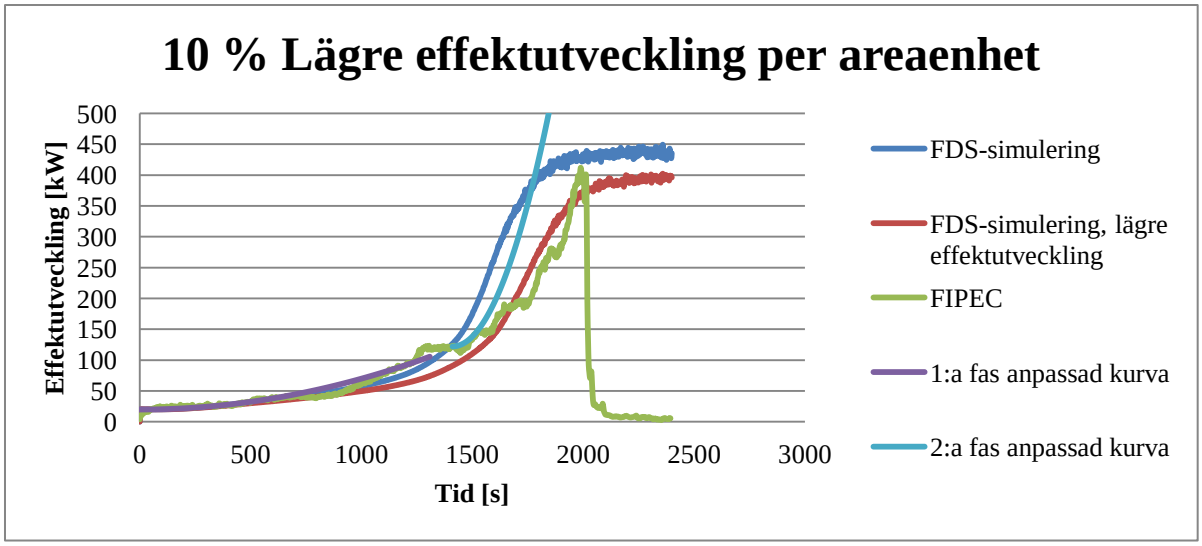
Nedan åskådliggörs effektutvecklingskurvor från simuleringarna med variationer i indata enligt Tabell H.4 ovan och uppställning i linje med FIPEC-projektets fullskaleförsök. I samtliga figurer finns även den tidigare framtagna effektutvecklingskurvan, FIPEC-projektets effektutvecklingskurva samt den anpassade effektutvecklingskurvan, detta för att lättare kunna göra jämförelser av hur mycket resultatet påverkas av variationerna.



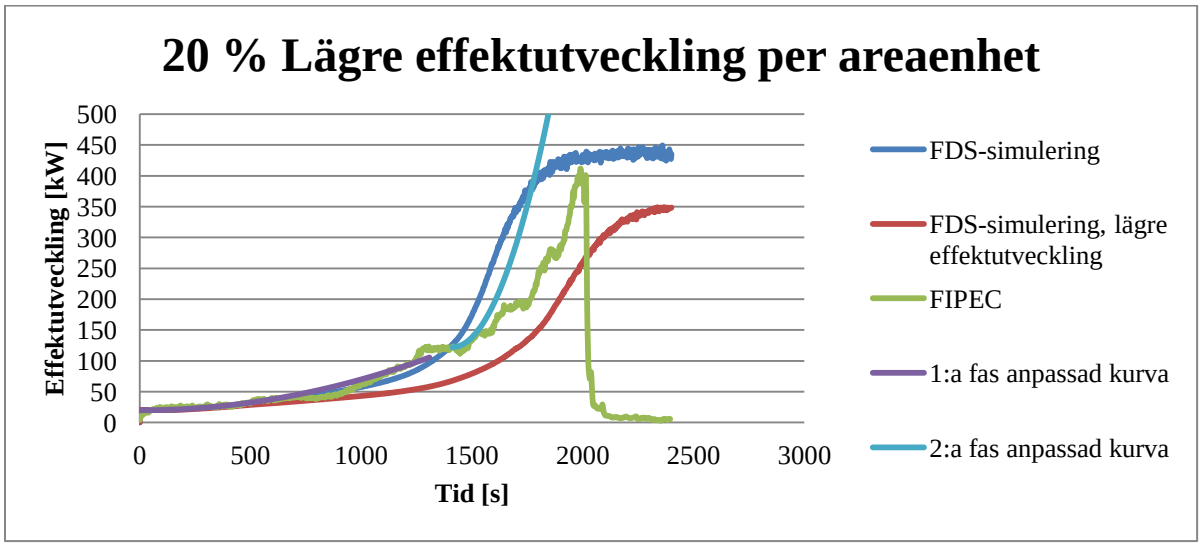
Figur H.5 Effektutvecklingskurva från simulering med 10 % högre effektutveckling per areaenhet



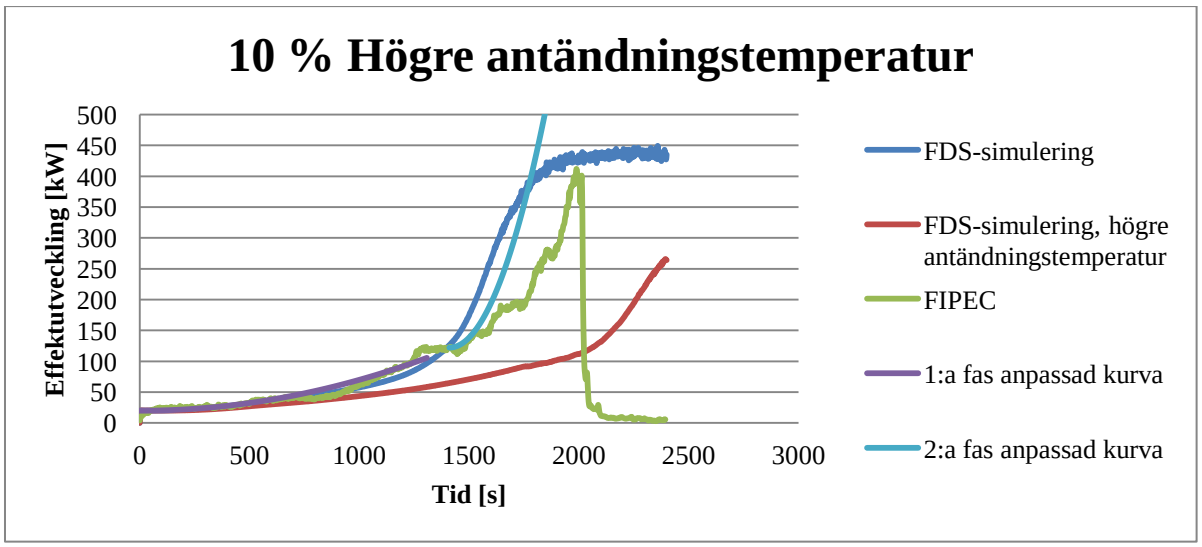
Figur H.6 Effektutvecklingskurva från simulering med 20 % högre effektutveckling per areaenhet



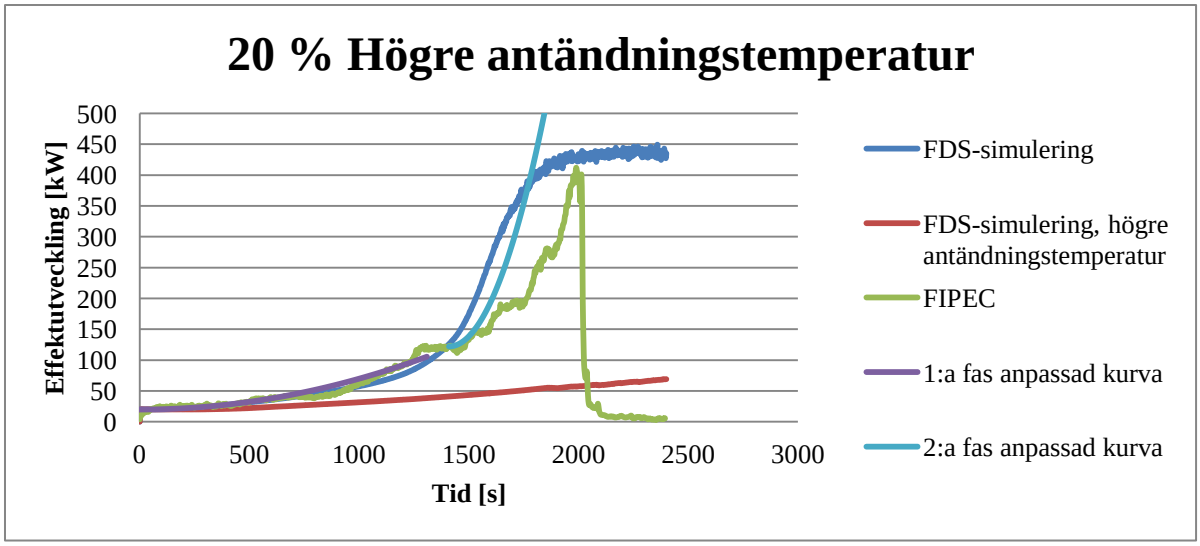
Figur H.7 Effektutvecklingskurva från simulering med 10 % lägre effektutveckling per areaenhet



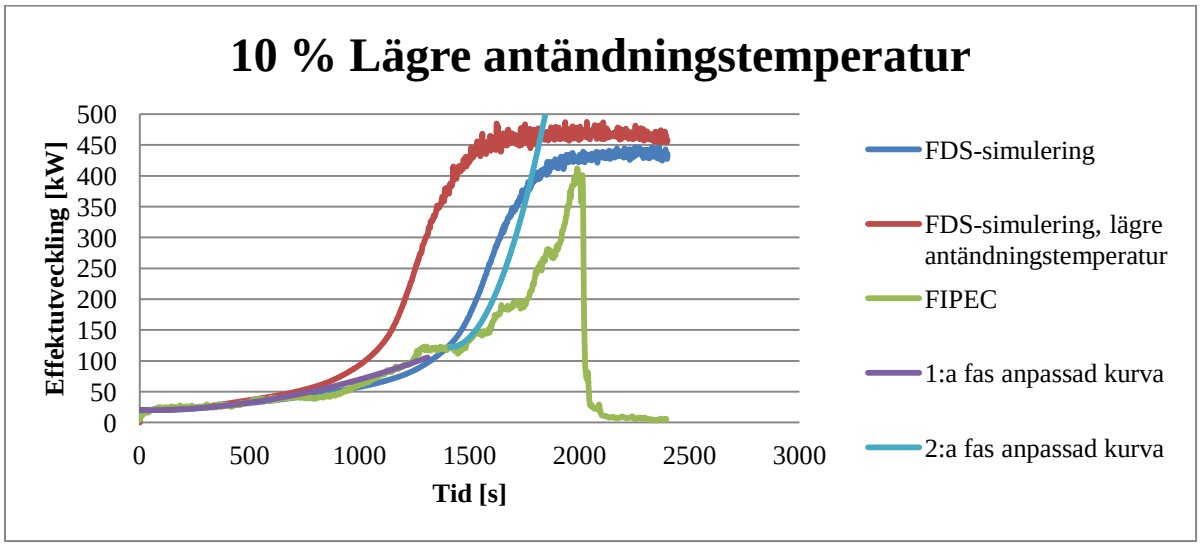
Figur H.8 Effektutvecklingskurva från simulering med 20 % lägre effektutveckling per areaenhet



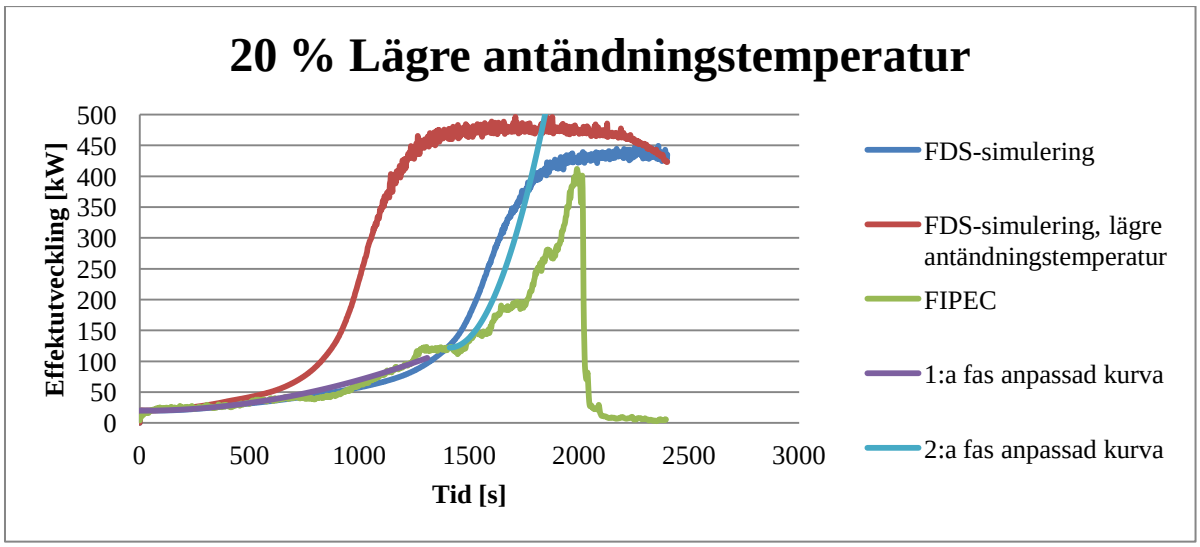
Figur H.9 Effektutvecklingskurva från simulering med 10 % högre antändningstemperatur



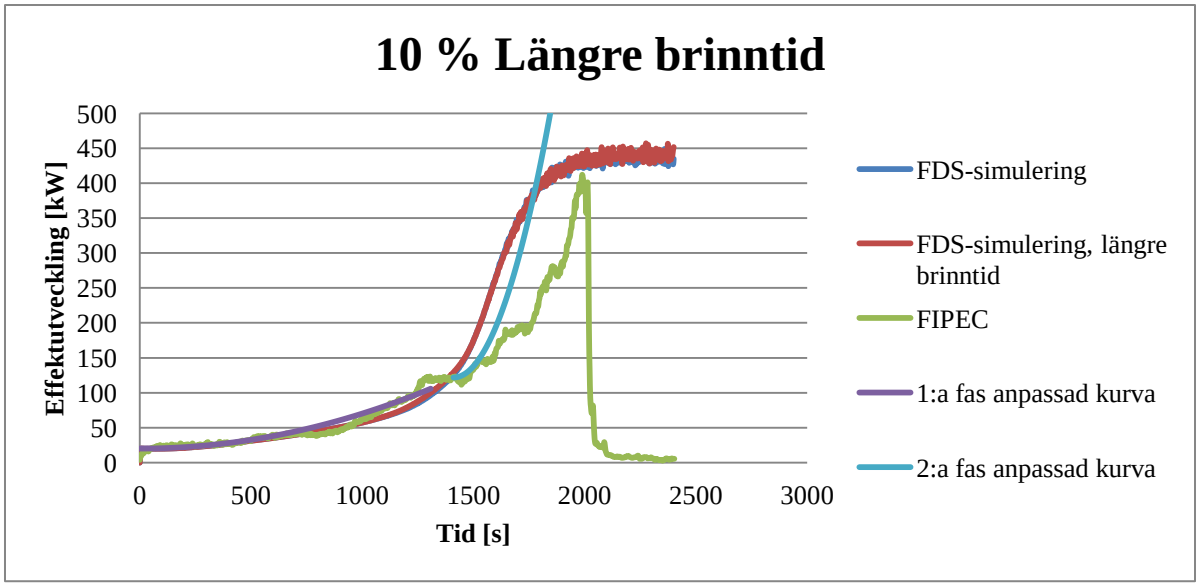
Figur H.10 Effektutvecklingskurva från simulering med 20 % högre antändningstemperatur



