

Analys av brandspridning inom probabilistiska säkerhetsanalyser använda i kärnkraftsindustrin

Elias Karlsson & Fredrik Wennberg | Avdelningen för
brandteknik | LTH | LUNDS UNIVERSITET



**Analys av brandspridning inom probabilistiska säkerhetsanalyser
använda i kärnkraftsindustrin**

Elias Karlsson & Fredrik Wennberg

Lund 2019

Titel

Analys av brandspridning inom probabilistiska säkerhetsanalyser använda i kärnkraftsindustrin

Title

Analysis of fire spread within probabilistic safety analyses used in Nuclear Power Plant facilities

Författare

Fredrik Wennberg & Elias Karlsson

Rapport 5586

ISRN: LUTVDG/TVBB--5586—SE

ISSN: 1402-3504

Antal sidor/Number of pages

65

Illustrationer/Illustrations

Om ej specificerat, tillhör bilderna författarna. / If not specified, the images belong to the authors.

Sökord

Brandspridning PSA, brandspridning kärnkraft, brandspridning screening, screeningkriterium brand

Keywords

Fire spread PSA, fire spread nuclear facility, fire spread screening, screening criteria fire

Abstract

The work presented in this report was based upon two different stages, with the aim of coming up with an improved screening process concerning fire spread within PSA at Ringhals Nuclear Power Plant in Sweden. The first phase consisted of creating a methodology for the screening process, which was based on various screening data, such as CDF, fire loads and openings between compartments. Each spread case (scenario) consisted of two fire compartments. The second phase was a detailed analysis of two scenarios that were selected through the screening process. The analysis was performed using CFAST and FDS as well as hand calculations in one case. Spridningsfall 1 was deemed to not be likely to fire spread, while Spridningsfall 2 was shown to be associated with the possibility of spread in the event of fire in the shaft.

© Copyright: Division of Fire Safety Engineering, Faculty of Engineering, Lund University, Lund 2019

Avdelningen för Brandteknik, Lunds tekniska högskola, Lunds universitet, Lund 2019

Brandteknik
Lunds tekniska högskola
Lunds universitet
Box 118
221 00 Lund

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

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

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

Förord

Detta examensarbete har finansierats av NBSG och har utförts på uppdrag av Risk Pilot AB och vi vill passa på att rikta ett extra stort tack till följande personer:

Vår handledare Nils Johansson, samt Bjarne Husted och Patrick van Hees vid institutionen för brandteknik vid Lunds Tekniska Högskola, för goda synpunkter och support vid brandtekniska frågor och simuleringsverktyg.

Vår externa handledare Per Nyström, samt Erik Sparre, Jonas Sevrell och Roland Nilsson vid Risk Pilot AB, för deras engagemang och vilja att dela med sig av sin mångfacetterade kunskap rörande kärntekniska anläggningar och PSA.

Peter Berggren och Sebastian Levin vid Ringhals AB, för att de tog sig tid att guida oss vid anläggningsbesöken och även delade med sig av sina synpunkter.

Summary

The work presented in this report was based upon two different stages, with the aim of coming up with an improved screening process concerning fire spread within PSA at Ringhals Nuclear Power Plant in Sweden. The first phase consisted of creating a methodology for the screening process, which was based on various screening data, such as CDF (Core damage frequency), fire loads and openings between compartments. Each spread case (scenario) consisted of two fire compartments.

A literature study was conducted to provide information and insight about how treatment of fire spread within PSA has been handled historically, until today. A screening methodology was then created based upon the knowledge that was gained through the literature study, as well as professional contributions from PSA personnel at Risk Pilot AB and Ringhals AB. One of the limitations when shaping a screening methodology is that it is more or less tied to which information and what databases are available and accessible, such as information concerning fire loads for compartments, doors, etc.

It was also included in the task to provide suitable screening criteria for the different parameters. An effort was put into treating different problems related to fire loads and the uncertainties associated with different approaches. The screening criteria of 90 MJ/m^2 for fire load and 10^{-8} times per year regarding CDF were used in the methodology.

The second phase was a detailed analysis of two scenarios that were selected through the screening process. The analysis was performed using CFAST and FDS as well as hand calculations in one case.

It was concluded in the analysis that Scenario 1 (Spridningsfall 1) was deemed unlikely and not linked to a significantly high risk regarding the spread of fire between the two compartments, while Scenario 2 was shown to be possible and vulnerable to fire spread.

The report generally concludes that the methodology to screen scenarios obtained within this thesis, did prove to be beneficial, but would need to be enhanced with the addition of wall penetrations as an alternative screening parameter. This would however affect the time frame, which was one of the major concerns in the design of the methodology – to make the process easily repeatable as well as manageable.

Sammanfattning

Arbetet som ligger till grund för denna rapport är uppdelat i två delar, där den första bestod i att ta fram en metodik med syftet att på ett tillämpbart och robust vis kunna sortera fram och analysera relevanta brandspridningsfall mellan brandceller på Ringhals kärnkraftverk, reaktor 3. Detta gjordes med hjälp av att utveckla lämpliga "screeningkriterier", vilka fungerade som bedömningsgrund för hur stor eller liten möjligheten till brandspridning mellan två brandceller kunde anses vara. De två viktigaste screeningkriterierna som bestämdes var bidraget till den totala härdskadefrekvensen samt brandbelastningen i de båda brandcellerna inom spridningsfallet. Stor vikt lades vid att metoden bör vara relativt lättarbetad och möjlig att återskapa.

För att undersöka hur brandspridning hanteras inom kärnkraftverk, nationellt och internationellt, gjordes en litteraturstudie. Litteraturstudien genomfördes för att generera insikt och vägledning gällande olika riktlinjer över hur brandspridning bör behandlas inom probabilistiska säkerhetsanalyser, samt bidra med kunskap kring hur en screeningprocess kan eller bör gå till vid kärnkraftverk. Baserat på litteraturstudien och med bidrag från PSA- och brandkunnig personal utarbetades därefter en metodologi.

Det inledande steget bestod i att ta fram underlag vilka närliggande rum och brandceller som fanns på anläggningen, vilket gjordes med hjälp av en kabeldatabas. Bidragen till härdskadefrekvensen för olika spridningsfall togs fram med hjälp av programmet RiskSpectrum och en befintlig PSA-studie (Probabilistisk säkerhetsanalys) som i sin tur är uppbyggd av fel- och händelseträd för system i reaktor 3. Därefter samlades övrig information in gällande brandbelastning, beroenden av dörrar och ventilation för de närliggande brandcellerna från olika databaser. Information gällande ventilation var dock inte fullständig vilket medförde att den endast kunde användas med försiktighet. Under processens gång fördes rimlighetsdiskussioner, vilka framförallt berörde dilemman kring turordningen av screeningparametrar. I princip gäller att ju tidigare en parameter med tillhörande kriterium används i screeningen, desto större påverkan på resultatet får den också. Screeningkriterium för brandbelastning ansattes till 90 MJ/m^2 och för härdskadefrekvensen 10^{-8} gånger/år.

Efter att betydelsefulla brandspridningsfall screenats fram genomfördes en rundvandring på kärnkraftverket. Syftet med detta moment var att få en mer detaljerad inblick av de ingående rummen mellan brandcellerna. Därefter kunde det med hjälp av ingenjörsmässiga och okulära bedömningar avgöras huruvida spridning mellan brandcellerna faktiskt kunde anses vara möjlig eller ej.

Slutligen fanns två brandspridningsfall kvar vilka analyserades med hjälp av handberäkningar och simuleringar i CFAST (Consolidated Fire and Smoke Transportation Model) och FDS (Fire Dynamics Simulator). I Spridningsfall 1 fanns det enligt detaljanalysen ingen risk för brandspridning, medan det i Spridningsfall 2 fastställdes att risken för brandspridning torde vara hög baserat på resultaten i detta arbete.

Terminologi

<i>CDF</i>	<i>Core Damage Frequency (Härdskadefrekvens)</i>
<i>PSA</i>	<i>Probabilistisk säkerhetsanalys</i>
<i>CFD</i>	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
<i>CFAST</i>	<i>Consolidated Model of Fire and Smoke Transport</i>
<i>MCS</i>	<i>Minimal Cut Set</i>
<i>CCF</i>	<i>Common Cause Failure (fel med gemensam orsak)</i>
<i>Inledande händelse (IH)</i>	<i>Den händelse eller tillstånd som är startpunkten i ett händelsetråd</i>
<i>Härdskada</i>	<i>Kärnbränslet upphettas tillräckligt mycket av den egenalstrade värmen tills dess att reaktorhärden smälter</i>
<i>Analytisk brandcell</i>	<i>Ej brandtekniskt, till exempel ej fysiskt avskilda brandceller utan separeras till varandra på andra sätt, exempelvis genom avstånd</i>
<i>Enkelfel</i>	<i>En komponent som inte uppfyller sin avsedda funktion samt följdfel som eventuellt uppkommer</i>
<i>RiskSpectrum</i>	<i>Beräkningsprogram för PSA</i>
<i>Screening</i>	<i>Bortsortering i en urvalsprocess (gallring)</i>
<i>SBA</i>	<i>Systematiskt Brandskyddsarbete</i>
<i>Brandbelastning</i>	<i>Mått på hur mycket energi som kan frigöras vid brand per omslutande area [MJ/m²]</i>
<i>HRRPUA</i>	<i>Heat Release Rate Per Unit Area (Effektutveckling per area enhet)</i>

Nomenklaturlista

\dot{Q}	<i>Effektutveckling [kW]</i>
\dot{q}_{avg}''	<i>Effekten i genomsnitt per m² [kW/m²]</i>
E'_{tray}	<i>Energiinnehållet per meter i varje steg [MJ/m]</i>
ΔH	<i>Förbränningsvärme [KJ/kg]</i>
H_{tray}	<i>Höjden av steg [m]</i>
ρ_{cable}	<i>Densiteten av kabeln [kg/m³]</i>
δ_{air}	<i>Fraktionen luft i kabel [-]</i>
$\delta_{plastic}$	<i>Fraktionen plast i kabel [-]</i>
\dot{Q}_{intial}	<i>Effektutvecklingen vid antändning [kW]</i>
$l_{initial}$	<i>Längden på stegen vid antändning [m]</i>
W_{tray}	<i>Bredden på stegen [m]</i>
T_i	<i>Temperaturen efter ett tidssteg i nod 1. [K]</i>
h_{varm}	<i>Värmeöverföringstalet för den varma sidan [W/m²K]</i>
T_f	<i>Temperaturen på luften vid den brandutsatta sidan [K]</i>
T_1	<i>Temperaturen i nod 1 på det föregående tidssteget [K]</i>
k	<i>Värmeledningstalet [W/mK]</i>
dx	<i>Avståndet mellan noderna [m]</i>
dt	<i>Tidssteg [s]</i>
ρ	<i>Densiteten [kg/m³]</i>
c	<i>Specifik värmekapacitet [J/kgK]</i>
f	<i>frekvens [gångar/år]</i>

Innehållsförteckning

Förord.....
Summary
Sammanfattning.....
Terminologi
Nomenklaturlista.....
1 Inledning.....	1
1.1 Bakgrund	2
1.2 Syfte och mål	3
1.3 Frågeställningar	3
1.4 Avgränsningar och begränsningar	3
1.5 Metod	3
2 Säkerhetsprinciper på kärnkraftverk.....	5
2.1 Krav på kärnkraft	5
2.2 PSA.....	6
2.2.1 Felträdsanalys.....	7
2.2.2 Händelseträdsanalys	8
2.2.3 Berry Method	8
2.2.4 RiskSpectrum	8
2.2.5 Säkerhetsfunktioner	9
3 Brandteknisk teori	12
3.1 Brandcellsindelning	12
3.2 Brandförlopp	12
3.3 Värmetransport	13
3.4 Kabelklasser.....	13
3.5 Skadekriterier	14
3.6 Brandmodellering.....	14
3.6.1 Tvåzon.....	14
3.6.2 CFD.....	15
4 Litteraturstudie.....	17
5 Metodologi	23
5.1 Steg 1 - Framtagning av relevanta spridningsfall	23
5.2 Steg 2 – Screeningprocessen	24
5.3 Steg 3 - Anläggningsbesök.....	27
5.4 Steg 4 - Detaljanalys	28

5.5	Steg 5 – Diskussion och osäkerheter	28
6	Detaljanalys	29
6.1	Spridningsfall 1	29
6.1.1	Effektutveckling	30
6.1.2	Resultat	31
6.1.3	Känslighetsanalys	33
6.2	Spridningsfall 2	37
6.2.1	Effektutveckling	37
6.2.2	Resultat	38
6.2.3	Känslighetsanalys	44
6.3	Giltighet av modeller	44
6.3.1	CFAST	44
6.3.2	FDS	44
7	Diskussion	46
7.1	Metodologi	46
7.2	Detaljanalys	47
7.3	Osäkerheter	48
8	Slutsummering	50
9	Fortsättning på arbete	51
10	Referenser	52
	Bilaga A	55
	Bilaga B	58
	Bilaga C	60
	Bilaga D	61
	Bilaga E	65

1 Inledning

Kärnkraftsindustri är en bransch som har väldigt höga säkerhetskrav på sig, dels för att den hanterar bränsle som är joniserande och dels för att det som kallas resteffekten måste kunna hanteras. Resteffekt är den värme som fortsätter att produceras efter att styrstavarna förts in i härden. Detta beror på att de klyvningsprodukter som bildats vid fissionsprocessen fortsätter att sönderfalla och även denna värme måste transporteras bort för att undvika härdsmlta (Vattenfall, 2018).

I svenska reaktorer klyvs Uran-235-kärnor genom en fissionsprocess då neutroner sammanstötter med kärnorna och nya neutroner skickas ut genom atomkärnans sönderfall vilket i sin tur leder till att fler kärnor klyvs och en kedjereaktion skapas. För att styra processen används styrstavar, dessa har som funktion att interagera med neutronerna för att stoppa klyvningen (Vattenfall, 2017). Nedan i figur 1 visas Ringhals kärnkraftverk.



Figur 1 visar Ringhals kärnkraftverk med reaktor 1 och 2 i bakgrunden samt reaktor 3 och 4 i förgrunden (Vattenfall, ud).

Kärnkraft stod år 2017 för ca 40 procent av Sveriges totala elproduktion (Energimyndigheten, 2018). Totalt finns tre kärnkraftverk i drift i Sverige och Ringhals kärnkraftverk i Varberg är det som är störst och står i nuläget för cirka 15-20 procent av Sveriges elproduktion (Vattenfall, 2017). Ringhals reaktor 2, 3 (vilken är den reaktor som ligger till grund för denna rapports ändamål) och 4, är så kallade tryckvattenreaktorer (på engelska vanligtvis förkortat PWR, Pressurized Water Reactor). En tryckvattenreaktor är uppdelad i två system; det *primära* och det *sekundära systemet*. Det primära systemet består av reaktortanken med omslutande kylkretsar, medan det sekundära systemet består av turbinsidan och kondensator. En viktig skillnad mellan dessa två system är att sekundärsidan under normala förhållanden inte är radioaktiv (Strålsäkerhetsmyndigheten, 2017).

Vad som även är viktigt inom kärnkraftsindustrin är att visa att anläggningarna är säkra att driva, och då faller det naturligt att ha beredskap för vad som kan inträffa vid en eventuell brand. En avgörande händelse då fokus på brand- och brandgasspridning blev tydligare och kraven hårdare, var branden vid kärnkraftverket Browns Ferry 1975. Det som inträffade var att operatörer hade i uppdrag att

kontrollera om kabelgenomföringar var tätade, och att det inte skedde något luftläckage, vilket gjordes med hjälp av ett värmeljus. Genomföringarna var inte tätade och lågan lyckades antända kablarna varpå branden spred sig till de båda brandcellerna (NRC, 2018).

För att kunna visa att anläggningarna är säkra genomförs omfattande riskanalyser och som en del av det ingår det att kvantifiera de risker som förekommer, något som vanligtvis går under benämningen probabilistisk säkerhetsanalys (IAEA, 2001). På ett kärnkraftverk är även det systematiska brandskyddsarbetet (SBA) viktigt, vilket betyder att det genomförs regelbundna kontroller med avseende på släckrutrustning, utrymningsvägar, branddörrar, brandcellsgränser integritet och andra brandtekniska installationer (IAEA, 1998).

1.1 Bakgrund

Studier har påvisat att det största bidraget till den totala risken ges av händelser då kylningen av reaktorhärden upphör att fungera, och därför fokuserar många PSA-studier på händelseförlopp som leder fram till detta (O. Siu, Melly, Nowlen, Kazarians, 2016). Huvudfokus för brandskydd inom kärnkraft ligger i att motverka förlust av kylning av reaktorhärden och efterföljande härdsador, vilket innebär att kärnbränslet upphettas tillräckligt mycket av den egenalstrade värmen tills reaktorhärden smälter (SSM, 2017). Brand är även en stor bidragande orsak till den totala riskbilden inom kärnkraften, vilket kan ses i figur 2.



Figur 2 visar bidrag till total härdskadefrekvens på Ringhals reaktor 3.

Tidigare uppskattningar har visat att den brandberoende härdskadefrekvensen (på engelska vanligtvis förkortat CDF), vilket betyder bidrag till härdskada med brand som inledande händelse, ligger mellan $4 \cdot 10^{-8}$ till $2 \cdot 10^{-4}$ gånger per år och reaktor, där majoriteten av den totala riskbilden ligger mellan 10^{-6} till 10^{-4} per år (O. Siu et al., 2016).

De probabilistiska säkerhetsanalyserna som är utförda i denna rapport är "Nivå 1 PSA" vilket innebär identifiering av händelseförlopp som kan leda till härdskada, skattningar av härdskadefrekvensen samt bidrag till en fördjupad insikt i systemets styrkor och svagheter. Utöver Nivå 1 finns även Nivå 2 och 3 vilka innefattar risk för extern radioaktiv spridning samt hälso- och miljökonsekvenser (IAEA, 2001).

PSA är praktiskt taget obligatoriskt i alla länder som har kommersiella kärnkraftverk, där International Atomic Energy Agency's (IAEA) riktlinjer är en av hörnstenarna i arbetet, men även mer specifika guider för brandriskanalys samt nationella riktlinjer är vanliga (Möller, Hansson, Holmberg, Rollenhagen, 2018).

Eftersom PSA används som grund till beslutsfattande är det viktigt att analysen är tillräckligt omfattande, robust och har en hög detaljeringsgrad så att besluten blir adekvata (IAEA, 2001). OECD har föreslagit att brand-PSA ska vara lämpat som beslutsunderlag, dock inte att besluten endast ska vara baserade på detta (OECD, 2004).

Den probabilistiska säkerhetsanalysen består av tänkbara händelser och anläggningarnas möjlighet att hantera dessa på ett kontrollerat sätt. En av dessa tänkbara händelser är brand och syftet med examensarbetet är att fördjupat studera konsekvenserna av ett brandförlopp med avseende på risken för brand- och brandgasspridning. I nuläget är det oklart hur de befintliga brandanalysfallen med avseende på brandspridning framtagits och det finns även brist på transparens.

Då ett kärnkraftverk verkar under normalt drifttillstånd, så kallad effektdrift, är produktionen av värme lika stor som bortforslingen av värme. Om något av hjälpsystemen slutar fungera eller andra driftmässiga fel inträffar kan detta påverka det primära systemet vilket i slutändan kan medföra att reaktorn överhettas (Vattenfall, 2014). Vid en sådan händelse, som vanligtvis betecknas som härdskada, är haveriet ett faktum och risken för en härdsmälta ökar markant.

1.2 Syfte och mål

Utmaningen ligger i att försöka kombinera information, kunskap och erfarenheter från två olika discipliner (SBA och PSA) som berör samma område, det vill säga brand, vilket ska leda fram till en metodutveckling för screening och analys med avseende på brandspridning. Genom att föra in djupare brandanalytisk kunskap till PSA-studierna kommer det att bli möjligt att kvantifiera brandspridning i PSA-studierna för Ringhals på ett mer realistiskt sätt.

1.3 Frågeställningar

- Hur hanteras brandspridning inom kärnkraft idag, nationellt och internationellt?
- Är det möjligt att införa en metod för att implementera en mer fördjupad och detaljerad brandanalytisk resurs i PSA-studierna och samtidigt göra den effektiv och hanterbar?

1.4 Avgränsningar och begränsningar

I arbetet undersöks de mest kritiska brandceller och analytiska brandceller (brandceller som inte är brandtekniskt avskilda utan komponenter skyddas på annat sätt, exempelvis genom avstånd), där en potentiell brandspridning ger ett betydande bidrag till härdskadefrekvensen på Ringhals reaktor 3. Hänsyn har inte tagits till personsäkerhet eller konsekvenser för miljön.

I detaljanalys av spridningsfallen har det antagits att antändning redan har skett och därför läggs inget fokus på sannolikheten för antändning, utan endast konsekvenserna av denna. Vidare har endast fenomenet brandspridning mellan brandceller undersökts, och inte eventuella påföljder vid en brand i en enskild brandcell som inte sprider sig.

1.5 Metod

En projektplan skapades för att få en struktur över hur arbetsgången borde se ut och hur mycket tid som skulle spenderas på de olika delarna. Med hjälp av projektbeskrivning och handledning av Risk Pilot AB skapades en sådan. Då författarna var relativt oerfarna gällande PSA-delen av arbetet påbörjades en omfattande inläsningsperiod, samt en studie av olika typer av litteratur över hur brand

integreras i PSA på kärnkraftverk. Efter detta var kunskapen större inom ämnet och frågeställningarna kunde konkretiseras.

För att undersöka hur brandspridning hanteras på kärnkraftverk i nuläget gjordes en litteraturstudie, vilken tillsammans med befintlig PSA och dialog med handledare på Risk Pilot låg som grund för framtagning av en metodologi för screening. En introduktion i programmet RiskSpectrum genomfördes och screeningprocessen påbörjades, utförandet av denna beskrivs i kapitel 5.

Besök på Ringhals gjordes vid ett flertal tillfällen, till en början för att få anläggningskännedom och för att tillgodose behoven av databaser, men sedan även som en del av screeningprocessen. När de kritiska brandspridningsfallen var framtagna beräknades effektutveckling och simuleringar genomfördes för de två respektive spridningsfallen. Detta gjordes för att utvärdera brandspridning på ett djupare sätt än vad som tidigare gjorts. Därefter sammanställdes resultaten av brandanalysen.

2 Säkerhetsprinciper på kärnkraftverk

Detta kapitel innehåller teori kring olika moment och delar som är av relevans för innehållet i denna rapport. För att kunna studera hur mer fördjupade brandtekniska analyser kan användas inom kärnkraft, finns behov av att ha kännedom om en del grundläggande teori kring kravställningar, PSA, brand och brandspridning samt skadekriterier.

2.1 Krav på kärnkraft

Det finns ett antal aktörer och myndigheter som ställer krav på och kontrollerar kärnkraftverken i Sverige genom lagar och föreskrifter. Det finns även olika internationella organisationer som ger ut internationella riktlinjer och säkerhetsbestämmelser. Anledning till att detta redovisas är för att ge en uppfattning om vilka aktörer som är involverade i säkerhetsstyrningen vid kärnkraftsanläggningar. I tabell 1 redovisas ett urval av dessa.

Tabell 1 presenterar Myndigheter/Organisationer som ställer krav eller bidrar med riktlinjer för kärnkraft.

Lag/Krav/Riktlinjer	Tillsynsmyndighet/Organisation	Funktion
Lag (1984:3) om kärnteknik verksamhet	Strålsäkerhetsmyndigheten	Övergripande säkerheten på den kärntekniska anläggningen.
SEVESO	Myndigheten för samhällsskydd och beredskap	Allvarliga kemikalieolyckor ska förebyggas och följderna vid en olycka ska begränsas.
Strålskyddslagen	Strålsäkerhetsmyndigheten	Skydda djur, människor och miljö från strålning som ger skadliga effekter.
SSMFS 2008:1	Strålsäkerhetsmyndigheten	Föreskrifter gällande säkerheten i den kärntekniska verksamheten.
SSMFS 2008:17	Strålsäkerhetsmyndigheten	Föreskrifter om kärnkraftsreaktorernas konstruktion och hur de ska utföras.
Lag om skydd mot olyckor	Myndigheten för samhällsskydd och beredskap	Syftet med LSO (Lag om skydd mot olyckor, LSO 2003:778) <i>"Syftar till att i hela landet bereda människors liv och hälsa samt egendom och miljö ett med hänsyn till de lokala förhållandena tillfredsställande och likvärdigt skydd mot olyckor."</i>
Lag om brandfarliga och explosiva varor	Myndigheten för samhällsskydd och beredskap	LBE (Lag om brandfarliga och explosiva varor, LBE 2010:1011) gäller <i>"hantering, överföring, import och export av brandfarliga och explosiva varor och sådana förberedande och efterföljande åtgärder som behövs med hänsyn till brand- och explosionsrisken och till konsekvenserna av en brand eller en explosion."</i>
Boverkets byggregler (BBR)	Boverket	Specifik gällande brandfrågor och konstruktion.
IAEA (International atomic energy agency)	IAEA	En internationell organisation som presenterar olika riktlinjer för säkerheten på en kärnteknisk anläggning. Ger även förslag på olika metoder som kan användas.

