



Universitetet
i Stavanger

DET TEKNISK-NATURVITENSKAPELIGE FAKULTET

MASTEROPPGAVE

Studieprogram/spesialisering: Risikostyring	Vårsemesteret, 2014 Åpen
Forfatter: Birgitte Storstein (signatur forfatter)
Fagansvarlig: Roger Flage Veiledere: Bjarne Christian Hagen (Høgskolen Stord/Haugesund) Roger Flage (Universitetet i Stavanger)	
Tittel på masteroppgaven: Usikkerhet knyttet til prediksjon av brannforløp og tilgjengelig rømningstid Engelsk tittel: Uncertainty associated with the prediction of fire development and available safe egress time	
Studiepoeng: 30	
Emneord: Usikkerhet Modellusikkerhet Brannforløp Tilgjengelig rømningstid Brannmodellering Usikkerhetsanalyse t ² -brann	Sidetail: 69 + vedlegg/annet: 12 Stavanger, 16.06.2014 dato/år

Forord

Denne masteroppgaven representerer avslutningen på mitt masterstudium i risikostyring ved Universitetet i Stavanger (UiS). Oppgaven utgjør 30 studiepoeng og er utført våren 2014.

Valget av oppgave falt på ønsket om å kombinere to spennende fagområder: brannsikkerhet og risikostyring. Gjennom denne oppgaven har jeg fått mulighet til å gjøre dette. Oppgaven er skrevet i tilknytning til Høgskolen Stord/Haugesund (HSH) som har svært god fagkunnskap på det brannfaglige området.

Det har vært lærerikt og engasjerende å arbeide med problemstillingen i denne oppgaven, selv om det har vært utfordringer underveis. Jeg sitter igjen med mye ny kunnskap som jeg kan ta med meg i videre karriere.

Jeg ønsker å takke mine to veiledere Bjarne Christian Hagen og Roger Flage for god veiledning og tilbakemelding og for alle ideer og innspill til oppgaven. I tillegg er jeg takknemlig til Høgskolen Stord/Haugesund som har vært imøtekommende og stilt et kontor til disposisjon. Ikke minst så ønsker jeg å takke Siri Herlin Walaker for godt samarbeid og for all hjelp, oppmuntring og glede underveis.

Haugesund, Juni 2014

Birgitte Storstein

Sammendrag

I dagens samfunn stilles det store krav til brannsikkerheten i bygninger. Byggverk må utformes slik at sikkerheten for personer, materielle verdier og miljø- og samfunnsmessige forhold er ivarettatt. Det må dimensjoneres og prosjekteres for det brannforløpet som det forventes at kan forekomme, samtidig som usikkerheten knyttet til hvilket brannforløp som vil forekomme vurderes. Brann er et komplekst fenomen som påvirkes av mange faktorer, som blant annet antennelseskilde og type og mengde brensel. Det gjøres derfor mange forenklinger og antagelser når et brannforløp predikeres. Det finnes ulike modeller som kan benyttes for å predikere brannforløp, men ingen av disse vil kunne gi eksakte prediksjoner av hvordan en brann vil utvikle seg. Dette fører til at det virkelige brannforløpet og den virkelige tilgjengelige rømningstiden kan avvike fra det som predikeres. Det er mye usikkerhet knyttet til hvordan en brann utvikler seg. Innen det brannfaglige feltet er det mangel på metoder for å håndtere usikkerhet.

Det overordnede formålet med denne oppgaven er å vurdere usikkerhet knyttet til prediksjon av brannforløp og tilgjengelig rømningstid.

Det ble utført en sensitivitetsanalyse for å se på hvilke inngangsparametere som påvirker prediksjonen av tilgjengelig rømningstid. I denne ble det antatt at brannens vekstfase kunne beskrives ved t^2 -brannen. Sensitivitetsanalysen viste tydelig at det er vekstfaktoren α som har størst innvirkning på den tilgjengelige rømningstiden. De andre inngangsparametere som ble undersøkt påvirket den tilgjengelige rømningstiden i mindre grad. Plasseringen av brannen påvirket hovedsakelig den tilgjengelige rømningstiden i startbrannrommet når brannen utviklet seg langsomt. Både strålingsandelen og den maksimale energiproduksjonen hadde liten innvirkning på den tilgjengelige rømningstiden i startbrannrommet. Disse inngangsparametere hadde større betydning for tiden til kritiske forhold oppsto i de omkringliggende rommene. Åpninger i brannrommet påvirket ikke den tilgjengelige rømningstiden i startbrannrommet. I de omkringliggende rommene oppsto det ikke kritiske forhold når det ble satt inn større åpningsareal i brannrommet.

I denne rapporten er det presentert en metode for hvordan usikkerhet kan håndteres. Denne metoden ble anvendt på modellen $\dot{Q} = \alpha t^2$ som ofte benyttes for å beskrive brannens vekstfase ved prediksjon av brannforløp. På grunnlag av usikkerhetsanalysen av denne modellen kan en si at t^2 -brannen vil kunne benyttes for å beskrive brannens energiproduksjon og gi prediksjoner med tilstrekkelig nøyaktighet i en tidlig fase av brannforløpet, det vil si når brannens omfang er begrenset til et objekt. Når brannen har spredd seg til omkringliggende objekt bør den brukes med større forsiktighet for å beskrive brannens energiproduksjon.

Rammeverket for å håndtere usikkerhet som er presentert i denne rapporten anbefales brukt ved prediksjon av brannforløp og tilgjengelig rømningstid. Denne metoden evaluerer styrken til bakgrunnskunnskapen og en kan ved hjelp av denne vurdere om usikkerheten knyttet til modellene som benyttes er akseptabel. Denne metoden vil også rette fokus mot hvilke områder kunnskapsgrunnlaget er for dårlig og hvor det dermed er behov for videre forskning slik at det kan utvikles bedre branntekniske modeller.

Innholdsfortegnelse

Forord	I
Sammendrag	II
1 Innledning	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Formål og problemstilling	2
1.3 Avgrensninger	2
1.4 Ordforklaringer og forkortelser	3
1.4.1 Ordforklaringer.....	3
1.4.2 Forkortelser	4
1.5 Rapportstruktur.....	4
2 Teori	5
2.1 Risiko.....	5
2.1.1 Risikoperspektiv	5
2.1.2 Usikkerhet	6
2.1.3 Modell og modellusikkerhet.....	7
2.1.4 Usikkerhetsanalyse og sensitivitetsanalyse	8
2.2 Brann	10
2.2.1 Brannutvikling.....	10
2.2.2 Energiproduksjon	15
2.2.3 Dimensjonerende brann.....	15
2.2.4 t^2 - brann	16
2.2.5 Nødvendig og tilgjengelig rømningstid.....	21
2.2.6 Kritiske forhold	23
2.3 Brannmodellering	25
2.3.1 Generelt	25
2.3.2 To-sonemodell og Argos	26
2.3.3 Argos	27
3 Metode og casebeskrivelse	30
3.1 Metode	30
3.2 Beskrivelse av analyseobjekt.....	30
3.3 Scenario	31
3.3.1 Endre vekstfaktor	32
3.3.2 Endre startbrannsted	33
3.3.3 Endre strålingsandel	33
3.3.4 Endre maksimal energiproduksjon.....	34
3.3.5 Endre på åpninger (ventilasjonsfaktor)	35
4 Resultater	36
4.1 Eksempel på brannforløp.....	36
4.2 Resultat fra sensitivitetsanalysen.....	38
4.2.1 Tilgjengelig rømningstid som funksjon av vekstfaktor (α).....	38
4.2.2 Tilgjengelig rømningstid som funksjon av startbrannsted	40
4.2.3 Tilgjengelig rømningstid som funksjon av strålingsandel	41
4.2.4 Tilgjengelig rømningstid som funksjon av maksimal energiproduksjon	41
4.2.5 Tilgjengelig rømningstid som funksjon av strålingsandel og åpninger	43

4.2.6	Oppsummering av sensitivitetsanalysen	43
5	Usikkerhetsanalyse.....	44
5.1	Modellusikkerhet og brannmodellering.....	44
5.2	Behandling av modellusikkerhet	45
5.2.1	Kvalitativ klassifisering.....	46
5.2.2	Subjektiv sannsynlighet.....	49
5.2.3	Resultat.....	52
6	Diskusjon.....	53
6.1	Generelt - Usikkerhet knyttet til prediksjon av brannforløp og tilgjengelig rømningstid.....	53
6.1.1	Parameter- og modellusikkerhet.....	53
6.1.2	Komplekthetsusikkerhet.....	54
6.2	Tilgjengelig rømningstid	55
6.2.1	Vekstfaktor	55
6.2.2	Startbrannsted.....	55
6.2.3	Strålingsandel	56
6.2.4	Maksimal energiproduksjon	56
6.2.5	Åpninger.....	57
6.3	t^2 -brannen og usikkerhetsanalysen	57
6.3.1	Parameterusikkerhet	57
6.3.2	Strukturell modellusikkerhet	59
6.3.3	Er t^2 -brannen en passende modell?	60
6.3.4	Nytteverdi usikkerhetsanalysen.....	61
6.4	Anbefalinger	62
7	Konklusjon.....	64
8	Videre arbeid	65
9	Referanser	66
10	Vedlegg.....	70
	Vedlegg A – Tilgjengelig rømningstid som funksjon av vekstfaktor	70
	Vedlegg B – Tilgjengelig rømningstid som funksjon av startbrannsted	72
	Vedlegg C – Tilgjengelig rømningstid som funksjon av strålingsandel	76
	Vedlegg D – Tilgjengelig rømningstid som funksjon av maksimal energiproduksjon.....	79

Figurliste

Figur 1: Oppgavens sammenheng med Walaker (2014).....	3
Figur 2: Modell.....	8
Figur 3: Usikkerhetsanalyse	9
Figur 4: Fasene i en brann (Karlsson & Quintiere, 2000).....	10
Figur 5: Branntrekant og -firkant.	11
Figur 6: Energiproduksjon vs. tid basert på Drysdale (2011).	12
Figur 7: Eksempel på en dimensjonerende brann (Karlsson & Quintiere, 2000).	16
Figur 8: Energiproduksjonen ved standard α -verdier.....	17
Figur 9: Vekstfasen til en konstant voksende brann (NFPA, 2012).....	20
Figur 10: Nødvendig og tilgjengelig rømningstid.....	22
Figur 11: To-sonemodell og CFD (Karlsson & Quintiere, 2000).....	25
Figur 12: Plantegning (enhet i mm).	31
Figur 13: Energiproduksjon og varmestråling fra røyklaget i brannrommet.	36
Figur 14: Avstand fra gulvet til røyklaget, temperatur i røyklaget og gjennomsnittlig temperatur i brannrommet.	37
Figur 15: Optisk røyktetthet i rommene.	38
Figur 16: Tilgjengelig rømningstid vs. vekstfaktor ved brannstartsted i hjørne av lokale 1....	39
Figur 17: Sammenligning av tilgjengelig rømningstid når startbrannstedet er i hjørne og midten i lokale 1.....	40
Figur 18: Tilgjengelig rømningstid vs. maksimal energiproduksjon spisesal.....	42
Figur 19: Tilgjengelig rømningstid vs. maksimal energiproduksjon korridor.	42
Figur 20: Stegene i analysen og behandlingen av modellusikkerhet i Bjerga et al. (2014).	46
Figur 21: Tilgjengelig rømningstid som funksjon av $\alpha = 0,003, 0,012, 0,047$ og $0,19 \text{ kW/s}^2$	50
Figur 22: Subjektiv sannsynlighet for modellfeilen Δ_G når $\alpha=0,012 \text{ kW/s}^2$	51
Figur 23: Tilgjengelig rømningstid vs. vekstfaktor ved brannstartsted i hjørne av lokale 1....	71
Figur 24: Sammenligning av tilgjengelig rømningstid når startbrannstedet er i hjørne og midten i lokale 1.....	72
Figur 25: Sammenligning av tilgjengelig rømningstid når startbrannstedet er i hjørne og midten i spisesalen.	73
Figur 26: Sammenligning av tilgjengelig rømningstid når startbrannstedet er i hjørne og midten i lokale 2.....	74
Figur 27: Sammenligning av tilgjengelig rømningstid når startbrannstedet er i hjørne og midten i korridoren.....	75
Figur 28: Tilgjengelig rømningstid vs. strålingsandel lokale 1.....	76
Figur 29: Tilgjengelig rømningstid vs. strålingsandel spisesal.	77
Figur 30: Tilgjengelig rømningstid vs. strålingsandel korridor.	78
Figur 31: Tilgjengelig rømningstid vs. maksimal energiproduksjon lokale 1.	79
Figur 32: Tilgjengelig rømningstid vs. maksimal energiproduksjon spisesal.....	80
Figur 33: Tilgjengelig rømningstid vs. maksimal energiproduksjon korridor.	81

Tabelliste

Tabell 1: α -verdier for ulike vekstrater (Karlsson & Quintiere, 2000; Bwalya, 2008; BSI, 2003).....	17
Tabell 2: Typisk anbefalt vekstfaktor for ulike typer bygninger.	18
Tabell 3: Vekstrate og tilhørende brensel (Bukowski, 2003).....	19
Tabell 4: Romoversikt.....	31
Tabell 5: Scenario for brann i lokale 1.....	32
Tabell 6: Scenario med ulik vekstfaktor.	33
Tabell 7: Forskjellig startbrannsted.....	33
Tabell 8: Scenario med ulik strålingsandel.	34
Tabell 9: Scenario med ulik maksimal energiproduksjon.....	34
Tabell 10: Scenario med endre ventilasjonsfaktor.	35
Tabell 11: Tilgjengelig rømningstid ved endring av vekstfaktor, strålingsandel og åpninger.	43
Tabell 12: Retningslinjer for klassifisering av antagelser (Bjerga et al., 2014, s. 52-53).....	47
Tabell 13: Klassifisering av antagelsene.....	48
Tabell 14: Tilgjengelig rømningstid ved brannstartsted i hjørne lokale 1.	70
Tabell 15: Tilgjengelig rømningstid ved brannstartsted i lokale 1.....	72
Tabell 16: Tilgjengelig rømningstid ved brannstartsted i spisesal.	73
Tabell 17: Tilgjengelig rømningstid ved brannstartsted i lokale 2.....	74
Tabell 18: Tilgjengelig rømningstid ved brannstartsted i korridor.	75
Tabell 19: Tilgjengelig rømningstid i lokale 1 ved ulik strålingsandel.....	76
Tabell 20: Tilgjengelig rømningstid i spisesal ved ulik strålingsandel.....	77
Tabell 21: Tilgjengelig rømningstid i korridor ved ulik strålingsandel.	77
Tabell 22: Tilgjengelig rømningstid i lokale 1 ved ulik maksimal energiproduksjon.	79
Tabell 23: Tilgjengelig rømningstid i spisesal ved ulik maksimal energiproduksjon.....	79
Tabell 24: Tilgjengelig rømningstid i korridor ved ulik maksimal energiproduksjon.....	80

1 Innledning

1.1 Bakgrunn

I dagens samfunn stilles det store krav til brannsikkerheten i bygninger. Byggverk må utformes slik at sikkerheten for personer, materielle verdier og miljø- og samfunnsmessige forhold er ivaretatt (DiBK, 2010). Det er ønskelig å redusere sannsynligheten for at en brann oppstår og å redusere konsekvensene ved en oppstått brann, slik at sannsynligheten for tap av liv reduseres. Veiledning om tekniske krav til byggverk (VTEK10) angir at prosjektering av byggverk enten kan gjøres ved bruk av preaksepterte løsninger eller ved analyse eller en kombinasjon av disse. Det finnes ulike typer analyser som kan benyttes (DiBK, 2010).

Byggverk må dimensjoneres og prosjekteres for det brannforløpet som det forventes at kan forekomme, samtidig som usikkerheten knyttet til hvilket brannforløp som vil forekomme vurderes (DiBK, 2010). Det finnes ulike modeller som kan benyttes for å predikere brannforløp, men ingen av disse vil ifølge Byggforsk (2006) kunne gi eksakte prediksjoner av hvordan en brann vil utvikle seg. Det er knyttet mye usikkerhet til å predikere brannforløp. Dette er en følge av at brann er et fenomen som er vanskelig å predikere på grunn av kompleksiteten i brannens dynamikk (Jahn et al., 2011). Det er mange parametere og faktorer som påvirker en brann og dens utvikling. Hvordan brannutviklingen predikeres avhenger av mange antagelser som gjøres angående hvilket brannforløp som kan forventes (Bwayala, 2008). Som følge av usikkerheten er det vanskelig å forutsi hvordan en brann vil utvikle seg. Forskjellen mellom en prediksjon av et brannforløp og en virkelig framtidig brann kan være stor (Rein et al., 2009).

Når det benyttes modeller kan utgangsverdien fra modellen avvike fra de sanne framtidige verdiene (Aven & Zio, 2013). Det vil både være usikkerhet knyttet til modellens struktur og inngangsparametere. Denne usikkerheten må vurderes, dette kan gjøres i en usikkerhetsanalyse. Innen det brannfaglige feltet er det mangel på metoder for å behandle usikkerhet knyttet til modeller som benyttes og beregninger som gjøres (Notarianni, 2002).

For å ivareta sikkerheten er det viktig at usikkerheten behandles (Notarianni, 2002). Når det skal tas beslutninger angående de branntekniske løsningene må derfor usikkerheten knyttet til predikeringen av brannforløpet tas i betraktning. For å ivareta personsikkerheten predikeres den tilgjengelige rømningstiden som angir hvor lang tid det tar før det oppstår kritiske forhold (Byggforsk, 2006). Den tilgjengelige rømningstiden vil påvirkes av hvordan brannen utvikler seg og prediksjonen av når kritiske forhold vil oppstå gjøres på grunnlag av prediksjonen av brannforløpet. Det er dermed også usikkerhet knyttet til den tilgjengelige rømningstiden og usikkerheten knyttet til den tilgjengelige rømningstiden må også vurderes for å ivareta personsikkerheten.

En av de viktigste størrelsene som benyttes for beskrive en brann er energiproduksjon (Babrauskas og Peacock, 1992). Denne beskriver brannstørrelsen kvantitativt (Babrauskas, 2002). En modell som benyttes for å beskriver brannens vekstfasen er den såkalte t^2 -brannen. Å predikere hvordan en brann vokser, uttrykt ved energiproduksjon, er vanskelig å gjøre nøyaktig (Rein et al. 2009).

Det er altså et behov for å vurdere usikkerheten knyttet til å predikere brannforløp og tilgjengelig rømningstid for å ivareta sikkerheten. Ettersom modellens prediksjoner kan avvike fra de sanne (ukjente) verdiene er det behov for et rammeverk for å analysere modellusikkerhet.

1.2 Formål og problemstilling

Denne oppgaven vil rette fokus på usikkerhet knyttet til å predikere brannforløp og tilgjengelig rømningstid. Usikkerheten knyttet til modellen $\dot{Q} = \alpha t^2$ som benyttes for å predikere brannforløp vil studeres nærmere. Videre vil det bli sett på viktigheten til inngangsparametere som benyttes i brannmodellering. Det er effekten av brannens vekstfaktor, varmestråling, maksimale energiproduksjon og åpninger i brannrommet som vil betraktes. Det konkrete formålet er følgende:

- Identifisere bidragsyttere til usikkerhet ved prediksjon av brannforløp.
- Identifisere og vurdere hvilke parametere som har innvirkning på prediksjon av brannforløp og tilgjengelig rømningstid og hvordan predikert brannforløp og tilgjengelig rømningstid vil påvirkes av valg av inngangsparametere.
- Vurdere hvordan prediksjon av tilgjengelig rømningstid påvirkes av usikkerheten knyttet til modeller og parametere som benyttes for å predikere brannforløp.
- Gjøre en vurdering av usikkerheten knyttet til modellen $\dot{Q} = \alpha t^2$ som benyttes for å beskrive brannstørrelsen til en framtidig brann.
- Gi anbefalinger om hvordan usikkerhet knyttet til brannmodellering kan behandles.