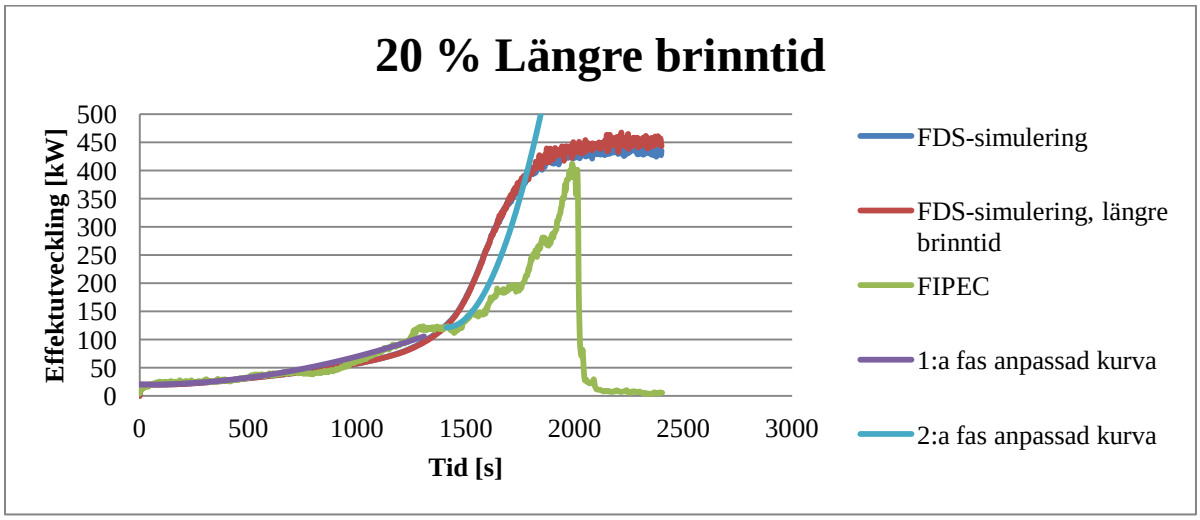
Figur H.11 Effektutvecklingskurva från simulering med 10 % lägre antändningstemperatur



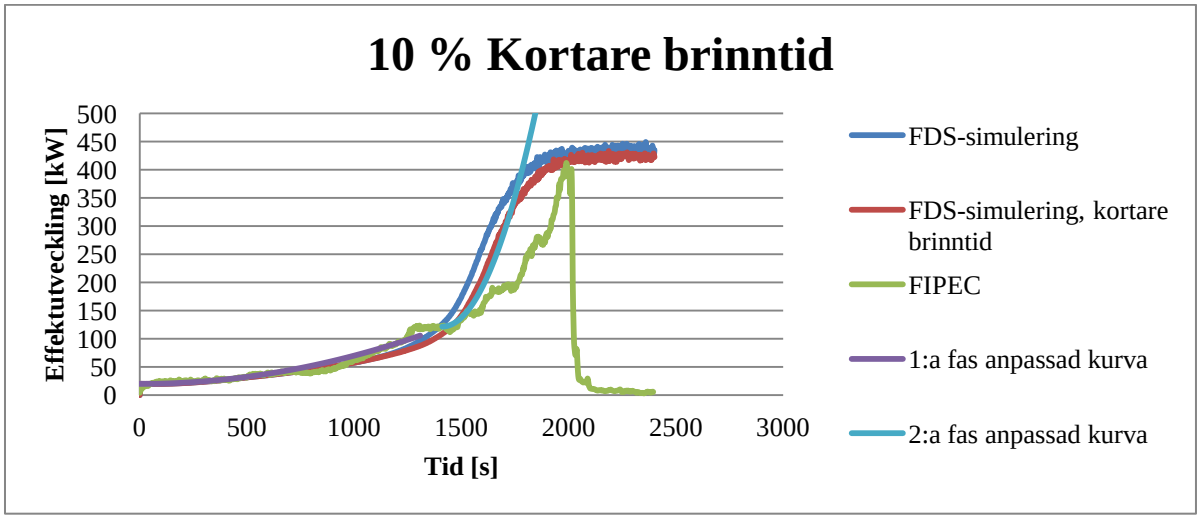
Figur H.12 Effektutvecklingskurva från simulering med 20 % lägre antändningstemperatur



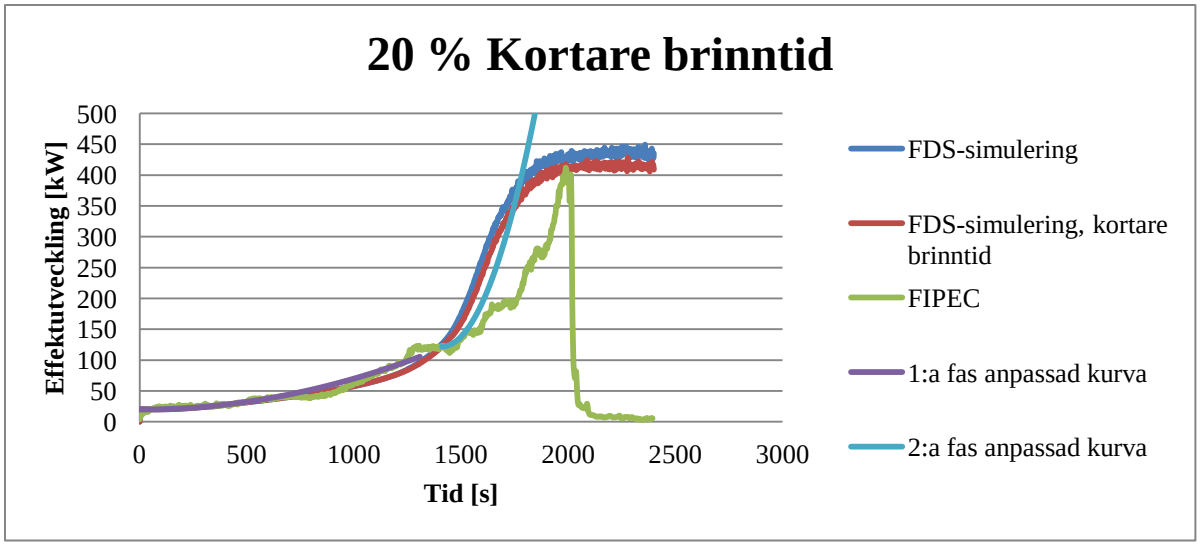
Figur H.13 Effektutvecklingskurva från simulering med 10 % längre brinntid



Figur H.14 Effektutvecklingskurva från simulering med 20 % längre brinntid



Figur H.15 Effektutvecklingskurva från simulering med 10 % kortare brinntid

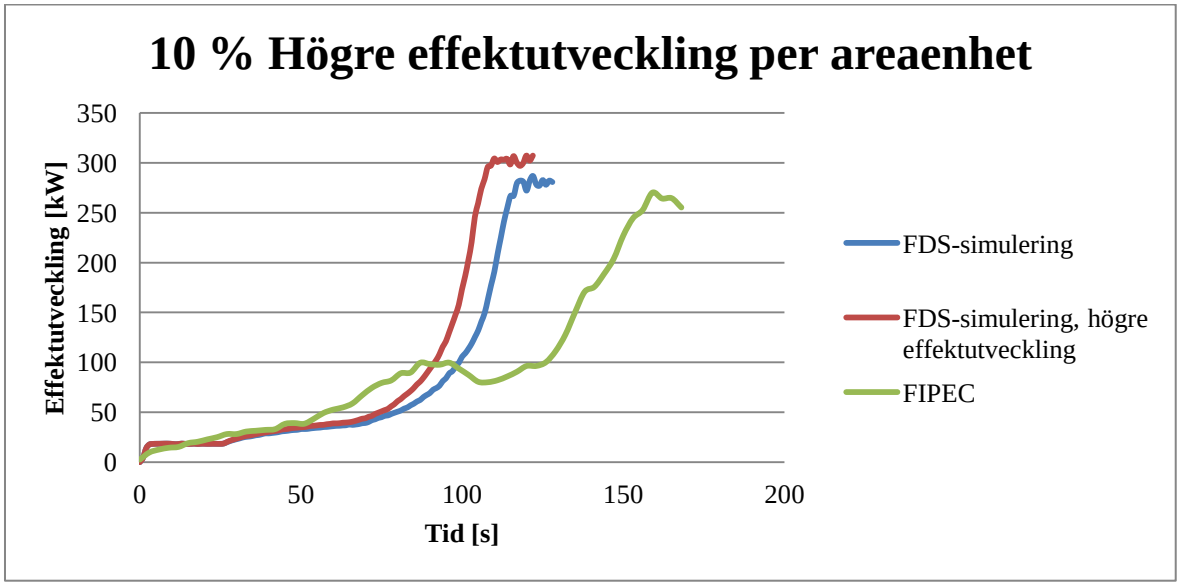


Figur H.16 Effektutvecklingskurva från simulering med 20 % kortare brinntid

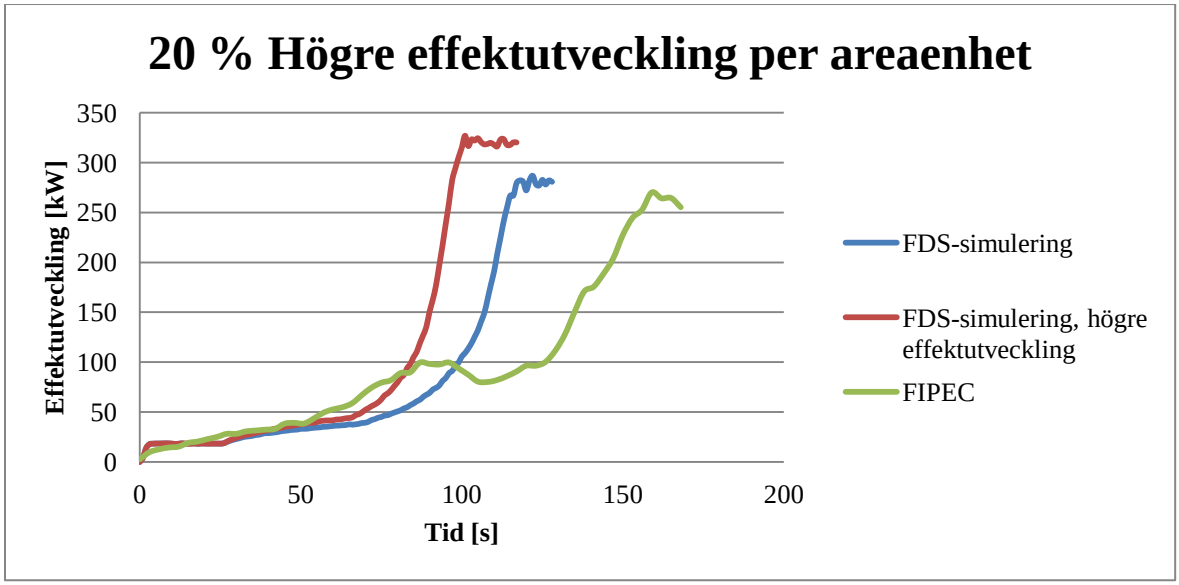
Det som kan utläsas från figurerna ovan är att antändningstemperaturen har den avsevärt största inverkan på effektutvecklingskurvornas utseende. Bara en så liten skillnad på 10 % i antändningstemperatur medför en avsevärd skillnad på effektutvecklingskurvans utseende. Vad gäller övriga parametrar är skillnaderna inte lika påtagliga. Angående effektutvecklingen per areaenhet blir skillnaden i effektutvecklingskurvans utseende påtaglig först vid 20 % variation kring ursprungsvärdena och för brinntiden ses att även vid 20 % variation kring ursprungsvärdena skiljer sig effektutvecklingskurvorna inte särskilt mycket åt.

H.2.5.2 Övriga kablar

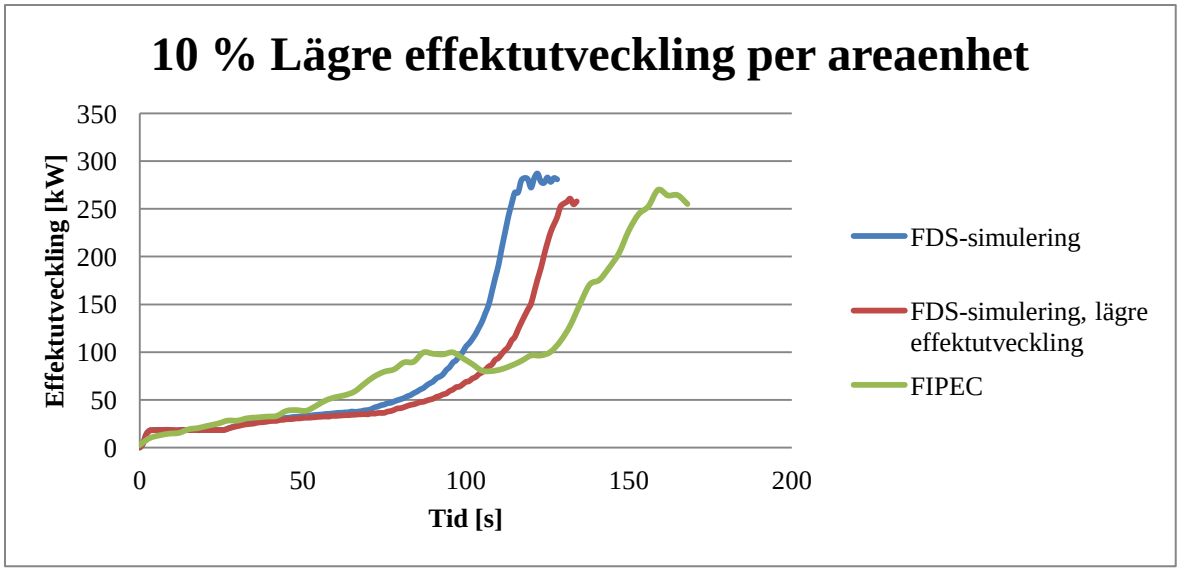
Nedan åskådliggörs effektutvecklingskurvor från simuleringarna med variationer i indata enligt Tabell H.5 ovan och uppställning i linje med FIPEC-projektets fullskaleförsök. I samtliga figurer finns även den tidigare framtagna effektutvecklingskurvan och effektutvecklingskurvan från FIPEC-projektet, detta för att lättare kunna göra jämförelser av hur mycket resultatet påverkas av variationerna.