NFPA 805 (National Fire Protection Association)	National Fire Protection Association	Syftet med denna rapport är att skydda allmänheten, miljön och anställda i händelse av brand och undersöka vilken inverkan brand har på reaktorsäkerheten. För att uppnå skydd mot brand föreslår de att djupförsvarsprincipen tillämpas. (Fredholm, 2010)
NUREG	NRC (Nuclear Regulatory Commission)	Rapporter som ges ut kontinuerligt och beskriver vilka krav som ska följas på en kärnteknisk anläggning. (Fredholm, 2010)

2.2 PSA

PSA är användandet av händelsetråd och feltråd för att ta fram kritiska kombinationer av fel och kvantifiera hur sannolika dessa kombinationer är. I PSA definieras härdskadefrekvensen för ett brandscenarios bidrag enligt nedan:

$$CDF = \lambda_i \cdot p_{ed,j|i} \cdot p_{CD,k|i,j}$$

λ_i är frekvens för brandscenario. $p_{ed,j|i}$ är betingad sannolikhet för skada av kritiska komponenter j , givet förekomsten av brandscenario i . $p_{CD,k|i,j}$ är betingad sannolikhet för härdskada på grund av anläggningsrespons scenario k , givet brandscenario i och skada av kritiska komponenter j .

För att beräkna det totala bidraget till härdskadefrekvensen för brand på anläggningen summeras alla scenarier:

$$CDF = \sum_i \lambda_i \left[\sum_j p_{ed,j|i} \left(\sum_k p_{CD,k|i,j} \right) \right]$$

(O. Siu et al., 2016)

I analyserna har även en konservativ förenkling gjorts, då det vid brand antas en hundra procentig sannolikhet att alla komponenter i rummet slås ut.

En stor fördel med att beskriva sina delsystem och huvudsystem som antingen feltråd eller händelsetråd är att det är effektivt sätt att kvantifiera frekvenser och sannolikheter för att en olycka ska inträffa, samt att det ger en bra insyn och överblick av systemet. Det används för att identifiera olika typer av kombinationer som kan leda till att ett fel inträffar och att producera resultat för vad bland annat sannolikheten och konsekvenser för att det kan hända. De olika händelserna har en sannolikhet mellan 0 och 1 (Möller et al., 2018).

I SSMFS 2008:1 vilket är en av de riktlinjer som efterföljs på svenska kärnkraftverk anges följande krav:

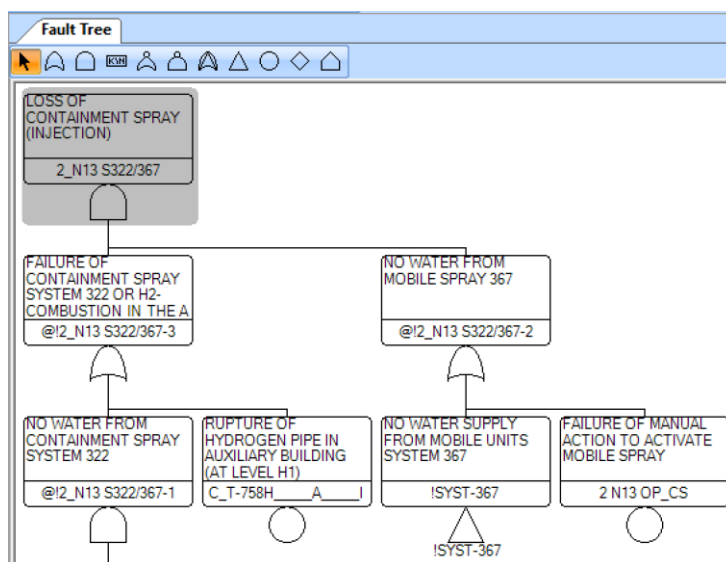
- 1 § Kapaciteten hos en anläggnings barriärer och djupförsvaret att förebygga radiologiska olyckor, och lindra konsekvenserna om olyckor ändå skulle ske, ska analyseras med deterministiska metoder innan anläggningen uppförs eller ändras och tas i drift. Analyserna ska därefter hållas aktuella.
- 1 § Förutom deterministisk analys enligt första stycket ska anläggningen analyseras med probabilistiska metoder för att ge en så allsidig bild som möjligt av säkerheten.

- 1 § Säkerhetsanalyser bör omfatta en uppsättning händelser eller scenarier som så långt det är möjligt täcker in de händelseförlopp och förhållanden som kan påverka barriärernas och djupförsvarets funktion och därmed ytterst leda till en radiologisk påverkan på omgivningen. Frekvensen för olika händelser eller scenarier utgör grund för indelning i händelseklasser.

I följande kapitel 2.2.1–2.2.4 ges beskrivningar på modellverktyg som kan användas för att genomföra PSA analyser. Dessa används också för närvarande vid PSA-analyser vid Ringhals.

2.2.1 Felträdsanalys

FTA (Fault Tree Analysis) är en analytisk metod för att undersöka komponentberoenden och interaktioner mellan komponenter inom exempelvis ett kärnkraftverk. Det är dock en metod som visar sig vara applicerbar inom en mängd olika användningsområden sedan den introducerades på 1960-talet. Rent grafiskt redovisas de beroenden och interaktioner mellan komponenter och instrument, vilket namnet avslöjar, som en trädstruktur vilket åskådliggörs i figur 3. Felträdet är i sin tur uppbyggt av noder, nämligen *bashändelser* och *grindar* (Ruijters & Stoelinga, 2015). De parametrar och element som ligger till grund för denna rapporters analyser presenteras i Bilaga E.



Figur 3 visar exempel på felträd i programvaran RiskSpectrum (RiskSpectrum, 2017).

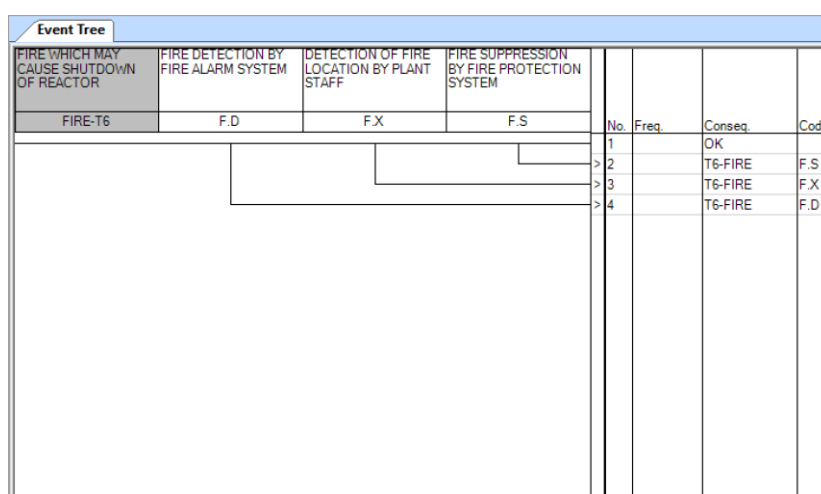
Ett vanligt begrepp inom felträdsanalys är MCS (Minimal Cut Set). Ett cut set kan beskrivas som en uppsättning av händelser, exempelvis felande av komponenter, som tillsammans får ett system att fela, vilket bland annat bidrar till kunskap om ett systems sårbarhet (Ruijters & Stoelinga, 2015). Det finns olika definitioner av MCS där en av dem är "den minsta uppsättning händelser vars gemensamma felande medför systemhaveri" (Center for Chemical Process Safety, 2000). En definition jämförbar med den föregående är att "ett cut set är minimal om topphändelsen inte inträffar utifall någon av bashändelserna tas bort" (Möller et al., 2018).

Felträd beskrivs och modelleras top-down vilket betyder att topphändelsen som representerar systemfelet bryts ner i de (bas)händelser som leder till att systemfelet inträffar. Det är framförallt ett bra verktyg för att kunna utföra bedömningar av systemets pålitlighet (Möller et al., 2018).

2.2.2 Händelseträdsanalys

Händelseträd är en kompletterande metod till felträdsanalysen vilket är användbart vid säkerhetsanalyser vid kärnkraftverk, då främst vid demonstration av orsak-konsekvensförhållanden mellan händelser.

Till skillnad från ett felträd är ett händelseträd strukturerat utifrån bottom-up-metoden vilken startar vid en inledande händelse, exempelvis brand, som därefter får inverkan på skyddsbarriärer i systemet, både positivt och negativt, som slutligen leder till en konsekvens. Varje kombination av inledande händelse och barriärer samt dess funktioner bildar i sin tur en sekvens där start är en inledande händelse och slutprodukten är konsekvensen av denna, exempelvis härdskada eller utebliven skada på grund av att någon eller några av skyddsbarriärerna uppfyllde sin funktion. Händelseträd är användbart för att skapa modeller för olyckshändelse-scenarion (Möller et al., 2018). Exempel på ett händelseträd i programmet RiskSpectrum redovisas i figur 4.



Figur 4 visar exempel på händelseträd i programvaran RiskSpectrum (RiskSpectrum, 2017).

2.2.3 Berry Method

För att bestämma frekvenserna för att en brand uppstår har Berrymetoden använts i den befintliga PSA-studien på Ringhals. Frekvenserna för brand i varje rum utvärderas med avseende på parametrar som ökar sannolikheten för brand. De parametrar som inventeras är mängden brännbart material, antändningstemperatur på materialen, antändningskälla, hur ofta personal besöker rummen och mängden mekanisk och elektrisk utrustning. Efter inventeringen får rummen en värdering och det används för att beräkna sannolikheten av att brand uppstår (Berry & Minor, 1979).

2.2.4 RiskSpectrum

Programmet som använts för PSA-studierna inom denna rapport är utvecklat för att bland annat kunna hantera händelse- och felträdsanalys (RiskSpectrum, 2017).

Analysmodulen i RiskSpectrum heter RSAT (RiskSpectrum Analysis Tool) och har kapacitet för att utföra flera olika analyssteg: MCS-analys, osäkerhetsanalys, känslighetsanalys och tidsberoende analys (RiskSpectrum, Teorimanual).

I Bilaga E, tabell 8, förklaras i programmet ingående begrepp och funktioner.

2.2.5 Säkerhetsfunktioner

I ett kärnkraftverk finns det många delar som ska bibehålla sin funktion under kritiska förhållanden. I SSMFS 2008:17, 11 § beskrivs hur tåligheten mot inre och yttre händelser ska uppfyllas:

“För att motverka samtidig utslagning av redundanta delar av säkerhetssystem, skall kärnkraftsreaktorn vara konstruerad så att de redundanta delarna och dess stödfunktioner har en tillräcklig fysisk och funktionell separation. Graden av separation skall bestämmas med utgångspunkt från konsekvenserna i anläggningen av de inledande händelser som medför att säkerhetssystemet behöver tas i bruk”.

Huvudsyftet med fysisk och funktionell separation enligt § 11 i SSMFS 2008:17 är att undvika att rumshändelser slår ut en hel säkerhetsfunktion, där en rumshändelse kan vara brand. Säkerhetsanalyser med beaktande av inledande händelse, följdfel och enkelfel ska kunna påvisa att acceptansvillkoren uppfylls.

Vidare finns det ytterligare två begrepp som är viktiga att lyfta i detta sammanhang, nämligen djupförvarsprincipen samt barriärer. Djupförsvaret behandlar alla delar som tillsammans bidrar till den totala säkerheten på anläggningen, vilket innefattar betydelsen av att förebygga, motverka och lindra. Detta är allt från byggnadsmässiga konstruktioner till organisationen och ingående säkerhetsmässiga rutiner (SSMFS 2018:17).

Strålskyddsmyndigheten definierar djupförsvaret som *”tillämpning av flera på varandra följande tekniska, organisatoriska och manuella åtgärder för att motverka uppkomst och begränsa utveckling av händelser och förhållanden som har betydelse för strålsäkerheten samt för att upprätthålla effektiviteten hos de barriärer och andra hinder som har placerats mellan en strålkälla och arbetstagare, allmänhet och miljön”* (Strålsäkerhetsmyndigheten, 2018). I tabell 2 förklaras de ingående nivåerna i djupförsvaret.

Tabell 2 visar skyddsnivåerna i djupförsvaret (SSMFS, 2018).

Djupförsvarets fem skyddsnivåer	
Nivå 1	Förhindra avvikelser från normaldrift samt fel i strukturer och komponenter.
Nivå 2	Upptäcka avvikelser från normaldrift och hantera störningar så att de inte leder till förhöjda strålnivåer, begränsa spridning av radioaktiva ämnen inom kärnkraftsreaktorn ("accident conditions") samt återföra kärnkraftsreaktorn till normaldrift.
Nivå 3	Minimera konsekvenserna av händelser och förhållanden som leder till förhöjda strålnivåer, begränsa spridning av radioaktiva ämnen, samt motverka omfattande skador på strålkällor.
Nivå 4	Säkerställa att utsläpp av radioaktiva ämnen orsakade av händelser och förhållanden med omfattande skador på strålkällor blir så låga som det är möjligt och rimligt.
Nivå 5	Lindra de radiologiska konsekvenserna av utsläpp som kan bero på händelser och förhållanden som leder till förhöjda strålnivåer eller spridning av radioaktiva ämnen.

Djupförsvaret byggs i sin tur upp av barriärer, där barriär definieras av Strålsäkerhetsmyndigheten som "fysiskt hinder som direkt eller indirekt motverkar spridning av radioaktiva ämnen eller medför skydd mot strålning". Bränslet i härden skyddas exempelvis med hjälp av fem barriärer: Bränslekuts, kapslingsrör, primärsystem (reaktortank), reaktorinneslutning samt reaktorbyggnaden. Det finns tre olika begrepp som brukar användas för att beskriva säkerhetssystemen och barriärerna i ett kärnkraftverk, vilka är redundans, diversifiering samt separation.

Att ha möjligheten att genomföra en säker avstängning av reaktorn är viktigt vid alla typer av händelser. Vid brand är säker avstängning en del av processen men även att skydda branden från att

skada andra kritiska komponenter är också en viktig del för att kunna uppnå detta. Ett sätt att motverka att kritiska komponenter skadas och förhindrar en säker avstängning är att ha redundans. Det betyder att det existerar ett överskott av komponenter som upprätthåller samma funktion. Om då en komponent skadas kan den icke-skadade ersätta den (van Hees, Vallée, Hostikka, Sikanen, Lauridsen, Ingermasson, 2017).

Nedan visas hur redundans kan definieras.

$$p = \prod_{i=1}^n p_i$$

Där p är den totala sannolikheten för att n antal komponenter felar och p_i är sannolikheten för att komponent i felar.

Diversifiering innebär implementering av olika tekniska lösningar, så som olika typer av pumpar utav olika tillverkare, för att förhindra att alla pumpar skulle slås ut av samma fel. Fenomenet då flera komponenter slås ut av samma fel benämns CCF (Common Cause Failure).

En viktig del av att förebygga konsekvenserna av en eventuell brand är fysisk separation. SSMFS 2008:17 definierar fysisk separation som "system eller komponenter som är fysiskt åtskilda, genom avstånd eller barriärer eller en kombination av dessa". Det är också en viktig del av djupförsvarsprincipen, exempelvis nivå 1.

Att den fysiska separationen bryts kan bero på flera olika orsaker. Det kan exempelvis vara att en branddörr som lämnas öppen, att det genom ventilation sprids brand- och brandgaser eller att genomföringar inte är tätade som i fallet med Browns Ferry-incidenten. Faktum är att en av de viktigaste brandskyddsstrategierna på ett kärnkraftverk är att upprätthålla fysisk separation mellan viktiga elektriska kablar (O. Siu et al., 2016).

3 Brandteknisk teori

På Ringhals finns en stor mängd rum och utrymmen med varierande brandbelastning för olika ändamål. I detta kapitel diskuteras några av de säkerhets- och skyddsmekanismer som förekommer på kraftverket och ger en bakgrund till de brandtekniska beräkningar som presenteras i kapitel 6.

3.1 Brandcellsindelning

En större byggnad ska alltid delas in i brandceller. Detta för att begränsa spridning av brand. I Boverkets byggregler (BBRBE 1, BFS 2013:11) definieras en brandcell som *”Med brandcell avses en avskild del av en byggnad inom vilken en brand under hela eller delar av ett brandförlopp kan utvecklas utan att sprida sig till andra delar av byggnaden eller andra byggnader”*.

Ett eller flera rum utgör en brandcell. På kärnkraftverk finns det några begrepp som är bra att ha kännedom kring. Den definition som motsvarar brandcell är *”fire compartment”*. Dock förekommer även benämningen *”fire cell”*, vilken lätt kan blandas ihop med svenskans brandcell. De skiljer sig däremot åt en aning; en *”fire cell”* är inte brandtekniskt avskild utan de separeras till varandra på andra sätt (IAEA, 1995). Benämningen på svenska är vanligtvis analytisk brandcell.

En metod för separation kan till exempel vara att utrustning som är viktig för verksamheten avskiljs genom tillräckliga avstånd, vilket visas analytiskt. Det kan även motiveras genom att brandbelastningen minskas tillräckligt mycket för att en brand inte kan fortgå under en längre tid (Johansson & van Hees, 2011). I engelskan finns även begreppet *”fire area”* som likt *”fire cell”* inte heller är brandtekniskt avskilt, utan skyddet är utfört i form av vattensprinkler istället för en brandcellsvägg (Nystedt & Frantzich, 2011).

3.2 Brandförlopp

En brand i ett slutet utrymme kan förlöpa på många olika sätt beroende på en del avgörande parametrar som exempelvis tillgången på brännbart material, vilka ventilationsförhållanden som råder och rummets geometri.

Första fasen är alltid någon form av antändning och när det har skett kan det antingen ligga och pyra en stund innan det tar fart eller så tillväxer branden fort. Denna fas kallas för tillväxtfasen och har olika hastighet beroende på vilket material som brinner. I detta skede är branden bränslekontrollerad vilket innebär att det är tillgången på bränsle som avgör tillväxten, till skillnad från om tillgång på syre avgör, vilket vanligen benämns som *”ventilationskontrollerad brand”*. Det frigörs även mycket giftiga och icke giftiga gaser samt sotpartiklar.

Om inte tillväxtfasen stoppas kommer branden antingen dö ut på grund av avsaknad av bränsle, eller så övergår den till något som kallas övertändning vilket är ett mycket snabbt förlopp mellan tillväxtfas och fullt utvecklad brand. Det finns ett antal olika sätt att definiera övertändning men Karlsson & Quinterie (2000) definierar det som när temperaturen har nått 500-600 °C eller att strålningen från brandgaslagret mot golvet har nått 15-20 kW/m². Vid en övertändning antänder i princip allt brännbart material i rummet momentant.

När branden är fullt utvecklad är den ventilationskontrollerad och tillgången av syre avgör hur branden fortgår. I detta läge kan det bildas mycket oförbrända gaser som lägger sig i taket tills tillgången på syre ökar och de kan antända. I detta läge är brandgastemperaturen ofta hög, 700-1200°C.

Sist inskrider den avtagande fasen. Detta sker när bränslet tar slut och temperaturen sjunker. I denna fas kan branden gå från att vara ventilationskontrollerad till att bli bränslekontrollerad. (Karlsson & Quinterie, 2000)

3.3 Värmetransport

Värme kan överföras från ett objekt till ett annat på tre olika sätt; ledning, strålning och konvektion. För att ledning ska vara möjligt krävs ett medium, det kan vara gas, vätska eller ett fast material. Värmeledning inträffar när ett objekt med hög temperatur är i direkt kontakt med ett objekt med låg temperatur. När kontakten sker kommer det kalla att bli varmare och det varma objektet bli kallare. Värmeledning beskrivs av Fourier's ekvation (se Bilaga A) där värmeflöde per tids- och areaenhet beräknas. Ekvationen antar att värmeflödet är direkt proportionerligt mot temperaturen. (Ezekoye, 2016)

Strålning är elektromagnetiska vågor. Till skillnad från ledning och konvektion krävs inget medium som överför värmen och fungerar därmed trots att det är avstånd mellan objekten. Vid en brand innebär det att värmestrålning kommer utbyta energi med omgivningen såsom möbler, tak, väggar etc. Beroende på vilket material som brinner strålar det olika mycket. Material som bildar mycket gaser när de brinner, strålar inte lika mycket som de som bildar mycket sot, exempelvis plaster och oljor. (Tien, Lee, Stretton, 2016)

För att konvektion ska uppstå krävs ett strömmande medium som kan överföra värme till andra ytor. Konvektion kan ses som ledning kombinerat med ett strömmande medium. Vid brand är konvektion ett av de värmeöverföringssätt som har stor påverkan på brandspridning. Konvektion kan ske på två sätt, antingen som naturlig konvektion eller påtvingad konvektion. Naturlig konvektion inträffar vid exempelvis en brand då varma gaser stiger och ersätts av kalla gaser som i sin tur värms upp. Påtvingad konvektion kan ske med hjälp av vinden eller fläkt. Naturlig och påtvingad konvektion kan även inträffa samtidigt. (Atreya, 2016)

3.4 Kabelklasser

Kablar delas in i olika brandspridningsklasser beroende på dess förmåga att antända och sprida brand. Klasserna har historiskt gått från F1-F4 men sedan 1 juli 2017 har standarderna ändrats (Voltimum, 2016). Statistik visar att bränder i elektrisk utrustning är de vanligaste på kärnkraftverk (IAEA, 2004). I NUREG-6850 (2005) anges det också att är kablar det vanligaste brännbara materialet på kärnkraftverk.

Nedan presenteras de klasserna som är aktuella för de analyserade brandcellerna.

Tabell 3 visar kabelklasser (Nexans, 2011).

Kabelklass och förklaring			
F1	F2	F3	F4
<i>Kabeln är ej självslocknande och sprider brand. Kablarna i denna klass är normalt bara avsedda för förläggning i mark och vatten.</i>	<i>Enstaka kabel är självslocknande och sprider inte brand. Vertikalt test på 600 mm långt kabelprov som antänds. Brännaren är tänd mellan 1 till 8 minuter beroende på ytterdiameter. Brandskadorna ska vara begränsade och branden ska ha slocknat 50 mm från övre infästnings nedre kant.</i>	<i>Enstaka eller sammankablade kablar är självslocknande och sprider inte brand. Kabeln är mer svårantändlig och underhåller brand sämre än F2. Vertikalt test på 850 mm långt kabelprov som utföres i ett vertikalt stålrör med ventilationsöppningar längs sidorna. Under kabeln antänds</i>	<i>Kablar lagda i bunt är självslocknande och sprider inte brand. Kabeln är mer svårantändlig och underhåller brand sämre än F3. Proven utföres i en 4 meter hög ugn med 3,5 meter långa kabelprov monterade vertikalt på en kabelstege. Brandskadorna ska vara begränsade och får inte förekomma högre upp än</i>

		<i>tändvätska som får brinna i 3 till 9 minuter beroende på kabeldiameter och area. Brandskadorna ska vara begränsade. Inga yttre brandskador får finnas på de delar av provföremålet som ligger inom 300 mm från dess övre ände.</i>	<i>2,5 meter från brännaren.</i>
--	--	---	----------------------------------

3.5 Skadekriterier

För att genomföra en utvärdering av brandspridning krävs det att ha vissa kriterier att utgå ifrån för att kunna avgöra om scenariot är kritiskt eller ej. Eftersom det här arbetet inte tar hänsyn till personsäkerhet och miljö, kommer endast kriterier med relevans för utvärdering av den kritiska temperaturen på den brandpåverkade sidan i spridningsfallen att presenteras. I en situation där brand uppstår ska den opåverkade sidan inte nå en medeltemperatur högre än 140 °C. Detta kriterium gäller där brandrummet har samma förlopp som standardbrandkurvan (ISO 834) (Nystedt & Frantzich, 2011).

Gällande påverkan av kablar presenterar NUREG-6850 (2005) skadekriterier för oklassade samt klassade kablar.

- Oklassade: Om den infallande strålningen överstiger 6 kW/m² eller om temperaturen inuti kabeln överstiger 205 °C.
- Klassade: Om den infallande strålningen överstiger 11 kW/m² eller om temperaturen inuti kabeln överstiger 330 °C.

För viss utrustning som exempelvis motorer och ventiler anses det största hotet vid brand vara att komponenterna i utrustningen skadas, och då framförallt att de kablarna som används överstiger skadekriterierna. Om kablarna inte är en stor del av utrustningen anges det att infallande strålning inte får överstiga 3 kW/m² eller att temperaturen överstiger 65 °C (NUREG-6850, 2005).

3.6 Brandmodellering

Brandmodellering kan genomföras med handberäkningar eller datormodeller i detta arbete har två olika typer koncept för datormodellering använts: Tvåzonsmodellering och CFD-modellering. Dessa koncept beskrivs i följande kapitel.