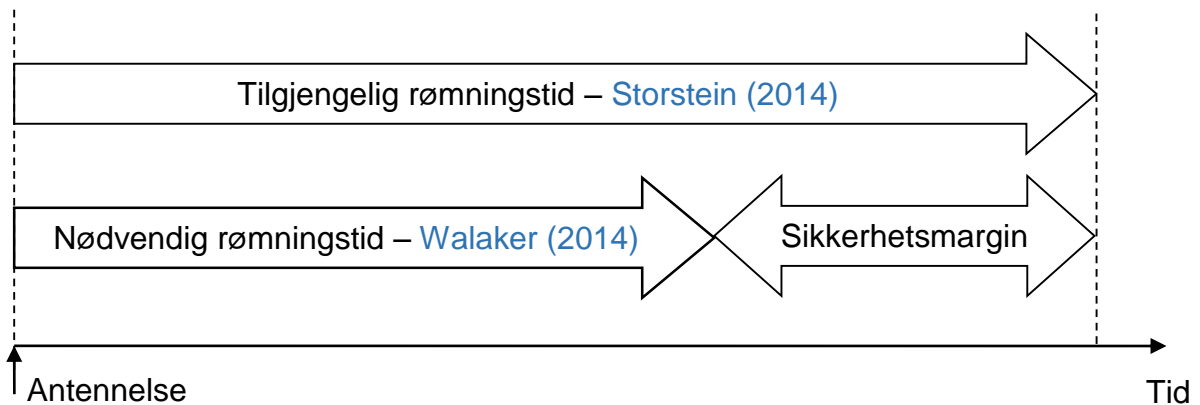
1.3 Avgrensninger

Det er valgt å bruke to-sonemodellen Argos for å predikere brannforløp og tilgjengelig rømningstid. CFD-modeller har ikke vært et alternativ på grunn av den lange simuleringstiden for disse programmene.

Usikkerhetsanalysen avgrenses til å betrakte modellen $\dot{Q} = \alpha t^2$, som benyttes for å beskrive brannens energiproduksjon. Det er usikkerhetsbidraget fra denne modellen til prediksjonen av brannforløp og tilgjengelig rømningstid som vurderes.

Sensitivitetsanalysen avgrenses til å se på effekten til følgende utvalgte inngangsparametere: vekstfaktor, strålingsandel, maksimal energiproduksjon og åpninger.

Denne oppgaven betrakter kun usikkerhet knyttet til prediksjon av brannforløp og tilgjengelig rømningstid, den omfatter ikke prediksjon av nødvendig rømningstid. Oppgaven bør sees i sammenheng med masteroppgaven til Walaker (2014) som omhandler usikkerhet knyttet til prediksjon av nødvendig rømningstid ved brann. Sammenhengen mellom oppgavene illustreres i Figur 1.



Figur 1: Oppgavens sammenheng med Walaker (2014).

1.4 Ordforklaringer og forkortelser

1.4.1 Ordforklaringer

Aleatorisk usikkerhet	Variasjon i utvalg (Paté-Cornell, 1996).
Brannbelastning	Den mengden varme som produseres i et område ved forbrenning av alt det brennbare materialet (Hicks, 2003).
Brannscenario	Kvalitativ beskrivelse av utviklingen til en brann i forhold til tid, hvor viktige forhold mellom antennelse og avsluttet brann angis for den bestemte brannen (Standard Norge, 2012).
Dimensjonerende brannscenario	Det brannscenarioet som danner grunnlag for en brannteknisk analyse av brannsikkerheten (Bwayala, 2008).
Dimensjonerende brann	Kvantitativ beskrivelse av brannutviklingen til et bestemt brannscenario (Staffansson, 2010).
Energiproduksjon	Mengden energi som produseres per tidsenhet under forbrenningsprosessen (Babrauskas, 2002).
Epistemisk usikkerhet	Mangel på kunnskap (Paté-Cornell, 1996).
Modell	Representasjon av et system (Parry, 1996).
Modellfeil	Forskjellen mellom verdiene modellen predikerer og de sanne verdiene til størrelsene av interesse (Aven & Zio, 2013).
Modellusikkerhet	Usikkerhet om verdien til modellfeilen, dvs. forskjellen mellom verdiene modellen predikerer og de sanne verdiene til størrelsene av interesse (Aven & Zio, 2013).
Nødvendig rømningstid	Tiden fra en brann starter til bygget er evakuert, dvs. alle personene er på sikkert sted (Byggforsk, 2006).

Parameterusikkerhet	Usikkerhet knyttet til den sanne verdien til en parameter X (Bedford & Cooke, 2001).
Risiko	"Den todimensjonale kombinasjonen av (i) hendelser A og konsekvensene av disse hendelsene C, og (ii) tilhørende usikkerhet U" (Aven, 2010, s. 227).
Strukturell modellusikkerhet	Usikkerhet om verdien til modellfeilen når inngangsparameterens sanne verdi er kjent (Aven & Zio, 2013).
Tilgjengelig rømningstid	Tiden det tar fra en brann starter til kritiske forhold oppstår (Byggforsk, 2006).

1.4.2 Forkortelser

BSI	British Standards Institution
CFD	Computational Fluid Dynamics
DBI	Dansk brand- og sikringsteknisk institut
DiBK	Direktoratet for byggkvalitet
NBS	National Bureau of Standards
NFPA	National Fire Protection Association
SFPE	Society of Fire Protection Engineers
TEK10	Teknisk forskrift
VTEK10	Veiledning til teknisk forskrift

1.5 Rapportstruktur

Denne rapporten er strukturert på følgende måte. I kapittel 1 introduseres bakgrunnen og formålet med oppgaven. I tillegg angis det hvilke avgrensninger som er gjort og det gis en oversikt over definisjoner og forkortelser.

Etter den introduserende delen følger det en teoridel i kapittel 2. Denne inneholder relevant teori om usikkerhet og brann. I tillegg er det en del som omhandler brannmodellering med en kort presentasjon av to-sonemodeller og Argos som benyttes i denne rapporten.

I kapittel 3 gis det en beskrivelse av casen som er benyttet i denne rapporten og scenarioene som er simulert. Videre presenteres resultatene fra simuleringene i kapittel 4. Deretter presenteres usikkerhetsanalysen som er utført i kapittel 5. Etter dette følger det en diskusjon av oppgavens resultater og funn i kapittel 6. Til slutt gis konklusjonen i kapittel 7 og forslag til videre arbeid i kapittel 8.

2 Teori

Dette kapitlet beskriver det teoretiske grunnlaget for oppgaven og er delt inn i to hoveddeler. Den første delen omhandler risiko og usikkerhet, mens den andre delen omhandler brann og begreper som benyttes i tilknytning til brannmodellering.

2.1 Risiko

I dette kapitlet vil risiko defineres og beskrives. Videre vil ulike typer usikkerhet presenteres og det vil gis en introduksjon av modell og modellusikkerhet. Til slutt presenteres et rammeverk for å behandle usikkerhet.

2.1.1 Risikoperspektiv

Risiko er et begrep som benyttes i mange sammenhenger (Leitch, 2010). Det eksisterer mange definisjoner på risiko (Haimes, 2009). Aven (2012) gir en oversikt over en del av definisjonene som benyttes. Blant annet så defineres risiko i noen sammenhenger basert på sannsynligheter og forventede verdier, mens i andre tilfeller ved konsekvens og usikkerhet. Som følge av den store variasjonen av risikodefinsjoner er det viktig i en gitt setting å ha en klar forståelse for hva risiko er. Definisjonen på risiko i Aven (2010, s. 227) legges til grunn for denne oppgaven. Her defineres risiko som

"den todimensjonale kombinasjonen av (i) hendelser A og konsekvensene av disse hendelsene C, og (ii) tilhørende usikkerhet U (om A vil inntreffe og hva C vil være)."

A er de framtidige hendelsene som vil inntreffe som følge av aktiviteten som vurderes. Ved å benytte denne definisjonen kan risiko uttrykkes som Risiko = (A, C, U) eller forenklet kan en skrive Risiko = (C, U). I den siste vil hendelsene A være inkludert i C.

Risiko knyttet til en aktivitet kan beskrives ved ulike komponenter. Aven og Krohn (2014) beskriver risiko ved (C', Q, K), hvor C' er spesifiserte hendelser/konsekvenser, Q er en beskrivelse av usikkerhet om C' og K er bakgrunnskunnskapen som Q og C' er basert på. Som følge av at de framtidige hendelsene/konsekvensene C ikke er kjent må et sett hendelser/konsekvenser C' identifiseres som beskriver hva en tror kan skje i framtiden. C' er altså en spesifisering av hvilke hendelser en tror kan inntreffe og av observerbare størrelser som karakteriserer C, for eksempel C' = antall omkomne. Usikkerheten om C' beskrives ved Q. Det finnes ulike verktøy som kan benyttes for å beskrive usikkerheten. Sannsynlighet P benyttes ofte, men det finnes også andre metoder. Bakgrunnskunnskap K kan for eksempel være antagelser som er gjort eller modeller som er brukt. Denne definisjonen og beskrivelsen av risiko refereres til som (A,C,U)-perspektivet.

For å beskrive risiko gjennomføres det risikoanalyser. En risikoanalyse utføres hovedsakelig for å gi støtte ved beslutningstaking. For å kunne gi beslutningsstøtte må risikoanalysen gi et informativt risikobilde, som er målsettingen med en risikoanalyse (Aven, 2008).

2.1.2 Usikkerhet

Hovedkomponenten i (A,C,U)-perspektivet er usikkerhet. Det er usikkerhet knyttet til hvilke hendelser og konsekvenser som vil skje i framtiden. Analytikeren vil gjennom risikoanalysen beskrive sin usikkerhet om hva som vil skje (Aven, 2010). Usikkerheten kan oppstå som følge av ulike årsaker, for eksempel som følge av mangel på kunnskap, og det kan skilles mellom ulike typer usikkerhet. Bedford og Cooke (2001) skiller mellom følgende typer usikkerhet:

- Aleatorisk usikkerhet
- Epistemisk usikkerhet
 - Parameterusikkerhet
 - Modellusikkerhet

NRC (2009) deler også inn i de samme typer usikkerhet, men inkluderer i tillegg kompletthetsusikkerhet som også er en type epistemisk usikkerhet.

Aleatorisk og epistemisk usikkerhet

Når usikkerhet vurderes skiller det ofte mellom aleatorisk og epistemisk usikkerhet (Paté-Cornell, 1996). Det er ifølge Bedford og Cooke (2001) disse to typene av usikkerhet som brukes mest. Aleatorisk og epistemisk usikkerhet defineres av Aven (2010, s. 145) som:

Aleatorisk usikkerhet: variasjon i utfall eller populasjon (også referert til som stokastisk usikkerhet eller tilfeldighet).

Epistemisk usikkerhet: mangel på kunnskap om fundamentale fenomen.

Epistemisk usikkerhet kan reduseres fordi den er et resultat av manglende kunnskap om fenomenet som vurderes. Analytikeren kan tilegne seg mer kunnskap og få bedre forståelse for fenomenet slik at den epistemiske usikkerheten reduseres. Den epistemiske usikkerheten er altså knyttet til analytikeren. Aleatorisk usikkerhet på den andre side kan ikke reduseres. Denne usikkerheten oppstår som følge av tilfeldige variasjoner i et system og kan sies å være en egenskap ved systemet og kan dermed ikke reduseres. Aleatorisk usikkerhet omtales ofte som tilfeldighet eller stokastisk usikkerhet.

Både aleatorisk og epistemisk usikkerhet kan kvantifiseres. Målinger og statistiske estimat eller ekspertvurderinger kan benyttes for å kvantifisere aleatorisk usikkerhet, mens eksperter kan benyttes for å kvantifisere epistemisk usikkerhet (Bedford & Cooke, 2001). Et mål på epistemisk usikkerhet er subjektiv sannsynlighet (Aven et al., 2014)

Parameterusikkerhet og modellusikkerhet

Parameterusikkerhet og modellusikkerhet kan betraktes som undergrupper av epistemisk usikkerhet (NRC, 2009). Det er usikkerhet som oppstår som følge av mangel på kunnskap. Modeller benyttes for å gi prediksjoner om framtidige størrelser. Noen modeller vil gi gode prediksjoner, mens andre vil gi mindre gode. Det vitenskapelige grunnlaget som modellen er basert på, vil ha betydning for hvor gode prediksjoner modellen vil gi (Bedford & Cooke, 2001).

Når en matematisk modell benyttes for å predikere en framtidig størrelse vil det gjøres antagelser om hvilken verdi parameterne i modellen vil ha. Parameterens sanne verdi vil ikke være kjent og det vil derfor være usikkerhet knyttet til verdien til parameteren (Bedford & Cooke, 2001).

I kapittel 2.1.3 går det nærmere inn på modellusikkerhet og parameterusikkerhet.

Komplekthetsusikkerhet

Komplekthetsusikkerhet er epistemisk usikkerhet og er en underkategori av modellusikkerhet (Reinert og Apostolakis, 2006). Når det utføres en risikoanalyse må usikkerheten identifiseres. Noen typer usikkerhet er kjente og vil være lettere å identifisere, mens andre typer usikkerhet er ukjente og vil dermed ikke kunne identifiseres. Noen ganger inkluderes ikke usikkerheten i risikoanalysen selv om den er kjent og identifisert. I andre tilfeller er ikke usikkerheten inkludert i analysen som følge av at den er fullstendig ukjent. Begge disse typene usikkerhet relateres til som komplekthetsusikkerhet (NRC, 2009). Den usikkerheten som er fullstendig ukjent refereres også til som *unknown unknowns* (Reinert & Apostolakis, 2006). Som følge av at denne usikkerheten ikke er kjent og identifisert vil det ikke være mulig å kvantifisere den (Reinert & Apostolakis, 2006).

2.1.3 Modell og modellusikkerhet

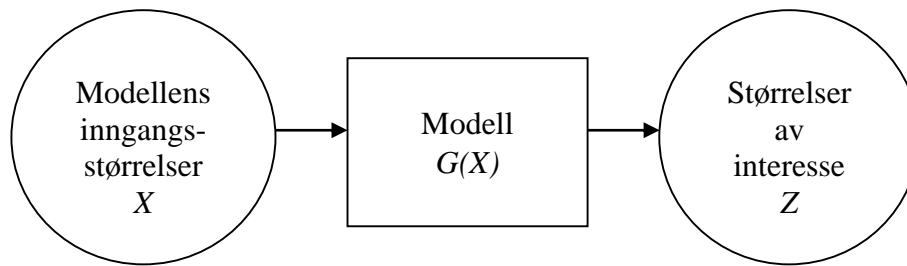
Presentasjonen i dette kapitlet er i stor grad og hvor ikke annet er angitt basert på Aven og Zio (2013).

Modeller benyttes generelt for å beskrive verden, det vil si de representerer systemet som vurderes (Parry, 1996). De fenomen, hendelser og systemer som studeres er ofte komplekse og det benyttes modeller for å beskrive disse. Som følge av kompleksiteten vil modellene representerer en forenklet beskrivelse av virkelige system (Nilsen & Aven, 2003). Når det utføres risikovurderinger anvendes ofte modeller. Disse modellene gjør det mulig å predikere framtidige størrelser, men det vil være epistemisk usikkerhet knyttet til modellen og dens prediksjoner som følge av at modellene er en tilnærming til virkeligheten (Parry, 1996).

Ettersom det er usikkerhet knyttet til de faktiske framtidige hendelsene og konsekvensene kan modellens utgangsverdier være forskjellige fra de som vil forekomme i framtiden. Det vil være usikkerhet knyttet til modellens utgangsverdier i forhold til framtidig utfall. Denne modellusikkerheten er epistemisk og kan defineres som (Aven & Zio, 2013, s 476):

Usikkerheten knyttet til forskjellen mellom modellens utgangsverdier og de sanne verdiene til de størrelsene som er av interesse for risikovurderingen.

Utgangsverdiene fra en modell $G(X)$ er avhengig av både funksjonen G og av modellens inngangsparametere X , som illustrert i Figur 2. Den sanne framtidige verdien til Z kan avvike fra prediksjonen som modellen $G(X)$ gir. Denne forskjellen kalles modellfeil og kan betegnes $\Delta_G(X)$. Modellfeilen kan da uttrykkes som $\Delta_G(X) = G(X) - Z$. Modellusikkerhet referer til usikkerhet knyttet til verdien til modellfeilen. Modellfeil og modellusikkerhet er altså ikke det samme.



Figur 2: Modell.

Det er en kombinasjon av strukturell modellusikkerhet og parameterusikkerhet som bidrar til usikkerhet knyttet til utgangsverdiene fra en modell. Disse defineres i Aven og Zio (2013, s. 477) som:

Strukturell modellusikkerhet: Usikkerhet om forskjellen $\Delta_G(X_{true})$, når den sanne verdien X_{true} til inngangsstørrelsen X er kjent.

Parameterusikkerhet: Usikkerhet om den sanne verdien til inngangsparameterne X .

Når det gjelder strukturell modellusikkerhet så er det modellens struktur G som bidrar til all usikkerhet, i og med at usikkerheten knyttet til inngangsparameterne X kan ignoreres som følge av at det antas at X -ene er kjent. Dermed er det usikkerheten (mangelen på kunnskap) om modellfeilen som uttrykkes. Parameterusikkerheten oppstår som følge av mangel på kunnskap.

Når en modell utvikles for å beskrive et fenomen er modellen avhengig av forståelsen av fenomenet og det må tas hensyn til påvirkning fra andre fenomen. Usikkerhet som følge av manglende kunnskap kan føre til at det gjøres antagelser som er feilaktige. Dette vil få konsekvenser for modellstrukturen og føre til strukturell modellusikkerhet.

For å kunne utvikle en modell må det ofte gjøres tilnærminger og forenklinger av fenomenet. Dette vil også være en kilde til strukturell modellusikkerhet. Videre introduseres usikkerhet når disse modellene benyttes i databeregningsprogrammer.

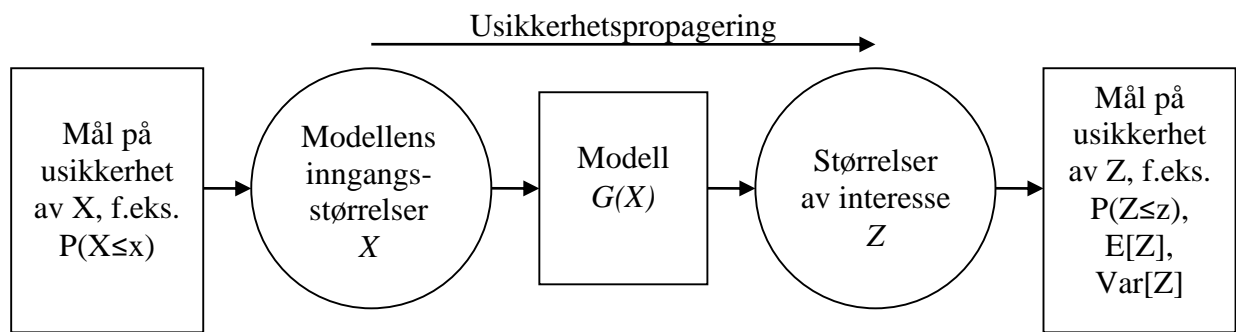
Modellusikkerhet kan uttrykkes ved sannsynlighet. Loven for total sannsynlighet kan benyttes:

$$P(\Delta_G(X) \leq z) = \int P(G(x) - Z \leq z | X = x) dH(x) \quad (1)$$

hvor H er sannsynlighetsfordelingen til X .

2.1.4 Usikkerhetsanalyse og sensitivitetsanalyse

Når det er usikkerhet knyttet til parametere og modeller som benyttes i en analyse vil det føre til usikkerhet knyttet til analysens resultat (Aven et al., 2014). Denne usikkerheten kan vurderes ved å utføre en usikkerhetsanalyse. I en usikkerhetsanalyse av Z må både usikkerhet knyttet til inngangsparameterne X og modellen $G(X)$ som benyttes for å predikere Z vurderes (Aven et al., 2014). Et rammeverk for usikkerhetsanalyse vises i Figur 3.