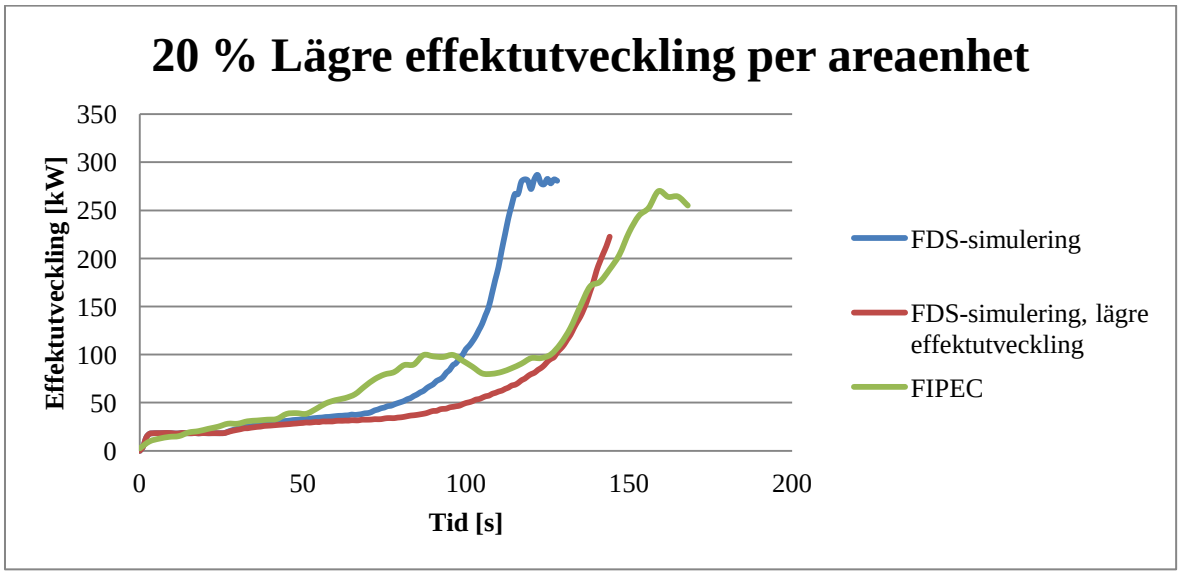
Figur H.17 Effektutvecklingskurva från simulering med 10 % högre effektutveckling per areaenhet



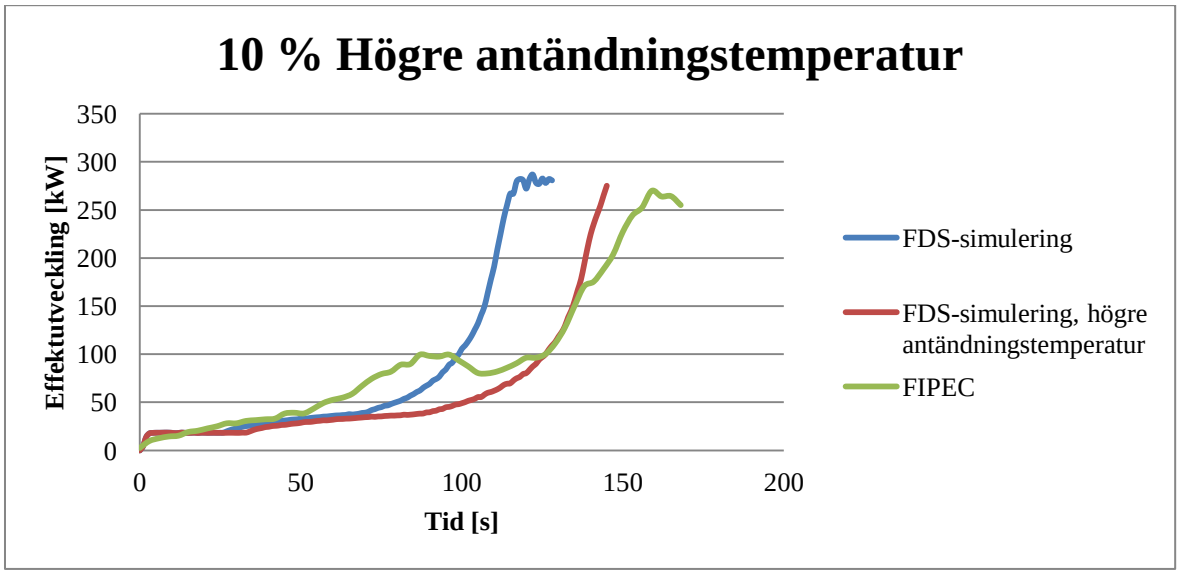
Figur H.18 Effektutvecklingskurva från simulering med 20 % högre effektutveckling per areaenhet



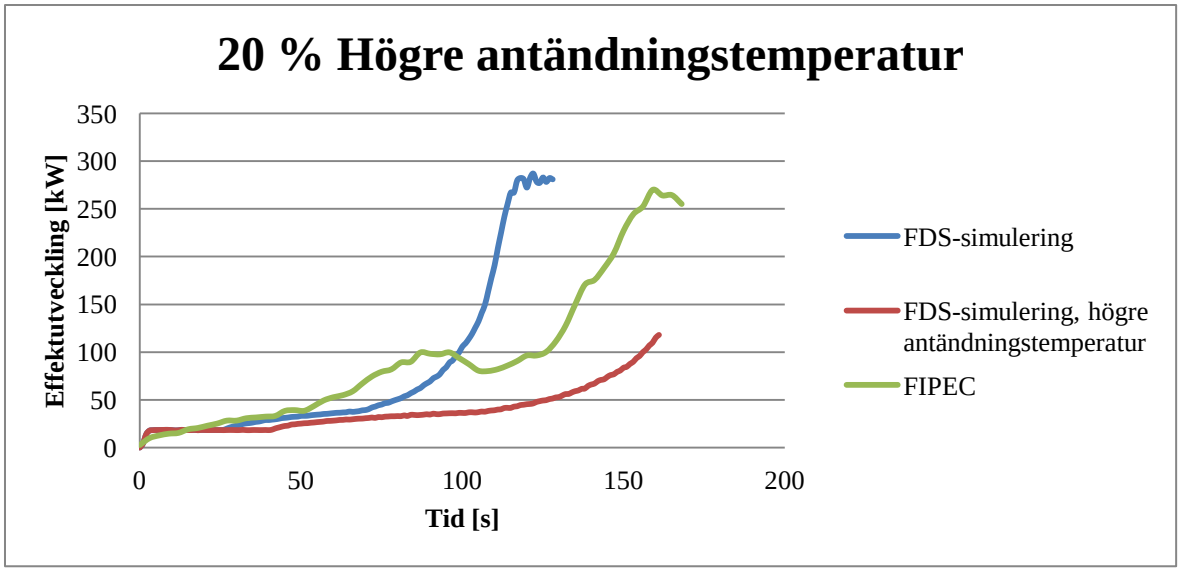
Figur H.19 Effektutvecklingskurva från simulering med 10 % lägre effektutveckling per areaenhet



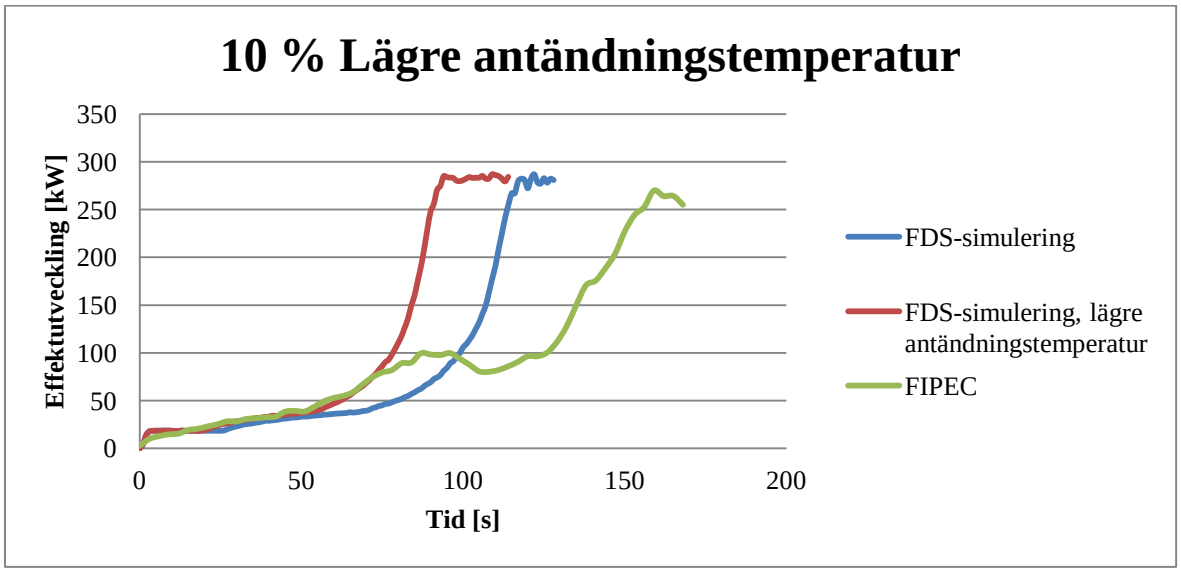
Figur H.20 Effektutvecklingskurva från simulering med 20 % lägre effektutveckling per areaenhet



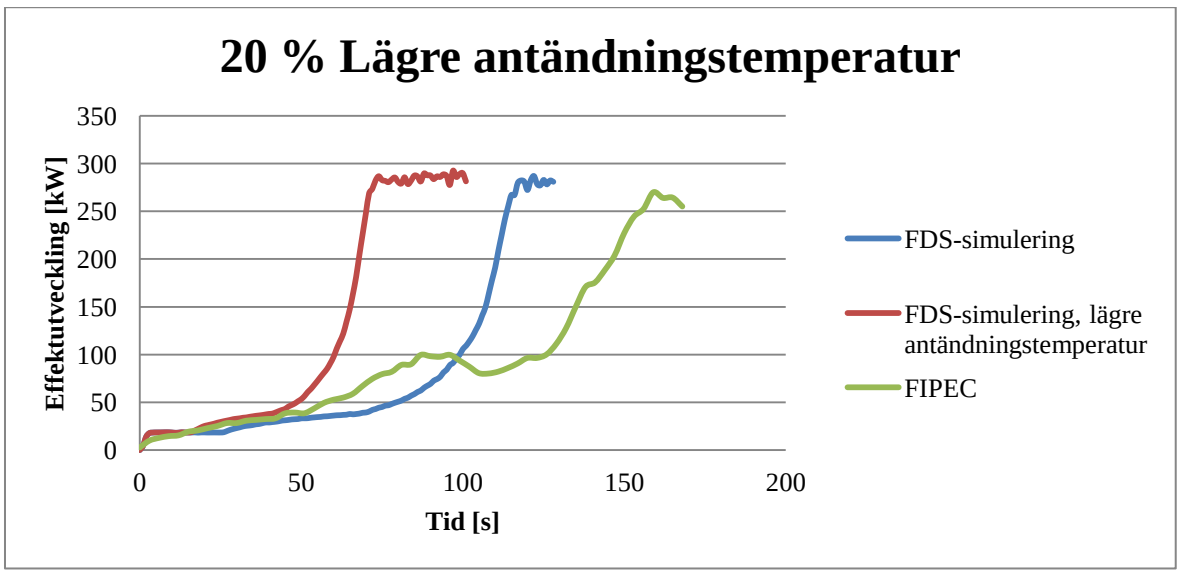
Figur H.21 Effektutvecklingskurva från simulering med 10 % högre antändningstemperatur



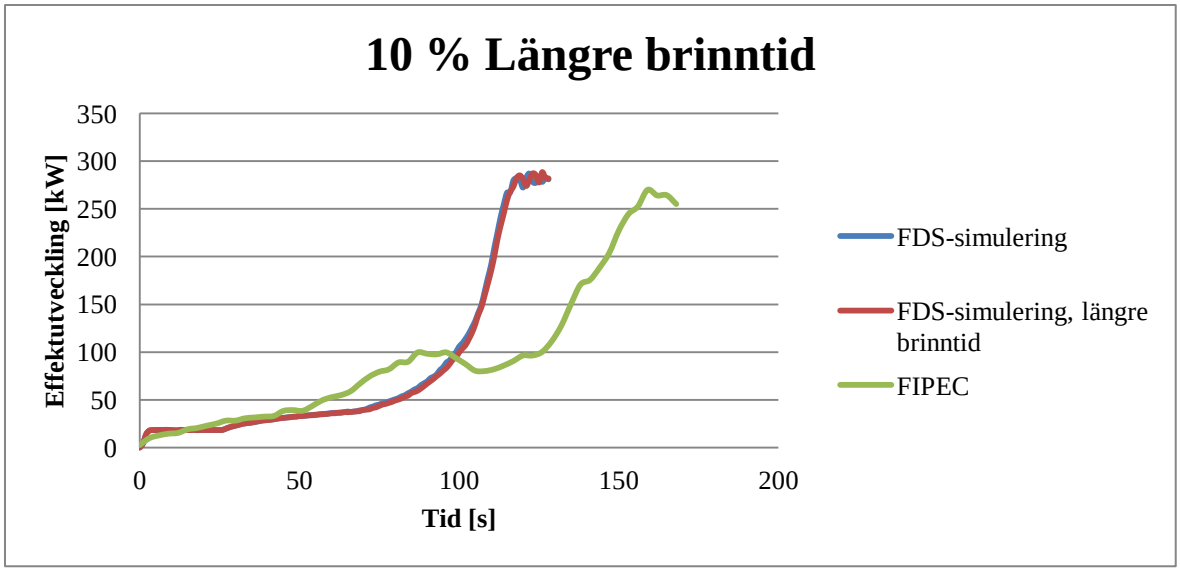
Figur H.22 Effektutvecklingskurva från simulering med 20 % högre antändningstemperatur



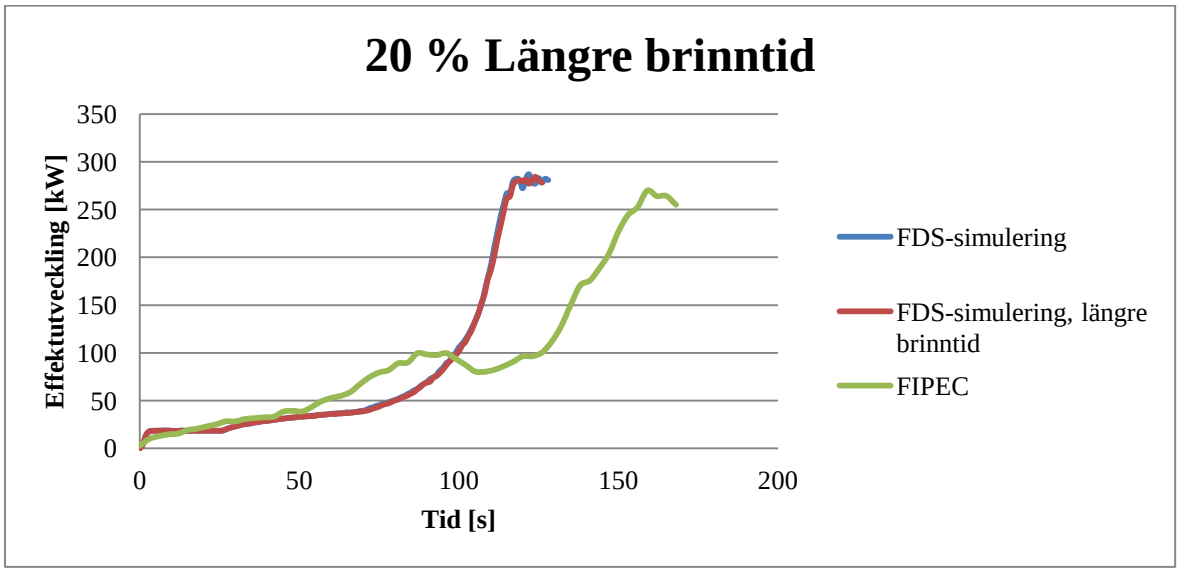
Figur H.23 Effektutvecklingskurva från simulering med 10 % lägre antändningstemperatur