3.6.1 Tvåzon

För att simulera brandförloppet i ett slutet utrymme kan en zonmodell användas. Beroende på typ av modell går det att antingen simulera endast brandrummet eller även de angränsande rummen. Om en modell som beräknar angränsande rum används, kan rökgasernas rörelse beräknas och således värmeffödet genom byggnaden. En zonmodell gör beräkningar utifrån två gaszoner, en övre varm och en undre kall zon på grund av de densitetskillnaderna som uppstår vid brand. I de två olika zonerna beräknas förbränningsprocesser och gastransport. I varje zon är temperaturen homogen. (Karlsson & Quintiere, 2000)

I detta arbete har zonmodellen CFAST version 7.0 använts. Det är ett program som är utvecklat av National Institute of Standards and Technology (NIST). Den nuvarande versionen släpptes 2015.

CFAST är begränsat till användning då det kan antas att två zoner uppstår. Det finns inga direkta begränsningar för hur geometrierna gällande de olika rummen ser ut. I programmet kan indata för termiska egenskaper, effektutveckling, rumsdimensioner, öppningar och brandegenskaper appliceras (Peacock, McGrattan, Forney, Reneke, 2015).

CFAST används som ett verktyg för att studera branddynamik och rökspridning. Det är inte specialiserat för att studera flöden inom rum – då passar en CFD-modell vanligtvis bättre. CFAST har bland annat svårt att göra sofistikerade beräkningar om byggnaderna har en komplicerad geometri. Beroende på att CFAST antar två zoner går det exempelvis inte att simulera en brinnande cigarett i ett vanligt rum och förvänta sig tillförlitliga resultat. Effekten på branden bör heller inte överstiga 1MW/m³. Ju mer de materiella egenskaperna kan specificeras desto mer realistiskt blir resultatet (Jones, Peacock, Forney, Reneke, 2005).

3.6.2 CFD

Fire Dynamics Simulator (FDS) är ett program som framtagits genom ett samarbete mellan National Institute of Standards and Technology (NIST) och VTT Technical Research Centre of Finland. Det är ett verktyg för CFD-modellering (Computational Fluid Dynamic).

Programmet används för beräkning av Navier-Stokes ekvationer, vilket innebär att den förutser hur vätskor och gaser beter sig över tid. FDS utvecklades för att på ett mer exakt sätt kunna simulera en brand och använder sig av Large Eddy Simulation (LES) för att kunna modellera de turbulenta strömningarna på ett mer sofistikerat sätt. För beräkningarna delar FDS upp rummet som ska modelleras i mindre delvolym, även kallat för celler (McGrattan, Hostikka, McDermott, Floyd, Weinschenk, Overholt, 2013). För varje liten delvolym beräknas temperatur, flödeshastigheter etc. Mindre delvolym medför vanligtvis ett mer tillförlitligt resultat, men desto längre blir även beräkningstiden. För varje gång subvolymen delas ökar beräkningstiden med en faktor 16. I programmet kallas dessa delvolym för celler (Nystedt & Frantzich, 2011).

För att simulera brandförlopp som kommer så nära verkligheten som möjligt är det viktigt att uppfylla vissa kriterier. Ekvationen nedan beskriver den karakteristiska diametern av branden. Denna används för att veta vilken cellstorlek som är lämpliga att använda för en specifik simulering (Nystedt & Frantzich, 2011).

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

där

D^* är brandens karakteristiska diameter [-]

ρ_{∞} är luftens densitet [kg/m³]

c_p är värmekapacitet [kJ/kgK]

T_{∞} är luftens temperatur [K]

g är gravitationskonstanten [m/s²]

Vidare gäller att kvoten $D^*/\delta x$ (där δx är cellstorlek) bör ligga inom intervallet 10-20 nära branden. D^* är i många fall även likvärdig med brandens faktiska diameter. (Nystedt & Frantzich, 2011)

Ett annat användbart kriterium för kvalitetssäkring av en FDS-simulering är den dimensionslösa effektutvecklingen Q^* som anger hur stark branden är i förhållande till sin yta. Värdet bör ligga i

intervallet 0,3 – 2,5. Den bakomliggande orsaken till att den dimensionslösa effektutvecklingen används beror på att FDS är skapat för att beräkna relativt låga strömingshastigheter (Nystedt & Frantzich, 2011).

$$Q^* = \frac{\dot{Q}}{\rho_{\infty} \cdot c_p \cdot T_{\infty} \cdot \sqrt{g \cdot D} \cdot D^2}$$

där

Q^* är brandens karakteristiska effektutveckling [-]

\dot{Q} är brandens effektutveckling [kW]

ρ_{∞} är luftens densitet [kg/m³]

c_p är värmekapacitet [kJ/kgK]

T_{∞} är luftens temperatur [K]

g är gravitationskonstanten [m/s²]

D är brandens diameter [m]

Vad som varit av intresse att undersöka i föreliggande rapports analyser med avseende på FDS, är brandgaslagrets höjd och temperatur i ett angränsande rum. Enligt (Nystedt & Frantzich, 2011) bör då en första ansats av värdet för $D^*/\delta x$ vara 5, men en känslighetsanalys med det dubblade värdet 10 bör även genomföras, vilket i praktiken innebär en halverad cellstorlek.

4 Litteraturstudie

Nedan presenteras den litteraturstudie som gjorts, samt resultat och slutsatser som har kunnat fastställas. Syftet med litteraturstudien är att ge underlag för att kunna svara på frågeställningen "Hur hanteras brandspridning inom kärnkraft idag, nationellt och internationellt?" vilken även formulerades i kapitel 1.3.

En litteraturstudie genomfördes för att generera insikt och vägledning gällande olika riktlinjer över hur brandspridning bör behandlas inom probabilistiska säkerhetsanalyser, samt kunskap kring hur en screeningprocess kan eller bör gå till gällande kärnkraftverk. Källor begränsades inte beroende av ursprung eller vilket land de författats i, utan resonemanget löd som så att studien bör generera en så bred och global bild som möjligt inom området. Syftet med studien är inte att detaljerat redovisa för varje ingående rapports modell och metod, utan snarare att ge läsaren en fingervisning kring var information och inspiration tagits med hänsyn till utvecklingen av metodologin för urvalsprocessen som presenteras i kapitel 5.

Det har inte tagits hänsyn till huruvida de rapporter och artiklar som granskats är beroende eller bygger på varandra, utan en slutlig diskussionsdel behandlar i så fall dessa fakta. Avslutningsvis förs en diskussion kring huruvida studien eventuellt kan kombineras eller kompletteras för att bättre beskriva brandspridning och effektivisera hanteringen inom PSA.

De sökmotorer som använts presenteras i tabell 4 nedan:

Tabell 4 visar sökmotor som använts.

Sökmotor	Webbadress	Organisation
Google	https://www.google.se/	Google
US.NRC	https://www.nrc.gov/	United States Nuclear Regulatory Commission
IAEA	https://www.iaea.org/	International Atomic Energy Agency
NFPA	https://www.nfpa.org/	National Fire Protection Association

Tabell 5 visar sökord och sökmotor.

Sökord	Titel	Författare	Hemsida
Fire PSA Nuclear Power Plant	Treatment of Internal Fires in Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants	IAEA	Google
Nuclear Fire PSA	Fire PRA Methodology for Nuclear Power Facilities (NUREG 6850)	EPRI/NRC-RES	US.NRC
Nuclear Fire Modelling	Nuclear Power Plant Fire Modeling Analysis Guidelines (NPP FIRE MAG)	EPRI/NRC-RES	US.NRC
Nuclear Power Plant Fire PSA	Performance-Based Standard for Fire	National Fire Protection Association	NFPA

	Protection for Light Water Reactor Electric Generating Plants		
Fire Nuclear Facility Guidelines	Fire Protection at a Nuclear Facility	STUK	Google

Totalt har fem rapporter från olika länder hittats som beskriver hur PSA analyser bör genomföras och som anses relevanta för detta arbete.

STUK (2013), på finska Säteilyturvakeskus och på svenska Strålsäkerhetscentralen kan sägas vara motsvarande myndighet i Finland till Strålskyddsmyndigheten i Sverige. Föreliggande dokument gäller för alla nya kärnkraftsanläggningar i Finland och trädde i kraft den 1 december 2013.

I guiden beskrivs det ett antal kriterier som bör uppfyllas gällande brand-PSA, varav ett urval av dessa presenteras i följande punktlista:

- Det ska antas att all utrustning i en brandcell som är utsatt för brand slås ut.
- Brand som inledande händelse ska inkluderas i PSA-analyser.
- Som felkriterium gäller att ett enkelfel eller annan avvikelse inte får medföra okontrollerad brandspridning.
- Det krävs analys av att upphävning av brandcellsgräns analyseras genom att man tar höjd för att en branddörr står öppen eller att ett brandspjäll felar.

Vidare ska situationer då CCF inträffar behandlas, då exempelvis aktiva brandskyddssystem som ett sprinklersystem slås ut av samma fel (otillgängligt vattenflöde eller dylikt). I samband med analys av CCF får man lov att göra en avgränsning till en brandcell i taget givet påföljderna av brand. Det gäller dock likväl att en brand kan slå ut flera redundanta "subbar" inom en brandcell. Även effekterna av rök och brandgaser ska tas i beaktning.

I **NFPA 805 (2015)** ges riktlinjer för hur en brand-PSA bör genomföras steg för steg. Det noteras att initiering, tillväxt samt säker nedstängning av kraftverket bör inkluderas i analysen. Den beskrivna processen i rapporten är utformad efter generella metoder och av hur hanteringen av PSA faktiskt historiskt har kommit till användning inom industrin. Det nämns även att många av de PSA-studier som gjorts inom kärnkraftsindustrin är uppbyggda på i princip en liknande struktur och stomme, där en generell metod kan se ut som följande:

1. Indelning av kraftverket i "brandområden" (fysiskt avskilda delar genom väggar eller avstånd).
2. Brandscenarier skapas och analyseras.
3. Screening, det vill säga värdering av relevans.

Vidare presenteras tre olika analyssteg: *Kvalitativ screening*, *kvantitativ screening* samt *detaljerad analys*.

Med kvalitativ screening åsyftas uppdelning av brandområden med övervägning av potentiell påverkan av reaktorsäkerheten framkallad av en icke-bekämpad brand. Det ingår en undersökning av flerzonspåverkan av brand där man kartlägger vilka komponenter som finns, exempelvis kablar, ventiler och pumpar. Man inkluderar alltså det faktum att ett specifikt instrument eller komponent som slås ut ska kunna påverka reaktorsäkerheten negativt, där de zoner eller områden som inte anses kunna ha någon nämnvärd påverkan kan raderas från vidare analys.

I den kvantitativa screeningen görs ytterligare utvärdering av de brandområden som ansågs relevanta i den kvalitativa screeningen. Rent praktiskt innebär det att man sätter upp gränskriterier av två kvantitativa faktorer: Brandfrekvensen och Conditional Core Damage Probability (CCDP), där ett antagande görs att all utrustning och alla instrument slås ut i de brandutsatta analysområdena. Produkten av dessa två genererar en användbar screeningparameter, Core Damage Frequency (CDF), vilket på svenska betyder härdskadefrekvensen vilken vanligtvis mäts i antal gånger per år. Slutligen görs en bedömning om härdskadefrekvensen för det specifika spridningsfallet överstiger acceptanskriterierna för hur stor fraktionen får vara i förhållande till den totala brandrelaterade härdskadefrekvensen. De brandspridningsfall som understiger kriteriet för hur stor fraktionen av den totala härdskadefrekvensen tillåts vara screenas bort från vidare analys. Värt att tillägga är att historiskt sett har skattning av total härdskadefrekvens på grund av brand ansatts till $10E-4$ per år (OECD, 2004), vilket även nämns i inledningen till denna rapport.

För de spridningsfall som finns kvar efter de föregående två stegen genomförs en detaljerad analys. Denna syftar till att på ett mer realistiskt och noggrant vis skatta brandområdenas riskbidrag. I denna analys behandlas och utvärderas de framtagna scenarierna ingenjörsmässigt genom lämpliga brandmodeller. Modellerna bör inkludera de faktorer som kan antas ha inverkan på brandförloppet, så som sprinklersystem, brandspridning, detektion och eventuella personalingripanden som kan lindra brandens konsekvenser gällande härdskadefrekvensen. Ett antal individuella scenarier kan utvärderas där skillnaderna ligger i var och hur branden förutsätts starta samt dess beteende.

Det anges i rapporten att den viktigaste förutsättningen för att lyckas genomföra en framgångsrik brand-PSA är att det är tydligt kring vad som förväntas uppnås med analysen. Hur själva metoden och utförandet av den går till rent praktiskt erbjuds däremot utrymme för större flexibilitet.

I rapporten **NUREG 6850 (2005)** gjordes en omfattande ansträngning att bilda en stabil och moderniserad PSA-metodologi baserat på tidigare forskning och utveckling. Ramverket är uppbyggt kring att beskriva processen för att ta fram en PSA med fokus på Level 1 (Core Damage Frequency, CDF).

I rapporten beskrivs en metodik för att genomföra PSA med avseende på brand vilken består av 16 delsteg som övergripande representeras av följande struktur:

1. Definiera analysens fysiska avgränsning. Därefter delas detta större område in i mindre utrymmen, exempelvis brandceller.
2. Välj komponenter som vid påverkan av brand ska krediteras för nedstängning av reaktorn. Detta kan exempelvis innefatta alla de komponenter som ingår i den generella PSA-studien i form av bashändelser.
3. Identifiera de kablar som understöder komponenter i stycke 2.
4. Genomförande av en kvalitativ screening, det vill säga sortera bort de rum som kan motiveras ha låg eller ingen signifikant risk. En bortsortering kan vara aktuell då en brandcell inte innehåller några kritiska komponenter eller kablar som identifierades i punkterna 2 och 3. Det ska även belysas att en brand i ett sådant rum ej bör innebära risk för att reaktorn behöver stängas ner på grund av exempelvis automatisk signalering.
5. En diskussion om utveckling av modell som involverar kärnkraftverkets reaktion av en brand. Detta kan exempelvis innefatta att personal erhållit instruktioner för hur man hanterar en brand, vilket kan ha betydelse för brandpåverkan av komponenter och funktioner.
6. Uppskattning av brandfrekvenser för brandceller och scenarion. I rapporten föreslås förändringar från riktlinjer som bland annat innebär större tonvikt mot påfrestande

händelser, utvärdering av datakvalitet och en utökad användning av modell för komponentsbaserad antändningsfrekvens.

7. I detta steg utförs den kvantitativa screeningen. Då utvärderas brandceller och scenarion efter deras numeriska brandriskbidrag. Denna ansats innebär även att den kumulativa risken av de tidigare, kvalitativt screenade rummen innefattas i analysen för att uppnå en så bra uppskattning som möjligt av den totala riskbilden.
8. Regler för att strukturera och screena antändningsscenarion för analysfallen i de relevanta brandcellerna.
9. Ett tekniskt tillvägagångssätt för att identifiera hur felande av specifika kablar kommer att påverka komponenter och deras funktion.
10. Övervägande av relativa sannolikheter för kretsfel. Detta steg kan ingå i de scenarion som har ett signifikant riskbidrag.
11. Metod för att beskriva konsekvenserna av en brand mer detaljerat. Man bör iakttä brand i en brandcell eller i flera brandceller (det vill säga spridning) samt i kontrollrummet. Faktorer som bör studeras är beteende av brand i tidigt skede, brandtillväxt i en brandcell eller mellan flera, detektion och aktiva släcksystem, brandskydd av kablar, påverkan av värme och rök m.m. Särskild vikt bör läggas på bränder som innefattar turbingenerator, vätgas, kablar, kabelbrott etc.
12. Implementering av Human Error Probability (HEP) samt beakta risken för manipulation av komponenter.
13. Kvalitativ redogörelse för sambandet mellan bränder och jordbävningar samt effekterna av dessa.
14. Kvantifiering och presentationer av brandriskresultaten (baserat på rekommendationer i föreliggande rapport).
15. Osäkerhets- och känslighetsanalys.
16. Dokumentation av studien/analysen.

Rapporten berör även problematiken kring multipla bränder, det vill säga inte nödvändigtvis en brand som börjar i ett utrymme och sprider sig till ett annat, utan då flera bränder startar samtidigt på grund av samma fel. Man anger i rapporten att sådana händelser vanligtvis inträffar på grund av elektroniska komponentfel, men att osäkerheten är stor och att vid den tiden (då rapporten skrevs) fanns ingen bra metod för att hantera detta fenomen trots att det fanns historiska belägg för att det inträffat. Det uppges även att en stor del av det kvalitativa arbetet bakom en bra PSA-studie går ut på att söka och identifiera de relevanta komponenter och kablar som finns, samt att sammanställa deras beroenden.

I **NUREG-1934 (2012)** presenteras riktlinjer för lämpliga program eller modeller för att utvärdera brandscenarier på kärnkraftverk men avses även att användas som ett lärande verktyg för brand-PSA.

Fem stycken olika brandmodeller har undersökts i rapporten: NRCs Fire Dynamics Tools (FDTs), Electric Power Research Institute's (EPRI) Fire-Induced Vulnerability Evaluation Revision 1 (FIVE-Rev1), The National Institute of Standards and Technology's (NIST) Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport (CFAST), Electricité de France's (EdF) MAGIC och NIST's Fire Dynamics Simulator (FDS). Riktlinjer behandlar val av modell och tillämpning av modell samt hur osäkerheter bör behandlas i brandmodellerna. Åtta olika brandscenarier på kärnkraftverk modellerades.

I rapporten presenteras sex steg för hur brandmodellering ska användas på kärnkraftverk. Följande steg omnämns i rapporten; definiera vilka mål som ska nås med brandmodelleringen, karakterisera

brandscenarier, val av brandmodell, beräkna brandförhållanden, genomföra känslighets- och osäkerhetsanalyser och dokumentera resultaten.

En viktig del i steg 1 är att definiera målet utifrån om det ska användas till ett deterministiskt problem eller som indata till en PSA. Alla brandmodelleringsmål bör konkretiseras genom att det med tydlighet anges vad som förväntas uppnås med analysen. Dessutom bör det framgå vilka kriterier som använts för att kontrollera om analysen varit lyckad eller ej, samt vilken analysprocess som efterföljts. I rapporten ges förslag till ett antal mål som de tycker borde inkluderas i en brandmodellering, vilka är följande:

- Utvärdera om branden skadar en kabel eller en komponent.
- Utvärdera om branden skadar flera kablar eller komponenter.
- Utvärdera om förhållandena faktiskt kan inträffa i utrymmet.
- Utvärdera om brandspridning kan ske genom eller över en brandbarriär.
- Utvärdera detektion eller sprinkleraktivering.
- Utvärdera potentiell brandspridning mellan brandzoner eller till andra brännbara material.
- Utvärdera bärförmåga under brandförhållanden.

Vidare antyds det i rapporten att vid brandmodellering är det även viktigt att tydligt motivera val av scenarier och vilken effektutveckling som branden ska ha. Effektutvecklingen är den viktigaste parametern och måste bestämmas med noggrannhet. Ett antagande som är vanligt är att branden följer en så kallad t^2 kurva, alltså att branden växer exponentiellt. Ofta är den maximala effektutvecklingen framtagen från experimentella data. Den kan också bestämmas utifrån den lufttillgången.

I en rapport utgiven av **IAEA (1998)** presenteras en strategi för implementering av brand-PSA samt integrering av brand i interna händelser i existerande PSA. I den här rapporten föreslås att det bör skapas ett standardiserat ramverk, terminologi och dokumentation gällande PSA för att underlätta för externa granskningar. Huvudsyftet med rapporten är att bedöma hur stor påverkan brand får på härskadefrekvensen.

För att undvika detaljanalys av orimligt många scenarier behöver en screening genomföras. Urval och sorteringen görs exempelvis på att många bränder inte bidrar med någon signifikant riskökning. Rapporten föreslår att screeningprocessen utförs i olika steg där man börjar med enkla modeller som är konservativa för att sedan skapa mer realistiska scenarier så att de bli mer omfattande och täcker in fler parametrar. Då kan exempelvis brandens förlopp, påverkan på säkerhetsutrustning, släckutrustning etc. beaktas. Hänsyn ska även tas till brandspridning om det inte går att styrka att branden endast kommer att påverka det enskilda rummet. Det ovanliga fallet där antändning av flera brandceller sker samtidigt på grund av en enskild händelse ska också utredas.

När en brand-PSA görs är det viktigt att det finns brandspecialister som kan bedöma och utvärdera effekterna av en potentiell brand. För att göra en så bra brandanalys som möjligt är det viktigt att samla in mycket anläggnings-specifik data. I metoden som IAEA föreslår radas följande steg upp:

1. Databesamling
2. Definition av brandområde (t.ex. brandcell)
3. Bekanta sig med interna händelser i PSA
4. Inventering av utrustning och kablar
5. Screening med avseende på påverkan
6. Screening med avseende på frekvens
7. Detaljerade analyser

8. Känslighets- och osäkerhetsanalyser
9. Dokumentation av analysen

I de olika metoderna finns det några punkter som omnämns i flera av rapporterna:

- Databesamling
- Screening
- Anläggningsbesök
- Analys
- Osäkerheter

De olika metoderna överensstämmer ganska väl, vilket är föga förvånande då många av dem bygger på internationella bestämmelser samt historiskt god praxis inom branschen. Flera är dock relativt omfattande och svårarbetade i praktiken, något som bland annat NUREG-6850 fått motta viss kritik för (Nusbaumer, Gubler, Kompella, 2018). Exempelvis ingår det i vissa av metoderna grundliga anläggningsbesök, vilket kan vara tidskrävande, samt att det kan finnas alternativa lösningar som effektiviserar processen beroende på vilken data som finns tillgänglig från start. Om det finns mycket data dokumenterat sedan tidigare, kan en större del av arbetet göras innan anläggningsbesök vilket sparar tid.

5 Metodologi

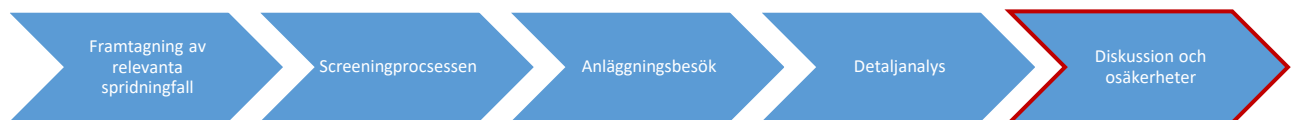
I detta kapitel beskrivs proceduren för framtagandet av en screeningmetodik gällande brand-PSA på Ringhals, reaktor 3, med funktionen att kunna identifiera ett adekvat urval av brandspridningsfall för att senare behandla dessa i en mer detaljerad analys. Processen för att ta fram de mest relevanta brandspridningsfallen är uppdelad i flera olika steg som till stor del bygger på rekommendationer och riktlinjer ur litteraturstudien i kapitel 4. Arbetsgången kan översiktligt betraktas i Figur 5. Det är dock viktigt att påpeka att det inte finns någon exakt beskriven linjär metod utan att det är en iterationsprocess som både bygger på konkreta rekommendationer men även välgrundade bedömningsfall.

Målet med metodologin är att ta fram ett begränsat men kritiskt urval av brandspridningsfall, med två brandceller inblandade i varje fall, vilka har hög relevans med avseende på risk och konsekvens vid en eventuell spridning.

Ringhals 3 består av hundratals rum i flera olika byggnader vilket innebär att det är en stor datamängd som måste hanteras. Det prioriterades därför att metoden skulle vara någorlunda enkel och hanterbar, och att det ganska tidigt i processen måste vara möjligt att avgränsa antalet rum för att inte arbetet ska bli allt för omfattande.

Vidare gäller det att en begränsning i detta examensarbete är insyn och kontroll av indata som använts i PSA-studien för att få fram de kvantitativa resultat och graderingar av spridningsfall som tagits fram i analysen.

De olika stegen är till viss del tillämpade beroende av vilken data som funnits tillgänglig, vilka bland annat hämtats från SBA.



Figur 5 beskriver arbetsgången.

I kapitel 5.1–5.5 beskrivs den framtagna arbetsgången som är beskriven i figur 5.

5.1 Steg 1 - Framtagning av relevanta spridningsfall

Poängen med detta inledande steg var dels att ta fram bidraget till härdskadefrekvens för specifika brandspridningsfall, samt att finna vilka brandceller som är närliggande varandra. I PSA-studien för Reaktor 3 finns det i nuläget inlagt ett knappt hundratal brandanalysfall, varav ca tio anses vara av det kritiska slaget med avseende på bidrag till härdskadefrekvensen.

Ett verktyg i RiskSpectrum för att utföra känslighetsanalyser är funktionen "Attribut". Med hjälp av denna funktion har relevanta brandspridningsfall sorterats fram. Metoden för att sortera fram brandspridningsfall har delats in i tre steg där det första steget var att ansätta "Attribut" i PSA-modellen.

1. Ansättande av "Attribut"

Då det var spridning mellan brandceller som skulle studeras ansattes "Attribut" baserat på befintliga brandceller. Detta betyder att de objekt som har beroende till en viss brandcell fick ett "Attribut" som benämndes enligt aktuell brandcell. Information om vilka objekt som hade beroende till en viss

brandcell togs fram genom att studera rumsberoenden i PSA-modellen. Med rumsberoenden menas i vilket rum ett visst objekt är placerat, vilket baseras på information från Ringhals kabeldatabas.