Figur 3: Usikkerhetsanalyse

En usikkerhetsanalyse er forskjellig fra en sensitivitetsanalyse. En sensitivitetsanalyse er rettet mot inngangsparameterne og utføres for å gjøre en individuell vurdering av hvor viktige de er (Bedford & Cooke, 2001). Gjennom en sensitivitetsanalyse vil det vises hvor sensitivt resultatet er overfor endringer i inngangsparameterne. De gir en indikasjon på hva en endring i inngangsstørrelsene vil ha å si (Aven et al., 2014). Dersom for eksempel inngangsparameterne som benyttes er usikre vil sensitivitetsanalysen vise om en endring av disse vil påvirke resultatet.

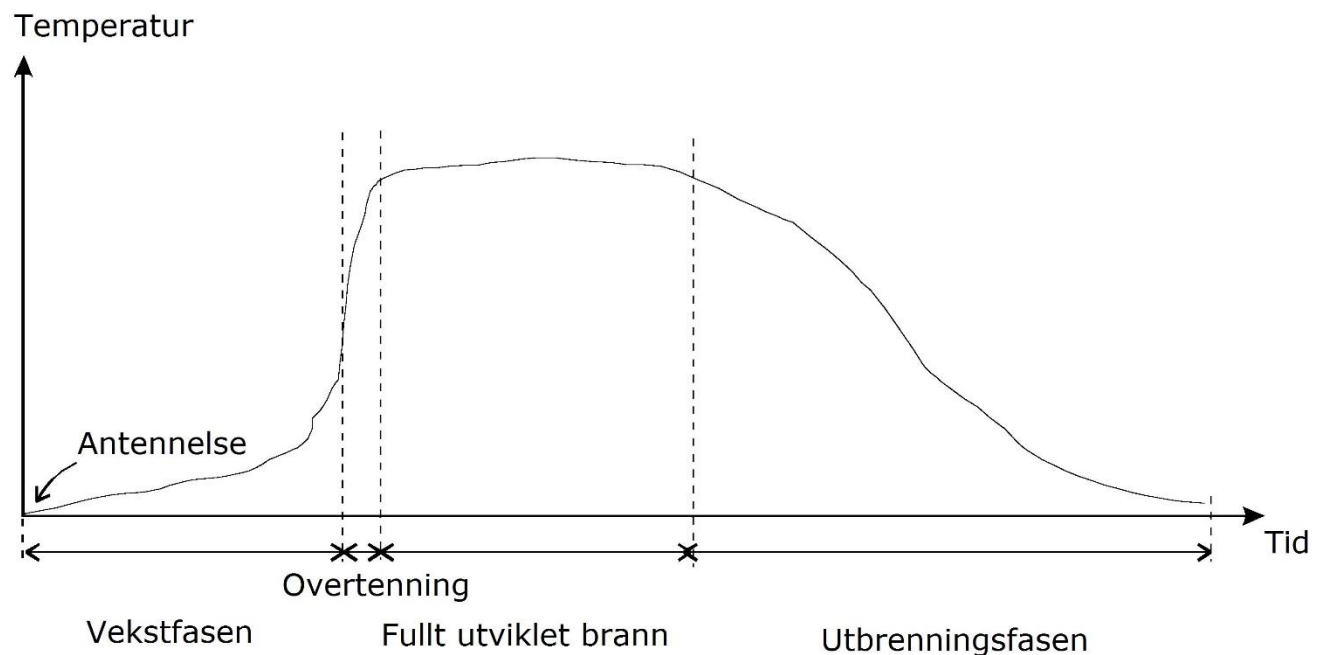
2.2 Brann

I dette kapitlet beskrives det hvordan en brann utvikler seg og hvilke faser en brann består av. Deretter gis det en kort beskrivelse av energiproduksjon som er den viktigste parameteren som benyttes for å beskrive en brann. Videre introduseres det hva en dimensjonerende brann er og det gis en beskrivelse av t^2 -brannen som benyttes for å beskrive brannstørrelsen. Til slutt er det en del som presenterer viktige begreper i forbindelse med rømningssikkerhet.

2.2.1 Brannutvikling

Det er mange måter en brann kan utvikle seg på. Dette kommer av at brann er et komplekst fenomen som påvirkes av mange faktorer (Jahn et al., 2011). En konsekvens av dette er at det er vanskelig å si hvordan en framtidig brann vil utvikle seg. Ifølge Karlsson og Quintiere (2000) er det rommets geometri, ventilasjon, type og mengde brensel og overflateareal som er de faktorene som hovedsakelig påvirker brannutviklingen.

En brann i et rom deles vanligvis inn i ulike faser. Karlsson og Quintiere (2000) skiller mellom når en brann antenner, vokser, overtenner, er fullt utviklet og brenner ut. En brann kan da deles inn i følgende faser: antennelsesfasen, vekstfasen, overtenning, fullt utviklet brann og utbrenningsfasen, som illustrert i Figur 4.



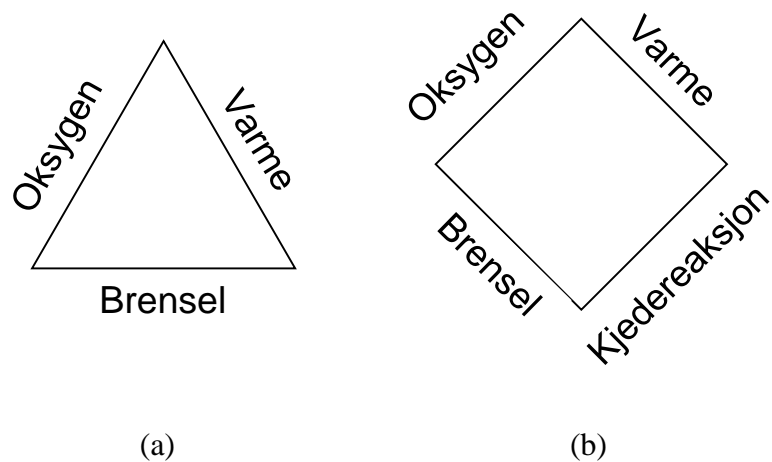
Figur 4: Fasene i en brann (Karlsson & Quintiere, 2000).

I en brann er det flere størrelser som vil endre seg med tiden, blant annet temperaturen. Figur 4 viser den hvordan temperaturen varierer når en brann utvikler seg fritt. Det vil si at det ikke er satt inn noen tiltak for å kontrollere brannen, som for eksempel et sprinkleranlegg.

Antennelse

Det er tre elementer som må være tilstede for at antennelse skal kunne skje. Det er brensel, oksygen og varme (NFPA & SFPE, 2000). Dette illustreres ofte ved en branntrekant, se Figur 5a. Det er i tillegg et element til som må inkluderes for at antennelse skal kunne forekomme og

det er kjedereaksjoner (Hagen, 2004). For å inkludere dette elementet utvides branntrekanten til en brannfirkant, se Figur 5b.



Figur 5: Branntrekant og -firkant.

Under antennelsesprosessen vil det forekomme en eksotermisk reaksjon (Karlsson & Quintiere, 2000). Det vil si at det produseres mer varme enn det som avgis og det vil da forekomme en temperaturøkning utover omgivelsestemperaturen. Når temperaturen har økt tilstrekkelig vil det oppstå antennelse av brennbart materiale.

Antennelse kan oppstå med eller uten tilstedeværelse av tennkilde. Karlsson & Quintiere (2000) angir at tilstedeværelse av en tennkilde er det som oftest fører til antennelse. Det kan være alt fra en gnist med lav energi til en tennkilde med en stor flamme, men spontanantennelse eller selvantennelse kan også gi antennelse. Hvor raskt brannen etableres og vokser avhenger av energien til antennelseskilden. Dersom energien er lav kan det ta lang tid før det oppstår flammer i forhold til om energien er større. Etter antennelse følger forbrenningsprosessen og det vil enten oppstå en flammebrann eller en ulmebrann.

Det sies ofte at det tar sekunder for en brann å spre seg oppover, minutter bortover og timer nedover. Vekstraten til en brann er altså avhengig av plasseringen til tennkilden i forhold til brenselet.

Vekstfasen

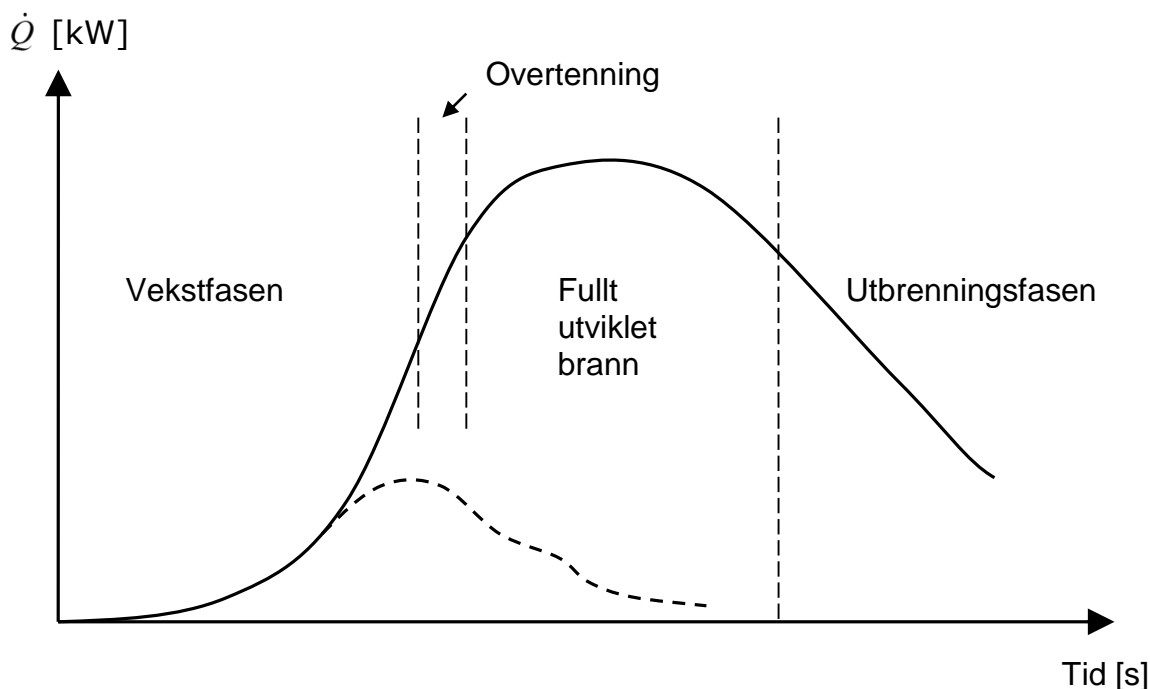
Etter at antennelse har funnet sted vil en brann utvikle seg videre. Brannutviklingen vil avhenge av tilgangen på brensel og oksygen. Ifølge Drysdale (2011) kan en brann ha tre mulige utfall. Disse er avhengige av om det er:

- I. *Begrenset brenselstilgang*: Om dette er tilfelle kan brannen slokke av seg selv. Dette kan f.eks. skje dersom startbrannstedet ikke er omgitt av andre brennbare materialer. Som illustrert av den stiplede kurven i Figur 6.
- II. *Begrenset lufttilgang*: Utilstrekkelig ventilasjon i brannrommet kan enten føre til at brannen slokker eller at den fortsetter, men da ved en lav forbrenningshastighet som er

regulert av mengden tilgjengelige oksygen i rommet. Det siste kan resultere i en backdraft (se forklaring under).

- III. *God tilgang på luft og brensel:* I dette tilfellet kan brannen utvikle seg til en fullt utviklet brann hvor brannen har spredt seg til å omfatte alle brennbare overflater.

En backdraft beskrives av blant annet Hagen (2004). Det er en type brann som kan oppstå i et underventilert rom med mye uforbrent gass dersom det plutselig blir tilført luft, f.eks. ved at en dør åpnes, slik at det dannes en brennbar gass-luftblanding. En rask forbrenning vil etterfølges dersom denne blandingen antennes og vil resultere i en trykkøkning som følge av at volumet til branngassene øker. Dette fører til at brennbar gass og flammer presses ut av rommet.



Figur 6: Energiproduksjon vs. tid basert på Drysdale (2011).

Hvor raskt en brann vil vokse avhenger av flere faktorer. Ifølge Karlsson og Quintiere (2000) vil type forbrenning og brensel, omgivelser og tilgang på oksygen påvirke vekstraten. En brann er avhengig av oksygen for å opprettholde forbrenningen. Brannens tilgang på luft påvirkes av plasseringen til brenselet. Dersom brenselet er plassert nær for eksempel vegger og hjørner vil lufttilgangen begrenses. Muligheten for at en brann sprer seg og hvor hurtig spredningen er avhenger av fordelingen til brenselspakkene i brannrommet. Orienteringen vil også ha betydning, det vil si hvilken retning overflaten til brenselet er rettet. Hvor stor overflate brenselet har vil i tillegg påvirke brannutviklingen. En større overflate vil som regel gi en raskere brannvekst.

I brannens vekstfase er den gjennomsnittlige temperaturen relativt lav, som Figur 4 illustrerer. Men i og nær brannens forbrenningszone vil det være noen steder hvor temperaturen vil være høy (Drysdale, 2011). Etter hvert som brannen vokser vil energien som produseres øke, som vist i Figur 6. I tillegg så vil det under brannens vekstfase produseres forbrenningsprodukter som gasser og partikler, hvor noen vil være giftige (Custer, 2003a). Det blir en raskere

temperaturøkning og en raskere produksjon av forbrenningsprodukter dess raskere en brann utvikler seg (NFPA & SFPE, 2000).

I den tidlige vekstfasen vil rommets geometri ikke påvirke brannen og den vil ikke ha spredd seg bort fra startbrannstedet (Drysdale, 2011). I startfasen vil brannen som regel være brenselkontrollert som følge av at den er avhengig av tilstrekkelig mengde brennbart materiale. Størrelse og plasseringen av åpningene i rommet kan begrense brannen ettersom gassene kan ventileres ut og redusere strålingen fra røyklaget. Dersom det er tilstrekkelig brennbart materiale vil brannen spre seg til omkringliggende brenselspakker (Jahn et al., 2011). Denne spredningen kan skje på tre måter, disse beskrives blant annet av Hagen (2004) og er:

- I. *Varmeledning*: Dersom en gjenstand blir oppvarmet av en brann vil brannen kunne spre seg ved at gjenstanden leder tilstrekkelig energi til andre brennbare materialer slik at de antenner, det forutsetter at det er kontakt mellom den varme gjenstanden og det brennbare materialet.
- II. *Konveksjon*: Denne varmetransporten skjer ved at energi transporteres til brennbare materialer via flammer eller varm røyk. Over det brennbare materialet vil det strømme varme eller kalde gasser/væsker og på grunn av temperaturforskjeller mellom disse vil det oppstå konveksjon.
- III. *Varmestråling*: Både flammer og røyk vil avgi varmestråling, dersom denne strålingen er kraftig nok vil det føre til spontanantennelse. Varmestråling vil også bidra til brannspredning ved at materialer forvarmes slik at de antenner lettere i kontakt med flammer.

Det kan også være en kombinasjon av disse som fører til at brannen sprer seg til andre objekter (NFPA & SFPE, 2000).

Rommets geometri vil påvirke brannen når den har økt i størrelse (Karlsson & Quintiere, 2000). Dette kommer av at det vil dannes et røyklag etterhvert som brannen vokser. Hvor raskt det dannes et røyklag og hvor høy temperaturen blir avhenger av størrelsen til brannrommet. Dersom rommet er stort vil det ta lengre tid å danne et røyklag, temperaturen vil være lavere og varmeoverføringen til brenselet vil være mindre. Dette vil føre til at brannen utvikler seg saktere. Varme vil transporteres til brenselet fra røyklaget og de øvre overflatene i rommet via stråling. Dette fører til at forbrenningshastigheten øker og oppvarming av gjenstander i rommet.

Takhøyden i et rom vil påvirke varmetransporten til brenselet i en brann (Karlsson & Quintiere, 2000). Hvor mye varme som avgis til brenselet og tiden det tar for flammene å nå taket vil påvirkes. Avstanden mellom brenselet og røyklaget vil spille en rolle for hvor mye kald luft som blandes inn under forbrenningen.

Varmefluksen gjennom overflatene i en bygning kan påvirke temperaturen til branngassene i rommet. Konduktivitet, tetthet og varmekapasitet er de materialeegenskapene som bestemmer varmekapasiteten (Karlsson & Quintiere, 2000). Samlet kalles disse egenskapene termisk treghet. Dersom overflatematerialene som er benyttet har en termisk treghet som reduserer temperaturen til den varme gassen vil også varmekapasiteten til brenselet reduseres.

Overtenning

I overgangen mellom vekstfasen og fasen hvor brannen er fullt utviklet skjer det en overtenning. I Drysdale (2011) karakteriseres overtenningsfasen med at alle de brennbare overflatene i rommet har antent og at denne brannspredningen skjer hurtig. Ettersom dette skjer raskt er varigheten til overtenningsfasen vanligvis kort sett i sammenheng med de andre fasene.

Det finnes ulike kriterier for når overtenning inntreffer i et rom. I Karlsson og Quintiere (2000) angis følgende kriterier:

- rommets temperatur må ha blitt 500 - 600°C, eller
- strålingen til gulvet er 15 – 20 kW/m², eller
- flammer står ut av åpningene i rommet.

I noen tilfeller deles en brann inn i to stadier, ”pre-flashover” og ”post-flashover”, overtenning er da skillett mellom disse to stadiene (Jahn et al., 2011).

Fullt utviklet brann

Det er ulike kjennetegn ved fasen hvor en brann er fullt utviklet, disse er gitt i Karlsson og Quintiere (2000). Det ene er at energiproduksjonen vil være på sitt største når brannen er fullt utviklet. I denne fasen vil den maksimale energiproduksjonen bli registrert. Det er også i løpet av denne fasen at temperaturen er høyest. Den gjennomsnittlige temperaturen ligger på rundt 700 - 1200°C.

Et annet kjennetegn med en brann som er fullt utviklet er at brannen ofte vil være ventilasjonskontrollert. Dette er som følge av at oksygentilgangen som regel er begrenset. Størrelsen til åpningene vil da ha betydning, ettersom de kontrollerer mengden luft som kommer inn i rommet. I denne fasen kommer som regel flammene ut av åpningene i rommet. Dette vil føre til at brannen kan spre seg til resten av bygningen, både gjennom åpninger til andre rom inne i bygget og utvendig til omgivelsene (Drysdale, 2011).

Varigheten til en fullt utviklet brann kan være opptil flere timer (Karlsson & Quintiere, 2000). Brannen er avhengig av at det er brensel og oksygen tilgjengelig, dermed vil forbrenningen forekomme så lenge det er tilstrekkelige mengder av disse.

Utbrenningsfasen

I løpet av utbrenningsfasen avtar både energiproduksjonen og den gjennomsnittlige temperaturen ettersom mengden brensel reduseres (Karlsson & Quintiere, 2000). Drysdale (2011) sier at denne fasen er fra den gjennomsnittlige temperaturen har falt til 80 % av den maksimale temperaturen som har forekommet. Mengden brensel benyttes også for å si når denne fasen starter. Ifølge Bukowski (2003) antas det ofte at utbrenningsfasen begynner når 80 % av initial brenselmengden er forbrukt.

2.2.2 Energiproduksjon

Babrauskas og Peacock (1992) fant at energiproduksjon er den variabelen som er viktigst for å forutsi hvor stor risiko en framtidig brann vil representere. Denne størrelsen er derfor vanlig å benytte for å beskrive en brann kvantitativt. Energiproduksjonen uttrykker hvor mye energi (varme) som produseres per tidsenhet under forbrenningsprosessen (Babrauskas, 2002). For mange materialer, som for møbler og lignende, er energiproduksjonen målt eksperimentelt, for eksempel i et konkalorimeter (Bwalaya, 2008).