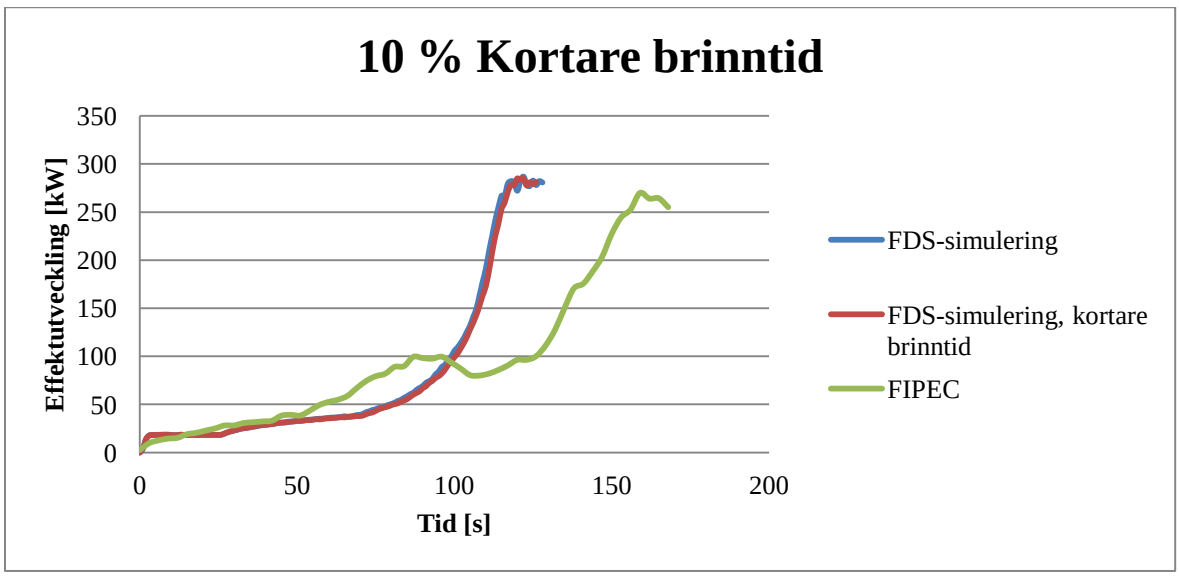
Figur H.24 Effektutvecklingskurva från simulering med 20 % lägre antändningstemperatur



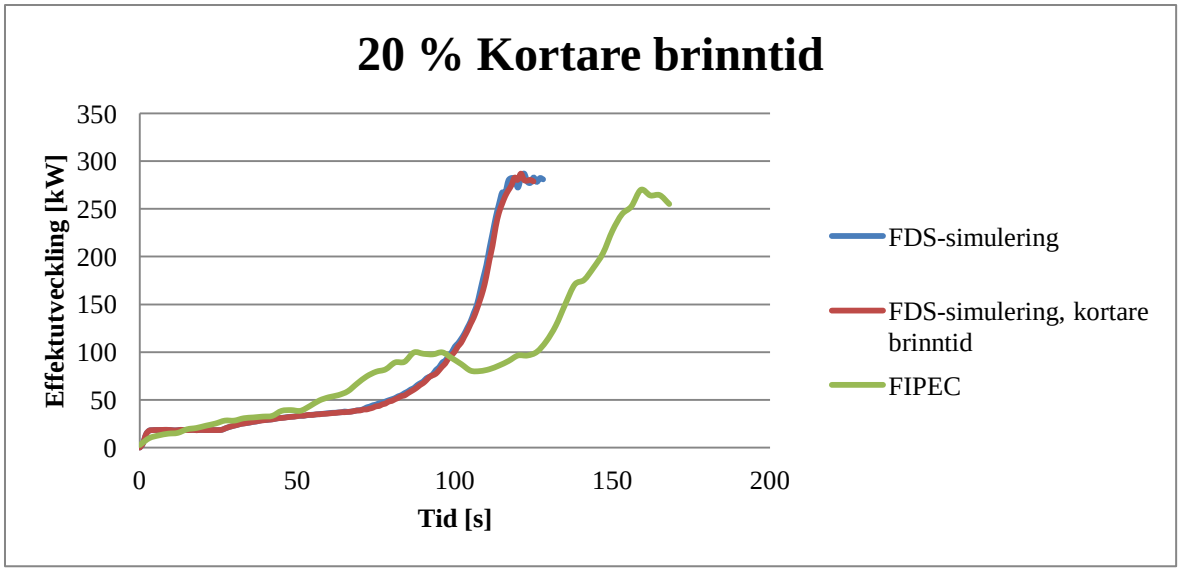
Figur H.25 Effektutvecklingskurva från simulering med 10 % längre brinntid



Figur H.26 Effektutvecklingskurva från simulering med 20 % längre brinntid



Figur H.27 Effektutvecklingskurva från simulering med 10 % kortare brinntid



Figur H.28 Effektutvecklingskurva från simulering med 20 % kortare brinntid

Även i dessa fall utläses att antändningstemperaturen har den avsevärt största inverkan på effektutvecklingskurvornas utseende. Vid variationer av effektutvecklingen ses större skillnader än hos kraftkablarna men vid variationer av brinntiden ses att skillnaderna även vid detta fall är små.

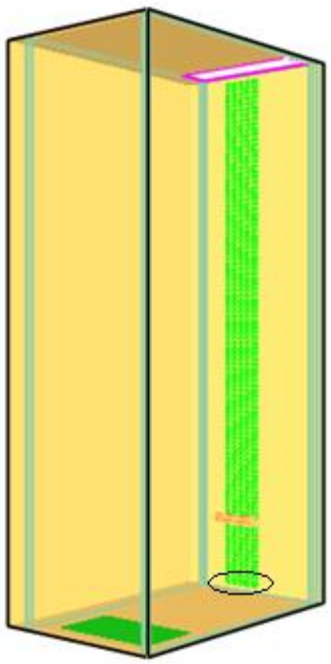
H.3 Indatafiler FDS

Följande avsnitt innefattar indatafilerna till de simuleringar som utförts i FDS. Inledningsvis åskådliggörs indatafiler till simuleringarna som utfördes för att definiera de ingående kabelparametrarna, det vill säga simuleringar med försöksuppställning enligt FIPEC-projektets fullskaleförsök. Vidare åskådliggörs indatafiler för simuleringarna som utfördes för att säkerställa att kabelparametrarna var korrekta, det vill säga simuleringar enligt FIPEC-projektets storskaleförsök, i hörnkonfiguration. Avslutningsvis åskådliggörs indatafilerna för simuleringarna i kabelschaktet.

H.3.1 Försöksuppställning enligt FIPEC-projektets fullskaleförsök

Nedan redogörs för indata till simuleringar vid definiering av kabelparametrar för de olika kabelsorterna. Då koden blir allt för lång om alla kabeldelar skall redogöras för anges endast de nedre kabeldelarna för varje kabel i uppställningarna, detta kan ses som de inringade delarna i Figur H.29 nedan. Inledningsvis åskådliggörs den kod som användes vid simuleringarna med kraftkablarna följt av koden för simuleringarna med övriga kablar. Meshstorlekarna bestämdes vid de två fallen med hänsyn till kabeldiametrarna samt avståndet mellan kablarna, detta för att kablarna skulle modelleras på ett korrekt sätt i FDS. Om meshen är för stor flyttar kablarna sig för att kanterna ska ligga i en meshgräns vilket därmed kan ge inkorrekta resultat.

Vid simuleringarna med kraftkablarna delades testkammaren upp i två olika mesher med storlekarna 2 centimeter i närhet till kablarna och 4 centimeter i resten av kammaren. Vid simuleringar med övriga kablar delades kammaren upp på samma sätt med skillnaden att meshstorleken istället sattes till 1 centimeter i närhet till kablarna. Att kammaren delades upp på dessa sätt är på grund av att 1 respektive 2 centimeters meshstorlekar i hela kammaren medförde att antalet celler blev så pass många att effektutvecklingarna ej hann nå upp till sina maximala värden även då simuleringarna fortgått den maximalt tillåtna simuleringstiden på 7 dagar. Med uppdelningen i två mesher kunde alltså antalet celler reduceras vilket därmed resulterade i att ett längre brandförlopp kunde simuleras.



Figur H.29 Inringat område visar de nedre kabeldelarna som anges i nedanstående kod

H.3.1.1 Kraftkablar

Nedan åskådliggörs indatafilen för simuleringarna med kraftkablarna. I nedanstående kod redovisas endast de nedre kabeldelarna på varje kabel då all indata i annat fall hade tagit upp åtskilliga sidor av rapporten.

```
 ISOFIPEC.fds
Generated by PyroSim - Version 2011.1.1114
2013-jan-17 22:48:05

&HEAD CHID='ISOFIPEC'/
&TIME T_END=2400.0/
&DUMP RENDER_FILE='ISOFIPEC.ge1', DT_RESTART=300.0/

&MESH ID='MESH', IJK=27,60,200, XB=1.52,2.06,-0.08,1.12,0.0,4.0/
&MESH ID='MESH02', IJK=39,30,100, XB=-0.04,1.52,-0.08,1.12,0.0,4.0/

&REAC ID='Kablar',
     FYI='Kablar',
     C=2.0,
     H=3.0,
     O=0.0,
     N=0.0,
     OTHER=1.0,
     MW_OTHER=35.45,
     HEAT_OF_COMBUSTION=1.64E4,
     CO_YIELD=0.063,
     SOOT_YIELD=0.14/

&MATL ID='STEEL',
     FYI='Drysdale, Intro to Fire Dynamics - ATF NIST Multi-Floor Validation',
     SPECIFIC_HEAT=0.46,
     CONDUCTIVITY=45.8,
     DENSITY=7850.0,
     EMISSIVITY=0.95/

&MATL ID='INSULATION',
     FYI='Isolatek BLAZE-SHIELD DC/F - WTC FDS5 Validation',
     SPECIFIC_HEAT_RAMP='INSULATION_SPECIFIC_HEAT_RAMP',
     CONDUCTIVITY_RAMP='INSULATION_CONDUCTIVITY_RAMP',
     DENSITY=208.0/

&RAMP ID='INSULATION_CONDUCTIVITY_RAMP', T=20.0, F=0.05/
&RAMP ID='INSULATION_CONDUCTIVITY_RAMP', T=377.0, F=0.1/
&RAMP ID='INSULATION_CONDUCTIVITY_RAMP', T=677.0, F=0.2/
&RAMP ID='INSULATION_SPECIFIC_HEAT_RAMP', T=20.0, F=0.8/
&RAMP ID='INSULATION_SPECIFIC_HEAT_RAMP', T=677.0, F=2.0/

&MATL ID='PVC',
     FYI='NISTIR 1013-1 - NIST NRC Validation',
     SPECIFIC_HEAT_RAMP='PVC_SPECIFIC_HEAT_RAMP',
     CONDUCTIVITY_RAMP='PVC_CONDUCTIVITY_RAMP',
     DENSITY=1380.0,
     EMISSIVITY=0.95/

&RAMP ID='PVC_CONDUCTIVITY_RAMP', T=23.0, F=0.192/
&RAMP ID='PVC_CONDUCTIVITY_RAMP', T=50.0, F=0.175/
```

```
&RAMP ID='PVC_CONDUCTIVITY_RAMP', T=75.0, F=0.172/
&RAMP ID='PVC_CONDUCTIVITY_RAMP', T=100.0, F=0.147/
&RAMP ID='PVC_CONDUCTIVITY_RAMP', T=125.0, F=0.141/
&RAMP ID='PVC_CONDUCTIVITY_RAMP', T=150.0, F=0.134/
&RAMP ID='PVC_SPECIFIC_HEAT_RAMP', T=23.0, F=1.29/
&RAMP ID='PVC_SPECIFIC_HEAT_RAMP', T=50.0, F=1.35/
&RAMP ID='PVC_SPECIFIC_HEAT_RAMP', T=75.0, F=1.41/
&RAMP ID='PVC_SPECIFIC_HEAT_RAMP', T=100.0, F=1.47/
&RAMP ID='PVC_SPECIFIC_HEAT_RAMP', T=125.0, F=1.53/
&RAMP ID='PVC_SPECIFIC_HEAT_RAMP', T=150.0, F=1.59/

&SURF ID='Stålvägg',
    RGB=146,202,166,
    MATL_ID(1,1)='STEEL',
    MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.0,
    THICKNESS(1)=0.002/

&SURF ID='Isolering',
    RGB=146,202,166,
    MATL_ID(1,1)='INSULATION',
    MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.0,
    THICKNESS(1)=0.065/

&SURF ID='Kabel',
    RGB=146,202,166,
    GEOMETRY='CYLINDRICAL',
    HRRPUA=XXX,                 <-- Här ändras effektutveckling per areaenhet för kabeldelarna
    RAMP_Q='Kabel_RAMP_Q',
    IGNITION_TEMPERATURE=XXX,<-- Här ändras antändningskriteriet hos kablarna i fråga
    MATL_ID(1,1)='PVC',
    MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.0,
    THICKNESS(1)=0.04/

&RAMP ID='Kabel_RAMP_Q', T=0.0, F=0.0/
&RAMP ID='Kabel_RAMP_Q', T=XXX, F=1.0/      <-- Här regleras tid till antändning och
&RAMP ID='Kabel_RAMP_Q', T=XXX, F=1.0/      <-- brinntid för kabeldelarna
&RAMP ID='Kabel_RAMP_Q', T=XXX, F=0.0/

&SURF ID='Brännare',
    COLOR='RED',
    HRRPUA=1388.89/

&SURF ID='Air Supply',
    RGB=26,204,26,
    VOLUME_FLUX=-0.1333/

&OBST XB=0.067,2.0,-0.02,0.0,0.0,4.0, SURF_ID='Stålvägg'/ Stålplatta1
&OBST XB=0.067,2.0,0.94,0.96,0.0,4.0, SURF_ID='Stålvägg'/ Stålplatta2
&OBST XB=1.98,2.0,0.0,0.94,0.0,4.0, SURF_ID='Stålvägg'/ Stålplatta3
&OBST XB=0.065,0.067,0.0,0.94,0.0,4.0, SURF_ID='Stålvägg'/ Stålplatta4
&OBST XB=0.067,2.0,-0.067,-0.02,0.0,4.0, SURF_ID='Isolering'/ Isolering1
&OBST XB=0.067,2.0,0.96,1.0,0.0,4.0, SURF_ID='Isolering'/ Isolering2
&OBST XB=2.0,2.065,-0.067,1.0,0.0,4.0, SURF_ID='Isolering'/ Isolering3
&OBST XB=0.0,0.065,-0.067,1.0,0.0,4.0, SURF_ID='Isolering'/ Isolering4
&OBST XB=0.0,2.065,-0.067,1.0,0.0,0.0, SURF_ID='INERT'/ Golv
&OBST XB=0.0,2.065,-0.067,1.0,4.0,4.0, SURF_ID='INERT'/ Tak
```

```
&OBST XB=1.68,1.72,0.32,0.68,0.56,0.6,
SURF_ID6='INERT','Brännare','INERT','INERT','INERT','INERT'/ Brännare

&HOLE XB=1.68,1.98,0.0,0.94,4.0,4.0/ Hole
&HOLE XB=0.15,0.65,0.1,0.9,0.0,0.0/ Hole

&VENT SURF_ID='OPEN', XB=1.68,1.98,0.0,0.94,4.0,4.0/ VentTak
&VENT SURF_ID='Air Supply', XB=0.15,0.65,0.1,0.9,0.0,0.0/ VentGolv
```