Detta steg kan sammanfattas med att de objekt som har beroende till ett visst rum och i sin tur till en viss brandcell får ett "Attribut" ansatt vilket benämns enligt aktuell brandcell.

2. Analys av befintliga spridningsfall

Med hjälp av RiskSpectrum kördes ordinarie brandanalysfall för att därefter kunna studera intressanta och betydande spridningsfall. Genom att studera känslighetsanalysen med avseende på "Attribut" erhöles information kring vilka brandspridningsfall som hade störst betydelse för resultatet.

3. Screening av möjliga brandspridningsfall baserat på närliggande brandceller

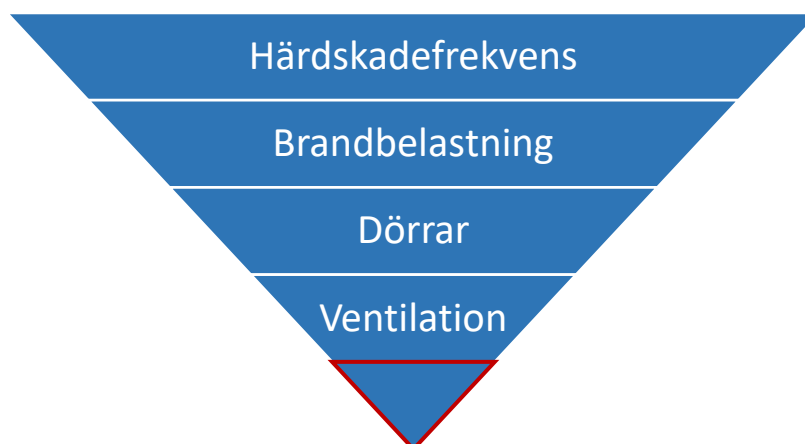
De spridningsfall som tagits fram med hjälp av funktionen "Attribut" tar ingen hänsyn till om fallen är möjliga eller ej och därför behövdes ytterligare information tillföras. Genom att studera vilka brandceller som var närliggande sorterades fall bort som ej är i kontakt med varandra. Närliggande brandceller sorterades fram med hjälp av en sedan tidigare framtagna databas för kvalitetssäkring av de kabeldatabaser som används på Ringhals 3 och 4. Rumsdatabasen studerar vilka rum som är närliggande både vertikalt eller horisontellt och genom att koppla rum och tillhörande brandcell kunde närliggande brandceller tas fram.

Resultatet av de ovan nämnda stegen är ett antal brandspridningsfall som har betydande påverkan på den totala härdskadefrekvensen och som är närliggande. Fall som ej är i kontakt har således screenats bort.

Denna delprocess av arbetet var ganska tidskrävande men poängen är alltså att genom kabeldatabaser finna vilka rum som är närliggande, vilket både kan vara vertikalt eller horisontellt i byggnaden. Detta gjordes för att täcka in alla möjliga spridningsfall som kan uppkomma och därmed inte screena bort fall för tidigt.

5.2 Steg 2 – Screeningprocessen

I detta steg beskrivs och motiveras urvalet av fall efter vilka bedömningar, resonemang och antaganden som har gjorts. I figur 6 går det att överblicka resultatet, där samtliga närliggande brandceller finns med högst upp och i den röda triangeln endast ett fåtal kvar.



Figur 6 beskriver arbetsgången för screeningprocessen och den inbördes ordningen av screeningparametrar.

Stor vikt lades vid vilken data som fanns tillgänglig samt en bedömning kring hur uppdaterad denna information var. Det samlades in data för branddörrar, brandbelastning och ventilationsberoenden. Den senare var dock bristfällig och det saknades en hel del information gällande ventilationsberoenden mellan specifika rum och brandceller. I figur 6 kan ses att första parametern som screenades på var de som hade störst bidrag till härdskadefrekvensen som sedan följdes upp av parametrarna brandbelastning, dörrar och ventilation. Den trattliknande figuren visar att mängden spridningsfall som "finns kvar" är fler högre upp i tratten och vice versa.

För att undvika att screena bort fall för tidigt inleddes processen med att ansätta ett kriterium för härdskadebidraget för respektive brandspridningsfall med frekvensen 10^{-8} gånger/år, vilket är ett riktvärde som använts vid tidigare analyser genomförda vid Ringhals. Resultatet för brandspridning baseras på härdskadebidraget för brand i en specifik brandcell multiplicerat med riskökningsfaktorn (RIF) för spridning till en annan brandcell. RIF är ett känslighetsmått som används för att visa hur stor påverkan en förändring (i detta fall brandspridning) har på resultatet. Följande ekvation används för att beräkna frekvensen:

$$f = CDF_b \cdot RIF$$

där

f är frekvensen per år

CDF_b är härdskadebidraget för brand

RIF är en riskökningsfaktor orsakad av spridning till annan brandcell

Genom att ansätta detta kriterium kunde andelen intressanta brandspridningsfall tidigt reduceras baserat på ett kvantitativt riktvärde. Det anses alltså att spridningsfall med en frekvens lägre än 10^{-8} bör screenas bort till förmån för spridningsfall som bidrar mer till den totala härdskadefrekvensen, vilket var den stora anledningen till att detta kriterium ansattes före någon annan parameter.

I nästa steg behandlades brandbelastningen (se figur 6). Villkoret som bestämdes var att brandbelastningen skulle vara större än 90 MJ/m^2 i brandcellen för att den skulle inkluderas i den fortsatta analysen. Detta medförde att exempelvis brandspridningsfall där en brandcell med brandbelastning 10 MJ/m^2 och den närliggande 100 MJ/m^2 , screenades bort från vidare analys. Detta specifika värde har bland annat använts för screening vid tyska kärnkraftverk (OECD/NEA, 2015).

Om en brandspridning mellan två brandceller ska anses vara möjlig, och för att kunna begränsa antalet fall för vidare analys, krävs det att båda brandcellerna inom ett spridningsfall innehåller en rimlig mängd brännbart material. Det var på basis av detta argument som valet av att screena på brandbelastning gjordes. Då det antogs finnas en del osäkerheter i databasen vid Ringhals där information om brandbelastningar i olika brandceller hämtats ur, godtogs dock även fall där en av brandcellerna låg strax under 90 MJ/m^2 .

Eftersom data för brandbelastning endast går att hämta på rumsnivå och inte för hela brandcellen gjordes en struktur i Excel där varje ingående rum för respektive brandcell radades upp. Då olika rum innehöll olika brandbelastningar var det nödvändigt att vid detta tidiga stadium förenkla detta moment genom att låta det rum med högst brandbelastning representera brandbelastningen för hela brandcellen, detta antagande var konservativt.

Figur 7 föreställer en principskiss över ett brandspridningsfall som exkluderats vid screening på brandcells nivå med avseende på brandbelastning, vilket beror på att båda innehåller rum med en brandbelastning större än 90 MJ/m^2 . Dock går det i figuren att se att rummen som utgör kontaktytor

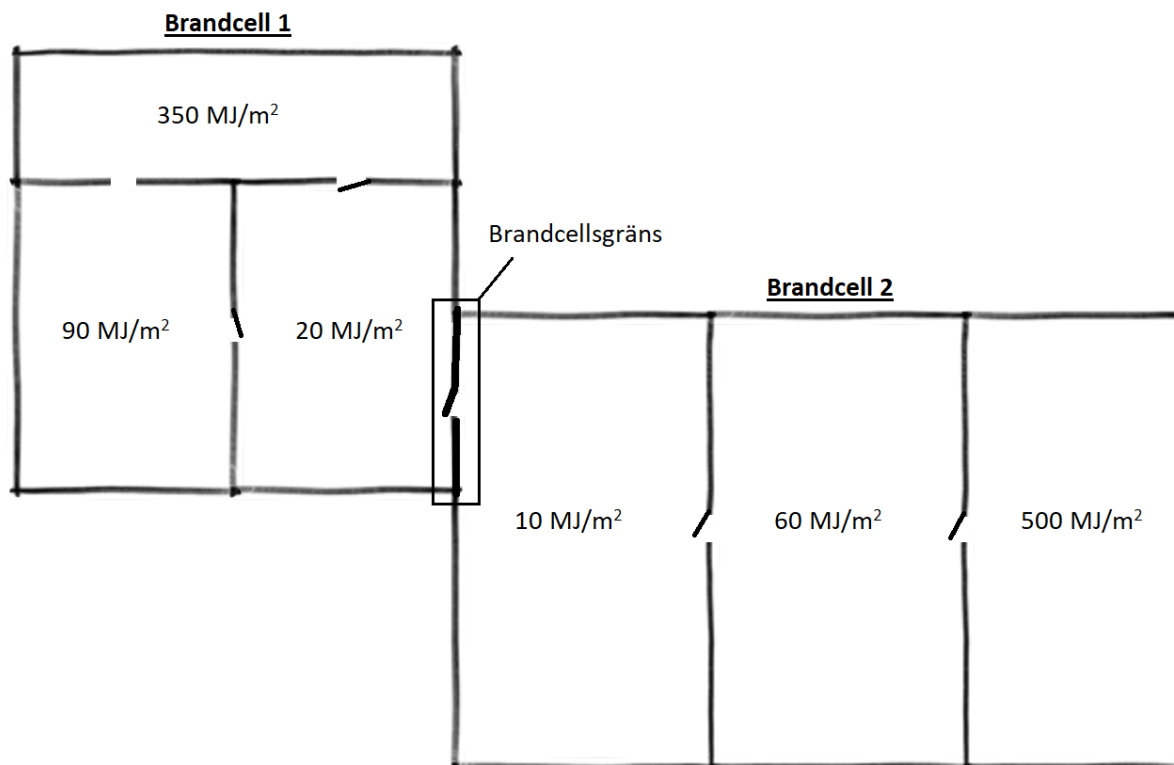
mellan brandcellerna har brandbelastningen som är betydligt lägre; 20 MJ/m² respektive 10 MJ/m². Detta medför i sin tur att ett sådant fall kan i princip screenas bort med ett kvalitativt resonemang, trots att en dörr existerar mellan brandcellerna. Detta eftersom brandbelastningen rummen sinsemellan anses vara för låg, vilket även sänker risken för brandspridning. Osäkerheter förbundna med bland annat detta antagande diskuteras i kapitel 7.3.

Det tredje screeningsteget gjordes med avseende på branddörrar (se figur 6). Orsaken till det beslutet var att i de fall där öppningar existerar mellan brandceller, föreligger även en högre risk för brandspridning mellan brandcellerna då en dörr av misstag kan lämnas öppen. Data för dörrar hämtades ur en databas över dörrprovningar. Dörrarna var namngivna efter de ingående rumsnamnen, där det första rummets namn (varifrån dörren öppnas) angavs först. Det gjorde det nödvändigt att även "omvända" rumsnamnen (dörrnamnen) för att inte "tappa information" och utelämna dessa fall ur analysen. Då informationen över dörrberoenden anskaffats på rumsnivå omvandlades denna information till att omfatta brandcells nivå med hjälp av Excel.

Gemensam ventilation har undersökts med hjälp av interndokument från Ringhals. Dessa dokument var inte heltäckande för alla fall som undersöktes men kunde ge ytterligare information till redan konstaterade kritiska fall.

Vidare gjordes en identifiering av vilka rum som faktiskt är inblandade i ett eventuellt brandspridningsfall mellan två brandceller, det vill säga kontaktytorna mellan brandcellerna. Detta gjordes mot bakgrund av att underlätta arbetet vid anläggningsbesöket, då förutsättningarna kring de rum som hade den högsta spridningsrisken var relativt kända och således kunde ett större fokus läggas på dessa.

Det togs alltså i beaktning om spridning mellan två brandceller kan anses vara möjligt baserat på förutsättningarna i de enskilda rummen (kontaktytorna mellan brandcellerna). Detta gjordes genom att varje rum ansattes med samma screeningkriterium som för brandceller, det vill säga 90 MJ/m², samt kommentarer gällande dörrar och med hjälp av den informationen kunde de mest intressanta rummen bestämmas.



Figur 7 visar exempel på fall som gallras bort.

Det har dock även tagits med ett fåtal rum då brandbelastningen understigit 90 MJ/m^2 i kontaktytor mellan två brandceller. Det har då i föreliggande fall berott på att brandbelastningen legat väldigt nära 90 MJ/m^2 , samt att det närliggande rummet haft betydligt högre brandbelastning än 90 MJ/m^2 . Det bör även tilläggas att det vid detta steg endast fanns ett tiotal brandspridningsfall kvar, då resterande screenats bort under processens gång, samt att vissa spridningsfall hade fler än ett rum som utgjorde kontaktytor mellan två brandceller.

5.3 Steg 3 - Anläggningsbesök

För att få en tydligare bild över de brandceller och rum som valts ut via screeningprocessen genomfördes två anläggningsbesök. Besöken varade under två dagar och då besöktes alla kritiska brandceller med tillhörande rum. Vid båda rundvandringarna närvarade ansvariga för brandrelaterade frågor på Ringhals samt person med kunskap inom PSA. Vid varje rundvandring gjordes en okulär bedömning av rummen som utgjorde kontaktytor i brandspridningsfallen med avseende på var brandbelastningen var koncentrerad och vilket material den främst bestod av, hur dörrar var placerade och till viss del mängd av genomföringar i aktuell brandcellsgräns. Informationen samlades in och sammanställdes för att sen kunna användas vid den detaljerade analysen i steg 4.

Utrymmen med egenskaper som ansågs kunna generera kritiska brandförlopp fotograferades och intressanta och väsentliga detaljer noterades. Personal med brandteknisk kunskap som var delaktiga vid anläggningsbesöket gav även synpunkter kring vilka känsliga element och områden i anläggningen som eventuellt skulle kunna ha förbisetts vid screeningen.

5.4 Steg 4 - Detaljanalys

I detta steg fördes en diskussion och utvärdering kring vilka fall som var av störst relevans att gå vidare med för en mer detaljerad analys. Detta steg baserades alltså på screeningen samt anteckningar och fotografier som tagits vid anläggningsbesöket.

Detaljerade analyser kan hanteras på sex stycken olika nivåer, från nivå 0 som är kvalitativ till nivå 5 som är probabilistisk med multipla riskkurvor som hanterar osäkerheter. Den analysen som gjorts i detta arbete bygger på värsta möjliga förhållanden som rimligen kan förväntas. Vad som också bör tas i beaktning är att inte vara så konservativ att de framtagna fallen saknar rimlighet (Paté Cornell, E., 1996).

Två fall valdes ut vilka kom att benämnas Spridningsfall 1 och Spridningsfall 2. Detta på grund av sekretesskäl. Den detaljerade analysen och de två fallen beskrivs utförligt i kapitel 6.

5.5 Steg 5 – Diskussion och osäkerheter

Slutligen genomfördes en diskussion angående osäkerheter och begränsningar i processen. Det gjordes även en värdering av resultaten och återkopplades till målen som formulerades i början av processen. I det här steget fördes också ett mer kvalitativt resonemang, exempelvis vad personal som mer eller mindre är deltagande i analysen, samt övriga intressenter, ansåg om olika fall.

6 Detaljanalys

Nedan beskrivs spridningsfallen som togs fram med hjälp av metodologin som är beskriven i kapitel 5. På grund av sekretesskäl utlämnas vissa detaljer i beskrivningen.

Inget av spridningsfallen är skyddade med aktiva system, exempelvis sprinkleranläggning, och ingen hänsyn har heller tagits till detektion. Detta för att analysens främsta uppgift är att generera underlag kring möjligheterna om spridning faktiskt är möjlig eller ej med avseende på separation. En separat utredning kring insatstider kan göras, där diagrammen för effektutveckling och temperatur kan vara till hjälp vid bestämning av när kritiska förhållanden uppstår.

6.1 Spridningsfall 1

Två brandceller är direkt angränsande till varandra via en dörr. Det finns även en luftsluss som avgränsar brandcellerna. Båda brandcellerna är i princip identiskt uppbyggda och det finns inget som skiljer de åt med avseende på utformning (se figur 8). Dörren mellan brandcellerna är försedd med ett larm som ljuder om dörren står öppen för länge och signal går till kontrollrummet.

I brandcellerna finns det kabelstegar som löper horisontellt längs med väggen. Rummet har en takhöjd på 4 meter. Enligt brandpersonal på Ringhals är brandcellerna kritiska och en spridning skulle ge konsekvenser som påverkar reaktorsäkerheten på ett betydande sätt, detta visar även screeningen och bidraget till härdskaedefrekvensen.

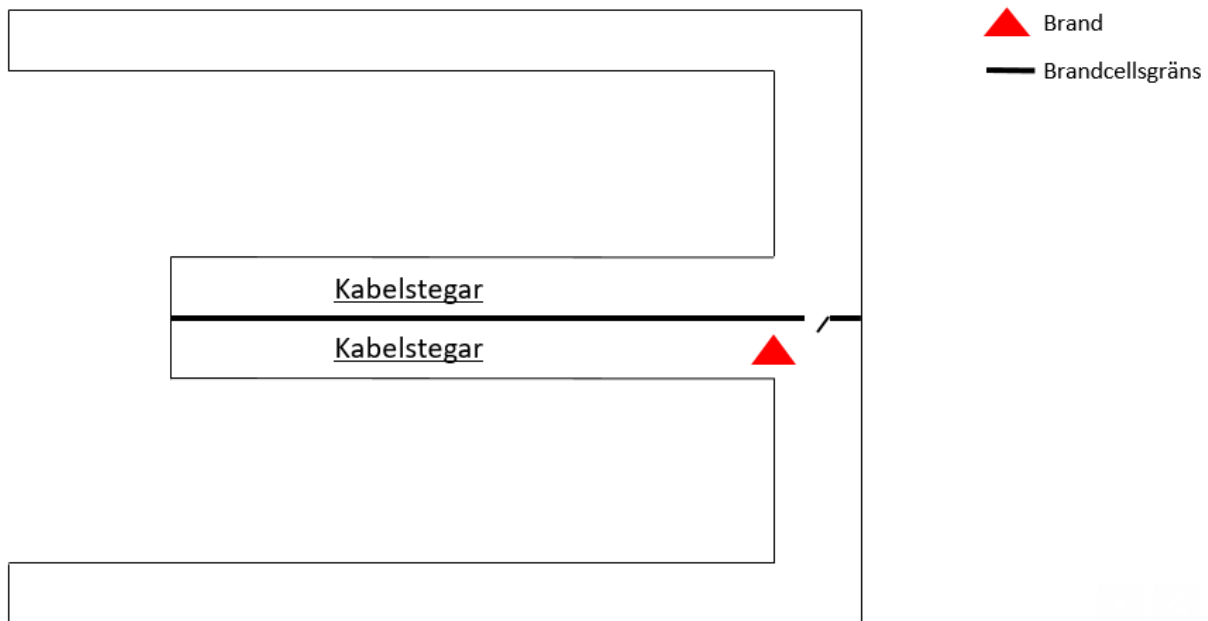
Kablarna i brandcellerna förser kylvattenpumparna med ström. Eftersom båda dessa brandceller innehåller kablar som har samma funktion är detta gjort för att öka redundansen i systemet. Som tidigare nämnts så ska enligt SSMFS 2008:17 "*de redundanta delarna och dess stödfunktioner ha en tillräcklig fysisk och funktionell separation*". Svagheten i redundansen i detta fall består i kablarna är placerade i angränsande rum inom brandcellerna, men inte så långt från varandra som möjligt (varsin sida om brandcellen). Skulle båda cellerna slås ut samtidigt stryps kraftmatningen till pumparna, med påverkan av att reaktorkylningen kan upphöra.

I detta fall har information om ventilation saknats, samt att det är högst troligt att denna stängs av vid eventuell brand.

För Spridningsfall 1 kan det bestämda skadekriteriet (se kapitel 3.5) uppnås genom två olika scenarier; brandgasspridning genom dörr och värmeledning genom vägg. När det gäller brandgasspridning genom öppen dörr har potentiell brandspridning analyserats med datorprogrammet CFAST (se kapitel 6.1.2). I simuleringen har det antagits att branden har full tillgång till syre på grund av att det är mest konservativt, och högst temperatur uppnås om förbränningen är fullständig.

Värmeledning genom gemensam vägg har beräknats med 1D värmetransport (se Bilaga C). Branden har antagits följa ISO-834 brandkurvan. Väggen består av betong och är 0,25 meter tjock. Väggen kommer att värmas upp genom strålning och konvektion som sedan leds igenom väggen. Den icke brandutsatta väggen kommer kylas ner av konvektion. Temperaturen genom väggen beräknas för 25 olika noder där det mellan varje nod är 0,5 cm. Då ISO-834 har ett brandförlopp som ökar snabbt i temperatur kan den anses vara konservativ för kabelbrand.

Hänsyn har inte tagits till om dörren är stängd och potentiell strålning från den varma dörren till den angränsande brandcellen. Däremot så anses att vid ett sådant fall så kommer inte strålningen kunna skada kablarna på grund av att kablarna är i 90 gradig vinkel mot dörren vilket innebär att den största delen av strålningen inte kommer nå kablarna.



Figur 8 visar principskiss för Spridningsfall 1 sett ovanifrån.

6.1.1 Effektutveckling

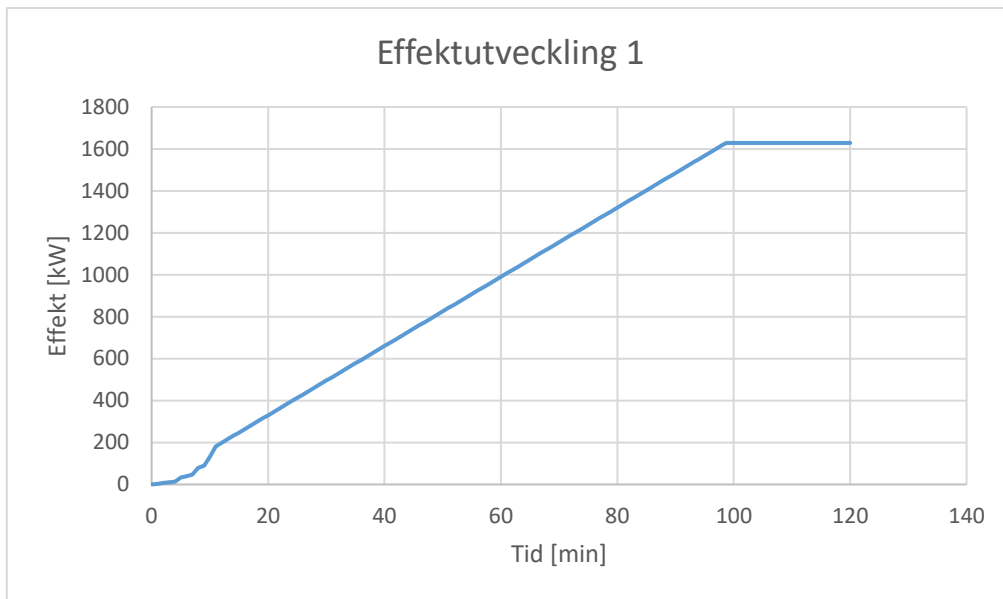
Vid en potentiell kabelbrand är beräkningarna gjorda utifrån vissa antaganden. De antagandena som är gjorda för beräkningar av effektkurvan är att branden startar i botten av kabelstegarna. Det är 5 kabelstegar som inte är skyddade. Kabelbranden kommer att sprida sig både horisontellt och vertikalt. Effektutvecklingen per areaenhet har antagits vara 150 kW/m^2 (NUREG 7010, 2013). När branden går in i jämviktsläge antas lika mycket brinna som avsvältnar. Kablarna är till största del av sorten XLPE. Den horisontella hastigheten för brandspridning är vid 70 kW/m^2 strålning

- 0,9 mm/s för PVC kablar
- 0,3 mm/s för XLPE kablar

(NUREG-6850, 2005)

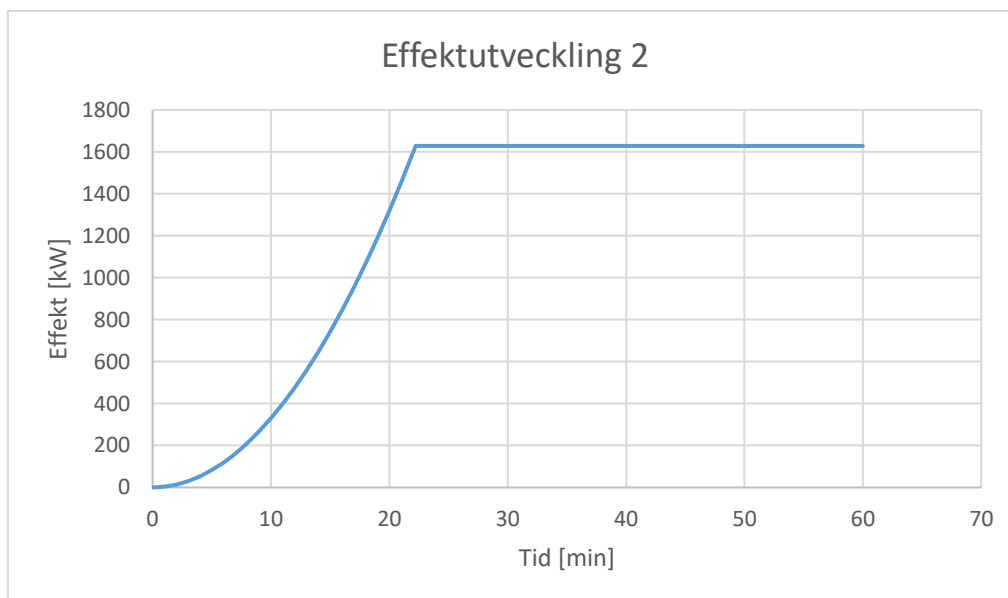
Framtagning av effektutvecklingen presenteras i bilaga A.