Forbrenningseffektivitet, massetapsrate, brannens areal og brenselets forbrenningsvarme er de faktorene som påvirker hvor mye varme som avgis per tidsenhet (SFPE & NFPA, 2000). Energiproduksjonen fra en brann kan uttrykkes på følgende måte (Hagen, 2004):

$$\dot{Q} = \chi \dot{m}'' A_f \Delta H_C \quad (2)$$

hvor

χ : forbrenningseffektivitet [-]

\dot{m}'' : massetapsrate per areal [kg/m²s]

A_f : brannens areal [m²]

ΔH_C : brenselets forbrenningsvarme [MJ/kg]

Både energiproduksjon og varmeavgivelse er begreper som benyttes for å beskrive hvor mye energi som avgis per tidsenhet når et objekt brenner. Disse brukes synonymt, men ifølge Karlsson & Quintiere (2000) bør energiproduksjon benyttes som følge av at varme er transport av energi på grunn av forskjell i temperatur (Karlsson & Quintiere, 2000).

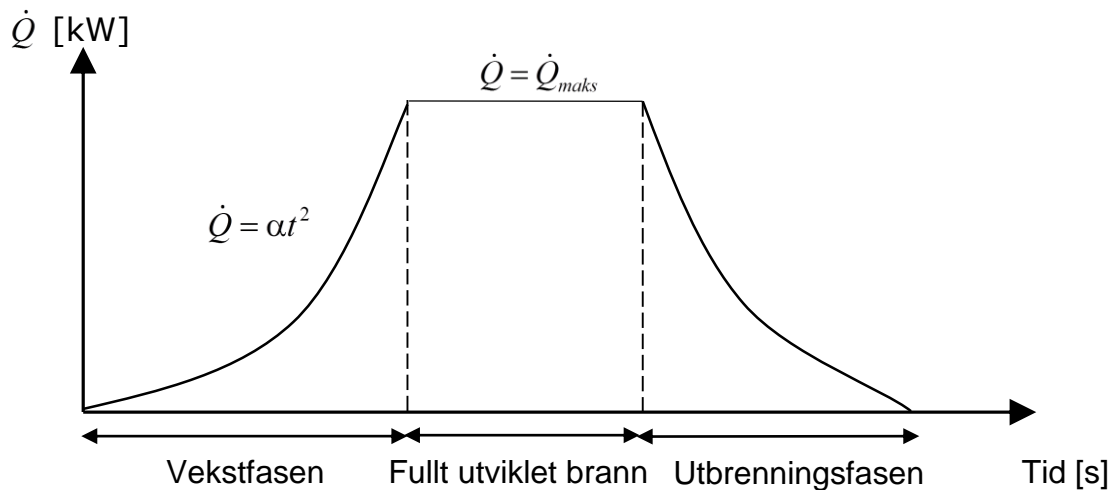
2.2.3 Dimensjonerende brann

En dimensjonerende brann beskriver brannutviklingen til et bestemt brannscenario som kan inntreffe (Staffansson, 2010). Den dimensjonerende brannen er en kvantitativ beskrivelse av de variablene som varierer over tid i en brann (Bwalaya, 2008). Energiproduksjon og temperatur er eksempler på variabler som ofte beskrives.

De dimensjonerende brannene benyttes ved prosjektering for å ivareta brannsikkerheten. Forholdet mellom energiproduksjon og tid benyttes ofte for å karakterisere brannutviklingen og når en har kommet fram til en slik kurve for et scenario kan den utgjøre den dimensjonerende brannen (Karlsson & Quintiere, 2000).

Eksakte metoder og prosedyrer for å bestemme en dimensjonerende brann er ikke etablert, men for et gitt scenario kan en dimensjonerende brann bestemmes på to måter (Karlsson & Quintiere, 2000). Den ene er å ta utgangspunkt i rommet hvor brannen antas å starte og vurdere hvor mye og hvilken type brennbart materiale som kan forventes i rommet. I tillegg må det vurderes hvor raskt det er forventet at brannen vil utvikle seg. Dersom en har lite kunnskap om hvilken brannbelastning som kan forventes kan en bestemme den dimensjonerende brannen på grunnlag av tilgjengelig informasjon om type bygning og ekspertvurderinger.

Å dele brannutviklingen inn i en vekstfase, en stabil fase hvor brannen er fullt utviklet og en utbrenningsfase er en enkel måte å sette opp en dimensjonerende brann på (Bukowski, 2003). For å beskrive vekstraten kan det for eksempel benyttes en t^2 -brann, se kapittel 2.2.4. Ut ifra informasjon om bygningens innhold av brennbart materiale og bygningstype kan det bestemmes en vekstrate (α -verdi). Figur 7 illustrerer hvordan en dimensjonerende brann kan skisseres.



Figur 7: Eksempel på en dimensjonerende brann (Karlsson & Quintiere, 2000).

Valg av dimensjonerende brann baseres på mange antagelser om: antennelse og tennkilde, type og mengde brensel, vekstrate, brannspredning, utbrenningsfasen og hvordan brannen vil slokkes (Bwalaya, 2008). Beregning av energiproduksjon og andre parametere som benyttes for å beskrive forbrenningsprosessen vil baseres på disse antagelsene. Det vil derfor være vanskelig å gjøre nøyaktige beregninger. Som følge av dette vil en bidragsyter til usikkerhet, når det gjøres vurderinger angående brannteknisk utforming og løsninger, være den dimensjonerende brannen (Bwalaya, 2008).

2.2.4 t^2 - brann

En t^2 -brann er en modell som er vanlig å benytte for å beskrive vekstfasen til en brann (Bukowski, 2003). Denne dimensjonerende brannen uttrykker brannens energiproduksjon som funksjon av tiden. Ved bruk av denne brannen antas det at brannens energiproduksjon øker proporsjonalt med kvadratet av tiden. Kvadratet av tiden multipliseres med en vekstfaktor α for å kunne modellere ulike veksthastigheter. Energiproduksjonen i vekstfasen kan da uttrykkes som funksjon av tiden på følgende form:

$$\dot{Q} = \alpha t^2 \quad (3)$$

hvor

\dot{Q} : energiproduksjon [kW]

α : vekstfaktoren [kW/s²]

t : tiden fra antennelse [s]

Vekstfaktoren kan ha hvilken som helst positiv verdi, men det benyttes ofte fire standardverdier. Disse anbefalte α -verdiene er for branner som vokser med en hastighet som er langsom, medium, rask og ultra-rask (Bwalya, 2008; Karlsson & Quintiere, 2000; NFPA, 2012; BSI, 2003). Hvor lang tid det tar før brannens energiproduksjon når 1055 kW er benyttet som grunnlag for å definere disse vekstfaktorene (NFPA, 2012). α -verdiene relaterer dermed til hvor lang tid det tar før brannens energiproduksjon når 1055 kW. Vekstfaktoren α uttrykkes ofte på følgende form (Bwalya, 2008):

$$\alpha = \frac{\dot{Q}_0}{t^2} \quad (4)$$

hvor

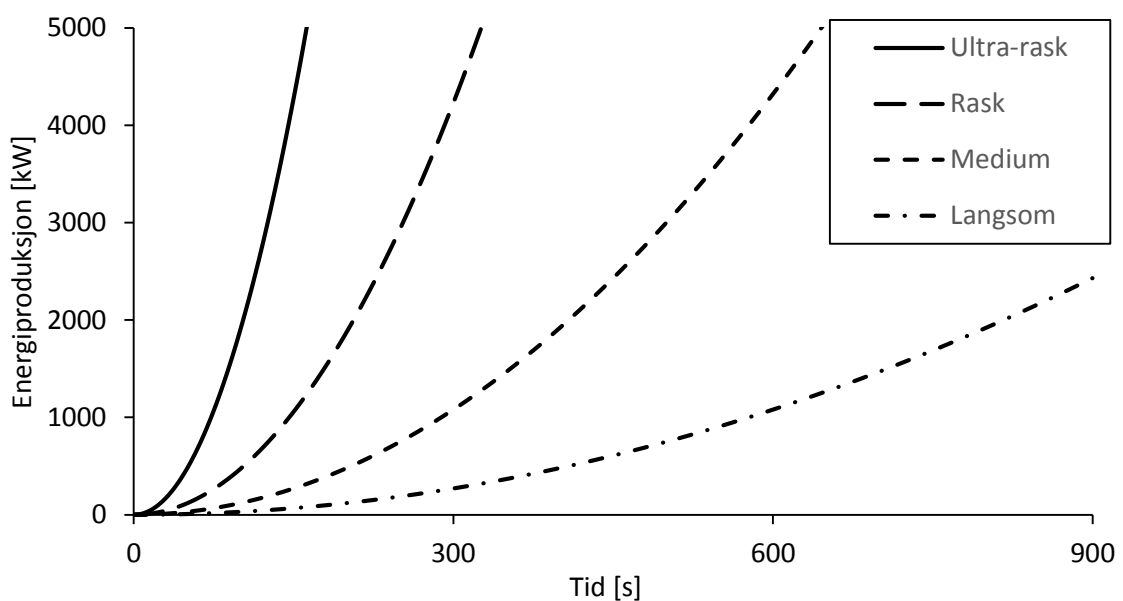
\dot{Q}_0 : referanse energiproduksjonen (vanligvis 1055 kW)

t : tiden til å nå \dot{Q}_0

α -verdiene og tilhørende tid til å nå 1055 kW er gitt i Tabell 1. De forskjellige vekstfaktorene vil gi ulik energiproduksjon ved tid t . Figur 8 viser hvordan energiproduksjonen vil utvikle seg for de fire α -verdiene.

Tabell 1: α -verdier for ulike vekstrater (Karlsson & Quintiere, 2000; Bwalya, 2008; BSI, 2003).

Vekstrate	Vekstfaktor α [kW/s ²]	Tid [s] til å nå 1055 kW
Langsom	0,003	600
Medium	0,012	300
Rask	0,047	150
Ultra-rask	0,190	75



Figur 8: Energiproduksjonen ved standard α -verdier.

Ifølge Kong et al. (2013) er det som regel ekspertvurderinger som danner grunnlag for valg av vekstfaktor når t^2 -branner benyttes for å modellere brannforløp. For ulike bygningstyper er det gitt anbefalinger om hvilken vekstfaktor som bør benyttes. I Tabell 2 er det gitt hvilken vekstfaktor som anbefales for ulike typer virksomheter i Karlsson og Quintiere (2000), den svenske veiledningen for analytisk prosjektering av bygningers brannsikkerhet (Boverket, 2011) og den britiske standarden PD 7974-1 (BSI, 2003). BSI (2003) angir at dersom et bygg skal benyttes til ulike formål bør den bruken av bygget som har den raskeste brannveksten benyttes som dimensjonerende. Som tabellen viser så anbefaler ikke alle det samme.

Tabell 2: Typisk anbefalt vekstfaktor for ulike typer bygninger.

Type bygning	Vekstfaktor α	
Boliger	Medium	(Karlsson & Quintiere, 2000)
	Medium	(BSI, 2003)
	Rask	(Boverket, 2011)
Hoteller, sykehjem, osv.	Medium*	(BSI, 2003)
	Rask	(Karlsson & Quintiere, 2000)
	Rask	(Boverket, 2011)
Forsamlingslokaler	Rask	(Boverket, 2011)
Butikker	Rask	(BSI, 2003)
Kjøpesentre, teater, osv.	Ultra-rask	(Karlsson & Quintiere, 2000)
Skoler og kontor	Medium	(Boverket, 2011)
	Medium	(BSI, 2003)
	Rask	(Karlsson & Quintiere, 2000)
Farlig industri	Ikke spesifisert	(Karlsson & Quintiere, 2000)
Industrielle lager/teknisk rom	Ultra-rask	(BSI, 2003)
Kunstgalleri	Langsom	(BSI, 2003)

*Angitt for hotell.

Bukowski (2003) angir hvilke typer brensel som kan kategoriseres under de fire ulike brannvekstratene, som vist i Tabell 3. Ut i fra branntester av ulike materialer er det funnet hvilken α -verdi og t^2 -kurve som er passende å benytte.

Tabell 3: Vekstrate og tilhørende brensel (Bukowski, 2003).

Langsom	Tykke, solide/massive gjenstander (f.eks. massivt trebord, soveromskommode eller -skap).
Medium	Faste brensel med lavere tetthet (f.eks. polstrede møbler og madrasser).
Rask	Tynne brennbare gjenstander (f.eks. papir, pappesker, gardiner).
Ultra-rask	Noen brennbare væsker, noen elder polstrede møbler og madrasser eller andre svært volatile brensel.

Ifølge Bukowski (2003) kan det benyttes en dimensjonerende brann med medium vekstrate i de tilfellene hvor det er stor variasjon av brenselstype i brannrommet. Dette forutsetter at det ikke er tilstedeværelse av svært brennbare gjenstander.

Bakgrunn og utvikling av t^2 -brannen

Det var i forbindelse med en evaluering av branndetektorer tidlig på 1970-tallet at t^2 -brannene ble introdusert (Babrauskas, 1996). Under en kvantitativ evaluering av detektorenes evne til å oppdage en brann ble det lagt merke til at hvor raskt varme blir avgitt i en brann varierer. Ifølge Bukowski (2003) ble det foreslått at brannens vekstfase kunne uttrykkes på formen $\dot{Q} = \alpha t^n$, hvor $n = 1, 2, 3$. Videre studier viste at det var $n = 2$ som ga den beste tilnærmingen til de fleste branner, altså t^2 -branner. Dette ble funnet gjennom analyse av data fra branntester og virkelige branner (Holborn et al., 2004).

Brannens veksthastighet vil påvirke responstiden til en detektor. Formålet med en detektor er å oppdage en eventuell brann før den har utviklet så mye at det er fare for liv. For å gjøre en vurdering av hvilken konsekvens ulike vekstrater ville ha for responstiden ble det ifølge Bukowski (2003) satt opp mange ulike kategorier hvor hver kategori hadde ulik brannvekstrate. Resultatet ble de fire brannvekstkurvene langsom, medium, rask og ultra-rask.

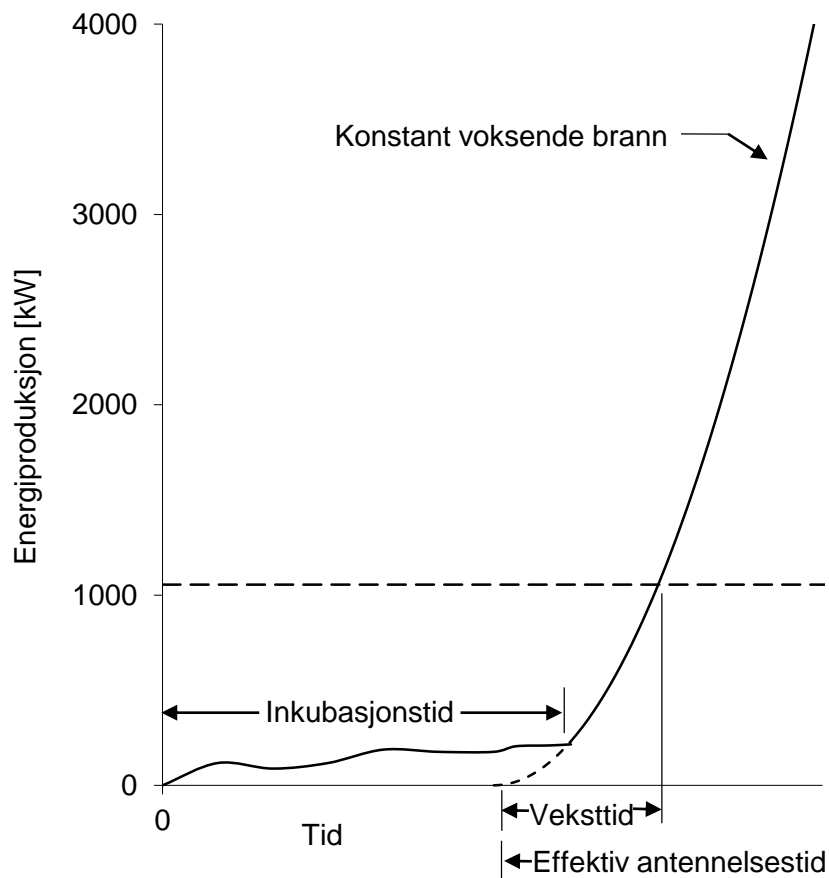
Antagelser

Ved å si at vekstfasen til en brann kan beskrives ved en t^2 -brann antas det at tennkilden har en rimelig stor flamme (Bukowski, 2003). Dersom brannen starter ved antennelse av en liten tennkilde må det tas hensyn til at det vil ta en tid før det vil være etablert flammer. Denne tiden kalles inkubasjonstiden, se Figur 9. I denne perioden vil ikke brannens energiproduksjon være tilnærmet kurvene som produseres av en t^2 -brann (NFPA, 2012). I litteraturen inkluderer t^2 -brannen inkubasjonstiden på følgende måte (Drysdale, 2011; Alpert, 2002):

$$\dot{Q} = \alpha(t - t_0)^2 \quad (5)$$

t_0 uttrykker hvor lang inkubasjonstiden er. Dette viser at inkubasjonstiden er en viktig parameter og har betydning for energiproduksjonen. Etter at det er etablert flammer vil brannen som regel

vokse tilnærmet konstant i den tidlige vekstfasen så lenge den brenner fritt, det vil si at den ikke påvirkes av geometri, plassering av brensel og andre faktorer (Nelson, 1987).



Figur 9: Vekstfasen til en konstant voksende brann (NFPA, 2012).

I forhold til deteksjon av en brann vil inkubasjonstiden være vesentlig. Dersom denne tiden ikke tas hensyn til vil det resultere i at deteksjonstiden underestimeres. For å unngå dette kan det ifølge Bukowski (2003) antas at brannen vil ha en lineær vekst og vokse sakte frem til energiproduksjonen er 25 kW.

Ved å si at en brann vil utvikle seg som en t^2 -brann gjøres det ulike antagelser. Ved å benytte en t^2 -brann angir blant annet NFPA (2012) og Buchanan (2001) at det antas at varmeavgivelsen per overflateareal er konstant, hvor overflatearealet er arealet av den brennende overflaten. Videre antas det at brannens form kan beskrives ved en sirkel med uniform brannbelastning og at når brannen sprer seg så vil den spre seg med konstant hastighet i alle retninger, det vil si at radiusen vil øke konstant og like mye i alle retninger. Ettersom brannens areal vil avhenge av tiden kan det uttrykkes som funksjon av tiden:

$$A(t) = \pi(r(t))^2 \quad (6)$$

Radiusen til brannen vil avhenge av hastigheten v som brannen sprer seg med og tiden og kan uttrykkes som:

$$r(t) = vt \quad (7)$$

Dersom disse uttrykkene settes inn i likning (2) for energiproduksjon fra kapittel 2.2.2 får en følgende uttrykk:

$$\dot{Q} = \chi \dot{m}'' A_f \Delta H_C = \chi \dot{m}'' \pi (r(t))^2 \Delta H_C = \chi \dot{m}'' \pi (vt)^2 \Delta H_C \quad (8)$$

Brannens vekstfaktor kan da defineres som $\alpha = \chi \dot{m}'' \pi v^2 \Delta H_C$ og en får at brannens energiproduksjon kan uttrykkes som:

$$\dot{Q} = \alpha t^2 \quad (9)$$

2.2.5 Nødvendig og tilgjengelig rømningstid

I Forskrift om tekniske krav til byggverk (TEK10) stilles det krav til utforming av byggverk i Norge. Kapittel 11 i denne forskriften omhandler sikkerhet ved brann og skal sikre at sikkerheten er tilfredsstillende ved et branntilløp.