Nedan redovisas den nedre delen på varje kabel:
Kabeldelarna är 4 centimeter höga vilket betyder att det är totalt 100 stycken kabeldelar som representerar varje 4-meterskabel.

```
&OBST XB=1.8,1.84,0.36,0.4,0.1,0.14, COLOR='GREEN', SURF_ID='Kabel'/ Kabel1
&OBST XB=1.8,1.84,0.48,0.52,0.1,0.14, COLOR='GREEN', SURF_ID='Kabel'/ Kabel3
&OBST XB=1.8,1.84,0.54,0.58,0.1,0.14, COLOR='GREEN', SURF_ID='Kabel'/ Kabel4
&OBST XB=1.8,1.84,0.6,0.64,0.1,0.14, COLOR='GREEN', SURF_ID='Kabel'/ Kabel5

&BNDF QUANTITY='NET HEAT FLUX'/
&BNDF QUANTITY='WALL TEMPERATURE'/

&TAIL /
```

H.3.1.2 Övriga kablar

Nedan åskådliggörs indatafilen för simuleringarna med övriga kablar. I nedanstående kod redovisas, precis som för kraftkablarna, endast de nedre kabeldelarna hos varje kabel.

```
ISOFIPEC.fds
Generated by PyroSim - Version 2011.1.1114
2013-jan-23 19:20:33

&HEAD CHID='ISOFIPEC'/
&TIME T_END=1000.0/
&DUMP RENDER_FILE='ISOFIPEC.ge1', DT_RESTART=300.0/

&MESH ID='MESH', IJK=54,120,400, XB=1.52,2.06,-0.08,1.12,0.0,4.0/
&MESH ID='MESH02', IJK=39,30,100, XB=-0.04,1.52,-0.08,1.12,0.0,4.0/

&REAC ID='Kablar',
    FYI='Kablar',
    C=2.0,
    H=3.0,
    O=0.0,
    N=0.0,
    OTHER=1.0,
    MW_OTHER=35.45,
    HEAT_OF_COMBUSTION=1.64E4,
    CO_YIELD=0.063,
    SOOT_YIELD=0.14/

&MATL ID='STEEL',
    FYI='Drysdale, Intro to Fire Dynamics - ATF NIST Multi-Floor Validation',
    SPECIFIC_HEAT=0.46,
    CONDUCTIVITY=45.8,
    DENSITY=7850.0,
    EMISSIVITY=0.95/
```

```
&MATL ID='INSULATION',
    FYI='Isolatek BLAZE-SHIELD DC/F - WTC FDS5 Validation',
    SPECIFIC_HEAT_RAMP='INSULATION_SPECIFIC_HEAT_RAMP',
    CONDUCTIVITY_RAMP='INSULATION_CONDUCTIVITY_RAMP',
    DENSITY=208.0/

&RAMP ID='INSULATION_CONDUCTIVITY_RAMP', T=20.0, F=0.05/
&RAMP ID='INSULATION_CONDUCTIVITY_RAMP', T=377.0, F=0.1/
&RAMP ID='INSULATION_CONDUCTIVITY_RAMP', T=677.0, F=0.2/
&RAMP ID='INSULATION_SPECIFIC_HEAT_RAMP', T=20.0, F=0.8/
&RAMP ID='INSULATION_SPECIFIC_HEAT_RAMP', T=677.0, F=2.0/

&MATL ID='PVC',
    FYI='NISTIR 1013-1 - NIST NRC Validation',
    SPECIFIC_HEAT_RAMP='PVC_SPECIFIC_HEAT_RAMP',
    CONDUCTIVITY_RAMP='PVC_CONDUCTIVITY_RAMP',
    DENSITY=1380.0,
    EMISSIVITY=0.95/

&RAMP ID='PVC_CONDUCTIVITY_RAMP', T=23.0, F=0.192/
&RAMP ID='PVC_CONDUCTIVITY_RAMP', T=50.0, F=0.175/
&RAMP ID='PVC_CONDUCTIVITY_RAMP', T=75.0, F=0.172/
&RAMP ID='PVC_CONDUCTIVITY_RAMP', T=100.0, F=0.147/
&RAMP ID='PVC_CONDUCTIVITY_RAMP', T=125.0, F=0.141/
&RAMP ID='PVC_CONDUCTIVITY_RAMP', T=150.0, F=0.134/
&RAMP ID='PVC_SPECIFIC_HEAT_RAMP', T=23.0, F=1.29/
&RAMP ID='PVC_SPECIFIC_HEAT_RAMP', T=50.0, F=1.35/
&RAMP ID='PVC_SPECIFIC_HEAT_RAMP', T=75.0, F=1.41/
&RAMP ID='PVC_SPECIFIC_HEAT_RAMP', T=100.0, F=1.47/
&RAMP ID='PVC_SPECIFIC_HEAT_RAMP', T=125.0, F=1.53/
&RAMP ID='PVC_SPECIFIC_HEAT_RAMP', T=150.0, F=1.59/

&SURF ID='Stålvägg',
    RGB=146,202,166,
    MATL_ID(1,1)='STEEL',
    MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.0,
    THICKNESS(1)=0.002/

&SURF ID='Isolering',
    RGB=146,202,166,
    MATL_ID(1,1)='INSULATION',
    MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.0,
    THICKNESS(1)=0.065/

&SURF ID='Brännare',
    COLOR='RED',
    HRRPUA=1955.03/

&SURF ID='Kabel',
    RGB=146,202,166,
    GEOMETRY='CYLINDRICAL',
    HRRPUA=XXX,                 <-- Här ändras effektutveckling per areaenhet för kabeldelarna
    RAMP_Q='Kabel_RAMP_Q',
    IGNITION_TEMPERATURE=XXX,<-- Här ändras antändningskriteriet hos kablarna i fråga
    MATL_ID(1,1)='PVC',
    MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.0,
```

```
    THICKNESS(1)=0.014/

&RAMP ID='Kabel_RAMP_Q', T=0.0, F=0.0/
&RAMP ID='Kabel_RAMP_Q', T=XXX, F=1.0/      <-- Här regleras tid till antändning och
&RAMP ID='Kabel_RAMP_Q', T=XXX, F=1.0/      <-- brinntid för kabeldelarna
&RAMP ID='Kabel_RAMP_Q', T=XXX, F=0.0/

&SURF ID='Air Supply',
    RGB=26,204,26,
    VOLUME_FLUX=-0.1333/

&HOLE XB=1.267,1.98,0.0,0.94,4.0,4.0/ Hole
&HOLE XB=1.4,1.8,0.0,0.94,0.0,0.0/ Hole[1]

&VENT SURF_ID='OPEN', XB=1.267,1.98,0.0,0.94,4.032,4.032/ VentTak
&VENT SURF_ID='Air Supply', XB=1.4,1.8,0.0,0.94,0.0,0.0/ VentGolv
```

Nedan redovisas den nedre delen på varje kabel:
Även i detta fall är kabeldelarna 4 centimeter höga vilket betyder att det är totalt 100 stycken kabeldelar per 4-meterskabel.

```
&OBST XB=1.8,1.814,0.346,0.36,0.1,0.14, COLOR='GREEN', SURF_ID='Kabel'/ Kabel1
&OBST XB=1.8,1.814,0.374,0.388,0.1,0.14, COLOR='GREEN', SURF_ID='Kabel'/ Kabel2
&OBST XB=1.8,1.814,0.402,0.416,0.1,0.14, COLOR='GREEN', SURF_ID='Kabel'/ Kabel3
&OBST XB=1.8,1.814,0.43,0.444,0.1,0.14, COLOR='GREEN', SURF_ID='Kabel'/ Kabel4
&OBST XB=1.8,1.814,0.458,0.472,0.1,0.14, COLOR='GREEN', SURF_ID='Kabel'/ Kabel5
&OBST XB=1.8,1.814,0.486,0.5,0.1,0.14, COLOR='GREEN', SURF_ID='Kabel'/ Kabel6
&OBST XB=1.8,1.814,0.514,0.528,0.1,0.14, COLOR='GREEN', SURF_ID='Kabel'/ Kabel7
&OBST XB=1.8,1.814,0.542,0.556,0.1,0.14, COLOR='GREEN', SURF_ID='Kabel'/ Kabel8
&OBST XB=1.8,1.814,0.57,0.584,0.1,0.14, COLOR='GREEN', SURF_ID='Kabel'/ Kabel9
&OBST XB=1.8,1.814,0.598,0.612,0.1,0.14, COLOR='GREEN', SURF_ID='Kabel'/ Kabel10
&OBST XB=1.8,1.814,0.626,0.64,0.1,0.14, COLOR='GREEN', SURF_ID='Kabel'/ Kabel11

&BNDF QUANTITY='NET HEAT FLUX'/
&BNDF QUANTITY='WALL TEMPERATURE'/

&TAIL /
```

H.3.2 Försöksuppställning enligt FIPEC-projektets storskaleförsök

Nedan redogörs för försöksuppställningarna med kraft- och övriga kablar som utfördes för att säkerställa att de tidigare framtagna kabelparametrarna stämde överens även vid andra geometrier. Uppställningen är enligt FIPEC-projektets storskaleförsök, det vill säga en kabelstege i hörnkonfiguration.

H.3.2.1 Kraftkablar

Nedan åskådliggörs indatafilen för simuleringen med kraftkablarna. I nedanstående kod redovisas endast de nedre kabeldelarna på varje kabel då all indata i annat fall hade tagit upp åtskilliga sidor av rapporten.

```
Realscalekraft.fds
Generated by PyroSim - Version 2011.1.1114
2013-jan-17 10:40:23

&HEAD CHID='Realscalekraft'/
&TIME T_END=2000.0/
```

```
&DUMP RENDER_FILE='Realscalekraft.ge1', DT_RESTART=300.0/

&MESH ID='MESH', IJK=35,36,200, XB=1.26,1.96,0.06,0.78,0.0,4.0/

&REAC ID='Kablar',
    FYI='Kablar',
    C=2.0,
    H=3.0,
    O=0.0,
    N=0.0,
    OTHER=1.0,
    MW_OTHER=35.45,
    HEAT_OF_COMBUSTION=1.64E4,
    CO_YIELD=0.063,
    SOOT_YIELD=0.14/

&MATL ID='FIRE BRICK',
    FYI='NBSIR 88-3752 - NBS Multi-Room Validation',
    SPECIFIC_HEAT=1.04,
    CONDUCTIVITY_RAMP='FIRE BRICK_CONDUCTIVITY_RAMP',
    DENSITY=750.0,
    EMISSIVITY=0.8/

&RAMP ID='FIRE BRICK_CONDUCTIVITY_RAMP', T=20.0, F=0.36/
&RAMP ID='FIRE BRICK_CONDUCTIVITY_RAMP', T=200.0, F=0.36/
&RAMP ID='FIRE BRICK_CONDUCTIVITY_RAMP', T=300.0, F=0.38/
&RAMP ID='FIRE BRICK_CONDUCTIVITY_RAMP', T=600.0, F=0.45/

&MATL ID='PVC',
    FYI='NISTIR 1013-1 - NIST NRC Validation',
    SPECIFIC_HEAT_RAMP='PVC_SPECIFIC_HEAT_RAMP',
    CONDUCTIVITY_RAMP='PVC_CONDUCTIVITY_RAMP',
    DENSITY=1380.0,
    EMISSIVITY=0.95/

&RAMP ID='PVC_CONDUCTIVITY_RAMP', T=23.0, F=0.192/
&RAMP ID='PVC_CONDUCTIVITY_RAMP', T=50.0, F=0.175/
&RAMP ID='PVC_CONDUCTIVITY_RAMP', T=75.0, F=0.172/
&RAMP ID='PVC_CONDUCTIVITY_RAMP', T=100.0, F=0.147/
&RAMP ID='PVC_CONDUCTIVITY_RAMP', T=125.0, F=0.141/
&RAMP ID='PVC_CONDUCTIVITY_RAMP', T=150.0, F=0.134/
&RAMP ID='PVC_SPECIFIC_HEAT_RAMP', T=23.0, F=1.29/
&RAMP ID='PVC_SPECIFIC_HEAT_RAMP', T=50.0, F=1.35/
&RAMP ID='PVC_SPECIFIC_HEAT_RAMP', T=75.0, F=1.41/
&RAMP ID='PVC_SPECIFIC_HEAT_RAMP', T=100.0, F=1.47/
&RAMP ID='PVC_SPECIFIC_HEAT_RAMP', T=125.0, F=1.53/
&RAMP ID='PVC_SPECIFIC_HEAT_RAMP', T=150.0, F=1.59/

&SURF ID='Vägg',
    MATL_ID(1,1)='FIRE BRICK',
```

```
    MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.0,
    THICKNESS(1)=0.13/

&SURF ID='Kabel',
    RGB=146,202,166,
    GEOMETRY='CYLINDRICAL',
    HRRPUA=260.0,
    RAMP_Q='Kabel_RAMP_Q',
    IGNITION_TEMPERATURE=370.0,
    MATL_ID(1,1)='PVC',
    MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.0,
    THICKNESS(1)=0.04/

&RAMP ID='Kabel_RAMP_Q', T=0.0, F=0.0/
&RAMP ID='Kabel_RAMP_Q', T=300.0, F=1.0/
&RAMP ID='Kabel_RAMP_Q', T=1500.0, F=1.0/
&RAMP ID='Kabel_RAMP_Q', T=1501.0, F=0.0/

&SURF ID='Brännare',
    COLOR='RED',
    HRRPUA=5102.0,
    RAMP_Q='Brännare_RAMP_Q'/

&RAMP ID='Brännare_RAMP_Q', T=0.0, F=0.0/
&RAMP ID='Brännare_RAMP_Q', T=1.0, F=0.4/
&RAMP ID='Brännare_RAMP_Q', T=300.0, F=0.4/
&RAMP ID='Brännare_RAMP_Q', T=301.0, F=1.0/
&RAMP ID='Brännare_RAMP_Q', T=1200.0, F=1.0/
&RAMP ID='Brännare_RAMP_Q', T=1201.0, F=0.0/

&OBST XB=1.26,1.84,0.64,0.76,0.0,4.0, SURF_ID='Vägg'/ Tegelvägg
&OBST XB=1.84,1.96,0.06,0.76,0.0,4.0, SURF_ID='Vägg'/ Tegelvägg2
&OBST XB=1.26,1.96,0.06,0.78,0.0,0.028, SURF_ID='INERT'/ Golv
&OBST XB=1.66,1.8,0.5,0.64,0.0,0.3, SURF_IDS='Brännare','INERT','INERT'/ Brännare

&VENT SURF_ID='OPEN', XB=1.26,1.96,0.06,0.78,4.0,4.0/ Venttak
&VENT SURF_ID='OPEN', XB=1.26,1.26,0.06,0.78,0.0,4.0/ Ventx
&VENT SURF_ID='OPEN', XB=1.26,1.96,0.06,0.06,0.0,4.0/ Venty
```

Nedan redovisas den nedre delen på varje kabel:
Kabeldelarna är 4 centimeter höga vilket betyder att det är totalt 100 stycken kabeldelar som representerar varje 4-meterskabel.

```
&OBST XB=1.8,1.84,0.6,0.64,0.1,0.14, SURF_ID='Kabel'/ Kabel1
&OBST XB=1.8,1.84,0.54,0.58,0.1,0.14, SURF_ID='Kabel'/ Kabel2
&OBST XB=1.8,1.84,0.48,0.52,0.1,0.14, SURF_ID='Kabel'/ Kabel3
&OBST XB=1.8,1.84,0.42,0.46,0.1,0.14, SURF_ID='Kabel'/ Kabel4
&OBST XB=1.8,1.84,0.36,0.4,0.1,0.14, SURF_ID='Kabel'/ Kabel5

&BNDF QUANTITY='NET HEAT FLUX'/
```

```
&BNDF QUANTITY='WALL TEMPERATURE'/

&TAIL /
```