I nedanstående fall antas branden ha en spridningshastighet 0,3 mm/s då kablarna till största delen är av sorten XLPE. I figur 9 kan utläsas att maxeffekt nås efter knappt 100 minuter. Anledningen till den icke linjära tillväxten i början är att stege 1 antänder stege 2 etc. (se Bilaga B).



Figur 9 visar effektutvecklingen för spridningsfall 1.

I figur 10 åskådliggörs effektutveckling för en snabbare tillväxtfas vilket gör att branden når maxeffekt efter drygt 20 minuter. I det här fallet har antagits en tillväxtfas som ökar med tiden i kvadrat medan de andra parametrarna har varit samma som i föregående fall. Detta har gjorts för att ta höjd för en eventuell snabbare tillväxt och undersöka hur det påverkar temperaturen i angränsande brandcell (se Bilaga B).

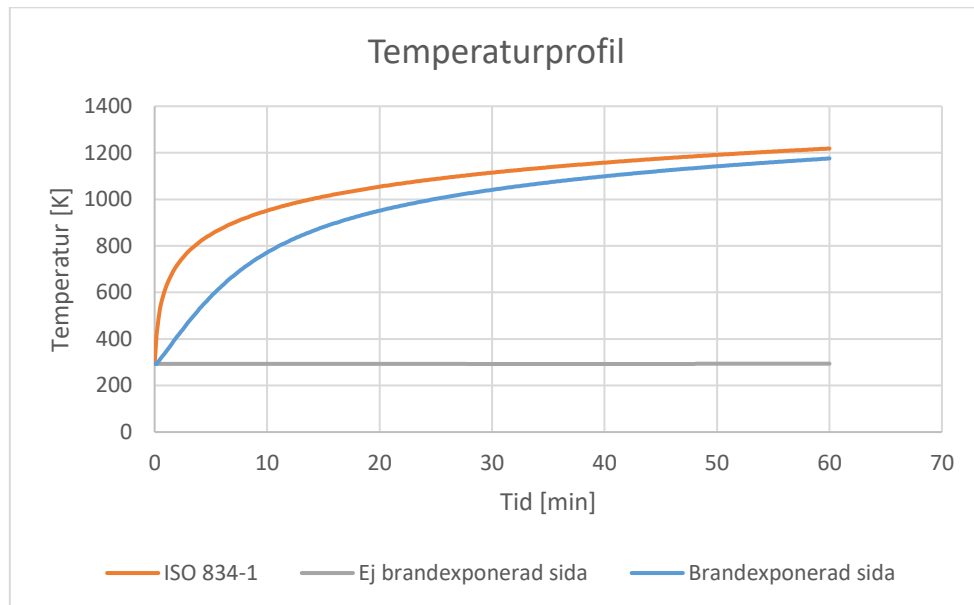


Figur 10 visar effektutveckling med snabbare tillväxt.

6.1.2 Resultat

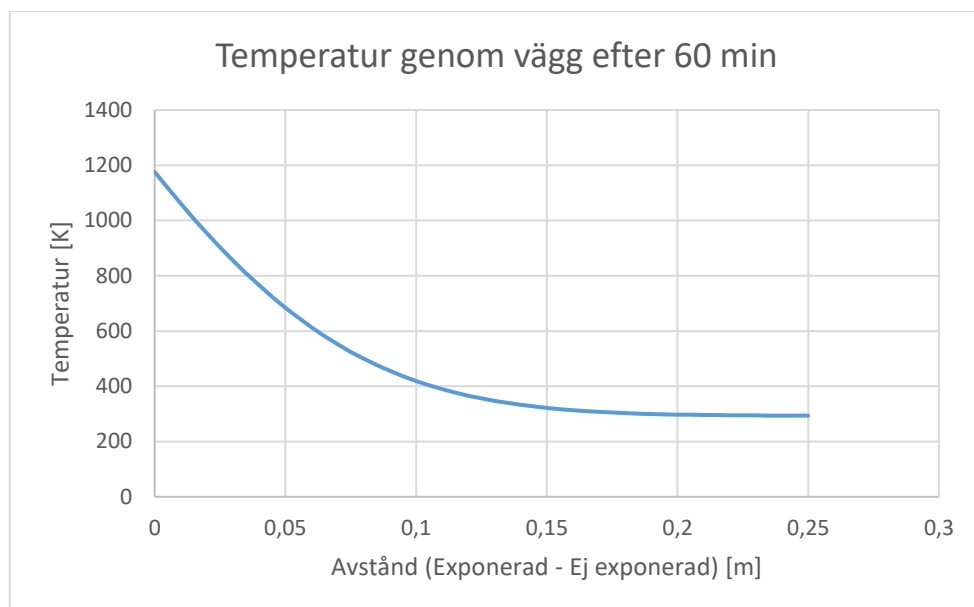
Resultat från beräkning för värmeledning genom vägg redovisas i figur 11 och 12. I figur 11 nedan visas tre olika kurvor, ISO-834, brandexponerad sida och ej brandexponerad sida. ISO-834-1 är en standardiserad tid- och temperaturkurva och valts som dimensionerande brand vid värmeledningsberäkningarna. Grafen nedan visar hur den brandexponerade sidan av väggen efter 1 timme når en temperatur som nästan är lika hög som i brandrummet. Den ej exponerade sidan når

upp till ungefär 295 K vilket motsvarar en ökning med 2 K då temperaturen vid tiden 0 är 293 K. Värmeledningsberäkningarna är grundade på en tidigare utförd metodik presenterad i SFPE handboken (Rockett & Milke, 2008).



Figur 11 visar den standardiserade brandkurvan samt temperaturen för brandexponerad och ej exponerad sida.

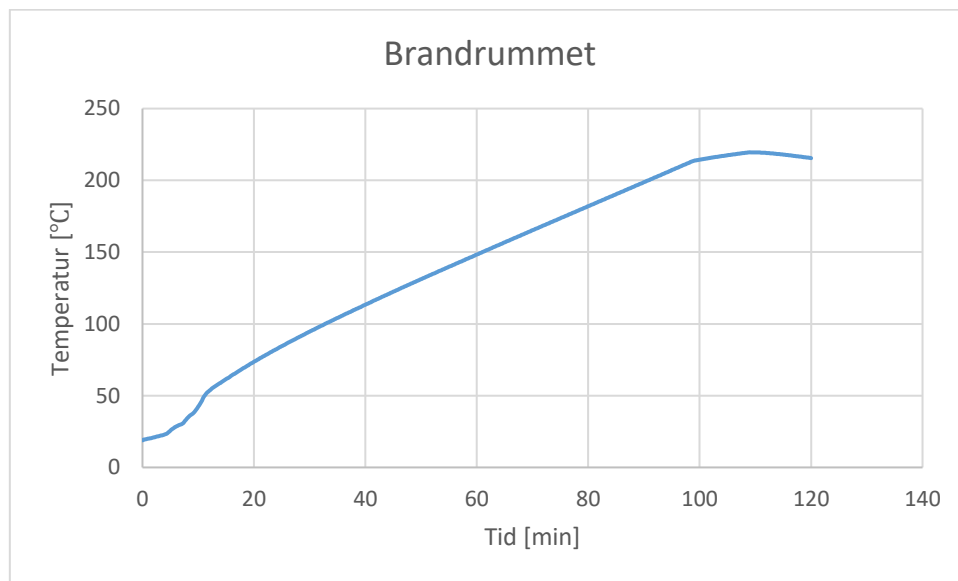
I figur 12 åskådliggörs hur temperaturen genom väggen förändras med avseende på vägg tjockleken. Det syns tydligt hur stor betydelse tjockleken har gällande temperaturförändringen av den icke exponerade sidan.



Figur 12 visar temperaturen genom väggen efter 60 min.

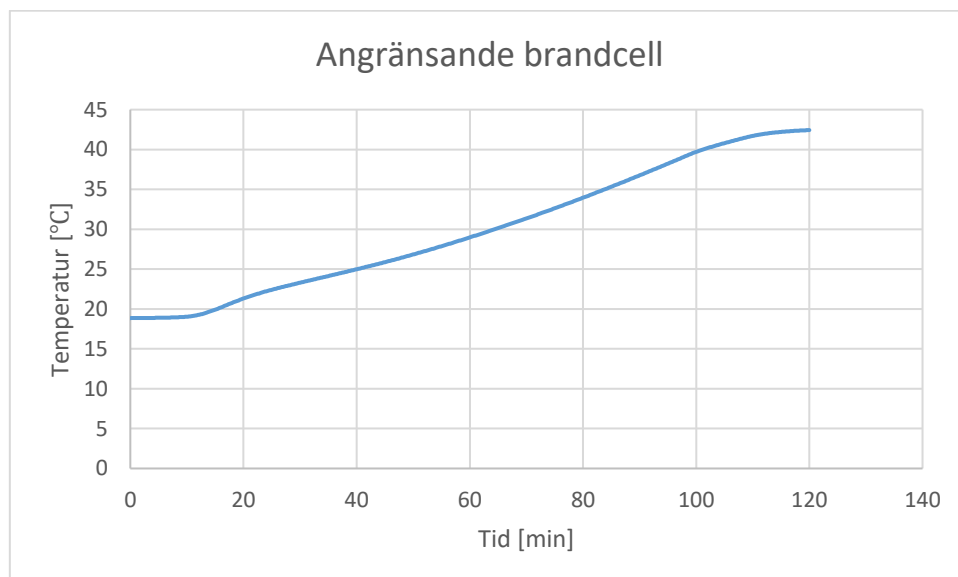
I CFAST har brandcellerna delats upp i mindre smårum. Detta eftersom CFAST är en tvåzonsmodell och det är därför mer lämpligt att dela upp ett mer avlångt utrymme till olika rum. Uppdelningen gör

att programmet lättare kan prediktera temperaturen i olika delar av brandcellerna (ISO/TS 13447, 2013). I figur 13 kan utläsas att temperaturen i brandrummet ökar till 215 °C efter 2 timmar.



Figur 13 visar temperaturen i rökgaslagret i det rum där branden är placerad.

I figur 14 kan utläsas att temperaturen uppnår kritiska nivåer med avseende på skadekriterier (se kapitel 3.5) av kablar i angränsande brandcell. Temperaturen når upp till 42 °C.



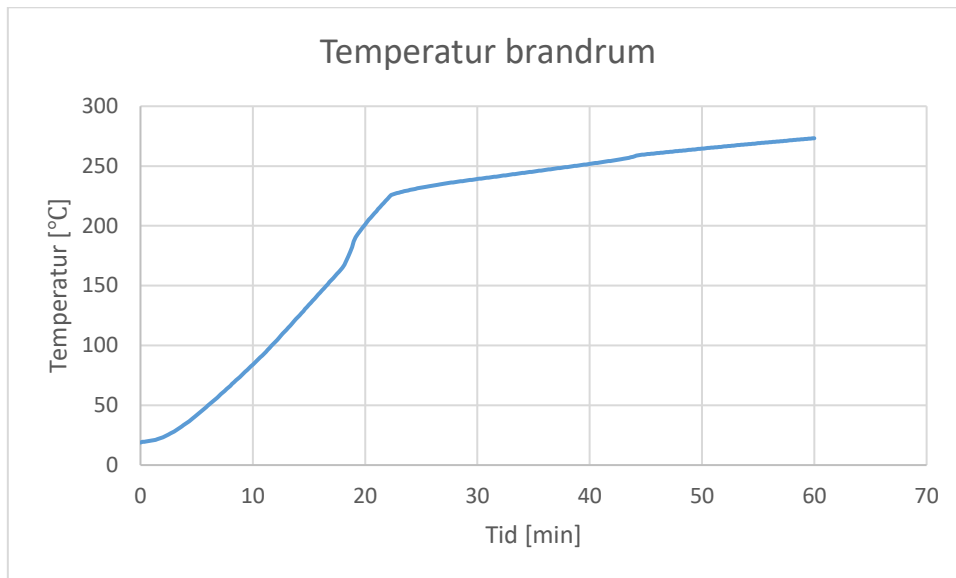
Figur 14 visar temperaturen i angränsande brandcells rökgaslager.

Vad som kan fastslås utifrån dessa figurer är att temperaturen i angränsande brandcell inte når upp till kritisk temperatur med avseende på brandspridning. Detta betyder att kablarna i angränsande brandcell kommer bibehålla sin funktion i händelse av brand i den närliggande brandcellen.

6.1.3 Känslighetsanalys

Nedan presenteras resultaten för de två olika brandspridningsfallen.

I figur 15 kan ses en snabbare tillväxtfas gentemot tidigare och dess påverkan av temperaturen i brandrummet. Vad som kan utläsas är att branden får en 50 °C högre temperatur i brandrummet än i grundfallet.



Figur 15 visar temperaturen i brandrummet efter 60 minuter.

I figur 16 åskådliggörs temperaturen i den angränsande brandcellen. Temperaturen i den angränsande brandcellen når inte en kritisk temperatur (se kapitel 3.5), trots den snabbare tillväxtfasen. Temperaturen uppgår till ungefär 45 C°.

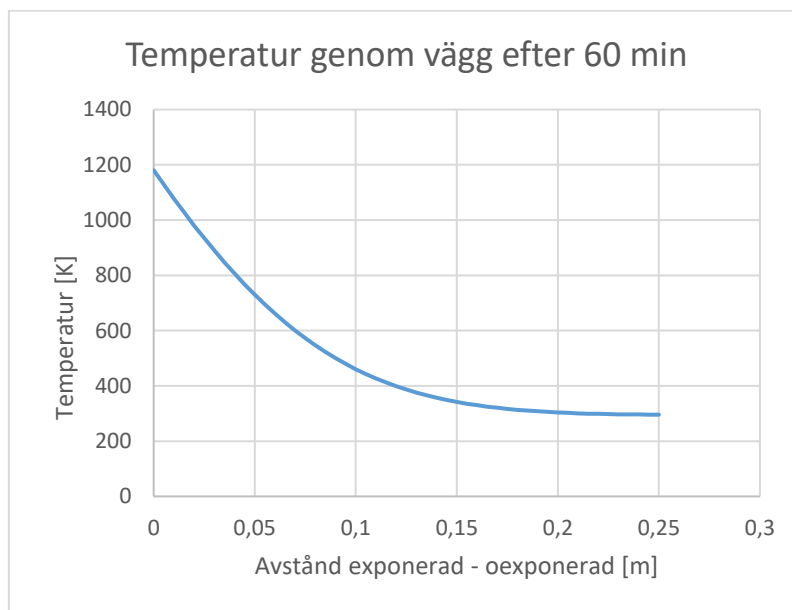


Figur 16 visar temperaturen i den angränsande brandcellen.

I samtliga fall kommer inte temperaturen i angränsande rum i närheten av de skadekriterier (se kapitel 3.5) som satts upp för spridningsfallet. Detta kan bero på att det dels är en stor volym som varma brandgaser kan fördela sig i, men också på att CFAST antar en homogen temperatur i hela brandgaslagret, och förbiser lokala temperaturvariationer. På grund av detta gjordes även en

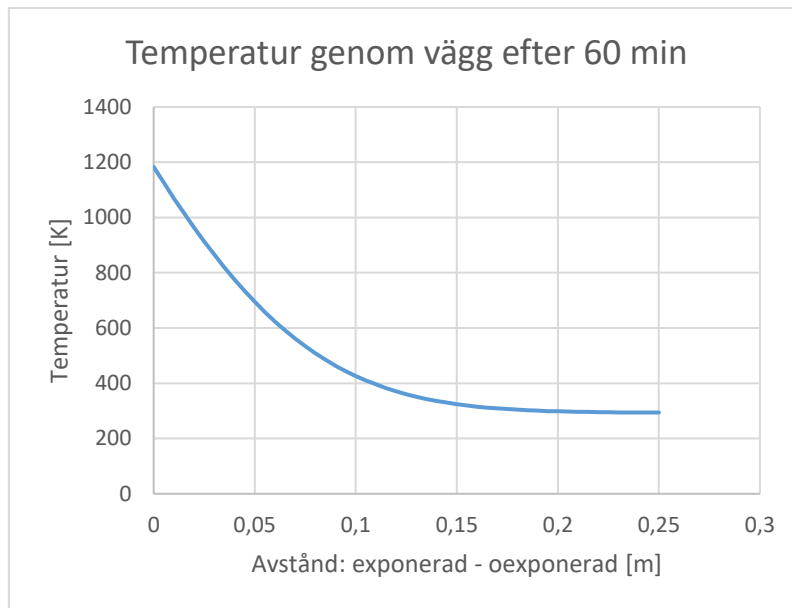
känslighetsanalys för värmeledning genom väggen för att undersöka om kablarna på andra sidan väggen eventuellt skulle kunna ta skada vid andra förutsättningar än i kapitel 6.1.2.

Nedan presenteras resultat om man ändrar indata för värmeledning. I figur 17 nedan antas densiteten vara lägre än i huvudfallet. Detta ger dock inget större utslag på resultat. Densiteten ändrades från 2000 kg/m^3 till 1600 kg/m^3 . I figur 17 syns det att temperaturen är ungefär samma som i huvudfallet.



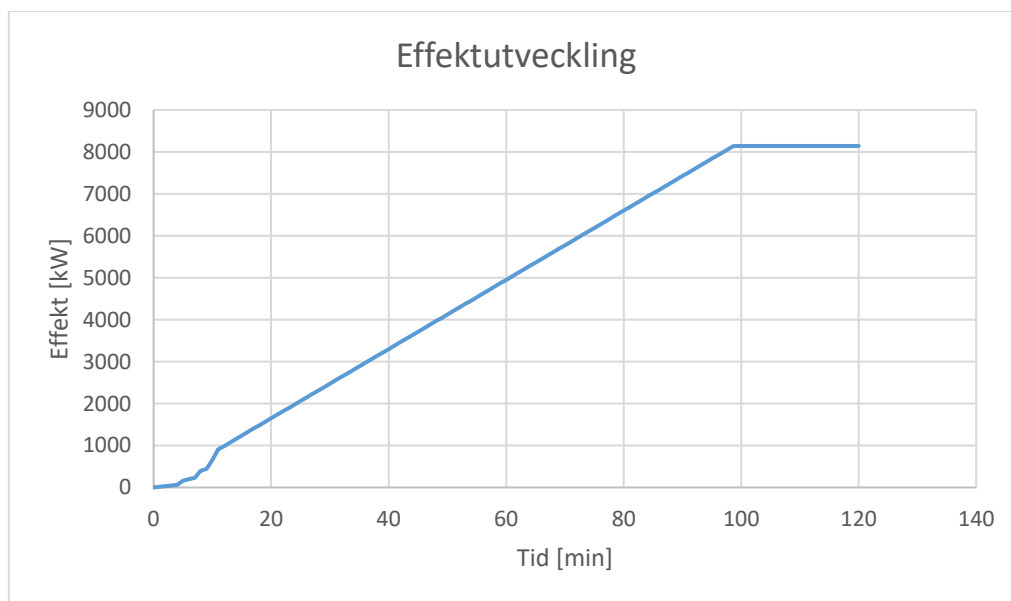
Figur 17 visar temperaturen genom väggen efter 60 minuter.

Istället för att ändra parametrarna densitet ändras nu istället den konvektiva värmeöverföringskoefficienten på den varma sidan. Denna höjdes vilket innebär att mer värme kommer överförs via konvektion till väggen. Den ändrades från $25 \text{ W/m}^2\text{K}$ till $100 \text{ W/m}^2\text{K}$. Även i detta fall kan det ses att temperaturen på den ej exponerade sidan inte når en temperatur som överstiger 295 K.



Figur 18 visar temperaturen i väggen efter 60 minuter.

Nedan visas vad som sker med effektutvecklingen om spridningshastigheten för kabelbranden i spridningsfall 1 ökas med en faktor fem. (NUREG-7010, 2013)

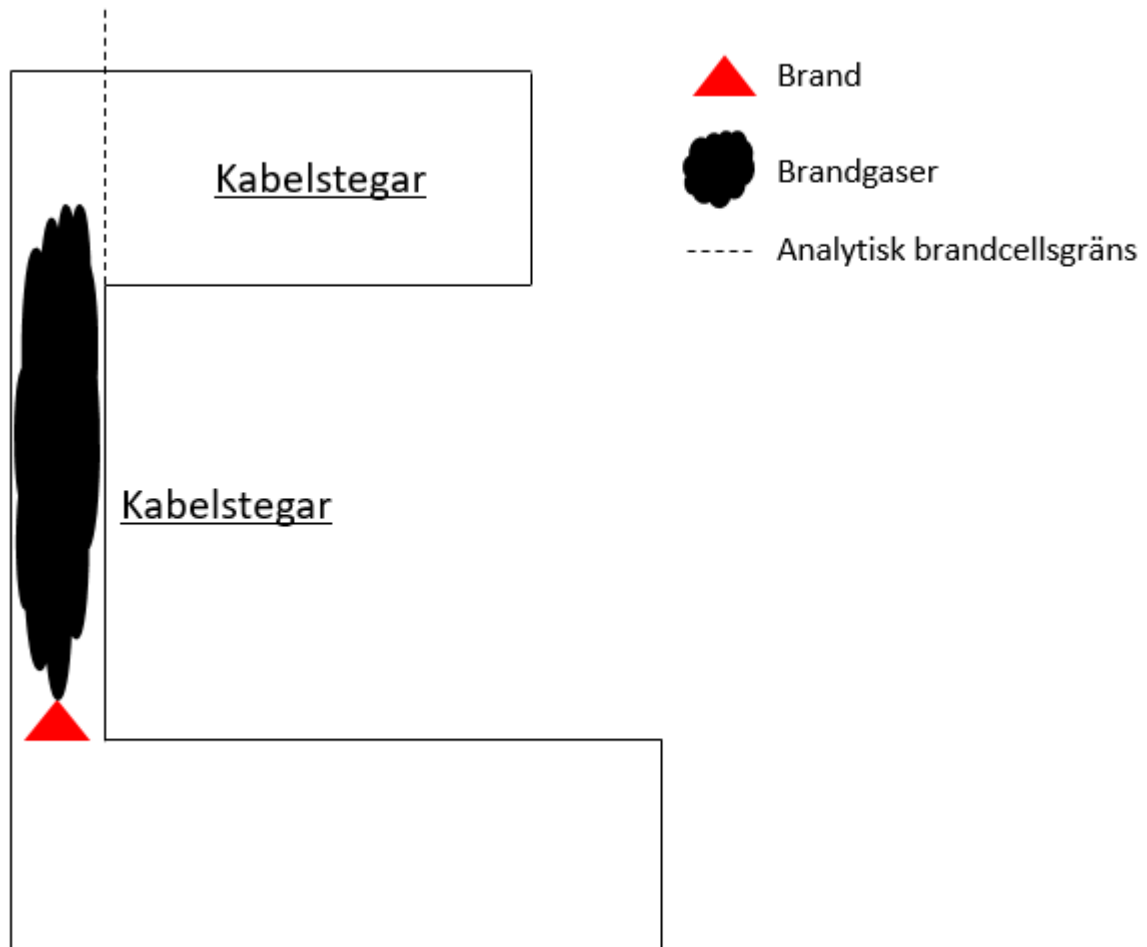


Figur 19 visar effektutveckling för högre spridningshastighet.

Vad som kan ses i figuren är att spridningshastigheten påverkar effektutvecklingen mycket. I fallet med denna spridningshastighet når effektutvecklingen drygt 8000 kW. Denna spridningshastighet anses dock inte vara helt rimlig då kablarna i detta fallet var klassade och är kvalitetssäkrade för att inte kunna ha den spridningshastigheten. I Spridningsfall 1 är det inte heller så mycket kablar vilket gör det svårt att få ett brandgaslager som återstrålar så pass mycket att spridningshastigheten ökar med en faktor fem. Att simulera detta fall i CFAST ansågs därmed inte vara nödvändigt och på grund av modellens begränsningar hade dessutom inte resultaten uppfyllt giltighet. Figur 19 är dock inkluderad för att visa på vad som kan hända om kablarna byts ut och inte uppfyller samma krav längre.

6.2 Spridningsfall 2

Detta scenario innefattar brandspridning mellan analytiska brandceller ("Fire Cells", se kapitel 3.1) med ett kabelschakt som vertikalt angränsar till ett slutet rum 12 meter ovanför, som även det innefattar kablage (se figur 20). Brandbelastningen i dessa rum består av kablar. Kablarna är inte nödvändigtvis sammankopplade, utan effekten av en kabelbrand i schaktet bör innebära att brandgaser stiger uppåt i schaktet, vilket riskerar innebära kortslutning eller i värsta fall antändning av kablarna som finns där. Det var dock vid simuleringen även nödvändigt att inkorporera ett större angränsande rum vertikalt under schaktet, på grund av detta rums betydelse för brandgasspridningen.