I § 11-11 pkt 1 og 2 i Byggteknisk forskrift (2010), som omhandler generelle krav om rømning og redning, står det følgende:

(1) Byggverk skal prosjekteres og utføres for rask og sikker rømning og redning. (...)

(2) Den tiden som er tilgjengelig for rømning, skal være større enn den tiden som er nødvendig for rømning fra byggverket. Det skal legges inn en tilfredsstillende sikkerhetsmargin.

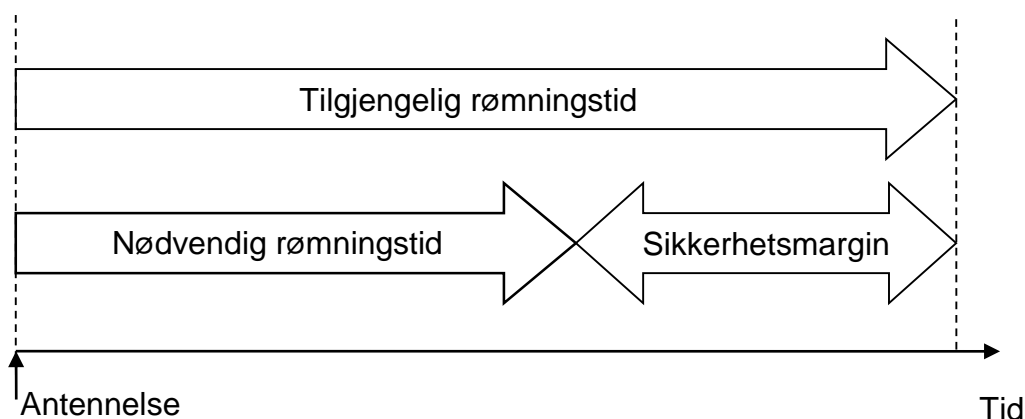
Veiledningen til byggteknisk forskrift (VTEK10) (DiBK, 2010, s. 48) definerer tilgjengelige rømningstid som:

"tiden fra en brann oppstår til forholdene blir kritiske,"

og nødvendig rømningstid som:

"tiden det tar å rømme et byggverk."

Videre stiller VTEK10 (DiBK, 2010) krav om at den tilgjengelige rømningstiden må være større enn den nødvendige rømningstiden. Dette er for å ivareta personsikkerheten slik at det er sannsynlig at alle personene som oppholder seg i bygget kommer seg til sikkert sted før kritiske forhold oppstår (Drysdale, 2011). For å sikre dette legges det inn en sikkerhetsmargin som sikkerhetsnivået uttrykkes ved. Sikkerhetsmarginen utgjør differansen mellom den tilgjengelige og nødvendige rømningstiden. Figur 10 illustrere sammenhengen mellom nødvendig og tilgjengelig rømningstid og sikkerhetsmargin.



Figur 10: Nødvendig og tilgjengelig rømningstid.

Hvor lang sikkerhetsmargin som bør benyttes baseres som regel på kvalitative vurderinger, det eksisterer ikke kvantitative mål for hvor lang den skal være (Byggforsk, 2006). Sikkerhetsmarginen skal sikre at den tilgjengelige rømningstiden er større enn den nødvendige rømningstiden, og den vil dermed alltid være positiv. Ettersom det er usikkerhet knyttet til prediksjon av tilgjengelig rømningstid anbefaler Byggforsk (2006) at det legges inn en sikkerhetsfaktor i alle beregninger som gjøres. Usikkerhet knyttet til beregning av tilgjengelig rømningstid må vurderes ved valg av sikkerhetsmargin (DiBK, 2010). Hagen (2008) angir at den tilgjengelige rømningstiden bør være mellom 2 og 3 ganger så stor som den nødvendige rømningstiden. Beregning av sikkerhetsmarginfaktoren kan gjøres ved følgende formel:

$$\text{Sikkerhetsmarginfaktor} = \frac{\text{Tilgjengelig rømningstid}}{\text{Nødvendig rømningstid}} \quad (10)$$

Den tilgjengelige rømningstiden er avhengig av vekstraten til brannen (Drysdale, 2011). Drysdale (2011) angir at en konsekvens av at en brann utvikler seg raskt er at den tilgjengelige rømningstiden vil være kort og at sannsynligheten for at ikke alle klarer å evakuere i løpet av denne tiden øker.

Overtenningsfasen spiller en viktig rolle for personsikkerheten (Drysdale, 2011). Ifølge Drysdale (2011) må evakuering av bygg eller del av bygg skje før denne fasen, da det er liten sannsynlighet for at mennesker vil overleve dersom de befinner seg i den delen av bygget hvor brannen er når overtenning inntreffer. Dersom det oppholder seg mennesker andre steder i bygningen vil disse også være direkte truet etter at overtenning har inntruffet.

I tiden før og etter overtenning er det ulike områder som har fokus (Karlsson & Quintiere, 2000). I tiden før overtenning er det sikkerheten for mennesker som vektlegges mest. Kurven over energiproduksjon benyttes for å karakterisere den dimensjonerende lasten i denne perioden. Det er brannens vekstfase som er viktigst. Etter overtenning er det sikkerheten til brannmenn og strukturell stabilitet som har størst fokus. I dette tilfellet benyttes temperatur-tid-kurver for å karakteriserer den dimensjonerende lasten og det er perioden hvor brannen er fullt utviklet som er av størst interesse. Temperatur-tid-kurvene beskriver hvordan temperaturen vil variere med tiden i en brann og som en konstruksjon vil eksponeres for (Hicks, 2003).

For å estimere den tilgjengelige rømningstiden modelleres vanligvis brannforløpet ved å spesifisere inngangsparametere (Kong et al., 2013), for eksempel brannens vekstfaktor. Det er

vanskelig å angi inngangsparameterne som følge av at en brann påvirkes av mange faktorer. Det vil derfor være mye usikkerhet forbundet med parameterne som benyttes i modellene. Som følge av dette vil det også være usikkerhet knyttet til den tilgjengelige rømningstiden som predikeres. VTEK10 (DiBK, 2010) angir at usikkerhet i beregningene må vurderes. Dette gjelder både usikkerheten knyttet til hver enkelt inngangsparameter og den samlede usikkerheten. I tillegg skal usikkerheten dokumenteres.

Ved prediksjon av den tilgjengelige rømningstiden benyttes det som oftest deterministiske verdier (Kong et al., 2013). Når parameterne som disse verdiene benyttes for er usikre fører det ofte til at usikkerheten ignoreres. I ulike standarder og annen litteratur finnes det anbefalinger om hvilke verdier som bør benyttes for inngangsparameterne. Som for eksempel for vekstraten for t^2 -branner. Ved prosjektering benyttes det ofte konservative verdier. Resultatet av dette blir ofte overestimering og det fører til dyre løsninger (Kong et al., 2013).

2.2.6 Kritiske forhold

Det er ulike forhold som kan betraktes under en brann for å si når kritiske forhold har oppstått. Dersom ett av de følgende kritiske forholdene nedenfor har inntruffet er det kritisk i forhold til personsikkerheten å oppholde seg i rommet. Disse kriteriene er hentet fra Deibjerg et al. (2003) og er de kriteriene som benyttes ved brannsimulering i modelleringsprogrammet Argos (se kapittel 2.3.3 og 0).

Sikt

For at mennesker skal kunne rømme en bygning på en trygg og sikker måte har det stor betydning om mulige rømningsveier og ledesystem er synlige (Mulholland, 2002). Når det brenner i et rom vil det produseres røyk og som følge av dette vil sikten i rommet reduseres. Dette påvirker menneskers evne til å finne rømningsveiene som fører til sikkert sted. I større rom (over 150 m²) kreves det en lengre siktlengde enn i mindre rom (mindre enn 150 m²). Det angis at kritiske forhold har oppstått dersom:

- sikt < 10 m i store rom, og
- sikt < 3 - 5 m for mindre rom.

Røykfri sone

Røyken som genereres fra en brann vil stige opp til taket og etter hvert danne et røyklag som til slutt kan fylle hele rommet. Dersom den røykfrie sonen er for liten i et rom vil det være kritisk for mennesker å oppholde seg i rommet. Det sies at et kritisk forhold har oppstått dersom:

- avstanden fra gulvet til røyklaget < 1,6 m + 10 % av høyden til rommet.

Temperatur i røykfri sone

Når det brenner i et rom vil temperaturen i rommet øke. Å oppholde seg i omgivelser med høy temperatur er farlig. Det kan føre til overoppheting og forbrenningsskader (Hagen, 2004). Det har oppstått kritiske forhold dersom:

- temperaturen $> 60 - 80^{\circ}\text{C}$ i den røykfrie sonen.

Varmestråling fra røyklaget

Fra røyklaget vil det avgis varme i form av stråling ettersom det er varm røyk som utgjør røyklaget (Hagen, 2004). Denne varmestrålingen er farlig for mennesker dersom den er kraftig nok. Forholdene vurderes som kritiske dersom:

- varmestråling $> 2,5 \text{ kW/m}^2$ fra røyklaget.

Gasskonsentrasjon

Røyken som produseres fra en brann vil inneholde ulike forbrenningsprodukter (Mulholland, 2002). Dersom konsentrasjonen av ulike gasser blir for høy anses det som kritisk å oppholde seg i rommet ettersom det kan være skadelig å puste inn disse gassene. Det vurderes som kritisk å oppholde seg i rommet dersom:

- CO_2 -nivået i luft $> 5 \%$.
- CO-nivået i luft $> 2000 \text{ ppm}$.

For at forbrenningen skal kunne opprettholdes må det som nevnt i kapittel 2.2.1 være tilgang på oksygen, det blir med andre ord forbrukt oksygen når det brenner. Dersom det er liten oksygentilførselen vil oksygenivået i rommet reduseres. Om oksygenkonsentrasjonen blir for lav vil det være farlig for mennesker å oppholde seg der. Forholdene er kritiske dersom:

- oksygenivået i det nedre laget $< 15 \%$.

2.3 Brannmodellering

For å modellere et brannforløp kan det benyttes ulike metoder og tilnærminger. I dette kapitlet gis det først en kort presentasjon av hvilke metoder og tilnærminger som finnes. Deretter forklares det nærmere hva en to-sonemodell er og det gis en kort introduksjon av Argos, som er programvaren som er benyttet for å predikere brannforløp og tilgjengelig rømningstid i denne rapporten.

2.3.1 Generelt

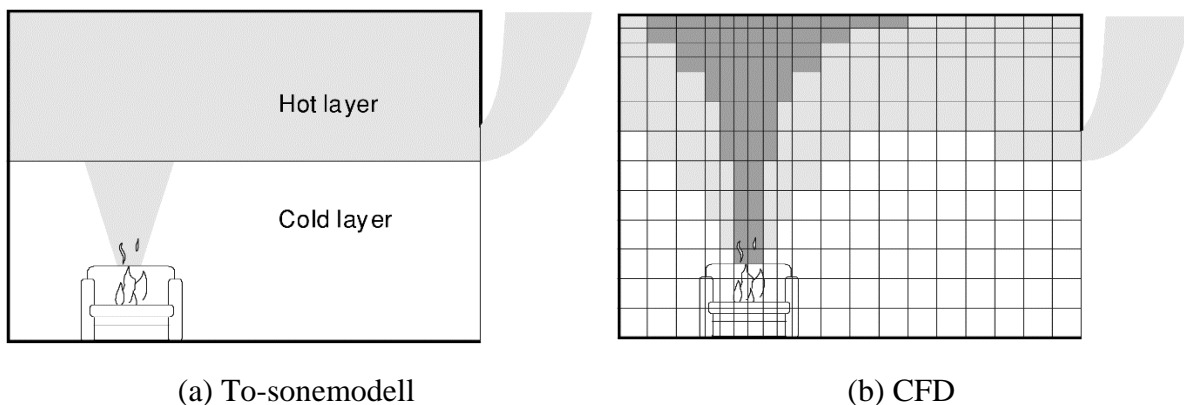
Når nye bygninger skal designes og konstrueres er det ønskelig å kunne si noe om hvordan en brann vil utvikle seg og hvordan røykutviklingen vil være slik at sikkerheten ved brann ivaretas (Deibjerg et al., 2003). Brannmodellering er et verktøy som benyttes for å kunne predikere brann- og røykutvikling og hvilke konsekvenser brannen vil føre til.

For å predikere hvordan en brann utvikler seg finnes det to grupper modeller. Det er probabilistiske og deterministiske modeller (Walton, 2002). Statistisk data fra virkelige branner og forsøk danner i stor grad grunnlag for de probabilistiske modellene. De deterministiske modellene tar utgangspunkt i prosessene som er involvert i en brann, både fysiske, kjemiske, termodynamiske, hydrauliske og elektriske prosesser og i tillegg menneskelig adferd (Mostue, 2002).

Det finnes ulike deterministiske modeller. Karlsson & Quintiere (2000) angir at de som benyttes er håndberegningsmodeller, sonemodeller og CFD-modeller, hvor den første er en statisk modell, mens de to siste modellene er transiente.

Håndberegningsmodellene beregner ulike variabler som flammehøyde, temperatur osv. ved hjelp av enkle beregningsmetoder (Karlsson & Quintiere, 2000).

Ved å modellere en brann ved bruk av sonemodeller deles det lukkede området inn i flere soner (Karlsson & Quintiere, 2000). Det vanligste er ifølge Custer (2003b) å benytte to-sonemodeller. I disse deles rommet inn i to soner: en øvre varm sone og en nedre kald sone, hvor det varme røyklaget utgjør den øvre sonen, se Figur 11a. Bevaringslikningene for masse og energi anvendes for begge sonene og de løses numerisk for hvert tidssteg. I sonemodeller tilfredstilles ikke bevaring av moment.



Figur 11: To-sonemodell og CFD (Karlsson & Quintiere, 2000).

I CFD-modeller, som også kalles feltmodeller, benyttes lovene for bevaring av masse, moment og energi (Custer, 2003b). Volumet som vurderes deles inn i mange små volum (felter) som disse likningene anvendes for, se Figur 11b.

2.3.2 To-sonemodell og Argos

I denne rapporten har programvaren Argos blitt benyttet. Dette programmet er en to-sonemodell. Det gis derfor her en kort beskrivelse av teorien bak denne to-sonemodellen.

I en to-sonemodell utgjør det varme og kalde røyklaget de to sonene. Det er den oppvarmede luften som deles inn i en varm og kald sone. Når brannen starter vil temperaturforskjellen være liten i rommet, det vil si at i starten vil det være en 1-sonemodell. Etter hvert som luft varmes opp vil det dannes et varmt og et kaldt lag og det vil bli en to-sonemodell når det er blitt en stor nok temperaturforskjell. Det vil alltid være en sone med kald gass og dersom temperaturforskjellen blir stor nok vil det i tillegg være en sone hvor det er varm forbrenningsgass blandet med luft (Deibjerg et al., 2003).

I perioden før overtenning er alle brannene som modelleres i Argos brenselskontrollert. Dersom oksygennivået blir lavere enn 10,5 % vil brannen gå over til å være ventilasjonskontrollert (Husted & Westerman, 2009).

Det er både fordeler og ulemper med å benytte sonemodeller. Fordelen er at det tar kort tid å gjøre simuleringer, noe som gir raske svar og en får raskt en indikasjon på hvordan en brann vil utvikle seg (Jahn et al., 2011). Ulempen er at det gjøres mange antagelser i modellene som følge av forenklinger som gjøres angående fluiddynamikken (Jahn et al., 2011). Dette fører til begrenset nøyaktigheten i simuleringsresultatene.

Bevaring av masse og energi

I en brann kan masse og energi enten forlate volumet gjennom åpninger, transporteres til en av de andre sonene eller bli værende i sonen. Både masse og energi vil være bevart, dvs. at mengden energi og masse vil være lik før og etter brannen.

Det må være likevekt mellom den massen som strømmer inn og ut av et volum. Bevaring av masse kan uttrykkes som (Karlsson & Quintiere, 2000):

$$[\text{Endring av masse i kontrollvolumet}] + [\text{masse inn} - \text{massestrøm ut}] = 0$$

$$\frac{dm}{dt} + \sum_{j=1}^n \dot{m}_j = 0 \quad (11)$$

hvor m er massen i kontrollvolumet og \dot{m}_j er massestrømsraten til massestrøm j gjennom kontrollvolumets overflate.

For det varme røyklaget antas det følgende i Argos når bevaringslikningen for masse settes opp (Husted & Westerman, 2009):

- Både kald og varm gass vil blandes med den varme røykgassen dersom de strømmer inn i det varme røyklaget.

- Varm gass vil stige opp dersom den kommer inn i det kalde laget. Når denne stiger opp vil det blandes inn luft.
- Hvis det er åpninger i brannrommet vil denne deles inn i flere del-åpninger, dersom den inneholder både et varmt og kaldt sjikt eller strømmen endrer retning i åpningen.

I et rom hvor det brenner vil det tilføres varme til volumet, volumet vil utføre arbeid og det vil strømme masse inn og ut gjennom volumets overflate. Siden det vil være strømminger inn og ut gjennom volumets overflate må energien som er i denne strømmingen tas hensyn til. Bevaring av energi kan uttrykkes som (Karlsson & Quintiere, 2000):

$$[\text{Endring i indre energi i volumet}] + [\text{netto energi ut av volumet}] = [\text{netto varme tilført volumet}] - [\text{arbeid utført av strømmen i volumet}]$$

$$\frac{dU}{dt} + \sum_{j=1}^n \dot{E}_j = \dot{Q} - \dot{W} \quad (12)$$

hvor U er indre energi, \dot{E}_j er raten til energistrøm j gjennom kontrollvolumets overflate, \dot{Q} er varmeoverføringsraten og \dot{W} er arbeid utført per tidsenhet.

2.3.3 Argos

Dette kapittelet er basert på brukermanualen (Deibjerg et al., 2003) og teorimanualen (Husted & Westerman, 2009) til Argos.

Argos er en et brannsimuleringsverktøy som er utviklet av Dansk brand- og sikringsteknisk institut (DBI). Rådgivende selskaper, myndigheter, brannvesenet og forsikringsselskaper er blant de som benytter seg av programmet. Denne programvaren benyttes for å gjøre vurderinger av brannrisiko. Både brannutvikling og røyktransport kan simuleres ved hjelp av Argos.

Ved å spesifisere en brann i Argos kan brannens effekt på for eksempel temperatur, gasskonsentrasjon og røyklag beregnes og predikeres. Etter at simuleringene er utført vil det genereres et sett med ulike grafer som presenterer resultatene.

Deibjerg et al. (2003) angir at av alle skader og dødsfall som oppstår under brann så skyldes 70 % av dem røyk. De angir videre at røyk ikke bare utgjør en stor fare for mennesker, men også for eiendom. Røyk har i noen tilfeller vært årsaken til 95 % av tapene. Dette viser hvor viktig det er å få et bilde av hvordan røykutviklingen vil være under en brann. Røykforholdene kan simuleres og predikeres på en detaljert måte ved å benytte Argos. For eksempel så kan programmet gi grunnlag for å si noe om både røyktemperatur, toksisitet og sikt.

Begrensninger

Det er ulike begrensninger knyttet til å benytte Argos. Geometrien som modelleres bør være forholdsvis enkel. Følgende begrensninger gjelder for geometrien dersom Argos benyttes til brannmodellering:

- Det maksimale antall rom som kan modelleres er 10.
- Lengde bredde forholdet i et rom kan maksimalt være 1:5.
- Arealet til et rom kan ikke overstige 750 m².

Som følge av at Argos er en to-sonemodell vil det bare være en temperatur som beregnes i røyklaget.

Energiproduksjon

I Argos beskrives brannens energiproduksjon ved ulike modeller. Det er syv ulike typer branner som kan benyttes, disse er:

- Solid material fire.
- Melting material fire.
- Liquid pool fire.
- Liquid tank fire.
- Smouldering fire.
- Energy formula.
- Data points.