H.3.2.2 Övriga kablar

Nedan åskådliggörs indatafilen för simuleringarna med övriga kablar. I nedanstående kod redovisas, precis som för kraftkablarna, endast de nedre kabeldelarna hos varje kabel.

```
Realscaleovr.fds
Generated by PyroSim - Version 2011.1.1114
2013-jan-17 11:59:56

&HEAD CHID='Realscaleovr'/
&TIME T_END=300.0/
&DUMP RENDER_FILE='Realscaleovr.ge1', DT_RESTART=300.0/

&MESH ID='MESH', IJK=20,30,288, XB=1.686,1.966,0.346,0.766,0.0,4.032/
&MESH ID='MESH02', IJK=25,10,144, XB=1.266,1.966,0.066,0.346,0.0,4.032/
&MESH ID='MESH03', IJK=15,15,144, XB=1.266,1.686,0.346,0.766,0.0,4.032/

&REAC ID='Kablar',
     FYI='Kablar',
     C=2.0,
     H=3.0,
     O=0.0,
     N=0.0,
     OTHER=1.0,
     MW_OTHER=35.45,
     HEAT_OF_COMBUSTION=1.64E4,
     CO_YIELD=0.063,
     SOOT_YIELD=0.14/

&MATL ID='FIRE BRICK',
     FYI='NBSIR 88-3752 - NBS Multi-Room Validation',
     SPECIFIC_HEAT=1.04,
     CONDUCTIVITY_RAMP='FIRE BRICK_CONDUCTIVITY_RAMP',
     DENSITY=750.0,
     EMISSIVITY=0.8/

&RAMP ID='FIRE BRICK_CONDUCTIVITY_RAMP', T=20.0, F=0.36/
&RAMP ID='FIRE BRICK_CONDUCTIVITY_RAMP', T=200.0, F=0.36/
&RAMP ID='FIRE BRICK_CONDUCTIVITY_RAMP', T=300.0, F=0.38/
&RAMP ID='FIRE BRICK_CONDUCTIVITY_RAMP', T=600.0, F=0.45/

&MATL ID='PVC',
     FYI='NISTIR 1013-1 - NIST NRC Validation',
     SPECIFIC_HEAT_RAMP='PVC_SPECIFIC_HEAT_RAMP',
     CONDUCTIVITY_RAMP='PVC_CONDUCTIVITY_RAMP',
     DENSITY=1380.0,
     EMISSIVITY=0.95/
```

```
&RAMP ID='PVC_CONDUCTIVITY_RAMP', T=23.0, F=0.192/
&RAMP ID='PVC_CONDUCTIVITY_RAMP', T=50.0, F=0.175/
&RAMP ID='PVC_CONDUCTIVITY_RAMP', T=75.0, F=0.172/
&RAMP ID='PVC_CONDUCTIVITY_RAMP', T=100.0, F=0.147/
&RAMP ID='PVC_CONDUCTIVITY_RAMP', T=125.0, F=0.141/
&RAMP ID='PVC_CONDUCTIVITY_RAMP', T=150.0, F=0.134/
&RAMP ID='PVC_SPECIFIC_HEAT_RAMP', T=23.0, F=1.29/
&RAMP ID='PVC_SPECIFIC_HEAT_RAMP', T=50.0, F=1.35/
&RAMP ID='PVC_SPECIFIC_HEAT_RAMP', T=75.0, F=1.41/
&RAMP ID='PVC_SPECIFIC_HEAT_RAMP', T=100.0, F=1.47/
&RAMP ID='PVC_SPECIFIC_HEAT_RAMP', T=125.0, F=1.53/
&RAMP ID='PVC_SPECIFIC_HEAT_RAMP', T=150.0, F=1.59/

&SURF ID='Vägg',
    MATL_ID(1,1)='FIRE BRICK',
    MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.0,
    THICKNESS(1)=0.136/

&SURF ID='Kabel',
    RGB=146,202,166,
    GEOMETRY='CYLINDRICAL',
    HRRPUA=150.0,
    RAMP_Q='Kabel_RAMP_Q',
    IGNITION_TEMPERATURE=180.0,
    MATL_ID(1,1)='PVC',
    MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.0,
    THICKNESS(1)=0.014/

&RAMP ID='Kabel_RAMP_Q', T=0.0, F=0.0/
&RAMP ID='Kabel_RAMP_Q', T=1.0, F=1.0/
&RAMP ID='Kabel_RAMP_Q', T=150.0, F=1.0/
&RAMP ID='Kabel_RAMP_Q', T=151.0, F=0.0/

&SURF ID='Brännare',
    COLOR='RED',
    HRRPUA=5102.0,
    RAMP_Q='Brännare_RAMP_Q'/

&RAMP ID='Brännare_RAMP_Q', T=0.0, F=0.0/
&RAMP ID='Brännare_RAMP_Q', T=1.0, F=0.4/
&RAMP ID='Brännare_RAMP_Q', T=300.0, F=0.4/
&RAMP ID='Brännare_RAMP_Q', T=301.0, F=1.0/
&RAMP ID='Brännare_RAMP_Q', T=1200.0, F=1.0/
&RAMP ID='Brännare_RAMP_Q', T=1201.0, F=0.0/

&OBST XB=1.266,1.84,0.64,0.766,0.0,4.0, SURF_ID='Vägg'/ Tegelvägg
&OBST XB=1.84,1.966,0.066,0.766,0.0,4.0, SURF_ID='Vägg'/ Tegelvägg2
&OBST XB=1.266,1.966,0.066,0.766,0.0,0.028, SURF_ID='INERT'/ Golv
&OBST XB=1.686,1.826,0.5,0.64,0.0,0.3, SURF_IDS='Brännare','INERT','INERT'/ Brännare
```

&VENT SURF_ID='OPEN', XB=1.266,1.966,0.066,0.766,4.032,4.032/ Vent
&VENT SURF_ID='OPEN', XB=1.266,1.966,0.066,0.066,0.0,4.032/ Ventx
&VENT SURF_ID='OPEN', XB=1.266,1.266,0.066,0.766,0.0,4.032/ Venty

Nedan redovisas den nedre delen på varje kabel:
Kabeldelarna är 4 centimeter höga vilket betyder att det är totalt 100 stycken kabeldelar som representerar varje 4-meterskabel.

&OBST XB=1.826,1.84,0.346,0.36,0.1,0.14, SURF_ID='Kabel'/ Kabel1
&OBST XB=1.826,1.84,0.374,0.388,0.1,0.14, SURF_ID='Kabel'/ Kabel2
&OBST XB=1.826,1.84,0.402,0.416,0.1,0.14, SURF_ID='Kabel'/ Kabel3
&OBST XB=1.826,1.84,0.43,0.444,0.1,0.14, SURF_ID='Kabel'/ Kabel4
&OBST XB=1.826,1.84,0.458,0.472,0.1,0.14, SURF_ID='Kabel'/ Kabel5
&OBST XB=1.826,1.84,0.486,0.5,0.1,0.14, SURF_ID='Kabel'/ Kabel6
&OBST XB=1.826,1.84,0.514,0.528,0.1,0.14, SURF_ID='Kabel'/ Kabel7
&OBST XB=1.826,1.84,0.542,0.556,0.1,0.14, SURF_ID='Kabel'/ Kabel8
&OBST XB=1.826,1.84,0.57,0.584,0.1,0.14, SURF_ID='Kabel'/ Kabel9
&OBST XB=1.826,1.84,0.598,0.612,0.1,0.14, SURF_ID='Kabel'/ Kabel10
&OBST XB=1.826,1.84,0.626,0.64,0.1,0.14, SURF_ID='Kabel'/ Kabel11

&BNDF QUANTITY='NET HEAT FLUX'/
&BNDF QUANTITY='WALL TEMPERATURE'/

&TAIL /

H.3.3 Modellering i kabelschaktet
Nedan åskådliggörs indatafilen för simuleringar utförda i schaktet. Då koden i sin helhet är så pass lång åskådliggörs ej varje kabeldel i schaktet utan endast de nedre eller yttre kabeldelarna av varje kabel.

Schakt.fds
Generated by PyroSim - Version 2011.1.1114
2013-apr-16 20:00:54

&HEAD CHID='Schakt'/
&TIME T_END=2400.0/
&DUMP RENDER_FILE='Schakt.ge1', DT_RESTART=300.0/

&MESH ID='MESH', FYI='Mesh1', IJK=40,40,240, XB=0.0,2.0,3.5,5.5,0.0,12.0/
&MESH ID='MESH04', IJK=40,40,240, XB=0.0,2.0,3.5,5.5,12.0,24.0/
&MESH ID='MESH07', IJK=40,40,240, XB=0.0,2.0,3.5,5.5,24.0,36.0/
&MESH ID='MESH10', IJK=40,40,240, XB=0.0,2.0,3.5,5.5,36.0,48.0/
&MESH ID='MESH11', IJK=40,40,240, XB=0.0,2.0,3.5,5.5,48.0,60.0/
&MESH ID='MESH02', IJK=39,36,120, XB=0.0,3.9,-0.1,3.5,0.0,12.0/
&MESH ID='MESH03', IJK=19,20,120, XB=2.0,3.9,3.5,5.5,0.0,12.0/
&MESH ID='MESH05', IJK=39,36,120, XB=0.0,3.9,-0.1,3.5,12.0,24.0/
&MESH ID='MESH06', IJK=19,20,120, XB=2.0,3.9,3.5,5.5,12.0,24.0/
&MESH ID='MESH08', IJK=39,36,360, XB=0.0,3.9,-0.1,3.5,24.0,60.0/
&MESH ID='MESH09', IJK=19,20,360, XB=2.0,3.9,3.5,5.5,24.0,60.0/
&MESH ID='MESH12', IJK=12,12,300, XB=3.9,6.3,-0.1,2.3,0.0,60.0/

```
&REAC ID='Kablar',
    FYI='Kablar',
    C=2.0,
    H=3.0,
    O=0.0,
    N=0.0,
    OTHER=1.0,
    MW_OTHER=35.45,
    HEAT_OF_COMBUSTION=1.64E4,
    CO_YIELD=0.063,
    SOOT_YIELD=0.14/

&MATL ID='INSULATION',
    FYI='Isolatek BLAZE-SHIELD DC/F - WTC FDS5 Validation',
    SPECIFIC_HEAT_RAMP='INSULATION_SPECIFIC_HEAT_RAMP',
    CONDUCTIVITY_RAMP='INSULATION_CONDUCTIVITY_RAMP',
    DENSITY=208.0/

&RAMP ID='INSULATION_CONDUCTIVITY_RAMP', T=20.0, F=0.05/
&RAMP ID='INSULATION_CONDUCTIVITY_RAMP', T=377.0, F=0.1/
&RAMP ID='INSULATION_CONDUCTIVITY_RAMP', T=677.0, F=0.2/
&RAMP ID='INSULATION_SPECIFIC_HEAT_RAMP', T=20.0, F=0.8/
&RAMP ID='INSULATION_SPECIFIC_HEAT_RAMP', T=677.0, F=2.0/

&MATL ID='STEEL',
    FYI='Drysdale, Intro to Fire Dynamics - ATF NIST Multi-Floor Validation',
    SPECIFIC_HEAT=0.46,
    CONDUCTIVITY=45.8,
    DENSITY=7850.0,
    EMISSIVITY=0.95/

&MATL ID='PVC',
    FYI='NISTIR 1013-1 - NIST NRC Validation',
    SPECIFIC_HEAT_RAMP='PVC_SPECIFIC_HEAT_RAMP',
    CONDUCTIVITY_RAMP='PVC_CONDUCTIVITY_RAMP',
    DENSITY=1380.0,
    EMISSIVITY=0.95,
    HEAT_OF_COMBUSTION=1.64E4/

&RAMP ID='PVC_CONDUCTIVITY_RAMP', T=23.0, F=0.192/
&RAMP ID='PVC_CONDUCTIVITY_RAMP', T=50.0, F=0.175/
&RAMP ID='PVC_CONDUCTIVITY_RAMP', T=75.0, F=0.172/
&RAMP ID='PVC_CONDUCTIVITY_RAMP', T=100.0, F=0.147/
&RAMP ID='PVC_CONDUCTIVITY_RAMP', T=125.0, F=0.141/
&RAMP ID='PVC_CONDUCTIVITY_RAMP', T=150.0, F=0.134/

&RAMP ID='PVC_SPECIFIC_HEAT_RAMP', T=23.0, F=1.29/
&RAMP ID='PVC_SPECIFIC_HEAT_RAMP', T=50.0, F=1.35/
&RAMP ID='PVC_SPECIFIC_HEAT_RAMP', T=75.0, F=1.41/
&RAMP ID='PVC_SPECIFIC_HEAT_RAMP', T=100.0, F=1.47/
```

```
&RAMP ID='PVC_SPECIFIC_HEAT_RAMP', T=125.0, F=1.53/
&RAMP ID='PVC_SPECIFIC_HEAT_RAMP', T=150.0, F=1.59/

&SURF ID='Isolering',
    RGB=146,202,166,
    MATL_ID(1,1:2)='INSULATION','STEEL',
    MATL_MASS_FRACTION(1,1:2)=0.5,0.5,
    THICKNESS(1)=0.3/

&SURF ID='KabelOvr',
    RGB=146,202,166,
    GEOMETRY='CYLINDRICAL',
    HRRPUA=150.0,
    RAMP_Q='KabelOvr_RAMP_Q',
    HEAT_OF_VAPORIZATION=1.64E4,
    IGNITION_TEMPERATURE=180.0,
    MATL_ID(1,1)='PVC',
    MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.0,
    THICKNESS(1)=0.01435/

&RAMP ID='KabelOvr_RAMP_Q', T=0.0, F=0.0/
&RAMP ID='KabelOvr_RAMP_Q', T=1.0, F=1.0/
&RAMP ID='KabelOvr_RAMP_Q', T=150.0, F=1.0/
&RAMP ID='KabelOvr_RAMP_Q', T=151.0, F=0.0/

&SURF ID='KabelKraft',
    RGB=146,202,166,
    GEOMETRY='CYLINDRICAL',
    HRRPUA=260.0,
    RAMP_Q='KabelKraft_RAMP_Q',
    HEAT_OF_VAPORIZATION=1.64E4,
    IGNITION_TEMPERATURE=370.0,
    MATL_ID(1,1)='PVC',
    MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.0,
    THICKNESS(1)=0.04/

&RAMP ID='KabelKraft_RAMP_Q', T=0.0, F=0.0/
&RAMP ID='KabelKraft_RAMP_Q', T=300.0, F=1.0/
&RAMP ID='KabelKraft_RAMP_Q', T=1500.0, F=1.0/
&RAMP ID='KabelKraft_RAMP_Q', T=1501.0, F=0.0/

&OBST XB=0.0,3.9,0.0,5.5,0.0,0.0, SURF_ID='INERT'/ Golv
&OBST XB=0.0,6.2,0.0,0.3,0.0,60.0, SURF_ID='Isolering'/ Vägg1
&OBST XB=3.56,3.9,1.9,5.2,0.0,60.0, SURF_ID='Isolering'/ Vägg2
&OBST XB=0.0,3.9,5.2,5.5,0.0,60.0, SURF_ID='Isolering'/ Vägg3
&OBST XB=0.0,0.3,0.3,5.2,0.0,60.0, SURF_ID='Isolering'/ Vägg4
&OBST XB=3.9,6.2,1.9,2.2,0.0,60.0, SURF_ID='Isolering'/ Vägg5
&OBST XB=5.9,6.2,0.3,1.9,0.0,60.0, SURF_ID='Isolering'/ Vägg6

&VENT SURF_ID='OPEN', XB=0.0,3.9,-0.1,5.5,12.0,12.0/ Vent
```

```
&BNDF QUANTITY='NET HEAT FLUX'/
&BNDF QUANTITY='WALL TEMPERATURE'/

&TAIL /
```

Kablar:
Nedan åskådliggörs hur kablarna är placerade vid simuleringarna. De koder som visas nedan är de nedre/yttre kabeldelarna för varje kabelstege/sektion. Vid simuleringarna är kablarna i sina helheter modellerade enligt tidigare figur. Vilket kan ses i koderna är det mellanrum mellan vissa av kablarna, detta för att i största möjliga mån likna kabeluppbyggnaden i schaktet.