Figur 20. Principskiss över spridningsfall 2 sett från sidan.

Scenariot är komplext på grund av geometrin och den skorstenseffekt som bedöms kunna uppstå i schaktet varför programmet FDS (se kapitel 3.6.2) därför valts som simuleringsprogram.

6.2.1 Effektutveckling

För att ta fram en effektutvecklingskurva för brand i kabelstegar i schakt har följande förutsättningar och indata använts:

- Effektutveckling per areaenhet, 250 kW/m²
- Vertikal spridningshastighet av branden, 0,015 m/s
- Antal kabelstegar inblandade i brand, 2 stycken
- Längd av kabelstege, 11 meter

- Bredd av kabelstege, 0,4 meter

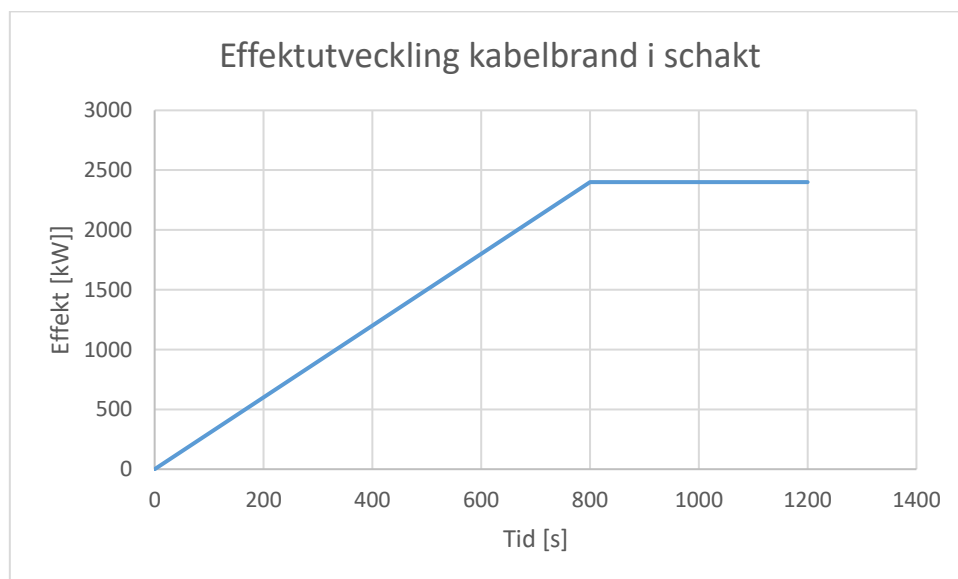
Maxeffekt beräknas genom att multiplicera effektutveckling per areaenhet med arean av två kabelstegar. Det antas alltså att dessa antänder samtidigt och momentant.

Tid till maxeffekt beräknas genom att dividera längden av kabelstegen med den vertikala spridningshastigheten.

I figur 21 åskådliggörs den beräknade maxeffekten. Efter 800 sekunder brinner båda kabelstegarna över hela ytan, och därefter antas de fortsätta brinna i 400 sekunder. Det kan vara rimligt att tro att efter 800 sekunder bör materialet sakteligen brinna av och effekten sjunka. Dock har det i detta scenario varit fördelaktigt att stressa systemet ytterligare för att ta viss höjd för osäkerheter i indataparametrar.

Den vertikala brandspridningshastigheten längs med kablarna har bedömts vara 50 m/h, vilket är ett värde hämtat ur NUREG-6850, Vol. 2. Effektutveckling per areaenhet (HRRPUA) har bedömts vara 250 kW/m² för termoplastiska kablar och är hämtat ur NUREG-7010 Vol. 1. Som jämförelse nämns det i samma rapport att effektutveckling per areaenhet för härdade kablar är 150 kW/m². Då det inte fanns någon tillgänglig information gällande vilka kabeltyper som löper genom schaktet antogs det högsta värdet.

Branden antas sprida sig vertikalt längs med två kabelstegar från schaktets lågpunkt till högpunkt på ett avstånd av 11 meter. Det skall dock poängteras att simuleringen har förenklats något såvida att endast en kabelstege används, dock med justerad effektutveckling per areaenhet. Indata för parametrar och annan information som berör simuleringarna redovisas i Bilaga D. Bakomliggande teori för validering etc. för FDS redovisas i kapitel 3.6.2.



Figur 21 visar effektutveckling för kabelbrand i vertikalt schakt.

6.2.2 Resultat

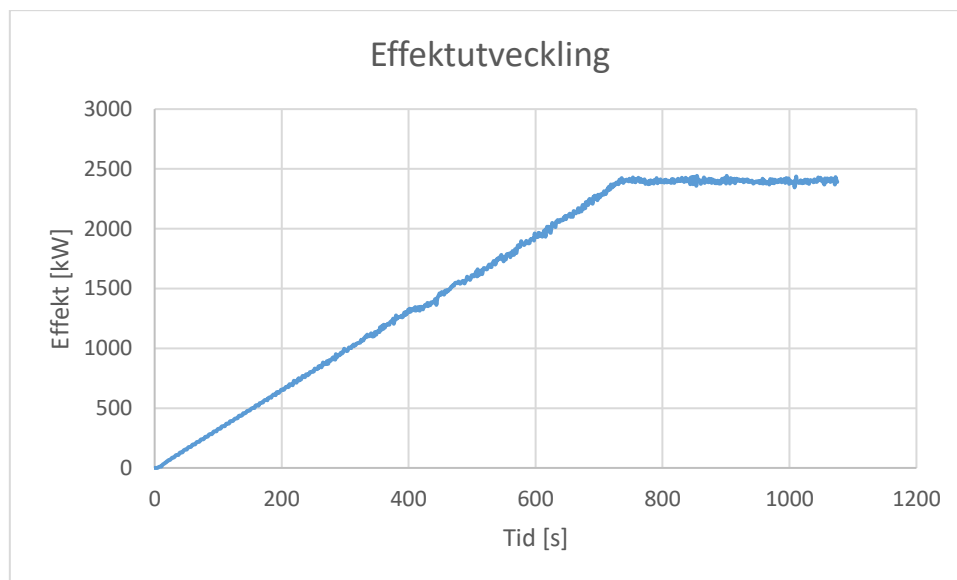
Det aktuella scenariot är relativt svårt att modellera och därför har vissa förenklingar och ändringar, likvärdiga med de verkliga förutsättningarna av rummen i Spridningsfall 2 varit nödvändiga att genomföra. Dessa förändringar bedöms dock bidra till konservativa resultat med avseende på tiden till skadekriterium uppnått.

Ventilationsöppningar har använts i det nedersta samt översta rummet för att motverka orealistiska tryckkuppbyggnader vid simuleringarna och för att representera de otätheter och läckage som i princip finns i alla byggnader, i synnerhet äldre sådana. Storleken på detta innebär även att branden inte tillåts bli underventilerad eftersom det bidrar med ny tillförsel av syre oavsett hur länge branden pågått. Detta anses vara konservativt, eftersom branden då inte tillåts självslockna. Det finns även osäkerheter kring hur väl modellen hanterar och uppskattar förbränningen och betingade förhållandena vid underventilerade bränder, vilket gör det än mer motiverat inte att inte ta hänsyn till detta (Nystedt, F. & Frantzich, H., 2011).

I resultatet nedan har två ventilationsöppningar om vardera 1 m² i det nedre och det övre rummet använts. Eftersom ventilationsöppningen i det övre rummet kan bidra till att brandgaslagret kyls ner, vilket beror på att varm luft läcker ut, har en redogörelse för detta gjorts i kapitel 6.2.3.

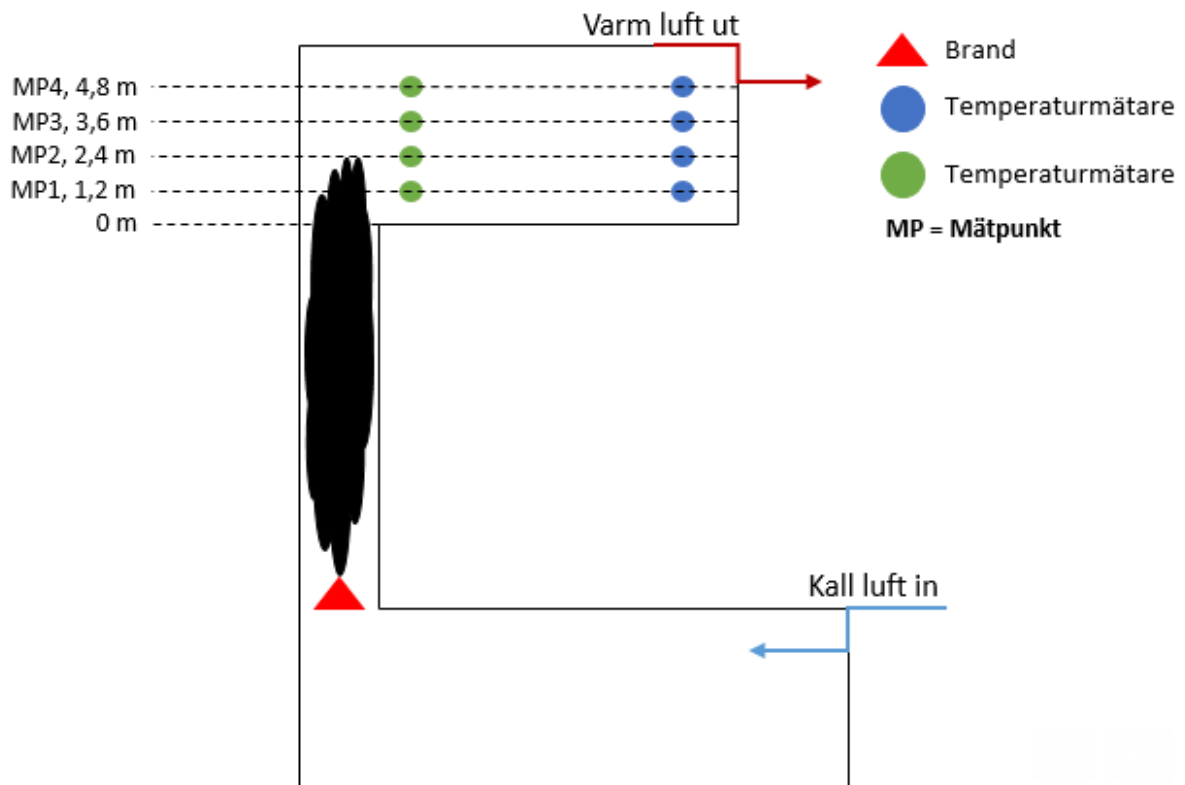
Funktionen SPREAD_RATE har använts i simuleringarna, vilket medför att effektutvecklingskurvan i figur 22 inte ser exakt likadan ut som den i figur 21. Dock är den effektutveckling som genererades i FDS mer konservativ med tanke på att maxeffekt nås efter 700 sekunder till skillnad från 800 sekunder.

Figur 22 visar att maxeffekten för branden uppgår till ca 2400 kW efter drygt 700 sekunder. Det har även antagits att då branden är fullt utvecklad, brinner två hela kabelstegar samtidigt och därefter fortgår förloppet som fullt utvecklad brand i några hundra sekunder. Eftersom det finns knapphändig och osäker information gällande hur vertikala kabelbränder utvecklar sig över en längre sträcka, inte minst i ett schakt, samt hur många kabelstegar respektive kablar som kan förväntas vara inblandade i branden, anses detta vara ett rimligt antagande.



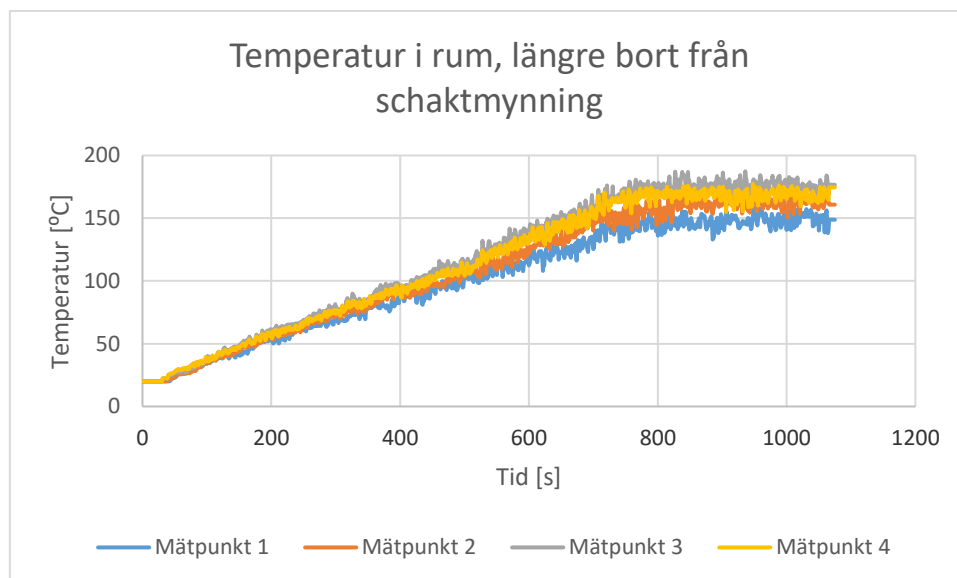
Figur 22. Effektutvecklingskurva för kabelbrand i vertikalt schakt.

I figur 23 visas var termaturmätarna är placerade i det övre rummet. Mät punkt 4 är placerad in den varmaste delen av brandgaserna.



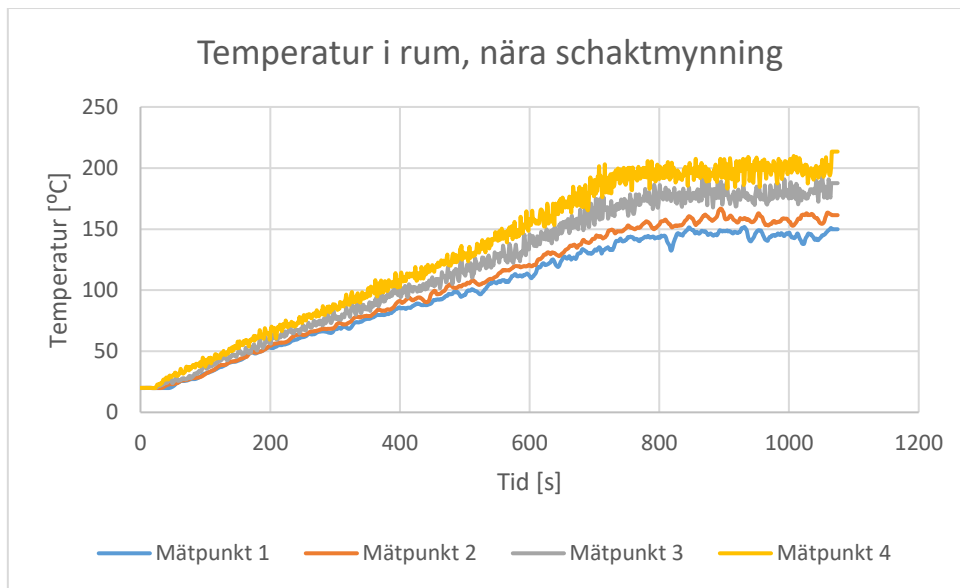
Figur 23 visar placering av temperaturmätare.

I figur 24 erhålls temperatur i brandgaslaget för mät punkter som är placerade längst bort ifrån schaktmyrning (blå temperaturmätare i figur 23).



Figur 24. Temperatur i brandgaslager bort från schaktet.

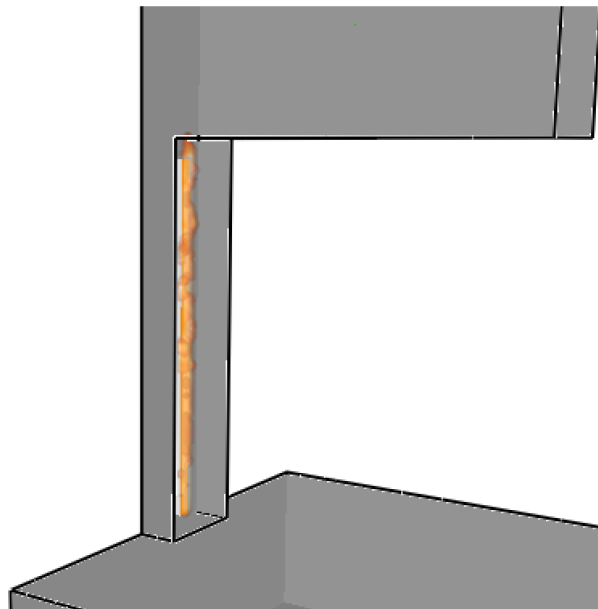
I figur 25 erhålls temperatur i brandgaslaget för mät punkter som är placerade nära schaktmyrning (gröna temperaturmätare i figur 23).



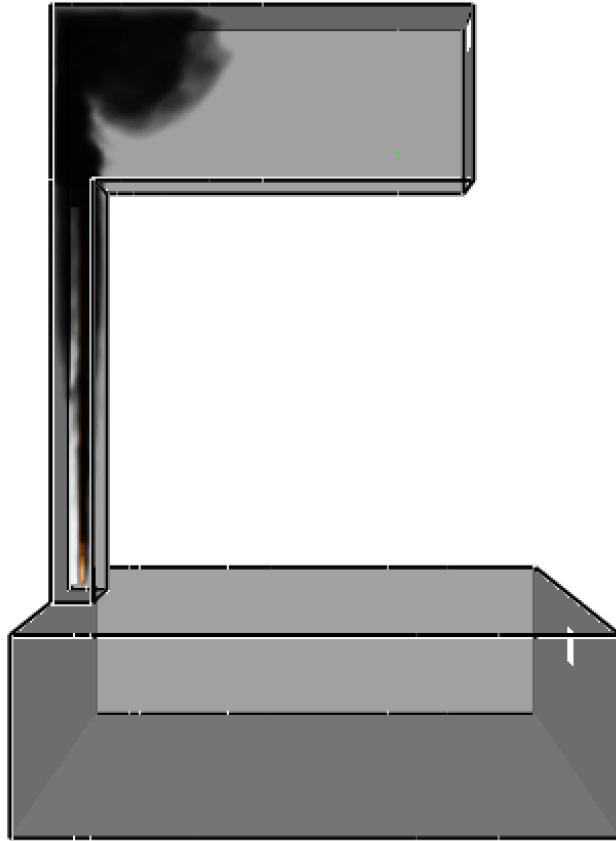
Figur 25. Temperatur i brandgaslager nära schaktets inlopp.

Att brandgastemperaturen är högre närmare schaktöppningen beror troligtvis på att mätpunkterna befinner sig närmre brandkällan, där även brandgaserna har en högre temperatur, till skillnad från mätpunkterna längre bort från schaktet som även befinner sig närmare ventilationsöppningen.

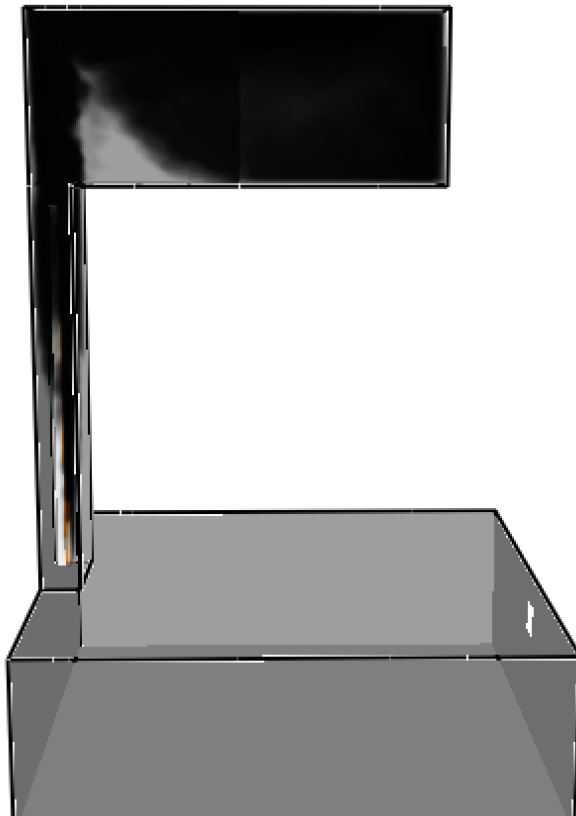
Nedan följer ett antal olika figurer som förhoppningsvis bidrar till en ökad förståelse och insyn över brandförloppet:



Figur 26. Branden har pågått i 800 sekunder och hela kabelstegen brinner.

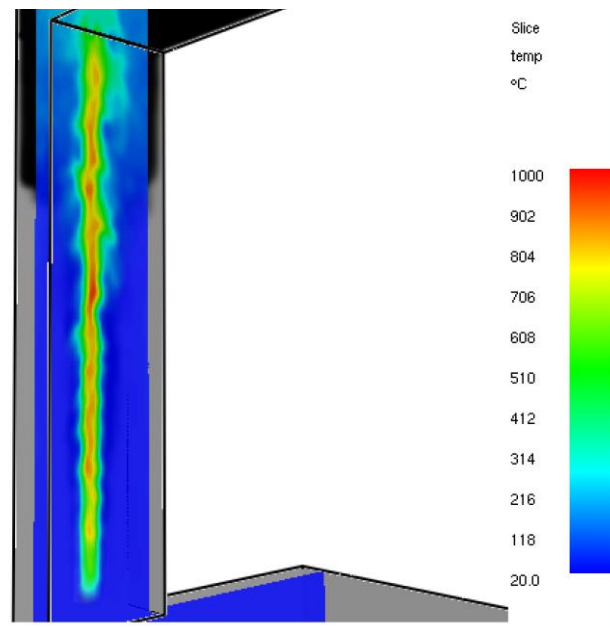


Figur 27. Rökspridning efter 30 sekunder.



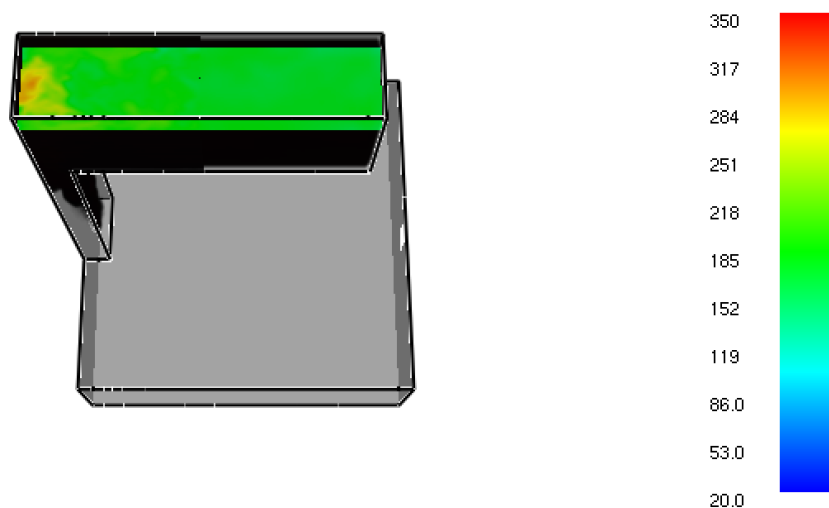
Figur 28. Rökspridning efter 60 sekunder.

I figur 29 uppgår flamtemperaturen till 800-1000 grader efter 1000 sekunder då hela kabelstegen brinner.



Figur 29. Flamtemperatur efter 1000 sekunder.

I figuren nedan är brandgastemperaturen relativt jämnt fördelad runt 200 grader, förutom vissa turbulenta luftströmmar som är upp emot 350 grader varma.



Figur 30. Visar temperaturfördelning i brandgaslagret 1 meter nedanför taket efter 750 sekunder.

Med avseende på ovanstående resultat går det inte att utesluta att Spridningsfall 2 faktiskt kan innebära ett brandspridningsfall från schaktet till det ovan angränsande rummet. Temperaturen överstiger 205 grader, eller befinner sig inom felmarginalen på grund av osäkerheter, vilket är det lägre temperaturkriteriet för kablar (se kapitel 3.5 om skadekriterier). Vidare går det inte heller att utesluta att fler kablar kan förväntas bidra till branden, vilket skulle medföra en ännu högre effektutveckling, och således ännu högre temperaturer vid ett verkligt scenario.

6.2.3 Känslighetsanalys

För att ta höjd för läckage och angränsande dörrar som eventuellt kan tänkas stå öppna, lades två öppningsareor om vardera 1 m² till i det undre och det övre rummet. Detta bidrar dels till att skapa ett drag genom schaktet och håller branden överventilerad, samtidigt som de varma brandgaserna som stigit och spritt sig till det övre rummet tillåts ventileras ut. Vidare motverkar öppningarna en orealistiskt hög tryckupbyggnad.