Dersom oksygenivået i brannrommet reduseres vil energiproduksjonen avta. Når oksygenivået er tilstrekkelig lavt vil det føre til at brannen slukker. I Argos antas det at energiproduksjonen vil være avhengig av tilgangen på oksygen dersom den minste fraksjonen av oksygen i brannrommet er mindre enn 10,5 % og det antas at energiproduksjonen er uavhengig av tilgangen på oksygen dersom den er høyere. Hvis den er lavere reduseres energiproduksjonen ved en faktor lik $X_{O_2}/(10,5 \%)$, hvor X_{O_2} er den faktiske minste fraksjonen av oksygen [%]. Denne beregningsmetoden gir en energiproduksjon som er null når det ikke er mer oksygen i brannrommet, men overestimerer energiproduksjonen når oksygenivået er mellom 0 og 10,5 %. Dette er som følge av at det for forbrenning i atmosfærer med lavt oksygeninnhold ikke eksisterer gode modeller.

Stråling står for en andel av det totale varmetapet. I Argos benyttes det en standardverdi på 0,35 (35 %) for strålingsandelen, $\chi_{stråling}$. Hvor stor andel av varmetapet som kommer av stråling vil i virkeligheten variere alt etter hvilken type brensel som brenner. For noen brenselstyper er strålingsandelen målt og i disse tilfellene benyttes denne verdien i Argos. For eksempel så er strålingsandelen 0,16 for LNG og 0,27 for Aceton.

Av dette følger det at varmetapet på grunn av konveksjon kan uttrykkes ved stråling og energiproduksjon:

$$\dot{Q}_c = (1 - \chi_{stråling}) \cdot \dot{Q} \quad (13)$$

Framgangsmåte

For å simulere et brannscenario i Argos er det ulike steg som må utføres. Framgangsmåten omfatter de følgende stegene:

- Spesifisere krav basert på bruken av bygget.
- Sette opp scenarioet, det vil si data om selve konstruksjonen.
- Kjøre scenarioet, gjøre beregninger.
- Betrakte og tolke resultatene, sammenligne kravene med beregnede resultater.
- Tilpasse til kunden og gjøre flere simuleringer for å kunne sammenligne resultatene.

Sette opp scenarioet

Det er ulike typer data som må defineres i Argos før en kan gjøre en simulering. Det er ikke alle dataene som må skrives inn, men en kan bestemme selv hva som er av betydning for det spesifikke formålet.

- Det første som må gjøres er å skrive inn informasjon om scenarioet. Blant annet så omfatter det navnet på scenarioet, hvilken type bedrift det er og hvilken type materiale bygningen består av, osv.
- Geometrien til bygningen er det neste som må defineres, dvs. antall rom, areal og høyde.
- Informasjon om åpninger i geometrien, både til omgivelsene og mellom rommene. Hvilke rom og vegger som er knyttet sammen. Materialer og vegg lengde.
- Informasjon om taket og eventuelle åpninger i dette. Materialer og utforming.

Det kan i tillegg angis hvilket deteksjonsanlegg, sprinkleranlegg og røykventilasjon som er i bygget. Når scenarioet er satt opp må det velges hvilken type brann som skal benyttes og hvor brannen skal starte.

Det angis i hvilket rom brannen skal starte, men hvor i rommet brannen starter defineres ikke direkte. Det angis hvor langt det er fra brannens sentrum til det hjørnet som er lengst borte. For de andre rommene angis det hvor langt det er fra døråpningen til det hjørnet som er lengst borte. Dette er for å si hvor langt en varm luftstrøm kan bevege seg langs taket og kalles *maximum distance*.

Når scenarioet er satt opp og brannen er definert kan brannforløpet modelleres. Fra simuleringene genereres det ulike grafer og en utdatafil. Størrelsene som beregnes og som presenteres i grafene er:

- Energiproduksjonen fra brannen
- Optisk røyktetthet i rom og i røyklag
- Avstand fra gulvet til røyklag
- Temperatur i røyklag
- Varmestråling fra røyklag
- Varmetap gjennom overflater
- Oksygennivået i rom og røyklag
- Temperatur på nedre og øvre takoverflate
- Takets temperaturprofil
- Gjennomsnittlig temperatur
- Trykket på gulvet
- Numerical Integration Step Length

3 Metode og casebeskrivelse

I dette kapitlet presenteres metoden som er benyttet i denne rapporten. I tillegg inneholder kapitlet en beskrivelse av analyseobjektet som er benyttet i simuleringene som er utført og en oversikt over hvilke scenario som er utført.

3.1 Metode

Hensikten med denne oppgaven er å vurdere usikkerhet knyttet til prediksjon av brannforløp og tilgjengelig rømningstid. For å identifisere bidragsyttere til usikkerhet ved prediksjon av brannforløp og tilgjengelig rømningstid er det tatt utgangspunkt i en case. Denne er benyttet for å modellere brannforløp og predikere tilgjengelig rømningstid. Simuleringene er utført ved bruk av to-sonemodellen Argos. Det er simulert ulike brannforløp hvor brannen antas å ha en brannutvikling som kan beskrives ved t^2 -brannen.

Casen danner grunnlaget for en sensitivitetsanalyse som er utført for å identifisere og vurdere hvilke parametere som har innvirkning på prediksjon av brannforløp og tilgjengelig rømningstid og hvordan disse inngangsparameterne påvirker predikert brannforløp og tilgjengelig rømningstid.

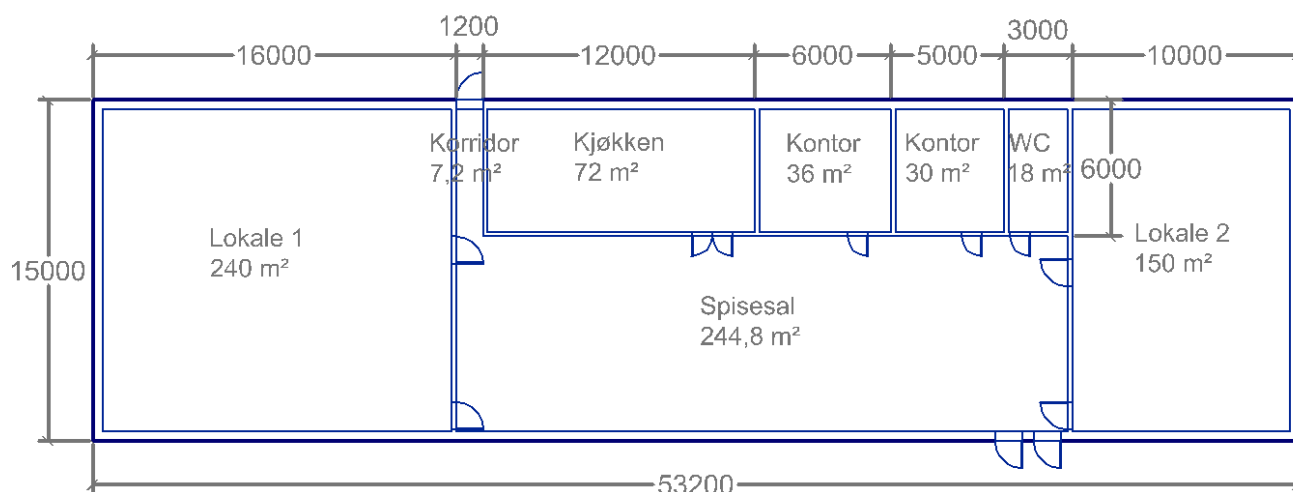
Det er i tillegg utført en usikkerhetsanalyse. Det er benyttet et rammeverk for å håndtere modellusikkerhet, dette presenteres i kapittel 5.2. For å illustrere dette rammeverket er det tatt utgangspunkt i den samme casen som for sensitivitetsanalysen. I usikkerhetsanalysen vurderes usikkerheten knyttet til modellen $\dot{Q} = \alpha t^2$ som benyttes for å beskrive brannstørrelsen til en framtidig brann og hvordan denne bidrar til usikkerhet i prediksjonen av tilgjengelig rømningstid.

3.2 Beskrivelse av analyseobjekt

For å kunne predikere brannforløp og tilgjengelig rømningstid er det designet et byggverk. Dette er den samme bygningen som er benyttet til å predikere nødvendig rømningstid i Walaker (2014).

Byggverket er et kurs- og konferansesenter. Selve bygget består av en etasje på 798 m². Figur 12 viser en plantegning av bygget og Tabell 4 gir en oversikt over romfordelingen i bygningen, arealet til hvert rom og hvilken personbelastning hvert rom er beregnet for. Dimensjonerende persontall er bestemt etter DiBK (2010).

Kurs- og konferansesenteret har en total lengde på 53,2 m og en bredde på 15 meter. Høyden på etasjen er satt til 4 m. Dørene ut fra lokale 1 og lokale 2 til spisesalen har en bredde på 1,2 m og høyde på 2,1 m. Det samme har dørene ut til det fri. Dørene fra kjøkkenet, kontorene og WC har en bredde på 0,9 m og høyde på 2,1 m. Konstruksjonen består hovedsakelig av betong.



Figur 12: Plantegning (enhet i mm).

Tabell 4: Romoversikt.

Rom	Areal	Personbelastning
Lokale 1	240 m ²	240
Korridor	7,2 m ²	Sporadisk personopphold
Kjøkken	72 m ²	10
Kontor 1	36 m ²	3
Kontor 2	30 m ²	2
WC	18 m ²	Sporadisk personopphold
Lokale 2	150 m ²	150
Spisesal	244,8 m ²	175

3.3 Scenario

Det er simulert ulike brannscenarier for å se på hvilke parametere som har betydning for prediksjon av brannforløp og tilgjengelig rømningstid og hvor stor innvirkning endring av inngangsparameterne har på disse prediksjonene. I simuleringene antas det at brannens vekstfase kan beskrives ved t^2 -brannen. I simuleringene er det ikke satt inn noen aktive tiltak, som for eksempel sprinkler og røykventilasjon ettersom det ikke er av interesse å se på effekten av slike tiltak.

I beregningene som gjøres i Argos er det et stort antall parametere som inngår. Det er valgt å se på noen av disse. De som betraktes er vekstfaktoren (α), strålingsandelen, maksimal energiproduksjon og åpninger.

3.3.1 Endre vekstfaktor

Det er først sett på hvilken betydning brannens vekstfaktor har for den tilgjengelige rømningstiden. Denne inngangsparameteren er endret for å se på hvor sensitiv den tilgjengelige rømningstiden er overfor denne parameteren. Tabell 5 viser en oversikt over hvilke scenarioer med ulik vekstfaktorer som er gjort. I disse simuleringene er brannen satt til å starte i hjørne i lokale 1.

Tabell 5: Scenario for brann i lokale 1.

Scenario	Vekstfaktor (kW/s²)
5	0,004
6	0,005
7	0,006
8	0,007
9	0,008
10	0,009
11	0,010
12	0,011
13	0,017
14	0,022
15	0,027
16	0,032
17	0,037
18	0,042
19	0,067
20	0,087
21	0,107
22	0,127
23	0,147
24	0,167

3.3.2 Endre startbrannsted

I tillegg til å endre vekstfaktoren er det utført simuleringer for å se på betydningen av brannens startsted. Scenario 1 – 4 i Tabell 6 er simulert for forskjellige startbrannsteder. Tabell 7 viser en oversikt over hvilke rom brannen er satt til å starte. Det er utført to simuleringer av scenario 1 – 4 for hvert av rommene, hvor brannen i den ene simuleringen starter i hjørnet av rommet, mens den i den andre starter i midten av rommet.

Tabell 6: Scenario med ulik vekstfaktor.

Scenario	Vekstfaktor (kW/s ²)	Plassering av brannen		
		(a)	(b)	
1	Langsom	0,003	i hjørne av rommet	midt i rommet
2	Medium	0,012	i hjørne av rommet	midt i rommet
3	Rask	0,047	i hjørne av rommet	midt i rommet
4	Ultra-rask	0,190	i hjørne av rommet	midt i rommet

Tabell 7: Forskjellig startbrannsted.

Startbrannsted:
Lokale 1
Spisesal
Lokale 2
Korridor

3.3.3 Endre strålingsandel

En annen inngangsparameter som er endret er strålingsandelen. Den er normalt satt til 35 % i Argos som nevnt tidligere. Når strålingsandelen er liten vil det produseres mindre røyk enn når den er høy. Det er sett på 7 scenarioer med ulik strålingsandel. Tabell 8 gir en oversikt over hvilke strålingsandeler som er benyttet. Disse scenarioene er simulert for en langsom, medium, rask og ultra-rask brann, det vil si fire simuleringer for hvert av de sju scenarioene. Brannens startsted er i disse simuleringene lokalisert i hjørnet av lokale 1.

Tabell 8: Scenario med ulik strålingsandel.

Scenario	Strålingsandel [-]
1	0,05
2	0,10
3	0,15
4	0,20
5	0,25
6	0,30
7	0,40

3.3.4 Endre maksimal energiproduksjon

Den maksimale energiproduksjonen er i Argos normalt satt til 5 MW. Det er utført simuleringer hvor denne inngangsparameteren er endret for å se på hvilken effekt denne vil ha på den tilgjengelige rømningstiden. Det er utført simuleringer med en maksimal energiproduksjon som angitt i Tabell 9, totalt 6 scenario. Disse scenarioene ble simulert for alle de fire α -verdiene, det vil si fire simuleringer for hvert av de seks scenarioene. I disse scenarioene ble brannen satt til å starte i hjørnet av lokale 1. Den maksimale energiproduksjonen til brannen er enten brensels- eller ventilasjonskontrollert.

Tabell 9: Scenario med ulik maksimal energiproduksjon.

Scenario	Maksimal energiproduksjon [MW]
1	2
2	3
3	4
4	6
5	7
6	8

3.3.5 Endre på åpninger (ventilasjonsfaktor)

Det er også gjort simuleringer hvor det er sett på effekten til åpninger på den tilgjengelige rømningstiden ved langsom, medium og rask brannvekst. I tillegg til å se på innvirkningen av å endre strålingsandelen. Scenarioene er simulert med en strålingsandel på 20, 30 og 40 %. Brannen er satt til å starte i hjørnet av lokale 1.

Åpningene i lokale 1 (brannrommet) i scenarioene beskrevet ovenfor består av de to dørene til spisesalen på 1,2 m x 2,1 m. For å se på effekten til åpninger er det i tillegg satt inn en glassvegg som utgjør ett stort vindu på 10 m x 2,5 m.

Beregning av ventilasjonsfaktoren $A_0\sqrt{H_0}$ er gjort ved bruk av formler gitt i Karlsson og Quintiere (2000):

$$A_0 = \sum A_i = \sum b_i h_i = 1,2 \text{ m} \cdot 2,1 \text{ m} \cdot 2 + 10 \text{ m} \cdot 2,5 \text{ m} = 30,04 \text{ m}$$

$$H_0 = \frac{\sum A_i h_i}{A_0} = \frac{1,2 \text{ m} \cdot 2,1 \text{ m} \cdot 2,1 \text{ m} \cdot 2 + 10 \text{ m} \cdot 2,5 \text{ m} \cdot 2,5 \text{ m}}{30,04 \text{ m}} = 2,43 \text{ m}$$

$$A_0\sqrt{H_0} = 30,04 \text{ m} \cdot \sqrt{2,43 \text{ m}} = \underline{46,86}$$

Det er utført simuleringer med denne ventilasjonsfaktoren. I tillegg så er den endret med ± 25 %. Dette tilsvarer en endring i ventilasjonsfaktoren på $\pm 11,71$.

I simuleringene hvor ventilasjonsfaktoren er endret med -25 % er vinduets høyde redusert til 1,98 m. Dette gir en ventilasjonsfaktor på 35,17. Videre er høyden til vinduet økt til 2,97 m når ventilasjonsfaktoren øker med 25 %, den blir da 58,58.

Tabell 10: Scenario med endre ventilasjonsfaktor.

Scenario	Vekstfaktor	Ventilasjonsfaktor $A_0\sqrt{H_0}$		
1	Langsom			
2	Medium	-25 %	0	+25 %
3	Rask			

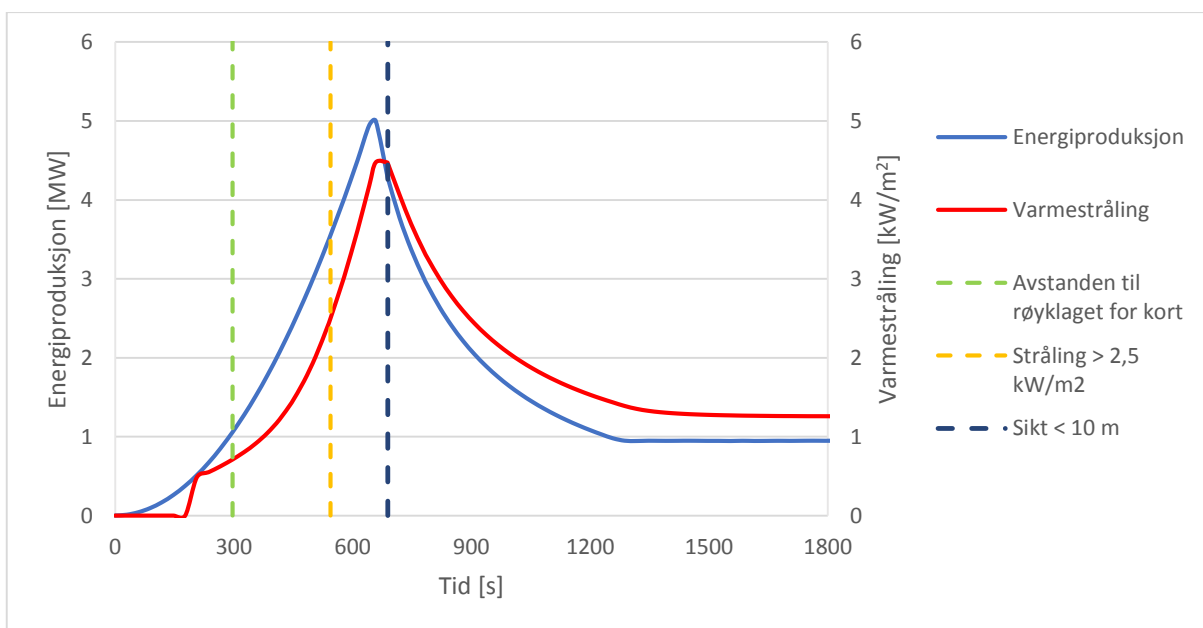
4 Resultater

I dette kapitlet presenteres først et av scenarioene som er simulert for å vise hvordan en brann utvikler seg. Deretter presenteres resultatene fra sensitivitetsanalysen, det vil si hvordan tilgjengelig rømningstid påvirkes av å endre vekstfaktoren (α), strålingsandelen, maksimal energiproduksjon og åpninger, som er de inngangsparameterne som er betraktet.