Kabelstegar med kraftkablar:
Kabelstegarna med kraftkablar går från 1,0 meter upp till höjden 40,0 meter i schaktet. Kabeldelarna är 10 centimeter höga vilket betyder att det totalt är 390 stycken kabeldelar som representerar varje kabel.

```
&OBST XB=1.65,1.7,4.2,4.3,1.0,1.1, SURF_ID='KabelKraft'/ KraftYttre
&OBST XB=1.65,1.7,4.4,4.5,1.0,1.1, SURF_ID='KabelKraft'/ KraftYttre[1]
&OBST XB=1.65,1.7,4.5,4.6,1.0,1.1, SURF_ID='KabelKraft'/ KraftYttre[2]
&OBST XB=1.65,1.7,4.6,4.7,1.0,1.1, SURF_ID='KabelKraft'/ KraftYttre[3]
&OBST XB=1.3,1.35,4.2,4.3,1.0,1.1, SURF_ID='KabelKraft'/ KraftInre
&OBST XB=1.3,1.35,4.4,4.5,1.0,1.1, SURF_ID='KabelKraft'/ KraftInre[1]
&OBST XB=1.3,1.35,4.5,4.6,1.0,1.1, SURF_ID='KabelKraft'/ KraftInre[2]
&OBST XB=1.3,1.35,4.6,4.7,1.0,1.1, SURF_ID='KabelKraft'/ KraftInre[3]
```

Kabelstegar med övriga kablar:
Den yttre kabelstegen med övriga kablar går från 1,0 meter upp till höjden 54,0 upp i schaktet. Kabeldelarna är 10 centimeter höga vilket betyder att det totalt är 530 kabeldelar som representerar varje kabel på den yttre kabelstegen. Den inre kabelstegen med övriga kablar går från 1,0 meter upp till höjden 60 meter i schaktet. Även dessa kabeldelar är 10 centimeter höga vilket betyder att det totalt är 590 kabeldelar som representerar varje kabel på den inre kabelstegen.

```
&OBST XB=0.95,1.0,4.2,4.3,1.0,1.1, SURF_ID='KabelOvr'/ OvrYttre
&OBST XB=0.95,1.0,4.3,4.4,1.0,1.1, SURF_ID='KabelOvr'/ OvrYttre[1]
&OBST XB=0.95,1.0,4.4,4.5,1.0,1.1, SURF_ID='KabelOvr'/ OvrYttre[2]
&OBST XB=0.95,1.0,4.6,4.7,1.0,1.1, SURF_ID='KabelOvr'/ OvrYttre[3]
&OBST XB=0.6,0.65,4.2,4.3,1.0,1.1, SURF_ID='KabelOvr'/ OvrInre
&OBST XB=0.6,0.65,4.3,4.4,1.0,1.1, SURF_ID='KabelOvr'/ OvrInre[1]
&OBST XB=0.6,0.65,4.4,4.5,1.0,1.1, SURF_ID='KabelOvr'/ OvrInre[2]
&OBST XB=0.6,0.65,4.5,4.6,1.0,1.1, SURF_ID='KabelOvr'/ OvrInre[3]
&OBST XB=0.6,0.65,4.6,4.7,1.0,1.1, SURF_ID='KabelOvr'/ OvrInre[4]
```

Horisontella sektioner längs med schaktets inre vägg:
De horisontella sektionerna går från dess startpositioner y=0,5 meter till y=4,8 meter. Alla kabeldelar är 10 centimeter långa vilket betyder att det totalt är 43 kabeldelar som representerar varje kabel i dessa sektioner.

```
&OBST XB=0.35,0.4,0.5,0.6,5.0,5.1, SURF_ID='KabelOvr'/ KabelHorisontell
&OBST XB=0.35,0.4,0.5,0.6,5.1,5.2, SURF_ID='KabelOvr'/ KabelHorisontell[1]
&OBST XB=0.35,0.4,0.5,0.6,5.2,5.3, SURF_ID='KabelKraft'/ KabelHorisontell[2]
&OBST XB=0.35,0.4,0.5,0.6,5.3,5.4, SURF_ID='KabelKraft'/ KabelHorisontell[3]
&OBST XB=0.35,0.4,0.5,0.6,5.4,5.5, SURF_ID='KabelKraft'/ KabelHorisontell[4]
```

&OBST XB=0.35,0.4,0.5,0.6,6.0,6.1, SURF_ID='KabelOvr'/ KabelHorisontell
&OBST XB=0.35,0.4,0.5,0.6,6.1,6.2, SURF_ID='KabelOvr'/ KabelHorisontell[1]
&OBST XB=0.35,0.4,0.5,0.6,6.2,6.3, SURF_ID='KabelKraft'/ KabelHorisontell[2]
&OBST XB=0.35,0.4,0.5,0.6,6.3,6.4, SURF_ID='KabelKraft'/ KabelHorisontell[3]
&OBST XB=0.35,0.4,0.5,0.6,6.4,6.5, SURF_ID='KabelKraft'/ KabelHorisontell[4]

&OBST XB=0.35,0.4,0.5,0.6,9.0,9.1, SURF_ID='KabelOvr'/ KabelHorisontell
&OBST XB=0.35,0.4,0.5,0.6,9.1,9.2, SURF_ID='KabelOvr'/ KabelHorisontell[1]
&OBST XB=0.35,0.4,0.5,0.6,9.2,9.3, SURF_ID='KabelKraft'/ KabelHorisontell[2]
&OBST XB=0.35,0.4,0.5,0.6,9.3,9.4, SURF_ID='KabelKraft'/ KabelHorisontell[3]
&OBST XB=0.35,0.4,0.5,0.6,9.4,9.5, SURF_ID='KabelKraft'/ KabelHorisontell[4]

&OBST XB=0.35,0.4,0.5,0.6,16.5,16.6, SURF_ID='KabelOvr'/ KabelHorisontell
&OBST XB=0.35,0.4,0.5,0.6,16.6,16.7, SURF_ID='KabelOvr'/ KabelHorisontell[1]
&OBST XB=0.35,0.4,0.5,0.6,16.7,16.8, SURF_ID='KabelKraft'/ KabelHorisontell[2]
&OBST XB=0.35,0.4,0.5,0.6,16.8,16.9, SURF_ID='KabelKraft'/ KabelHorisontell[3]
&OBST XB=0.35,0.4,0.5,0.6,16.9,17.0, SURF_ID='KabelKraft'/ KabelHorisontell[4]

&OBST XB=0.35,0.4,0.5,0.6,23.5,23.6, SURF_ID='KabelOvr'/ KabelHorisontell
&OBST XB=0.35,0.4,0.5,0.6,23.6,23.7, SURF_ID='KabelOvr'/ KabelHorisontell[1]
&OBST XB=0.35,0.4,0.5,0.6,23.7,23.8, SURF_ID='KabelKraft'/ KabelHorisontell[2]
&OBST XB=0.35,0.4,0.5,0.6,23.8,23.9, SURF_ID='KabelKraft'/ KabelHorisontell[3]
&OBST XB=0.35,0.4,0.5,0.6,23.9,23.0, SURF_ID='KabelKraft'/ KabelHorisontell[4]

&OBST XB=0.35,0.4,0.5,0.6,33.1,33.2, SURF_ID='KabelOvr'/ KabelHorisontell
&OBST XB=0.35,0.4,0.5,0.6,33.2,33.3, SURF_ID='KabelOvr'/ KabelHorisontell[1]
&OBST XB=0.35,0.4,0.5,0.6,33.3,33.4, SURF_ID='KabelKraft'/ KabelHorisontell[2]
&OBST XB=0.35,0.4,0.5,0.6,33.4,33.5, SURF_ID='KabelKraft'/ KabelHorisontell[3]
&OBST XB=0.35,0.4,0.5,0.6,33.5,33.6, SURF_ID='KabelKraft'/ KabelHorisontell[4]

&OBST XB=0.35,0.4,0.5,0.6,39.5,39.6, SURF_ID='KabelOvr'/ KabelHorisontell
&OBST XB=0.35,0.4,0.5,0.6,39.6,39.7, SURF_ID='KabelOvr'/ KabelHorisontell[1]
&OBST XB=0.35,0.4,0.5,0.6,39.7,39.8, SURF_ID='KabelKraft'/ KabelHorisontell[2]
&OBST XB=0.35,0.4,0.5,0.6,39.8,39.9, SURF_ID='KabelKraft'/ KabelHorisontell[3]
&OBST XB=0.35,0.4,0.5,0.6,39.9,40.0, SURF_ID='KabelKraft'/ KabelHorisontell[4]

&OBST XB=0.35,0.4,0.5,0.6,48.2,48.3, SURF_ID='KabelOvr'/ KabelHorisontell
&OBST XB=0.35,0.4,0.5,0.6,48.3,48.4, SURF_ID='KabelOvr'/ KabelHorisontell[1]
&OBST XB=0.35,0.4,0.5,0.6,48.4,48.5, SURF_ID='KabelOvr'/ KabelHorisontell[2]
&OBST XB=0.35,0.4,0.5,0.6,48.5,48.6, SURF_ID='KabelOvr'/ KabelHorisontell[3]

&OBST XB=0.35,0.4,0.5,0.6,54.1,54.2, SURF_ID='KabelOvr'/ KabelHorisontell
&OBST XB=0.35,0.4,0.5,0.6,54.2,54.3, SURF_ID='KabelOvr'/ KabelHorisontell[1]
&OBST XB=0.35,0.4,0.5,0.6,54.3,54.4, SURF_ID='KabelOvr'/ KabelHorisontell[2]

Horisontella sektioner som leds in i schaktet:
Dessa horisontella sektioner går dess startpositioner x=0,3 meter till x=1,8 meter. Alla kabeldelar är 10 centimeter långa vilket betyder att det totalt är 15 kabeldelar som representerar varje kabel i dessa sektioner.

&OBST XB=0.3,0.4,3.7,3.8,6.6,6.7, SURF_ID='KabelKraft'/ KabelIn
&OBST XB=0.3,0.4,3.8,3.9,6.6,6.7, SURF_ID='KabelKraft'/ KabelIn[1]
&OBST XB=0.3,0.4,3.9,4.0,6.6,6.7, SURF_ID='KabelKraft'/ KabelIn[2]
&OBST XB=0.3,0.4,4.0,4.1,6.6,6.7, SURF_ID='KabelKraft'/ KabelIn[3]

&OBST XB=0.3,0.4,3.7,3.8,8.0,8.1, SURF_ID='KabelKraft'/ KabelIn

&OBST XB=0.3,0.4,3.8,3.9,8.0,8.1, SURF_ID='KabelKraft'/ KabelIn[1]
&OBST XB=0.3,0.4,3.9,4.0,8.0,8.1, SURF_ID='KabelKraft'/ KabelIn[2]
&OBST XB=0.3,0.4,4.0,4.1,8.0,8.1, SURF_ID='KabelKraft'/ KabelIn[3]

&OBST XB=0.3,0.4,3.7,3.8,10.0,10.1, SURF_ID='KabelKraft'/ KabelIn
&OBST XB=0.3,0.4,3.8,3.9,10.0,10.1, SURF_ID='KabelKraft'/ KabelIn[1]
&OBST XB=0.3,0.4,3.9,4.0,10.0,10.1, SURF_ID='KabelOvr'/ KabelIn[2]
&OBST XB=0.3,0.4,4.0,4.1,10.0,10.1, SURF_ID='KabelKraft'/ KabelIn[3]

&OBST XB=0.3,0.4,3.7,3.8,16.0,16.1, SURF_ID='KabelKraft'/ KabelIn
&OBST XB=0.3,0.4,3.8,3.9,16.0,16.1, SURF_ID='KabelOvr'/ KabelIn[1]
&OBST XB=0.3,0.4,3.9,4.0,16.0,16.1, SURF_ID='KabelKraft'/ KabelIn[2]
&OBST XB=0.3,0.4,4.0,4.1,16.0,16.1, SURF_ID='KabelKraft'/ KabelIn[3]

&OBST XB=0.3,0.4,3.7,3.8,23.0,23.1, SURF_ID='KabelKraft'/ KabelIn
&OBST XB=0.3,0.4,3.8,3.9,23.0,23.1, SURF_ID='KabelKraft'/ KabelIn[1]
&OBST XB=0.3,0.4,3.9,4.0,23.0,23.1, SURF_ID='KabelKraft'/ KabelIn[2]
&OBST XB=0.3,0.4,4.0,4.1,23.0,23.1, SURF_ID='KabelOvr'/ KabelIn[3]

&OBST XB=0.3,0.4,3.7,3.8,33.0,33.1, SURF_ID='KabelKraft'/ KabelIn
&OBST XB=0.3,0.4,3.8,3.9,33.0,33.1, SURF_ID='KabelOvr'/ KabelIn[1]
&OBST XB=0.3,0.4,3.9,4.0,33.0,33.1, SURF_ID='KabelKraft'/ KabelIn[2]
&OBST XB=0.3,0.4,4.0,4.1,33.0,33.1, SURF_ID='KabelKraft'/ KabelIn[3]

&OBST XB=0.3,0.4,3.7,3.8,40.0,40.1, SURF_ID='KabelKraft'/ KabelIn
&OBST XB=0.3,0.4,3.8,3.9,40.0,40.1, SURF_ID='KabelOvr'/ KabelIn[1]
&OBST XB=0.3,0.4,3.9,4.0,40.0,40.1, SURF_ID='KabelKraft'/ KabelIn[2]
&OBST XB=0.3,0.4,4.0,4.1,40.0,40.1, SURF_ID='KabelKraft'/ KabelIn[3]

&OBST XB=0.3,0.4,3.7,3.8,48.0,48.1, SURF_ID='KabelOvr'/ KabelIn
&OBST XB=0.3,0.4,3.8,3.9,48.0,48.1, SURF_ID='KabelOvr'/ KabelIn[1]
&OBST XB=0.3,0.4,3.9,4.0,48.0,48.1, SURF_ID='KabelOvr'/ KabelIn[2]
&OBST XB=0.3,0.4,4.0,4.1,48.0,48.1, SURF_ID='KabelOvr'/ KabelIn[3]

&OBST XB=0.3,0.4,3.7,3.8,54.0,54.1, SURF_ID='KabelOvr'/ KabelIn
&OBST XB=0.3,0.4,3.8,3.9,54.0,54.1, SURF_ID='KabelOvr'/ KabelIn[1]
&OBST XB=0.3,0.4,3.9,4.0,54.0,54.1, SURF_ID='KabelOvr'/ KabelIn[2]
&OBST XB=0.3,0.4,4.0,4.1,54.0,54.1, SURF_ID='KabelOvr'/ KabelIn[3]

Cable failure detectors:
Kabelfalleringsdetektorerna är placerade med två meters mellanrum i höjdled på båda sidor om varje kabel i schaktet, totalt är det 948 stycken kabelfalleringsdetektorer utplacerade i schaktet. Orienteringen för detektorerna är satt 90° ut från kablarna vilket betyder att raden ORIENTATION nedan är 1.0,0.0,0.0, -1.0,0.0,0.0 eller 0.0,0.0,-1.0 beroende på var detektorn i fråga är placerad. Nedan åskådliggörs detektorernas egenskaper för kraft- respektive övriga kablar samt placering för en av de nedre detektorerna för var och en av dessa sorter.