Eftersom kritisk temperaturnivå uppnås i det övre rummet där kablarna finns, samt att en total öppningsarea om 2 m² må vara i det grövsta laget, görs bedömningen att ingen känslighetsanalys behöver göras med avseende på läckageytorna i simuleringarna.

Hade kritisk temperatur däremot inte uppnåtts skulle det ha varit motiverat att sänka läckageytorna så pass mycket att syresättning är tillräckligt hög för att underhålla fullständig förbränning, vilket i denna analys bör anses vara konservativt. Detta skulle i sin tur rimligen ha bidragit till att temperaturen i det övre brandgaslaget blivit högre, eftersom en mindre del varma gaser tillåts strömma ut, och en mindre del kall luft tillåts strömma in.

6.3 Giltighet av modeller

Nedan presenteras giltigheten av de simuleringsprogram som har använts.

6.3.1 CFAST

För att CFAST-beräkningarna ska anses vara giltiga finns vissa krav som ska uppfyllas vad gäller rumsdimensioner. I Spridningsfall 1 är rummen uppdelade i flera "delrum" för att uppfylla följande villkor som rekommenderas i NUREG-1934 (2012):

$$\frac{L}{H} \text{ eller } \frac{W}{H} = 0,6 - 5,7$$

där

L är längden på rummet [m]

H är höjden på rummet [m]

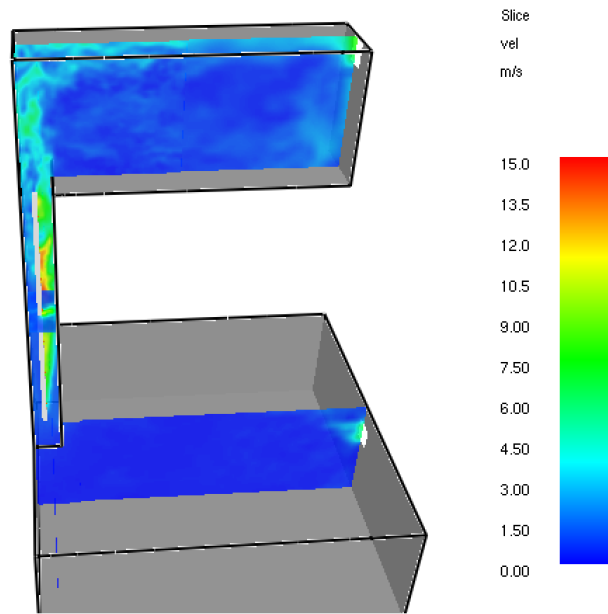
och W är bredden på rummet [m]

I Spridningsfall 1 för brandrummet blir denna kvot 14/4 för L/H och 6/4 för W/H vilka båda uppfyller kraven för giltighet (NUREG-1934, 2012). CFAST har tidigare använts på kärnkraftverk i korridorutrymmen och visat sig kunna prediktera väl, dock med en viss överskattning av temperaturen i rökgaslaget, vilket visat sig kunna vara upp emot 15 % överskattning (Peacock, R-D., K-B., Forney, G-P., Reneke P-A., 2017).

6.3.2 FDS

Strömningshastigheterna i schaktet undersöktes då Nystedt & Frantzich (2010) anger att denna parameter bör understiga 10 m/s, speciellt vid gränser för olika beräkningsdomäner och öppningar till det fria. I figur 31 syns strömningshastigheter vid olika platser i geometrin efter 800 sekunder, där hastigheten uppgår till 15 m/s vid vissa punkter nära flamman.

På grund av den skorstenseffekt som uppstår i schaktet är det inte helt otänkbart att lufthastigheten kan överstiga 10 m/s vid vissa tidpunkter och mindre lokaler. Dessutom är schaktet utfört som en enda mesh, samt att lufthastigheten endast överskrider 10 m/s sporadiskt, vilket medför att beräkningarna ändå generellt bör kunna anses vara giltiga (se figur 31).



Figur 31. Överblick av brandgasernas hastighet efter 800 sekunder

Indata och värden på kvalitetsparametrar för FDS-simuleringarna finns i bilaga D.

7 Diskussion

Nedan presenteras diskussion för de olika delarna av arbetet.

7.1 Metodologi

För att implementera en mer fördjupad och detaljerad brandanalytisk resurs i PSA-studierna krävs det dels experter inom sakområdet men även en god struktur. I den här rapporten beskrivs en metodologi som är effektiv och hanterbar men kan fördjupas ännu mer beroende på tidskravet.

Den metodologi som är framtagen och sedan applicerad i detta arbete presenteras i figur 5 och 6, i kapitel 5. Vad gäller första steget i metodologin där närliggande brandceller tas fram med hjälp av "Attribut", är ansatsen bra då inga spridningsfall väljs bort tidigt i processen. Detta är också ett steg som inte behöver göras om inför varje ny analys och därmed sparas mycket tid inför framtida analyser. En sådan ansats kan göras på alla kärnkraftverk och är inte specifikt för Ringhals. Det bör dock genomföras en kontroll inför varje ny analys att det inte har skett ändringar i anläggningen som gör att rumsdatabasen förändras.

En sak som diskuterades ganska snart efter att anläggningsbesöket genomförts var att det skulle ha varit gynnsamt att utföra ett besök tidigare i processen. Det hade hjälpt att vid ett tidigare skede ha bekantat sig med byggnaderna, som i många fall innehåller komplicerade geometrier med avseende på utrymmen och rumsberoenden, samt kunskap om vilken typ av brännbart material som dominerade, vilket visade sig vara kablar.

Ordningen på screeningparametrarna är diskutabel men samtidigt känns den lämpligt utformad. Härdskadefrekvensen bör styra först för att inte ödsla tid på spridningsfall som inte ger något större bidrag till härdskadefrekvensen. Brandbelastningen var i nästa steg en relevant parameter att använda, dels eftersom det fanns information att hämta för alla rum, och dels för att mängden brännbart material anses ha ett tydligt samband gällande risken och konsekvensen för brand och brandspridning.

Det som generellt blir en konflikt gällande metodologin är tidsaspekten kontra detaljeringsgraden. Visserligen vore det eventuellt möjligt att skapa en slags typ-beroende analys, där rum och utrymmen och deras motpart i spridningsfallet kan delas in i olika kategorier.

I nuläget hanteras brandspridning på ett sätt som antar att allt slås ut i händelse av brand. Detta kan vara för konservativt i vissa fall, och för att göra modellen mer sofistikerad skulle man istället kunna göra en mer detaljerad analys i form av brandmodellering eller handberäkningar, för att se om antagandet om att allt slås ut är korrekt i det enskilda fallet. Återigen krävs en föregående analys av nytta kontra kostnad med avseende på tid.

Genomföringar är en intressant aspekt som borde vara möjlig att implementera i metoden som presenterats i denna rapport. Problematiken ligger dock i hur man i så fall bör gå tillväga; för att kunna göra en screening med avseende på genomföringar måste det även bestämmas vad kriteriet ska vara. Detta kan vara allt ifrån antal genomföringar per vägg, storlek på genomföringarna, typ av tätning eller typ av material som är genomdraget. Det behövs därför troligtvis en vidare utveckling kring detta innan det går att säkerställa att parametern behandlas korrekt.

För att göra modellerna än mer sofistikerade avseende brandspridning krävs det indata som är uppdaterad och en större transparens kring hur brandspridningsfallen screenats fram. Det krävs ett ständigt pågående arbete för att behålla indata uppdaterad.

Osäkerheter gällande screeningprocessen är framförallt kopplad till tillgängliga indata, samt att för att få en så heltäckande bild som möjligt bör all tillgängliga data användas samtidigt som det uppstår en konflikt med avseende på tidsomfattningen av analysen. En viktig aspekt för att få fram indata är att ha goda SBA-rutiner. Ju mer som finns dokumenterat desto enklare blir det att inte screena bort fall för tidigt i processen baserat på dåliga data- och beslutsunderlag, vilket gör att analysens resultat blir mer tillförlitligt.

Det finns också en osäkerhet i vilka parametrar som används när i screening, det vill säga turordningen. Exempelvis så har det valts att värdera brandbelastningen högt, vilket innebär att den parametern screenar bort fall tidigt i processen trots att dessa fall kanske har andra parametrar som är kritiska (gemensam dörr eller gemensam ventilation). Ett sätt att försöka lösa det är att screena på alla parametrar samtidigt och istället generera en mer holistisk bild av spridningsfallet, vilket dock är en svårighet att genomföra rent praktiskt.

Ett sätt att göra analysen bättre är att screena på fler parametrar, exempelvis rumsdimensioner. Problemet med att screena på rumsdimensioner är att det är svårt att veta vilka dimensioner som är mest kritiska. Istället kan tänkas att screeningen sker på takhöjd. Takhöjden är intressant ur aspekten att vid en låg takhöjd kommer rökgaslagret att ligga närmre golvet och återstråla mot branden. När branden återstrålar värms det resterande brännbara materialet upp snabbare, vilket gör att branden får en högre tillväxthastighet.

Vad gäller applicerbarhet av den framtagna metodologin på andra kärnkraftverk än Ringhals anses det vara möjligt. Om metodologin ska vara applicerbar bygger det dock på att kärnkraftverken har liknande dokumentation över härdskadefrekvens, brandceller och dörrar som Ringhals har till sitt förfogande.

Den screening som genomförts med avseende på brandbelastning har bestämt utifrån ett värde om 90 MJ/m². Ett problem med att screena på brandbelastning är att det är svårt att veta hur och var energimängderna är placerade i rummen. Eventuellt kan ett eller flera områden i ett rum ha väldigt hög brandbelastning, medan resterande delar i princip endast består av väggar och golv i betong. Då kan rummet få en väldigt låg brandbelastning, trots att vissa delar av det har en hög mängd brännbart material. Pondera därefter att dessa höga koncentrationer av brännbart material befinner sig nära brandcellsgränser och dylikt. Detta är någonting man bör vara medveten om vid användningen av denna metod och extra hänsyn bör eventuellt tas för att kunna hantera denna osäkerhet.

7.2 Detaljanalys

Vid Spridningsfall 1 effektutvecklingen som beräknas en viktig faktor för brandspridningsrisken. Det finns olika ansatser som kan göras för kabelbränder och för Spridningsfall 1 gjordes den på två olika sätt, eftersom branden kan bete sig på olika sätt. I det andra fallet var tillväxtfasen snabbare och antogs öka med tiden i kvadrat. Detta gjordes för att generera ett snabbare brandförlopp och därmed ta höjd för att tillväxtfasen är snabbare än vad som tidigare predikterats.

Vid Spridningsfall 1 syns det att temperaturen i angränsande brandcell inte når upp till en hög temperatur. En anledning till detta kan vara rummets stora volym och att väggarna tar upp mycket energi.

Vad gäller värmeledning genom vägg kan det konstateras att vägg tjockleken är en faktor som är avgörande för huruvida den angränsande brandcellen uppnår kritiska nivåer eller ej. Eftersom väggen var 0,25 meter bred är risken för brandspridning genom värmeledning minimal. Detta förutsätter dock att väggen är tät och att sprickor eller andra hål ej förekommer i väggen. Det som däremot kan bli ett kritiskt fall är om det görs nya genomföringar mellan brandcellerna som är försvagade eller

inte tillräckligt tätade. Genomföringar ska uppfylla samma krav som väggen i övrigt och upprätthålla sin avskiljande konstruktion (BFS 2011:26).

Då beräkningarna i CFAST är gjorda efter antagandet att dörren mellan brandcellerna står öppen går det att diskutera om analysen är allt för konservativ. Som tidigare nämnts i rapporten bör en välgrundad analys inte bara anta att en dörr eller annan öppning är stängd inom PSA (van Hees et al., 2017). I detta fall finns larm på dörren som även signalerar till kontrollrummet vilket med största sannolikhet innebär att dörren inte står öppen särskilt länge. Tillfället då den skulle kunna stå öppen är under revision, då mycket människor rör sig i lokalerna och vid något tillfälle kanske dörren lämnas öppen i samband med utkoppling eller felfunktion av larmet. En viktig del för att bibehålla skyddet är att batterier på dörrlarm byts ut kontinuerligt och att personal är medvetna om riskerna under revision. Det är dock viktigt att även beakta tillfällena då en fysisk separation bryts, eftersom det i allmänhet screenas bort i PSA (van Hees et al., 2017). Med avseende på detta har Spridningsfall 1 undersökts på basis av en bruten brandcellsgräns, vilket gör analysen mer robust.

Spridningsfall 2 är svårt att studera på grund av den tämligen komplexa geometrin och branden. Analysen visar dock att kritisk temperatur i rummet ovanför schaktet, vilket innebär att nuvarande situation kan behöva åtgärdas. I analysen har det dock inte tagits någon hänsyn till antändningskälla, vilket är något som möjligheterna kring bör utredas först. Det bör även beaktas att spridning i ett vertikalt schakt går väldigt fort, vilket gör att en snabb släckinsats är nödvändig och kan vara tillräcklig för att begränsa omfattningen av branden, vilket även figurerna 18 och 19 visar.

I den här typen av anläggningar är det generellt ganska tätt och komplicerade geometrier. Det är i många fall begränsat med syretillförsel vilket gör att exakta brandberäkningar är svåra att genomföra. I den här rapporten har det antagits maximal tillgång på syre i båda spridningsfallen, vilket betyder att temperaturer rimligen ej har underskattats. Eftersom temperaturen är det som är viktigt med avseende på skadekriterierna, medför detta att beräkningarna bör bekännas vara konservativa. Hänsyn bör däremot tas till eventuell underventilering av brand om utrymningsförhållanden ska undersökas. Vid ett sådant fall kan en större mängd toxiska gaser bildas på grund av ofullständig förbränning, och en maximal syretillförsel hade därmed inte varit konservativt.

7.3 Osäkerheter

Effektutvecklingarna för kabelbränder som använts i beräkningarna inrymmer osäkerheter, vilka dels beror på vilka värden på parametrar som använts och vilka övriga antaganden som gjorts. Blandningen av kablar gör det svårt att bestämma specifika indata gällande exempelvis plastinnehåll, densitet och spridningshastighet. Somliga klassade kablar kan till och med vara självslocknande (NUREG-7010, 2013). Det finns även en osäkerhet i att bestämma mängden kablar som kan antas brinna samtidigt, då en relativt stor andel kabelbuntar är skyddade av plåt.

Det är även svårt att bestämma aktualiteten och giltigheten av de kabelspecifikationer som delvis legat till grund för analyserna. Det finns även risk för att kablar som bytts ut och inte längre är vid användning, på grund av exempelvis ändringar och ombyggnader, har blivit kvarlämnade och således inte längre bör vara registrerade i databasen.

Den största osäkerheten i beräkningarna, som även har stor påverkan på både maxeffekt och tillväxtfasen (vilket åskådliggörs i kapitel 6.1.3) är spridningshastigheten för flammen. Oavsett om det gäller klassade eller oklassade kablar, finns det ändå fog att tro att spridningshastigheten inom den egna kategorin kan variera mycket. Dessutom kan övriga faktorer, som återstrålning från ett

brandgaslager och uppvärmda väggar ha stor påverkan på hastigheten; enligt NUREG-7010 (2013) uppemot en faktor tio.

8 Slutsummering

I arbetet har följande två frågeställningar studerats:

- Hur hanteras brandspridning inom kärnkraft idag, nationellt och internationellt?
- Är det möjligt att införa en metod för att implementera en mer fördjupad och detaljerad brandanalytisk resurs i PSA-studierna och samtidigt göra den effektiv och hanterbar?

Nedan presenteras några av de slutsatser som har kunnat dras i samband med utvecklingen av denna rapport.

- Vid screening av brandspridningsfall måste en avvägning mellan detaljeringsgrad och tidsaspekt göras.
- Metodologin skulle troligtvis gynnas av att även behandla genomföringar som screeningparameter. Åtminstone bör en undersökning av möjligheterna till detta göras med avseende på tillgång på information samt lämpligt tillvägagångssätt.
- Utifrån resultat från detaljanalyser anses risken för brandspridning till angränsande brandcell i Spridningsfall 1 vara låg.
- Utifrån detaljanalyser går det inte att utesluta att Spridningsfall 2 kan medföra brandspridning från schaktet till ovan angränsande rum.

Hur hanteringen av brandspridning görs idag var något som litteraturstudien var menat att ge svar på. Det står dock klart att det inte finns något universellt ramverk för hantering av brandspridning, vilket troligtvis beror på att olika anläggningar har olika förutsättningar och krav. Detta innebär i sin tur att en metod måste kunna vara anpassningsbar för specifika ändamål och omständigheter.

Med hjälp av den framtagna metodologin kunde ett behändigt antal brandspridningsfall screenas fram för vidare analys. Detta innebär att det faktiskt är möjligt att införa en brandanalytisk resurs i PSA-studierna, som är effektiv och hanterbar.

9 Fortsättning på arbete

Eftersom genomföringar i brandcellsgränser inte gavs någon direkt funktion i screeningprocessen, utan endast noterades vid anläggningsbesöken, kan det finnas intresse i att inkorporera dessa som en screeningfaktor och vidareutveckla metodologin som framtagits i samband med detta examensarbete.

Relevanta frågeställningar kan kretsa kring hur många genomföringar i brandcellsgräns som bör agera screeningkriterium, eller om det är storleken eller vad som faktiskt passerar brandcellsgränsen som i så fall bör styra.

Eventuellt kan ytterligare fördjupning göras med avseende på statistik och sannolikhet och istället göra skattningar med hjälp av exempelvis Monte Carlo-simuleringar som behandlar flera parametrar samtidigt, det vill säga storlek, antal och material etc. På så vis skulle ett eventuellt screeningkriterium kunna innefatta flera olika faktorer gällande genomföringars påverkan på en brandcellsgräns integritet.

En annan intressant aspekt är att behandla tillförlitligheten på brandbarriärer och att kvantifiera risken för att en barriär fallerar. Studier har tidigare genomförts i projektet FIREBAN. Ett framtida arbete kan vara att utforma en metodik som tar hänsyn till resultaten från FIREBAN som sedan kan implementeras skarpt på Ringhals.

10 Referenser

- Atreya, A. Convection Heat Transfer. 2016. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. Fifth Edition. National Fire Protection Association. Quincy.
- Berg, H-P. & Röwekamp, M. 2010. Current Status of Fire Risk Assessment for Nuclear Power Plants. Nuclear Power. ISBN: 978-953-307-110-7. InTech.
- Berry, D-L., Minor, E-E. 1979. Nuclear Power Plant Fire Protection - Fire Hazard Analysis. Subsystem Study Task 4. NUREG/CR-0654. SAND79-0324. New Mexico.
- Center for Chemical Process Safety. 2000. Minimal Cut Set Analysis – Appendix D. Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis. Second Edition. American Institute of Chemical Engineers.
- Tien, C. L., Lee, K. Y., Stretton, A. J. 2002. Radiation Heat Transfer. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. Fifth Edition. National Fire Protection Association. Quincy.
- NUREG-6850. 2005. Fire PRA Methodology for Nuclear Power Facilities. Vol 2. U.S. Nuclear Regulatory Commission. Washington DC.
- NUREG-1934. 2012. Nuclear Power Plant Fire Modeling Application Guide (NPP FIRE MAG), Draft Report for Comment, U.S. Nuclear Regulatory Commission. Washington DC.
- NUREG-7010. 2013. Cable Heat Release, Ignition, and Spread in Tray Installations During Fire (CHRISTIFIRE) Phase 1: Horizontal Trays. Vol 1. U.S. Nuclear Regulatory Commission. Gaithersburg.
- NUREG-7010. 2013. Cable Heat Release, Ignition, and Spread in Tray Installations During Fire (CHRISTIFIRE) Phase 2: Vertical Shafts and Corridors. Vol 2. U.S. Nuclear Regulatory Commission. Gaithersburg.
- Energimyndigheten. 2018. Energiläget 2017. <http://www.energimyndigheten.se/aret-2017/nast-hogsta-elproduktionen-nagonsin/>. Hämtad: 2018-09-10.
- Ezekoye, OA. 2016. Conduction of Heat in Solids. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. Fifth Edition. National Fire Protection Association. Quincy.
- Fredholm, L. 2010. Strålsäkerhetsmyndigheten. Översikt av nationell och internationell kravbild avseende brandskydd på kärnkraftverk och hur dessa tillämpas i svensk kärnkraftindustri. Rapport 2010:10.
- Johansson, N., van Hees, P. 2012. En metodik för att utvärdera brandskadescenario på kärnkraftverk. Rapport 3159. Lund.
- Möller, N., Hansson, S-O., Holmberg, J-E., & Rollenhagen, C. 2018. Handbook of Safety Principles. Quantitative Risk Analysis. John Wiley & Sons Inc. Hoboken.
- International Atomic Energy Agency (IAEA). 2001. Applications of probabilistic safety assessment (PSA) for nuclear power plants. IAEA-TECDOC-1200. Vienna.
- International Atomic Energy Agency (IAEA). 1995. Evaluation of Fire Hazard for Analyses Nuclear Power Plants. Safety Series No. 50-P-9. Vienna.
- International Atomic Energy Agency (IAEA). 2004. Experienced gained from fires in nuclear power plants: Lessons Learned. IAEA-TEADOC-1421. Vienna.

International Atomic Energy Agency (IAEA). 1998. Preparation of Fire Hazard Analyses for Nuclear Power Plants. Safety Report Series No. 8. Vienna

International Atomic Energy Agency (IAEA). 2000. Regulatory review of probabilistic safety assessment (PSA) Level 1. IAEA-TECDOC-1135. Vienna.

Isaksson, E. & Olin, F. 2016. Comparative study of risk analysis methods from a fire safety perspective – Case study of new underground facilities at CERN. Rapport 5511. Lunds Tekniska Högskola.

ISO/TS 13447. 2013. Fire safety engineering – Guidance for use of fire zone models. First Edition.

Jones, W.W., Peacock, R-D., Forney, G-P., Reneke P-A. 2005. CFAST – Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport (Version 6) : Technical Reference Guide. NIST Technical Note 1889v1. National Institutes of Standards and Technology.

Justitiedepartementet. 2010. Lag om brandfarliga och explosiva varor. LBE 2010:1011.

Justitiedepartementet. 2003. Lag om skydd mot olyckor. LSO 2003:778.

Karlsson, B. & Quintiere, J-G. 2000. Enclosure Fire Dynamics. Boca Raton Florida. CRC Press LLC.

McGrattan, K., Hostikka, S., McDermott, R., Floyd, J., Weinschenk, C., Overholt, K. 2013. Fire Dynamics Simulator (Version 6) – Technical Reference Guide – Volume 1: Mathematical Model. NIST Special Publication 1018. National Institutes of Standards and Technology. Gaithersburg.

Nexans. 2011. http://www.nexans.se/eservice/Sweden-sv_SE/fileLibrary/Download_540072457/Sweden/files/Brandspridningsklasser_ Hämtad: 2018-11-23.

National Fire Protection Association (NFPA) 805. 2015. Performance-Based Standard for Fire Protection for Light Water Reactor Electric Generating Plants. Technical Committee on Fire Protection for Nuclear Facilities. English Edition.

Nusbaumer, O., Gubler, R., Kompella, D. 2012. Using NUREG/CR-6850 in a Full Scope Fire PSA: Implementation Strategies and Insights Gained.

Nystedt, F. & Frantzich, H. 2011. Kvalitetsmanual för brandtekniska analyser vid svenska kärntekniska anläggningar. Rapport 3160.

OECD. 2004. CSNI Technical Opinion Papers No. 6 PSA-based Event Analysis. ISBN 92-64-02091-8. Nuclear Energy Agency Organization for Economic Co-operation and Development.

Paté-Cornell, Elisabeth. 1996. Uncertainties in risk analysis: Six levels of treatment. Reliability Engineering and System Safety. Department of Industrial Engineering and Engineering Management. Stanford.

Peacock, R-D., McGrattan, K-B., Forney, G-P., Reneke P-A. 2015. CFAST – Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport (Version 7) – Volume 1: Technical Reference Guide. NIST Technical Note 1889v1. National Institutes of Standards and Technology.

Peacock, R-D., Forney, G-P., Reneke P-A. 2015. CFAST – Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport (Version 7) – Volume 3: Verification and Validation Guide. NIST Technical Note 1889v3. National Institutes of Standards and Technology.