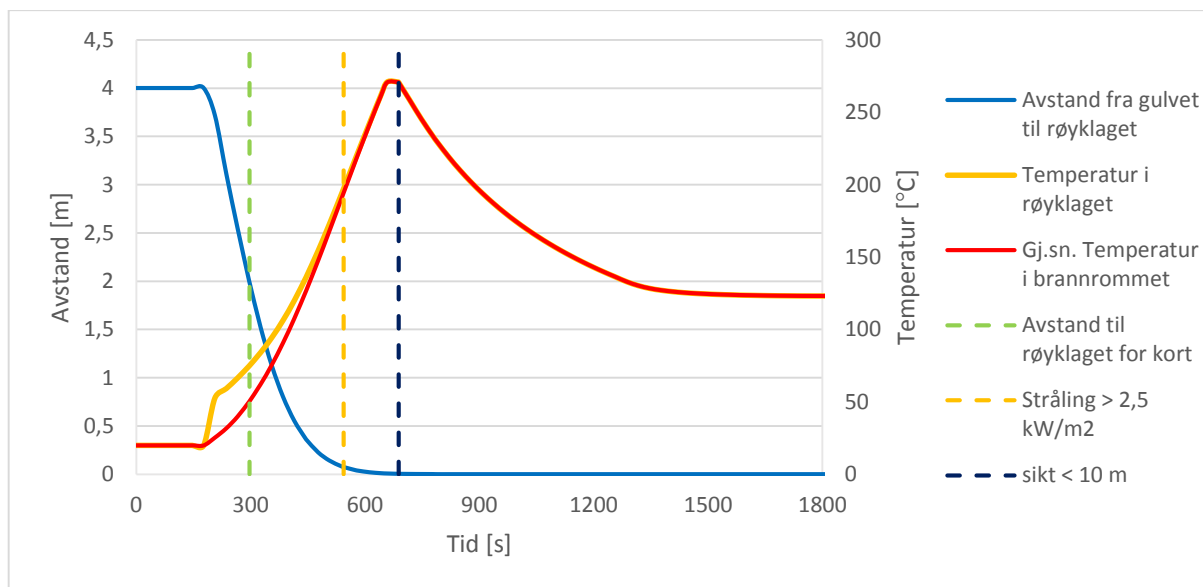
4.1 Eksempel på brannforløp

Her presenteres det hvordan et brannforløp er predikert av programvaren Argos. Det er valgt å se på scenarioet hvor brannen utviklet seg med en medium veksthastighet ($\alpha = 0,012 \text{ kW/s}^2$). Dette eksempelet er gitt for å beskrive hvordan en brann utvikler seg og hvordan de kritiske forholdene bestemmes. I simuleringene var brannen plassert i hjørne av lokale 1 og dørene mellom rommene var lukket gjennom hele brannforløpet.

Brannen vil antennes med en gang, det vil si at den begynner å vokse ved tiden $t = 0$, ettersom det er valgt at vekstfase kan beskrives ved modellen $\dot{Q} = \alpha t^2$. Figur 13 viser den predikerte energiproduksjonen. Røyken som produseres vil stige opp på grunn av oppdriftskreftene og når den treffer taket vil røyken spre seg utover mot veggene. Når røyken treffer veggene begynner det å dannes et røyklag. Etter rundt 180 – 200 s predikeres det at det vil begynne å formes et røyklag i lokale 1, som vist i Figur 14. Konsekvensen av at det dannes et røyklag er økt varmestråling (se Figur 13) og temperatur (se Figur 14) i brannrommet. Etter omtrent 300 s predikeres det at det vil være produsert så mye røyk at røyklaget vil ha sunket så langt ned mot gulvet at avstanden fra gulvet til røyklaget er 2 m ($1,6 \text{ m} + 0,1 \cdot 4 \text{ m} = 2 \text{ m}$), se Figur 14. Dette er kriteriet for når det blir kritisk i forhold til høyden til røyklaget, det vil si at kritiske forhold har oppstått i lokale 1 og at den predikerte tilgjengelige rømningstiden i dette rommet er 300 s. Videre predikeres det at varmestrålingen fra røyklaget i lokale 1 vil være større enn $2,5 \text{ kW/m}^2$ etter 540 s, se Figur 13. Det vil da være kritisk å oppholde seg i dette rommet på grunn av varmestråling.



Figur 13: Energiproduksjon og varmestråling fra røyklaget i brannrommet.

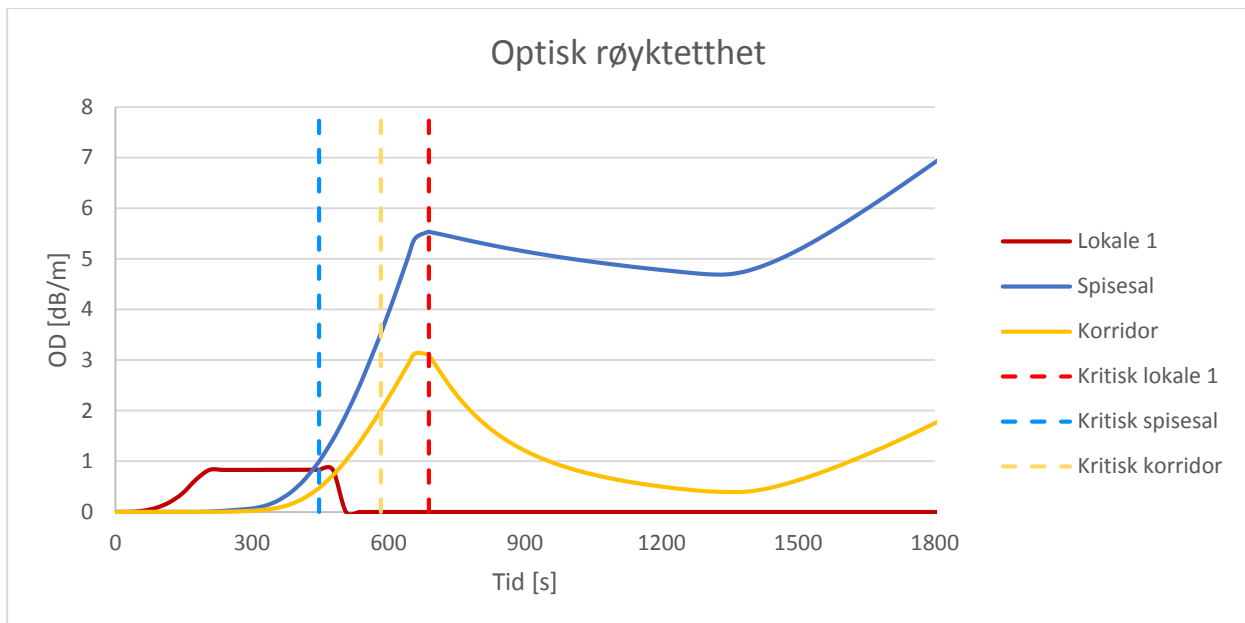


Figur 14: Avstand fra gulvet til røyklaget, temperatur i røyklaget og gjennomsnittlig temperatur i brannrommet.

Brannen begrenser seg til å være i lokale 1, men røyken som genereres vil trenge ut til de andre rommene i bygningen. I dette scenarioet predikeres det at røyken vil spre seg til spisesalen og korridoren, hvor røyken vil fordele seg jevnt i hele rommet som følge av liten temperaturforskjell mellom røyken og omgivelsestemperaturen. Det vil derfor ikke dannes et røyklag i disse rommene. Den optiske røyktettheten i rommet benyttes for å si når sikten i rommet er for kort (se Figur 15). Denne måles i dB/m. Sikten er ikke begrenset dersom den optiske røyktettheten er null. En optisk røyktetthet på 1 dB/m og 2 dB/m tilsvarer henholdsvis en sikt lengde på 10 m og 5 m. Etter rundt 450 s predikeres det at det vil være så mye røyk i spisesalen at sikten er mindre enn 10 m, som er kriteriet for kritiske forhold med hensyn på sikt i store rom. Dette blir da den tilgjengelige rømningstiden i spisesalen.

I korridoren vil sikten være mindre enn 10 m etter ca. 580 s, som er kriteriet for kritiske forhold med hensyn på sikt i små rom. Dette blir da den tilgjengelige rømningstiden i korridoren. Når brannen har vart i nesten 660 s vil brannen begynne å avta. Av Figur 13, Figur 14 og Figur 15 kan en se at ved denne tiden begynner brannens energiproduksjon, varmestråling, temperatur og røyktetthet å avta.

I lokale 1 vil det etter omtrent 690 s være så mye røyk også under røyklaget at sikten vil være mindre enn 10 m i dette rommet. Røyktettheten vil være mindre her ettersom mesteparten av røyken vil stige opp mot taket på grunn av temperaturforskjellen. Etter rett over 13 min er hele lokale 1 fylt med røyk, som sett av Figur 14.



Figur 15: Optisk røyktetthet i rommene.

Figur 13, Figur 14 og Figur 15 viser hvordan de forskjellige kritiske forholdene vil inntreffe og er bestemt ved bruk av datamodellen Argos. Avhengig av byggets geometri, brannens størrelse og andre faktorer vil de kritiske forholdene kunne variere. Det kan utføres en sensitivitetsanalyse for å se på hvordan tid til kritiske forholdene oppstår påvirkes ved endring av inngangsparametere (se kapittel 4.2) og en usikkerhetsanalyse (se kapittel 5) for å se på usikkerheten knyttet til prediksjonene.

4.2 Resultat fra sensitivitetsanalysen

Tid til kritiske forhold oppstår er beregnet i simuleringene som ble utført i Argos. Resultatene beskrives i dette kapitlet. Det er den tilgjengelige rømningstiden i de rommene hvor det er flest mennesker som oppholde seg og som er en del av rømningsveien det er fokusert på, det vil si lokale 1, spisesal, lokale 2 og korridoren.

Inngangsparametere vil påvirke ulike utgangstørrelser fra Argos, som blant annet temperatur, energiproduksjon og høyde fra gulvet til røyklaget. Det er her valgt å se på hvordan utgangstørrelsen tilgjengelige rømningstid påvirkes ettersom denne er av interesse ved en brannteknisk analyse av rømningsforholdene i et bygg.

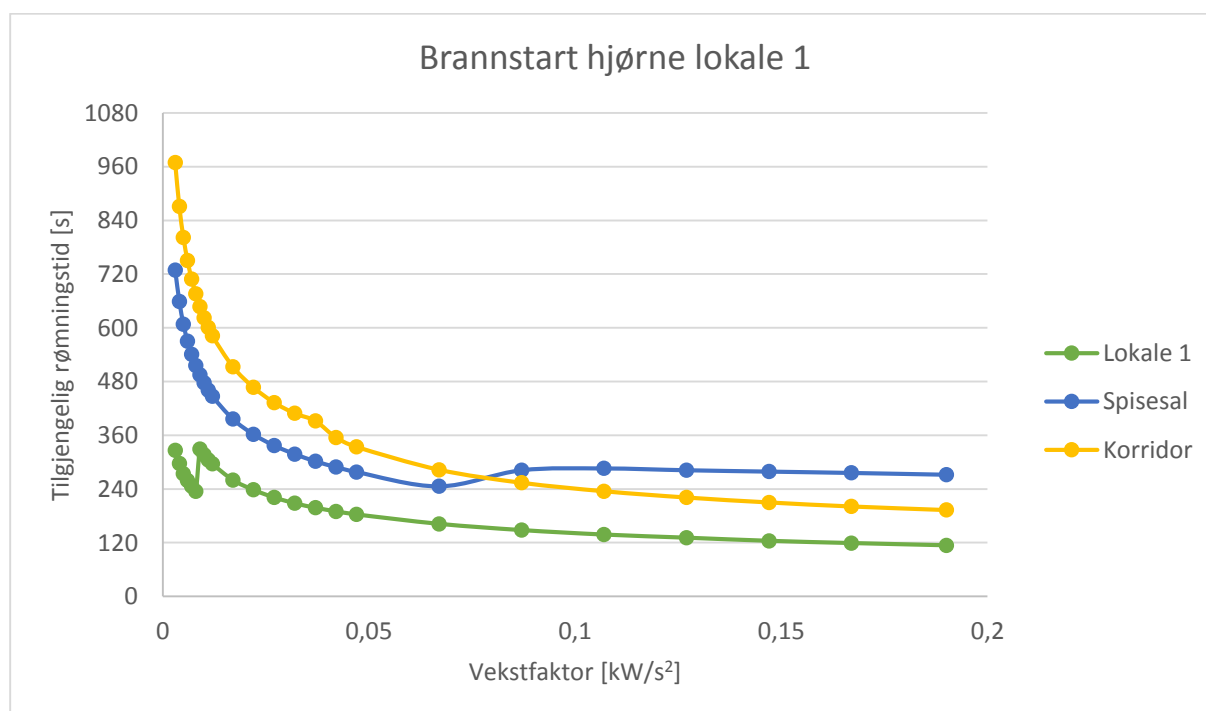
4.2.1 Tilgjengelig rømningstid som funksjon av vekstfaktor (α)

Vekstfaktoren (α) er en sentral inngangsparameter i modellen $\dot{Q} = \alpha t^2$. Valg av vekstfaktor påvirket den tilgjengelige rømningstiden i stor grad i simuleringene. Resultatene fra sensitivitetsanalysen som ble utført med hensyn på denne inngangsparameteren presenteres her. Brannen ble satt til å starte i hjørne av lokale 1 i disse simuleringene. Figur 16 viser at det oppstår raskest kritiske forhold i brannrommet. I spisesalen og korridoren tok det vesentlig lengre tid før det ble kritisk å oppholde seg og det oppsto ikke kritiske forhold i lokale 2 som ikke ligger vegg i vegg med lokale 1.

Ved en langsom brannutvikling ($\alpha = 0,003 \text{ kW/s}^2$) tok det 326 s før det ble kritisk i startbrannrommet, mens det gikk i underkant av 120 s (114 s) før det ble kritisk når brannen utviklet seg ultra-raskt ($\alpha = 0,190 \text{ kW/s}^2$). Mellom den lengste og korteste tilgjengelige rømningstiden i dette rommet er det altså en differanse på 212 s. En oversikt over tiden til kritiske forhold er gitt i Vedlegg A – Tilgjengelig rømningstid som funksjon av vekstfaktor.

Den tilgjengelige rømningstiden ble kortere etter hvert som vekstfaktoren økte, med unntak av i lokale 1, som en kan se av Figur 16. Tiden til kritiske forhold er kortere for en medium brannvekst enn for en langsom brannvekst, men når vekstfaktoren øker fra $0,008 \text{ kW/s}^2$ til $0,009 \text{ kW/s}^2$ øker tiden til kritiske forhold fra 235 s til 329 s, dvs. med 94 s. Ved $\alpha \leq 0,008 \text{ kW/s}^2$ var det kritiske forholdet som oppsto at sikten var mindre enn 10 m, mens ved $\alpha \geq 0,009 \text{ kW/s}^2$ var det høyden fra gulvet til røyklaget som ble for kort. Disse resultatene er svært overraskende, men kan ha sammenheng med at en kraftigere brann danner et skarpt skille mellom røyklaget og luften under.

I spisesalen og korridoren var det kriteriet om at sikten må være lang nok som ble kritisk i alle simuleringene. På et tidspunkt går det også lengre tid før kritiske forhold oppstår når vekstfaktoren økes. Det antas at dette muligens skyldes byggets utforming som følge av at det er helt åpent mellom korridoren og spisesalen og hvordan dette modelleres i Argos. Når brannen utvikler seg raskere kan det antas at røyken i større grad vil spre seg til korridoren og at det vil gå lengre tid før det blir kritisk i spisesalen. Årsaken til denne økningen vil ikke bli sett på videre da det ligger utenfor problemstillingen i denne oppgavens å se på programmeringen av Argos.

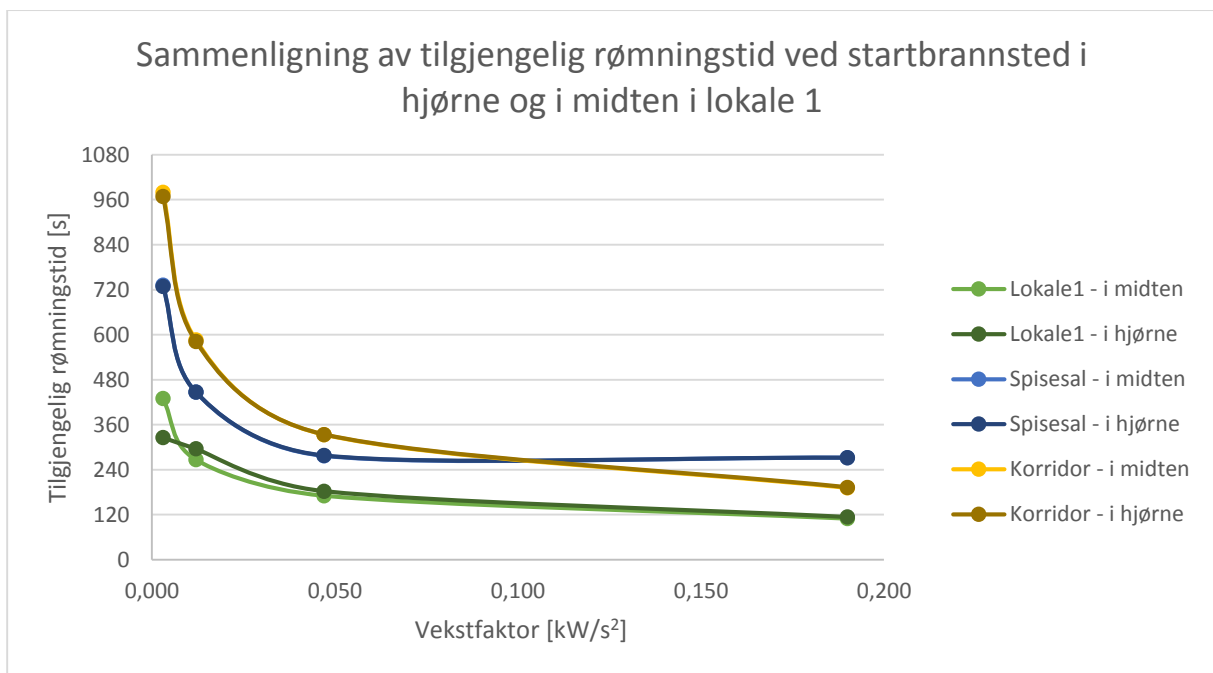


Figur 16: Tilgjengelig rømningstid vs. vekstfaktor ved brannstartsted i hjørne av lokale 1.

4.2.2 Tilgjengelig rømningstid som funksjon av startbrannsted

To lokasjoner av startbrannen ble undersøkt. Den tilgjengelige rømningstiden ble i liten grad påvirket av å endre startbrannstedet fra hjørne av rommet til midten av rommet. I Figur 17 sammenlignes den tilgjengelige rømningstiden når brannens startsted er henholdsvis i hjørnet og i midten av lokale 1.

Resultatene viser at den tilgjengelige rømningstiden er tilnærmet lik i korridoren og spisesalen når startbrannstedet endres i lokale 1. I brannrommet (lokale 1) var det en liten forskjell i tiden til kritiske forhold når brannens startsted ble flyttet. Differansen er størst for en langsom brannutvikling og avtar når vekstfaktoren øker. Ved en ultra-rask brannutvikling var det ingen tidsforskjell.



Figur 17: Sammenligning av tilgjengelig rømningstid når startbrannstedet er i hjørne og midten i lokale 1.

Scenarioene med brannstartsted i hjørne og i midten av spisesalen, lokale 2 og korridoren viste den samme trenden som i lokale 1. Resultatene fra disse er gitt i Vedlegg B – Tilgjengelig rømningstid som funksjon av startbrannsted.

Det var når brannens startsted var plassert i korridoren at tiden til kritiske forhold oppsto var kortest. Resultatene over scenarioene med ulikt startbrannsted er gitt i Vedlegg B – Tilgjengelig rømningstid som funksjon av startbrannsted.

4.2.3 Tilgjengelig rømningstid som funksjon av strålingsandel

Tiden til kritiske forhold var lite sensitiv overfor endring av strålingsandelen. I disse simuleringene startet brannen i lokale 1. I lokale 2 oppsto det ikke kritiske forhold i løpet av brannens varighet.

I Argos er strålingsandelens standardverdi 0,35 og i simuleringene ble den variert fra 0,05 til 0,40. I startbrannrommet hadde det ingen innvirkning på resultatet å endre strålingsandelen ved en langsom brannutvikling. For de andre α -verdiene ble den tilgjengelige rømningstiden lengre når strålingsandelen ble satt til å være større enn 0,35 og kortere når den var mindre enn 0,35. Når strålingsandelen ble endret med $0,35 \pm 0,05$ så var endringen i tilgjengelig rømningstid på rundt ± 4 s for alle vekstfaktorene. Den tilgjengelige rømningstiden avtok videre med rundt 4 s for hver gang strålingsandelen ble redusert med 0,05.

For de omkringliggende rommene påvirket endring av strålingsandelen den tilgjengelige rømningstiden mest når brannen utviklet seg langsomt. Når strålingsandelen ble endret med $0,35 \pm 0,05$ så var endringen i tilgjengelig rømningstid da på rundt ± 10 s. Når brannen utviklet seg raskere ble endringen i tilgjengelig rømningstid mindre.