Kraftkablar:
&PROP ID='FailureKraft props',
QUANTITY='CABLE TEMPERATURE',
CABLE_MASS_PER_LENGTH=2.419,
CABLE_FAILURE_TEMPERATURE=180.0,
CABLE_DIAMETER=0.0421,
CABLE_JACKET_THICKNESS=0.006/

&DEVC ID='FailureKraft', PROP_ID='FailureKraft props', XYZ=1.64,4.65,1.05, ORIENTATION=-1.0,0.0,0.0/

Övriga kablar:

```
&PROP ID='FailureOvr props',
    QUANTITY='CABLE TEMPERATURE',
    CABLE_MASS_PER_LENGTH=0.25,
    CABLE_FAILURE_TEMPERATURE=180.0,
    CABLE_DIAMETER=0.015/
    CABLE_JACKET_THICKNESS=0.002/

&DEVC ID='FailureOvr', PROP_ID='FailureOvr props', XYZ=0.94,4.65,1.05, ORIENTATION=-
1.0,0.0,0.0/
```

Termoelement:

Termoelementen är placerade som fem stycken element på samma höjd var femte meter upp till toppen av schaktet, det är alltså totalt 65 stycken termoelement utplacerade i schaktet. Nedan visas hur de nedre fem elementen är placerade.

```
&DEVC ID='THCP01', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.8,1.5,5.0/
&DEVC ID='THCP02', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.8,4.5,5.0/
&DEVC ID='THCP03', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=2.8,1.5,5.0/
&DEVC ID='THCP04', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=2.8,4.5,5.0/
&DEVC ID='THCP05', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=4.8,1.0,5.0/
```

Antändningskälla:

För att en inledande antändning skall ske måste även en antändningskälla definieras. Effektutvecklingen per areaenhet och brinntiden är samma som för resterande kablar, dock sätts dessa delar att antända direkt då simuleringen startar. Den inledande delen av nedanstående kod definierar ytans egenskaper och brinntiden varpå nästa del av koden definierar på vilken kabeldel denna egenskap sätts. I följande koder sätts antändningsplatsen på höjden 5 meter för en kraftkabeldel på den yttre kabelstegen med kraftkablar och för en kabeldel med övriga kablar på den yttre kabelstegen med övriga kablar.

Kraftkablar:

```
&SURF ID='Kabelantkraft',
    COLOR='RED',
    HRRPUA=260.0,
    RAMP_Q='Kabelantkraft_RAMP_Q'/

&RAMP ID='Kabelantkraft_RAMP_Q', T=0.0, F=0.0/
&RAMP ID='Kabelantkraft_RAMP_Q', T=1.0, F=1.0/
&RAMP ID='Kabelantkraft_RAMP_Q', T=1200.0, F=1.0/
&RAMP ID='Kabelantkraft_RAMP_Q', T=1201.0, F=0.0/

&OBST XB=1.65,1.7,4.4,4.5,4.9,5.0, SURF_ID='Kabelantkraft'/ KraftYttre
```

Övriga kablar:

```
&SURF ID='Kabelantovr',
    COLOR='RED',
    HRRPUA=150.0,
    RAMP_Q='Kabelantovr_RAMP_Q'/

&RAMP ID='Kabelantovr_RAMP_Q', T=0.0, F=0.0/
&RAMP ID='Kabelantovr_RAMP_Q', T=1.0, F=1.0/
&RAMP ID='Kabelantovr_RAMP_Q', T=150.0, F=1.0/
&RAMP ID='Kabelantovr_RAMP_Q', T=151.0, F=0.0/
```

&OBST XB=0.6,0.65,4.4,4.5,4.9,5.0, SURF_ID='Kabelantovr'/ OvrYttre

Strålningsskärmar:
Strålningsskärmarna är placerade för att kunna skydda omgivande kabelsektioner från flam- och strålningspåverkan från en brandutsatt kabelsektion. Då dessa skärmar antas vara både flam- och strålningsbeständiga definieras dess ytor som Inerta vilket betyder en icke-reagerande fast yta med dem konstanta temperaturen 20°C. Vid ett verkligt scenario kommer detta dock ej vara fallet då ytan kommer värmas upp vilket därmed kan accelerera ett eventuellt brandförlopp, dock kommer detta ej medföra någon skillnad i skadeomfattning då målet med strålningsskärmarna är att branden ej skall sprida sig till omgivande sektioner.

&OBST XB=0.5,0.5,4.1,4.8,0.0,60.0, COLOR='GREEN', SURF_ID='INERT" / Strålningsskärm1
&OBST XB=0.8,0.8,4.1,4.8,0.0,60.0, COLOR='GREEN', SURF_ID='INERT" / Strålningsskärm2
&OBST XB=1.15,1.15,4.1,4.8,0.0,60.0, COLOR='GREEN', SURF_ID='INERT" / Strålningsskärm3
&OBST XB=1.5,1.5,4.1,4.8,0.0,60.0, COLOR='GREEN', SURF_ID='INERT" / Strålningsskärm4
&OBST XB=0.5,2.0,4.1,4.1,0.0,60.0, COLOR='GREEN', SURF_ID='INERT" / Strålningsskärm5
&OBST XB=0.3,0.8,0.5,4.1,5.5,5.5, COLOR='GREEN', SURF_ID='INERT" / Strålningsskärm6
&OBST XB=0.3,0.8,0.5,4.1,6.5,6.5, COLOR='GREEN', SURF_ID='INERT" / Strålningsskärm7
&OBST XB=0.3,0.8,0.5,4.1,9.5,9.5, COLOR='GREEN', SURF_ID='INERT" / Strålningsskärm8
&OBST XB=0.3,0.8,0.5,4.1,17.0,17.0, COLOR='GREEN', SURF_ID='INERT" / Strålningsskärm9
&OBST XB=0.3,0.8,0.5,4.1,24.0,24.0, COLOR='GREEN', SURF_ID='INERT" / Strålningsskärm10
&OBST XB=0.3,0.8,0.5,4.1,33.6,33.6, COLOR='GREEN', SURF_ID='INERT" / Strålningsskärm11
&OBST XB=0.3,0.8,0.5,4.1,40.0,40.0, COLOR='GREEN', SURF_ID='INERT" / Strålningsskärm12
&OBST XB=0.3,0.8,0.5,4.1,48.6,48.6, COLOR='GREEN', SURF_ID='INERT" / Strålningsskärm13
&OBST XB=0.3,0.8,0.5,4.1,54.4,54.4, COLOR='GREEN', SURF_ID='INERT" / Strålningsskärm14

Sprinklerhuvuden:
Sprinklerhuvudena är vid simuleringen placerade mellan alla vertikala kabelstegar och riktade rakt nedåt.

&DEVC ID='SPRK', PROP_ID='Default_Water Spray_Default_Water Spray', XYZ=0.5,4.5,5.0, ORIENTATION=0.0,0.0,-1.0 /
&DEVC ID='SPRK', PROP_ID='Default_Water Spray_Default_Water Spray', XYZ=0.5,4.5,10.0, ORIENTATION=0.0,0.0,-1.0 /
&DEVC ID='SPRK', PROP_ID='Default_Water Spray_Default_Water Spray', XYZ=0.5,4.5,15.0, ORIENTATION=0.0,0.0,-1.0 /
&DEVC ID='SPRK', PROP_ID='Default_Water Spray_Default_Water Spray', XYZ=0.5,4.5,20.0, ORIENTATION=0.0,0.0,-1.0 /
&DEVC ID='SPRK', PROP_ID='Default_Water Spray_Default_Water Spray', XYZ=0.5,4.5,25.0, ORIENTATION=0.0,0.0,-1.0 /
&DEVC ID='SPRK', PROP_ID='Default_Water Spray_Default_Water Spray', XYZ=0.5,4.5,30.0, ORIENTATION=0.0,0.0,-1.0 /
&DEVC ID='SPRK', PROP_ID='Default_Water Spray_Default_Water Spray', XYZ=0.5,4.5,35.0, ORIENTATION=0.0,0.0,-1.0 /
&DEVC ID='SPRK', PROP_ID='Default_Water Spray_Default_Water Spray', XYZ=0.5,4.5,40.0, ORIENTATION=0.0,0.0,-1.0 /
&DEVC ID='SPRK', PROP_ID='Default_Water Spray_Default_Water Spray', XYZ=0.5,4.5,45.0, ORIENTATION=0.0,0.0,-1.0 /

&DEVC ID='SPRK', PROP_ID='Default_Water Spray_Default_Water Spray', XYZ=0.5,4.5,50.0,
ORIENTATION=0.0,0.0,-1.0 /
&DEVC ID='SPRK', PROP_ID='Default_Water Spray_Default_Water Spray', XYZ=0.5,4.5,55.0,
ORIENTATION=0.0,0.0,-1.0 /

&DEVC ID='SPRK', PROP_ID='Default_Water Spray_Default_Water Spray', XYZ=0.8,4.5,5.0,
ORIENTATION=0.0,0.0,-1.0 /
&DEVC ID='SPRK', PROP_ID='Default_Water Spray_Default_Water Spray', XYZ=0.8,4.5,10.0,
ORIENTATION=0.0,0.0,-1.0 /
&DEVC ID='SPRK', PROP_ID='Default_Water Spray_Default_Water Spray', XYZ=0.8,4.5,15.0,
ORIENTATION=0.0,0.0,-1.0 /
&DEVC ID='SPRK', PROP_ID='Default_Water Spray_Default_Water Spray', XYZ=0.8,4.5,20.0,
ORIENTATION=0.0,0.0,-1.0 /
&DEVC ID='SPRK', PROP_ID='Default_Water Spray_Default_Water Spray', XYZ=0.8,4.5,25.0,
ORIENTATION=0.0,0.0,-1.0 /
&DEVC ID='SPRK', PROP_ID='Default_Water Spray_Default_Water Spray', XYZ=0.8,4.5,30.0,
ORIENTATION=0.0,0.0,-1.0 /
&DEVC ID='SPRK', PROP_ID='Default_Water Spray_Default_Water Spray', XYZ=0.8,4.5,35.0,
ORIENTATION=0.0,0.0,-1.0 /
&DEVC ID='SPRK', PROP_ID='Default_Water Spray_Default_Water Spray', XYZ=0.8,4.5,40.0,
ORIENTATION=0.0,0.0,-1.0 /
&DEVC ID='SPRK', PROP_ID='Default_Water Spray_Default_Water Spray', XYZ=0.8,4.5,45.0,
ORIENTATION=0.0,0.0,-1.0 /
&DEVC ID='SPRK', PROP_ID='Default_Water Spray_Default_Water Spray', XYZ=0.8,4.5,50.0,
ORIENTATION=0.0,0.0,-1.0 /
&DEVC ID='SPRK', PROP_ID='Default_Water Spray_Default_Water Spray', XYZ=0.8,4.5,55.0,
ORIENTATION=0.0,0.0,-1.0 /

&DEVC ID='SPRK', PROP_ID='Default_Water Spray_Default_Water Spray', XYZ=1.15,4.5,5.0,
ORIENTATION=0.0,0.0,-1.0 /
&DEVC ID='SPRK', PROP_ID='Default_Water Spray_Default_Water Spray', XYZ=1.15,4.5,10.0,
ORIENTATION=0.0,0.0,-1.0 /
&DEVC ID='SPRK', PROP_ID='Default_Water Spray_Default_Water Spray', XYZ=1.15,4.5,15.0,
ORIENTATION=0.0,0.0,-1.0 /
&DEVC ID='SPRK', PROP_ID='Default_Water Spray_Default_Water Spray', XYZ=1.15,4.5,20.0,
ORIENTATION=0.0,0.0,-1.0 /
&DEVC ID='SPRK', PROP_ID='Default_Water Spray_Default_Water Spray', XYZ=1.15,4.5,25.0,
ORIENTATION=0.0,0.0,-1.0 /
&DEVC ID='SPRK', PROP_ID='Default_Water Spray_Default_Water Spray', XYZ=1.15,4.5,30.0,
ORIENTATION=0.0,0.0,-1.0 /
&DEVC ID='SPRK', PROP_ID='Default_Water Spray_Default_Water Spray', XYZ=1.15,4.5,35.0,
ORIENTATION=0.0,0.0,-1.0 /
&DEVC ID='SPRK', PROP_ID='Default_Water Spray_Default_Water Spray', XYZ=1.15,4.5,40.0,
ORIENTATION=0.0,0.0,-1.0 /
&DEVC ID='SPRK', PROP_ID='Default_Water Spray_Default_Water Spray', XYZ=1.15,4.5,45.0,
ORIENTATION=0.0,0.0,-1.0 /
&DEVC ID='SPRK', PROP_ID='Default_Water Spray_Default_Water Spray', XYZ=1.15,4.5,50.0,
ORIENTATION=0.0,0.0,-1.0 /

&DEVC ID='SPRK', PROP_ID='Default_Water Spray_Default_Water Spray', XYZ=1.15,4.5,55.0,
ORIENTATION=0.0,0.0,-1.0 /

&DEVC ID='SPRK', PROP_ID='Default_Water Spray_Default_Water Spray', XYZ=1.5,4.5,5.0,
ORIENTATION=0.0,0.0,-1.0 /
&DEVC ID='SPRK', PROP_ID='Default_Water Spray_Default_Water Spray', XYZ=1.5,4.5,10.0,
ORIENTATION=0.0,0.0,-1.0 /
&DEVC ID='SPRK', PROP_ID='Default_Water Spray_Default_Water Spray', XYZ=1.5,4.5,15.0,
ORIENTATION=0.0,0.0,-1.0 /
&DEVC ID='SPRK', PROP_ID='Default_Water Spray_Default_Water Spray', XYZ=1.5,4.5,20.0,
ORIENTATION=0.0,0.0,-1.0 /
&DEVC ID='SPRK', PROP_ID='Default_Water Spray_Default_Water Spray', XYZ=1.5,4.5,25.0,
ORIENTATION=0.0,0.0,-1.0 /
&DEVC ID='SPRK', PROP_ID='Default_Water Spray_Default_Water Spray', XYZ=1.5,4.5,30.0,
ORIENTATION=0.0,0.0,-1.0 /
&DEVC ID='SPRK', PROP_ID='Default_Water Spray_Default_Water Spray', XYZ=1.5,4.5,35.0,
ORIENTATION=0.0,0.0,-1.0 /
&DEVC ID='SPRK', PROP_ID='Default_Water Spray_Default_Water Spray', XYZ=1.5,4.5,40.0,
ORIENTATION=0.0,0.0,-1.0 /
&DEVC ID='SPRK', PROP_ID='Default_Water Spray_Default_Water Spray', XYZ=1.5,4.5,45.0,
ORIENTATION=0.0,0.0,-1.0 /
&DEVC ID='SPRK', PROP_ID='Default_Water Spray_Default_Water Spray', XYZ=1.5,4.5,50.0,
ORIENTATION=0.0,0.0,-1.0 /
&DEVC ID='SPRK', PROP_ID='Default_Water Spray_Default_Water Spray', XYZ=1.5,4.5,55.0,
ORIENTATION=0.0,0.0,-1.0 /