RiskSpectrum. 2017. About Risk Analysis. http://www.riskspectrum.com/en/risk/Risk_analyze/ Hämtad: 2018-12-18

- Rockett, J. A., Milke, J. A. 2008. Conduction of Heat in Solids. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. Fourth Edition. National Fire Protection Association. Quincy.
- Ruijters, E., Stoelinga, M. 2015. Fault Tree Analysis: A Survey of the State-of-the-art in Modeling, Analysis and Tools. University of Twente. Computer Science Review. Vol 15-16. pp 29-62.
- Plant, O. Siu, N., Melly, N., Nowlen, S-P., Kazarians, M. 2016. Fire Risk Analysis for Nuclear Power Plants. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. Fifth Edition. National Fire Protection Association. Quincy.
- SSMFS 2008:17. 2008. Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter och allmänna råd om säkerhet i kärntekniska anläggningar. Strålsäkerhetsmyndigheten. Stockholm.
- SSMFS.2018. Vägledning med bakgrund och motiv till Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter (SSMFS 2018:1) om grundläggande bestämmelser för tillståndspliktig verksamhet med joniserande strålning. Diarienummer: 2017-31180.
- Strålsäkerhetsmyndigheten (SSM). 2017. Så fungerar ett kärnkraftverk. <https://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/omraden/karnkraft/sa-fungerar-ett-karnkraftverk/sa-fungerar-en-tryckvattenreaktor/>. Hämtad: 2018-09-04.
- Strålsäkerhetsmyndigheten (SSM). 2017. Förloppet vid en härdsälta. <https://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/omraden/karnkraft/sa-fungerar-ett-karnkraftverk/tillbud-och-haverier/forloppet-vid-en-hardsmalta/> Hämtad: 2018-12-18.
- STUK. 2014. Fire Protection at a Nuclear Facility. GUIDE YVL B.8. ISBN 978-952-309-092-7. Helsinki. Teorimanual. RiskSpectrum. RiskPilot interndokument.
- United States Nuclear Regulatory Commission. 2018. Backgrounder on Fire Protection for Nuclear Power Plants. <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/fire-protection-fs.html>. Hämtad: 2018-09-12.
- van Hees, P., Vallée, J., Hostikka, S., Sikanen, T., Lauridsen, D., Ingermasson, S. 2017. Determination of Fire Barriers Reliability for Fire Risk Assessment of Nuclear Power Plants (FIREBAN) – Report Year 1. Rapport 3205. ISBN 978-87-7893-485-7. Lund.
- Vattenfall. 2018., Oberoende härdkylning, OBH. <https://corporate.vattenfall.se/om-oss/var-verksamhet/var-elproduktion/ringhals/sakerhet/obh/>. Hämtad: 2018-09-10.
- Vattenfall. 2014. Så fungerar kärnkraft. <https://corporate.vattenfall.se/om-energi/el-och-varmeproduktion/karnkraft/sa-fungerar-karnkraft/>. Hämtad: 2018-09-14 .
- Vattenfall. 2017. Fakta om kärnkraft. <https://corporate.vattenfall.se/om-energi/el-och-varmeproduktion/karnkraft/>. Hämtad: 2018-09-17.
- Vattenfall. u.d. http://www.visitringhals.se/content/uploads/2016/04/ringhals_map.jpg. Hämtad: 2018-12-18.
- Voltimum. 2016. Nya standarden för brandklassning av kablar. <https://www.voltimum.se/articles/nya-standarden-brandklassning-av-kablar>. Hämtad: 2018-11-19.

Bilaga A

I denna bilaga presenteras indata till CFAST.

Tabell 5 visar indata till CFAST

Parameter	Enhet	Värde	Referens
Takhöjd	[m]	4	Ritning
Vägg tjocklek	[m]	0,25	Ritning
Densitet	[kg/m ³]	2200	EFD
Termisk konduktivitet	[W/mK]	1,5	EFD
Värmekapacitet	[J/kgK]	880	EFD
Maxeffekt	[kW]	1628	Beräknad

Exempelkod:

Spridningsfall 1

!!

!!Scenario Configuration

!!

TIMES,3600,10,10,10

EAMB,293,101325,0

TAMB,292,101325,0,50

!!

!!Material Properties

!!

MATL,CONCRETE,1.5,880,2200,0.25,1,"Concrete, Normal Weight (6 in)"

!!

!!Compartments

!!

COMP,A,Rum 1,6,14,4,0,0,0,CONCRETE,CONCRETE,CONCRETE,50,50,50

COMP,A,Rum 2,11.5,2,4,6,28,0,CONCRETE,CONCRETE,CONCRETE,50,50,50

COMP,A,Rum 3,6,14,4,0,28,0,CONCRETE,CONCRETE,CONCRETE,50,50,50

COMP,A,Rum 4,29,4,4,6,52,0,CONCRETE,CONCRETE,CONCRETE,50,50,50

COMP,A,Rum 5,23,2,4,6,26,0,CONCRETE,CONCRETE,CONCRETE,50,50,50

COMP,A,Rum 6,29,4,4,6,0,0,CONCRETE,CONCRETE,CONCRETE,50,50,50

COMP,A,Rum 7,11.5,2,4,17.5,28,0,CONCRETE,CONCRETE,CONCRETE,50,50,50

COMPA,Rum 8,11.5,2,4,29,28,0,CONCRETE,CONCRETE,CONCRETE,50,50,50
COMPA,Rum 9,11.5,2,4,40.5,28,0,CONCRETE,CONCRETE,CONCRETE,50,50,50
COMPA,Rum 10,23,2,4,29,26,0,CONCRETE,CONCRETE,CONCRETE,50,50,50
COMPA,Rum 11,6,14,4,0,42,0,CONCRETE,CONCRETE,CONCRETE,50,50,50
COMPA,Rum 12,6,14,4,0,14,0,CONCRETE,CONCRETE,CONCRETE,50,50,50
COMPA,Rum 13,29,4,4,35,0,0,CONCRETE,CONCRETE,CONCRETE,50,50,50
COMPA,Rum 14,29,4,4,35,52,0,CONCRETE,CONCRETE,CONCRETE,50,50,50

!!

!!Vents

!!

HVENT,2,3,1,2,4,0,0,,4,TIME,,,0,1,0,1,0,0
HVENT,4,11,1,4,4,0,0,,4,TIME,,,0,1,0,1,0,0
HVENT,6,1,1,4,4,0,0,,2,TIME,,,0,1,0,1,0,0
HVENT,2,7,1,2,4,0,0,,2,TIME,,,0,1,0,1,0,0
HVENT,5,10,1,2,4,0,0,,2,TIME,,,0,1,0,1,0,0
HVENT,5,12,1,2,4,0,0,,4,TIME,,,0,1,0,1,0,0
HVENT,13,6,1,4,4,0,0,,2,TIME,,,0,1,0,1,0,0
HVENT,7,8,1,2,4,0,0,,2,TIME,,,0,1,0,1,0,0
HVENT,8,9,1,2,4,0,0,,2,TIME,,,0,1,0,1,0,0
HVENT,1,12,1,6,4,0,0,,3,TIME,,,0,1,0,1,0,0
HVENT,3,11,1,6,4,0,0,,3,TIME,,,0,1,0,1,0,0
HVENT,14,4,1,4,4,0,0,,2,TIME,,,0,1,0,1,0,0
HVENT,3,12,1,1,2.2,0,3,,1,TIME,,,0,1,0,1,0,0
VVENT,2,15,1,0.5,2,TIME,,,0,1,0,1,2,1
VVENT,3,15,1,0.5,2,TIME,,,0,1,0,1,2,5

!!

!!Fires

!!

LIMO2,0

!!New Fire

FIRE,3,3,1,2,1,TIME,0,0,0,0,New Fire

Bilaga B

$$E'_{tray} = H_{tray} \cdot W_{tray} \cdot \rho_{cable} \cdot (1 - \delta_{air}) \cdot \delta_{plastic} \cdot \Delta H_c$$

Ekvation 1

där

E'_{tray} är energiinnehållet i varje steg per meter [MJ/m]

H_{tray} är höjden av stegen [m]

ρ_{cable} är densiteten av kabeln [kg/m³]

δ_{air} är fraktionen luft i kabeln [-]

$\delta_{plastic}$ är fraktionen plast i kabeln [-]

ΔH_c är förbränningsvärmens [MJ/kg]

För att beräkna energiinnehållet per meter i varje steg användes ekvation 9. I den här metoden utgår man från densiteten på varje kabel och sedan hur mycket av det som är brännbart och hur mycket som är luft.

$$\dot{Q}_{initial} = l_{initial} \cdot W_{tray} \cdot \dot{Q}''$$

Ekvation 2

där

$\dot{Q}_{initial}$ är effektutvecklingen vid antändning [kW]

$l_{initial}$ är längden på stegen vid antändning [m]

W_{tray} är bredden på stegen [m]

\dot{Q}'' är effektutvecklingen per kvadratmeter [kW/m²]

Sedan räknades hur stor area branden ska i startskedet. Detta görs med hjälp av hur bred stegen är och hur längden av den antända delen av stegen.

$$t\dot{Q}_{max} = \frac{E'_{tray} \cdot l_{initial} \cdot c_{eff}}{60 \cdot \dot{Q}_{initial}}$$

Ekvation 3

där

$t\dot{Q}_{max}$ är tiden för maxeffekt för en steg [kW]

c_{eff} är förbränningskoefficient som i vårt fall är satt till 0,8 [-]

$$\beta = w_f \cdot \dot{Q}'' \cdot v_p$$

β är lutningskoefficient i tillväxtfasen [kW/min]

w_f är bredden på flamfronten [m]

v_p är brandspridningshastighet [m/s]

$$\dot{Q}_{max} = \beta \cdot t\dot{Q}_{max}$$

Ekvation 4

$$\dot{Q}_{total} = \dot{Q}_{max} \cdot S$$

Ekvation 5

där

\dot{Q}_{total} är maxeffekten för alla stegar [kW]

S är antalet stegar [-]

Ekvation 11,12 och 13 användes sedan för att beräkna en maxeffekt. Branden ökar i startskedet med det som kallas 5-4-3-2-1 metoden vilket innebär att första stegen antänder efter 5 med kritisk strålning. I Spridningsfall 1 & 2 är den redan antänd på grund av att det antas att antändning redan skett. Därefter fortsätter steg 2 att antända 4 minuter efter den första, steg 3 antänder 3 minuter efter steg 2, steg 4 antänder 2 minuter efter steg 3 och steg 5 antänder 1 minut efter steg 4. Vid maxeffekt har antagits att lika mycket som antänder även slocknar. (NUREG-6850, 2005)

$$m = m_c \cdot A_{tot} \quad \text{Ekvation 6}$$

$$E_{tot} = H_c \cdot m \quad \text{Ekvation 7}$$

$$t_{\dot{Q}_{max}} = \frac{E_{tot}}{\dot{Q}_{max}} \quad \text{Ekvation 8}$$

För snabb tillväxt.

$$Q = \beta \cdot t^2 \quad \text{Ekvation 9}$$

Indata Effektutveckling Brandspridningsfall 1

Tabell 6 visar indata för beräkningar av effektutveckling.

Parameter	Enhet	Värde	Referens eller motivering
Höjd på kabelstege	[m]	0,05	Ritning
Densitet av kablarna	[kg/m ³]	2500	NUREG-1934
Energiinnehåll	[kJ/kg]	20900	NUREG-1934
Bredd	[m]	0,6	Ritning
$\delta_{plastic}$	[-]	0,5	Isaksson & Olin
δ_{air}	[-]	0,15	Isaksson & Olin
β	[kW/min]	3,3	Beräknad
Brandbelastning per meter	[MJ/m]	666	Beräknad
HRRPUA	[kW/m ²]	150	NUREG-7010 Vol. 1
Spridningshastighet	[mm/s]	0,3	NUREG-6850

Bilaga C

I denna bilaga presenteras ekvationerna som användes vid värmeledning genom vägg.

$$\dot{q}'' = -k\nabla T \quad \text{Ekvation 10}$$

där

\dot{q}'' är värmeflödet per ytenhet

k är termisk konduktivitet

∇T är temperaturgradienten

Ekvationen kallas Fouriers lag och beskriver värmeledning.

ISO-834

$$T = 345 \log_{10}(8t + 1) + T_0 \quad \text{Ekvation 11}$$

där

t är tiden

T_0 är omgivande temperatur

$$T_i = \left(\frac{(h_{varm}(T_f - T_1) - k(T_1 - T_2)/dx)}{\rho c} \right) \frac{dt}{dx} + T_1 \quad \text{Ekvation 12}$$

där

T_i är temperaturen efter ett tidssteg i nod 1.

h_{varm} är värmeöverföringstalet för den varma sidan

T_f är Temperaturen på luften vid den brandutsatta sidan

T_1 är temperaturen i nod 1 på det föregående tidssteget

k är värmeledningstalet

dx är avståndet mellan noderna

dt är tidssteg

ρ är densiteten

c är specifik värmekapacitet

$$T'_i = \frac{k(T_{i+1} - 2T_i + T_{i-1})}{dx^2} \frac{dt}{\rho c} + T_1 \quad \text{Ekvation 13}$$

där

T'_i är temperaturen efter ett tidssteg

T_{i+1} är temperaturen i nod (i+1) i föregående tidssteg

T_i är temperaturen i nod i i föregående tidssteg

T_{i-1} är temperaturen i nod (i-1) i föregående tidssteg

Bilaga D

Tabell 7 visar indata för FDS-simulering.

Indata och kvalitetsparametrar för FDS-simulering	
Parameter	Värde (Motivering)
Spridningshastighet [m/s]	0,015 (NUREG-7010)
HRRPUA [kW/m ²]	250, dock justerat för en kabelstege 545 (Termoplastiska kablar, NUREG-7010)
Antal kabelstegarstegar [-]	2
Ventilationsöppningar, 2 stycken per simulering [m ²]	1 (Resultat) samt 0,35 och 1,5 (Känslighetsanalys)
Kabelstege bredd [m]	0,4
D^* [-]	1,361 (Beräkning)
$D^*/\delta x$ [m ⁻¹]	13,61 (Beräkning)
Q^* [-]	1,00
Väggmaterial	Betong, 0,25 m tjocklek
Förbränningsprodukt	PE/PVC
Förbränningsenergi [MJ/kg]	20900 (NUREG-1934)
Strålningsfraktion	0,49 [NUREG-1934]

Exempelkod:

```
&HEAD CHID='hbyggnad3_1', TITLE='Kabelbrand i schakt - open vent ' /
&TIME T_END=1200/
&DUMP DT_DEVC=1.0/
&MISC SUPPRESSION = .FALSE. /
&MESH ID='1', IJK=20,75,25, XB=11.0, 15.0, 0.0, 15.0, -3.0, 2.0 / 37500
&MESH ID='2', IJK=15,75,25, XB=8.0, 11.0, 0.0, 15.0, -3.0, 2.0 / 28125
&MESH ID='3', IJK=15,75,25, XB=5.0, 8.0, 0.0, 15.0, -3.0, 2.0 / 28125
&MESH ID='4', IJK=15,75,25, XB=2.0, 5.0, 0.0, 15.0, -3.0, 2.0 / 28125
&MESH ID='5', IJK=4,75,25, XB=1.2, 2.0, 0.0, 15.0, -3.0, 2.0 / 7500
&MESH ID='6', IJK=6,150,50, XB=0.6, 1.2, 0.0, 15.0, -3.0, 2.0 / 45000
&MESH ID='7', IJK=6,150,50, XB=0.0, 0.6, 0.0, 15.0, -3.0, 2.0 / 45000
&MESH ID='8', IJK=12,30,120, XB=0.0, 1.2, 6.0, 9.0, 2.0, 14.0 / 43200
&MESH ID='9', IJK=15,30,50, XB=0.0, 1.5, 6.0, 9.0, 14.0, 19.0 / 45000
&MESH ID='10', IJK=15,30,50, XB=1.5, 3.0, 6.0, 9.0, 14.0, 19.0 / 45000
&MESH ID='11', IJK=15,30,50, XB=3.0, 4.5, 6.0, 9.0, 14.0, 19.0 / 45000
&MESH ID='12', IJK=15,30,50, XB=4.5, 6.0, 6.0, 9.0, 14.0, 19.0 / 45000
&MESH ID='13', IJK=30,15,25, XB=6.0, 12.0, 6.0, 9.0, 14.0, 19.0 / 13500
```

```

&VENT ID='Vent down', SURF_ID='OPEN', XB=15.0,15.0,7.0,8.0,0.0,1.0, COLOR='BLUE'/
&VENT ID='Vent up', SURF_ID='OPEN', XB=12.0,12.0,7.0,8.0,18.0,19.0, COLOR='BLUE'/

Brand

&SPEC ID = 'PE/PVC', FORMULA = 'C2H3.5Cl0.5' /
&SPEC ID = 'OXYGEN',      LUMPED_COMPONENT_ONLY = .TRUE. /
&SPEC ID = 'NITROGEN',    LUMPED_COMPONENT_ONLY = .TRUE. /
&SPEC ID = 'HYDROGEN CHLORIDE', LUMPED_COMPONENT_ONLY = .TRUE. /
&SPEC ID = 'WATER VAPOR',  LUMPED_COMPONENT_ONLY = .TRUE. /
&SPEC ID = 'CARBON MONOXIDE', LUMPED_COMPONENT_ONLY = .TRUE. /
&SPEC ID = 'CARBON DIOXIDE', LUMPED_COMPONENT_ONLY = .TRUE. /
&SPEC ID = 'SOOT',        LUMPED_COMPONENT_ONLY = .TRUE., FORMULA='C1' /
&SPEC ID='AIR', BACKGROUND=.TRUE., SPEC_ID(1)='OXYGEN', VOLUME_FRACTION(1)=0.21,
      SPEC_ID(2)='NITROGEN', VOLUME_FRACTION(2)=0.79 /
&SPEC ID='PRODUCTS',      SPEC_ID(1)='HYDROGEN CHLORIDE', VOLUME_FRACTION(1)=0.5,
      SPEC_ID(2)='WATER VAPOR', VOLUME_FRACTION(2)=1.5,
      SPEC_ID(3)='CARBON MONOXIDE', VOLUME_FRACTION(3)=0.2376,
      SPEC_ID(4)='CARBON DIOXIDE', VOLUME_FRACTION(4)=1.2496,
      SPEC_ID(5)='SOOT', VOLUME_FRACTION(5)=0.5128,
      SPEC_ID(6)='NITROGEN', VOLUME_FRACTION(6)=7.9692 /

&REAC ID='PE/PVC',
      HEAT_OF_COMBUSTION = 20900.,
      SPEC_ID_NU='PE/PVC','AIR','PRODUCTS',
      RADIATIVE_FRACTION = 0.49,
      NU=-1,-10.0876,1, /

&RADI RADIATION=.TRUE. /

&OBST ID='TRAY', XB=0.4,0.6,7.2,7.6,2.4,13.4, SURF_ID='TRAY'/

&VENT XB= 0.6,0.6,7.2,7.6,2.4,13.4, XYZ=0.6,7.4,2.4, SPREAD_RATE=0.015, SURF_ID = 'BURNING
CABLE' /

Material

&SURF ID      = 'BURNING CABLE'
      COLOR    = 'ORANGE'

```



```

HRRPUA      = 545. /
&MATL ID='CONCRETE',
    SPECIFIC_HEAT=0.75,
    CONDUCTIVITY=1.6,
    DENSITY=2400.0 /
&MATL ID='STEEL',
    SPECIFIC_HEAT=0.465,
    CONDUCTIVITY=54.0,
    DENSITY=7850.0 /
&SURF ID='WALL',
    COLOR='GRAY 50',
    DEFAULT=.TRUE.,
    MATL_ID='CONCRETE',
    BACKING='EXPOSED',
        LEAK_PATH=1,0,
    THICKNESS=0.25 /
&SURF ID='TRAY',
    COLOR='SILVER',
    MATL_ID='STEEL',
    THICKNESS=0.002 /

```

Outputs

```

&DEVC XYZ=6.0,7.5,15.2 QUANTITY = TEMPERATURE, ID='T1' /
&DEVC XYZ=6.0,7.5,15.8 QUANTITY = TEMPERATURE, ID='T2' /
&DEVC XYZ=6.0,7.5,16.4 QUANTITY = TEMPERATURE, ID='T3' /
&DEVC XYZ=6.0,7.5,17.0 QUANTITY = TEMPERATURE, ID='T4' /
&DEVC XYZ=6.0,7.5,17.6 QUANTITY = TEMPERATURE, ID='T5' /
&DEVC XYZ=6.0,7.5,18.2 QUANTITY = TEMPERATURE, ID='T6' /
&DEVC XYZ=6.0,7.5,18.8 QUANTITY = TEMPERATURE, ID='T7' /
&DEVC XYZ=10.0,8.8,15.2 QUANTITY = TEMPERATURE, ID='T8' /
&DEVC XYZ=10.0,8.8,15.8 QUANTITY = TEMPERATURE, ID='T9' /
&DEVC XYZ=10.0,8.8,16.4 QUANTITY = TEMPERATURE, ID='T10' /

```

&DEVC XYZ=10.0,8.8,17.0 QUANTITY = TEMPERATURE, ID='T11' /

&DEVC XYZ=10.0,8.8,17.6 QUANTITY = TEMPERATURE, ID='T12' /

&DEVC XYZ=10.0,8.8,18.2 QUANTITY = TEMPERATURE, ID='T13' /

&DEVC XYZ=10.0,8.8,18.8 QUANTITY = TEMPERATURE, ID='T14' /

&SLCF PBZ=18.0, QUANTITY = 'TEMPERATURE' /

&SLCF PBX=6.0, QUANTITY = 'TEMPERATURE' /

&SLCF PBY=7.5, QUANTITY = 'TEMPERATURE' /

&SLCF PBX=0.7, QUANTITY = 'TEMPERATURE' /

&SLCF PBY=7.5, QUANTITY = 'VELOCITY' VECTOR =.TRUE. /

&SLCF PBX=0.8, QUANTITY = 'VELOCITY' VECTOR =.TRUE. /

&SLCF PBZ=8.0, QUANTITY = 'VELOCITY' /

&SLCF PBX=0.7,QUANTITY='VOLUME FRACTION' SPEC_ID='OXYGEN' /

&SLCF PBY=8.0,QUANTITY='VOLUME FRACTION' SPEC_ID='OXYGEN' /

&DEVC XYZ=0.8,8.0,8.0, QUANTITY='VOLUME FRACTION', SPEC_ID='OXYGEN', ID='Syre' /

&DEVC XYZ=0.8,8.0,8.0, QUANTITY='PRESSURE', ID='Tryck' /

&TAIL /

Bilaga E

Nedan i Tabell 8 förklaras ingående begrepp, parametrar och funktioner i programmet RiskSpectrum.

Tabell 8 förklarar begrepp i RiskSpectrum.

Element	Betydelse
Felträd	Startar vid topphändelse och bryts ner i olika orsaker/bashändelser.
Toppändelse	Den oönskade händelse, exempelvis brand, som felträdet byggs utifrån.
Bashändelse	Grundfel i ett felträd och kombinationer av dessa är orsaken till att topphändelsen kan inträffa. Är i sin tur uppbyggda av sannolikhetsfördelningar och ev. andra parametrar.
Grind	Operator för det logiska sambandet mellan olika händelser i ett felträd. De samband som främst används i denna rapportens analyser är "Och"- samt "Eller"-grindar (AND/OR).
Attribut	Kvalitativ information som tillhör en bashändelse eller grind. Används för att markera bashändelse och/eller grind som har ett gemensamt kännetecken, exempelvis komponenttyp eller tillverkare.
Parameter	De numeriska värden som används i sannolikhetsmodellerna. I PSA kan det exempelvis vara en punktskattning (vanligtvis medelvärde) av sannolikhet med tillhörande osäkerhetsfördelningar.
Hushändelse	Specialtyp av <i>bashändelse</i> som bara kan anta två värden; SANT eller FALSKT.
Händelseträd	En trädstruktur som börjar vid <i>inledande händelse</i> och sedan beskriver alla möjliga scenarier som kan inträffa på grund av denna inledande händelse.
Inledande händelse	Den händelse eller tillstånd som är startpunkten i ett händelseträd. Det kan exempelvis vara en felfunktion eller störning likt en brand. En inledande händelse kan vara en <i>bashändelse</i> , <i>grind</i> , eller <i>konsekvens</i> ur andra händelseträd.
Funktionshändelse	Händelse som påverkar resultatet av scenarierna i ett händelseträd. Det kan t.ex. vara om en skyddsbarriär klarar påfrestning eller ej. Är uppbyggda av antingen <i>bashändelser</i> eller <i>grindar</i> .
Sekvens	Ett scenario i ett händelseträd. Varje sekvens beskrivs av vilka funktionshändelser som felat och vilka som inte har felat.
Grenpunkt	Varje punkt i ett händelseträd där en <i>sekvens</i> delas upp i två eller fler sekvenser. Varje punkt korresponderar mot en funktionshändelse.

Konsekvens	Slutpunkt för varje sekvens i ett händelsetråd, exempelvis härskada.
------------	--

I tabell 9 presenteras de parametrar som berör tillförlitlighet i de analyser som har gjorts i RiskSpectrum.

Tabell 9 visar parametrar som berör tillförlitlighet i RiskSpectrum.

Parameter	Betydelse
Otillgänglighet av A	Sannolikheten att A felar vid en given tidpunkt.
Medelotillgänglighet av A	Medelvärdet av en tidsperiod då A felar.
Otillförlitlighet av A	Sannolikheten att A felar (åtminstone en gång) under en tidsperiod.
Frekvens av A	Förväntat antal fel av A per tidsenhet.

Det görs även en distinktion mellan reparerbara och oreparerbara komponenter och system. En komponent anses reparerbar om den kan repareras eller ersättas inom tiden som systemet ska fungera. Det motsatta gäller för oreparerbara komponenter. Detta medför att om en komponent inte kan repareras, är otillgängligheten lika med otillförlitligheten (RiskSpectrum, Teorimanual).