I sum er endringene svært små. En oversikt over den tilgjengelige rømningstiden i de ulike rommene og en grafisk presentasjon av den tilgjengelige rømningstiden som funksjon av strålingsandelen er gitt i Vedlegg C – Tilgjengelig rømningstid som funksjon av strålingsandel.

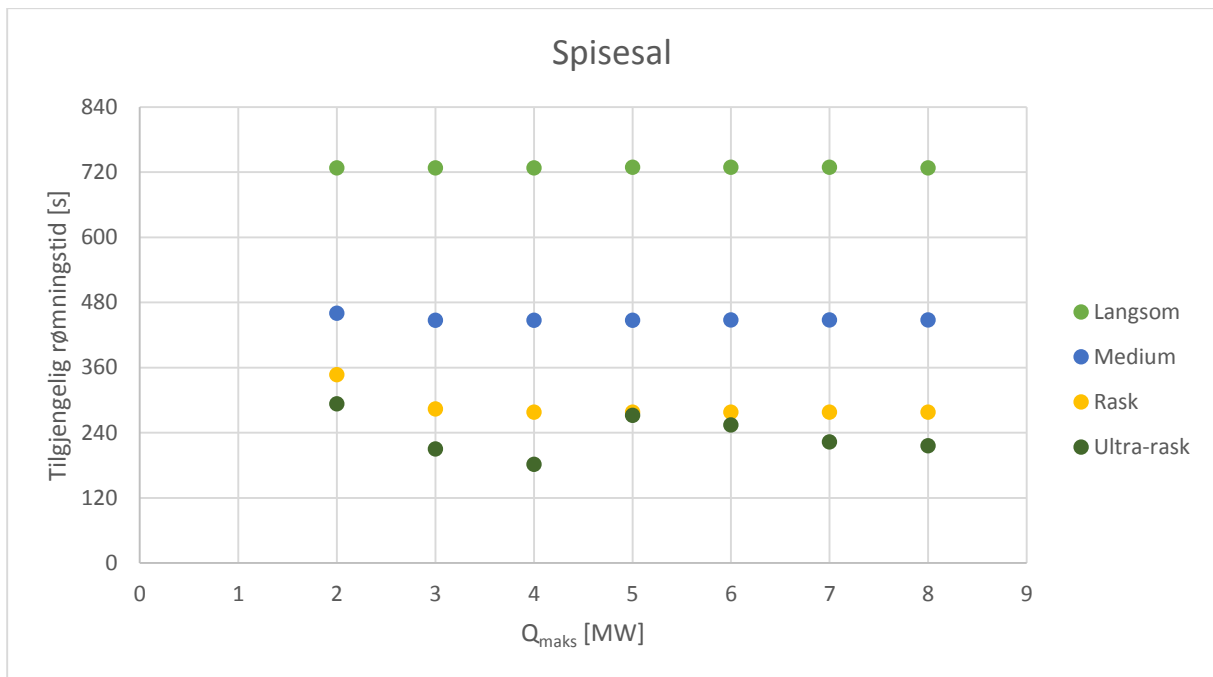
4.2.4 Tilgjengelig rømningstid som funksjon av maksimal energiproduksjon

I Argos er den maksimale energiproduksjonen satt til 5 MW, og i sensitivitetsanalysen er det vurdert $5 \text{ MW} \pm 3, 2$ og 1 MW.

Den maksimale energiproduksjonen påvirket i liten grad tiden til kritiske forhold i startbrannrommet, men i de omkringliggende rommene var tiden mer sensitiv overfor endring av denne inngangsparameteren. I disse simuleringene var startbrannstedet i hjørne av lokale 1. Det oppsto ikke kritiske forhold i lokale 2 i disse scenarioene.

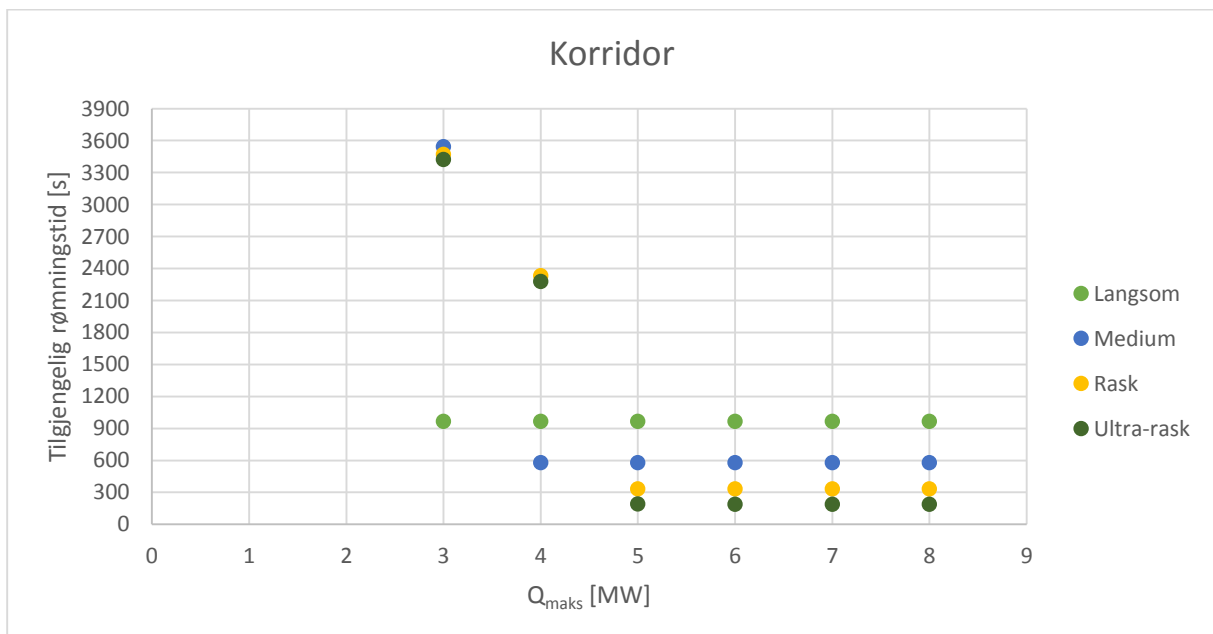
Den predikerte tilgjengelige rømningstiden i startbrannrommet var ikke sensitiv overfor endring av den maksimale energiproduksjonen. Tiden til kritiske forhold oppsto endret seg bare med noen sekunder. Det var bare vekstfaktoren α som påvirket den tilgjengelige rømningstiden. Resultatene fra disse simuleringene presenteres i Vedlegg D – Tilgjengelig rømningstid som funksjon av maksimal energiproduksjon.

Figur 18 viser at det var lite endring i tilgjengelig rømningstid i spisesalen for en langsom og medium brannutvikling. Når brannen utviklet seg raskt avtok tiden med 63 s når den maksimale energiproduksjonen økte fra 2 til 3 MW og ytterligere 6 s når den gikk fra 3 til 4 MW. For en høyere maksimal energiproduksjon var tiden uendret. Ved en ultra-rask brannvekst endret den tilgjengelige rømningstiden seg mest.



Figur 18: Tilgjengelig rømmingstid vs. maksimal energiproduksjon spisesal.

I korridoren oppsto det ikke kritiske forhold når den maksimale energiproduksjonen var lavest (2 MW), uavhengig av vekstfaktor. Ved en langsom brannutvikling endret tiden til kritiske forhold seg i liten grad. For en medium, rask og ultra-rask brannvekst var tiden til kritiske forhold oppsto betydelig lengre når den maksimale energiproduksjon var lav, se Figur 19.



Figur 19: Tilgjengelig rømmingstid vs. maksimal energiproduksjon korridor.

4.2.5 Tilgjengelig rømningstid som funksjon av strålingsandel og åpninger

Å sette inn et vindu i lokale 1 førte til at det ikke oppsto kritiske forhold i de omkringliggende rommene i bygningen, det var kun i brannrommet det ble kritisk. Tabell 11 viser tid til kritiske forhold i lokale 1, hvor brannen startet.

Når åpningsarealet ble endret med $\pm 25\%$ ble ikke den tilgjengelige rømningstiden påvirket når brannen utviklet seg langsomt. Når brannens vekstfaktor α økte ble effekten av å endre åpningsarealet større. Tiden til kritiske forhold ble lenger når åpningsarealet økte med 25% og mindre når åpningsarealet ble redusert med 25% . Det ga en effekt å endre åpningsarealet, men den var liten.

Å endre strålingsandel påvirket ikke tilgjengelig rømningstid når brannen utviklet seg langsomt. Ved en medium og rask brannutvikling økte tilgjengelig rømningstid noen sekunder når strålingsandelen økte.

Tabell 11: Tilgjengelig rømningstid ved endring av vekstfaktor, strålingsandel og åpninger.

		Ventilasjonsfaktor $A_0\sqrt{H_0}$		
Strålingsandel	Vekstfaktor α	-25 %	0	+25 %
20 %	Langsom	326	326	326
	Medium	287	289	290
	Rask	175	176	177
30 %	Langsom	326	326	326
	Medium	293	294	296
	Rask	183	181	183
40 %	Langsom	326	326	326
	Medium	301	303	304
	Rask	183	188	189

4.2.6 Oppsummering av sensitivitetsanalysen

De inngangsparameterne som påvirket den tilgjengelige rømningstiden var vekstfaktoren α og åpningene (ventilasjonsfaktoren). Brannens plassering, strålingsandel og maksimale energiproduksjon hadde liten påvirkning på den tilgjengelige rømningstiden.

5 Usikkerhetsanalyse

I dette kapitlet presenteres analysen som er utført for å vurdere usikkerheten knyttet til prediksjon av brannforløp og tilgjengelig rømningstid. Først klargjøres det hvilke størrelser som er av interesse og hvilken modell og inngangsparametere som benyttes i brannmodelleringen som er utført i denne rapporten. Deretter behandles usikkerheten ved kvalitativ klassifisering og subjektiv sannsynlighet.

5.1 Modellusikkerhet og brannmodellering

Som nevnt i kapittel 2.1.3 så vil både funksjonen G og inngangsparametere X påvirke utgangsverdiene fra en modell som er utviklet for å predikere en størrelse av interesse Z . Både strukturen til modellen og parameterne vil bidra til usikkerhet knyttet til modellens prediksjoner. For å behandle usikkerhet er det dermed nødvendig å klargjøre hvilke størrelser som er av interesse, samt hvilken modell og inngangsparametere som benyttes.

Hensikten med brannmodelleringen i denne oppgaven er å predikere tilgjengelig rømningstid. Størrelsen av interesse, Z , vil dermed være tilgjengelig rømningstid, som predikeres ved å benytte Argos. Denne programvaren vil da utgjøre modellen $G(X)$ som benyttes for å predikere Z . Videre vil inngangsparametere X som benyttes for å predikere den tilgjengelige rømningstiden være variablene som defineres i Argos, som vekstfaktor, maksimal energiproduksjon og strålingsandel. Argos avhenger av flere parametere enn disse, men de betraktes ikke i denne oppgaven.

Det er valgt å benytte t^2 -brannen for beskrive brannens vekstfase. Denne bli dermed en del-modell som benyttes i Argos. Denne kan defineres som $M(t|\alpha) = \alpha t^2$. I denne modellen vil den usikre inngangsparameteren være α . Videre i denne oppgaven vil det fokuseres på denne del-modellen.

Oversikt over Z , G og X

Størrelse av interesse, Z :
Tilgjengelig rømningstid

Modell, $G(X)$:
Programvaren Argos

For å beskrive brannens vekstfase benyttes t^2 -brannen. Denne blir da en del-modell $M(t|\alpha) = \alpha t^2$, hvor $X = \alpha$. Her er t bare en (tids)indeksering av funksjonen og ikke en del av X .

Usikre inngangsparametere, X :
 α – brannens vekstfaktor

$\chi_{\text{stråling}}$ – strålingsandel

\dot{Q}_{maks} – maksimal energiproduksjon

Type usikkerhet om inngangsparametere:

Epistemisk usikkerhet om brannens vekstfaktor, maksimale energiproduksjon og strålingsandel.

Størrelsen av interesse Z er som nevnt over tilgjengelig rømningstid. I Walaker (2014) er det nødvendig rømningstid som er av interesse og dermed utgjør Z . For å skille mellom disse kan de defineres som henholdsvis Z_1 og Z_2 . Modellene som benyttes for å predikere Z_1 og Z_2 kan defineres som henholdsvis $G_1(V)$ og $G_2(W)$, hvor V og W er inngangsparameterne i de respektive modellene.

Sikkerhetsmarginen er differansen mellom tilgjengelig og nødvendig rømningstid og dersom denne defineres som Y , kan den uttrykkes som $Y = Z_1 - Z_2$. Modellen $G(V, W) = G_1(V) - G_2(W)$ kan da benyttes for å predikere sikkerhetsmarginen. En vil da "optimalt" sett være interessert i å etablere en sannsynlighetsfordeling for Y , hvor en da vil være spesielt interessert i sannsynligheten $P(Y \leq 0)$ for at nødvendig rømningstid overstiger tilgjengelig rømningstid.

5.2 Behandling av modellusikkerhet

For å vurdere usikkerheten knyttet til prediksjon av tilgjengelig rømningstid må modellusikkerheten knyttet til programvaren Argos vurderes. Videre vil det fokuseres på delmodellen $M(t|\alpha) = \alpha t^2$ som benyttes for å predikere brannens energiproduksjon i vekstfasen. Det vil utføres en usikkerhetsanalyse av denne modellen. For modellen Argos vil det i prinsippet være mulig å anvende samme type analyse, men det vil være omfattende og praktisk vanskelig.

I denne casestudien antas det at brannens vekstfase kan beskrives ved t^2 -brannen. Det er usikkerhet knyttet til om brannens energiproduksjon i vekstfasen vil følge denne modellen og hvor raskt brannen vil utvikle seg. Dette bidrar til usikkerhet knyttet til prediksjonen av tilgjengelig rømningstid.

Den sanne energiproduksjonen ved tid t er beskrevet ved $M_0(t)$. $M(t|\alpha)$ er en modell av den sanne $M_0(t)$ og α_0 er den ukjente sanne verdien til modellens parameter α .

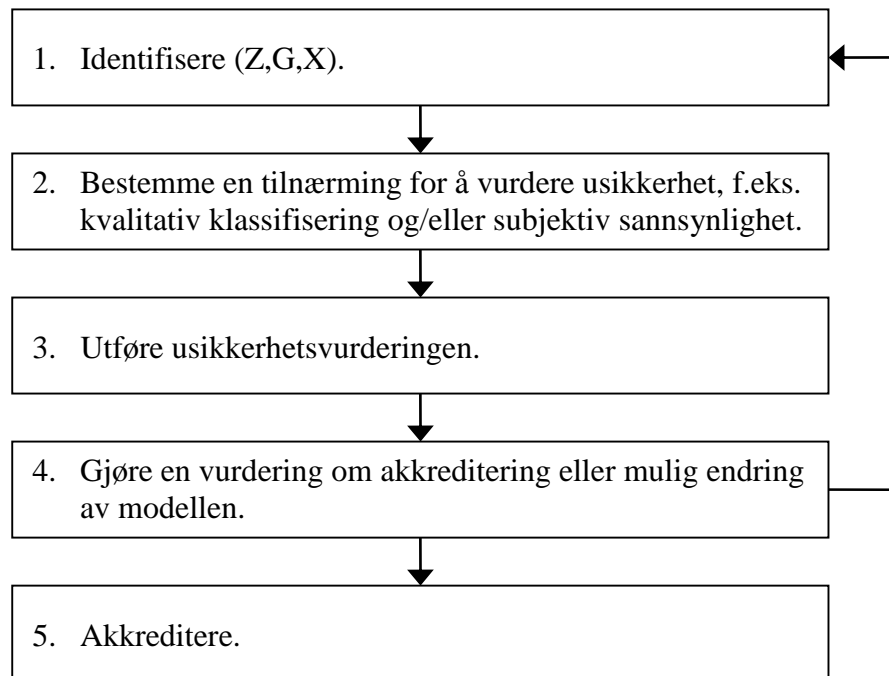
Usikkerhet knyttet til modellens utgangsstørrelse er det samme som usikkerhet om verdien til modellfeilen $\Delta_G(X) = G(X) - Z$. For modellen $M(t|\alpha) = \alpha t^2$ vil modellfeilen uttrykkes som $\Delta_M(t|\alpha) = M(t|\alpha) - M_0(t) = \alpha t^2 - M_0(t)$. Dersom den sanne verdien til α er kjent, dvs. α_0 , vil den strukturelle modellusikkerheten være usikkerhet om verdien til modellfeilen $\Delta_M(t|\alpha_0) = M(t|\alpha_0) - M_0(t) = \alpha_0 t^2 - M_0(t)$. Den usikre parameteren i modellen er α og parameterusikkerheten vil relatere til den sanne verdien til α , altså α_0 .

Videre vurderes modellusikkerheten ved å utføre en usikkerhetsanalyse. Behandlingen av usikkerheten er basert på metoden som anvendes i Bjerga et al. (2014). Stegene i denne metoden illustreres i Figur 20.

Det første steget (1) for å analysere og behandle modellusikkerhet er å identifisere hva som er (Z, G, X) . Dette er gjort i kapittel 5.1 for modellen som analyseres i denne rapporten.

Videre i steg (2) må det bestemmes hvordan usikkerheten skal vurderes. Det finnes ulike metoder og tilnærminger for dette. For eksempel så kan det gjøres en kvalitativ klassifisering av antagelsene eller benyttes subjektiv sannsynlighet og upresis sannsynlighet. Tilnærmingene som vil benyttes her er kvalitativ klassifisering og subjektiv sannsynlighet, hvor den første er en kvalitativ (ikke-tallfestet) tilnærming, mens den andre tilnærmingen er kvantitativ (tallfestet).

Det tredje steget (3) er å utføre usikkerhetsvurderingen. Deretter i steg (4) må det bedømmes om modellen kan godkjennes for det bestemte formålet eller om det må gjøres endringer med modellen. Dersom modellen må omformes må en tilbake til punkt 1 og gjenta steg 1 – 4 helt til modellen kan akkrediteres. Det siste steget (5) er å akkreditere modellen.



Figur 20: Stegene i analysen og behandlingen av modellusikkerhet i Bjerga et al. (2014).

5.2.1 Kvalitativ klassifisering

Kvalitativ klassifisering er en tilnærming som benyttes for å evaluere styrken til bakgrunnskunnskapen og er beskrevet i Flage og Aven (2009). Metoden tar utgangspunkt i antagelsene som gjøres i analysen ettersom disse kan være usikkerhetsfaktorer. Hvordan antagelsene påvirker risikoen analyseres gjennom denne tilnærmingen. Antagelsene som gjøres vurderes etter deres grad av usikkerhet og sensitivitet. Basert på disse vurderingene klassifiseres antagelsene etter hvor viktige de er. Klassifiseringen av viktigheten til antagelsene vil dermed reflektere graden av usikkerhet og sensitivitet.

Flage og Aven (2009) har gitt retningslinjer for hvordan antagelsene kan klassifiseres. Retningslinjene som anvendes i Bjerga et al. (2014) er basert på disse samt Selvik og Aven (2011). De samme retningslinjene vil bli benyttet her og er gitt i Tabell 12. Graden av usikkerhet og sensitivitet deles inn i tre grupper: høy, medium og lav, og viktigheten bestemmes på bakgrunn av hvordan usikkerhet og sensitivitet er klassifisert.

Tabell 12: Retningslinjer for klassifisering av antagelser (Bjerga et al., 2014, s. 52-53).

Aspect	Score	Interpretation
Uncertainty	High	One or more of the following conditions are met: <ul style="list-style-type: none"> – The assumptions made represent strong simplifications. – Data are not available, or are unreliable. – There is lack of agreement/consensus among experts. – The phenomena involved are not well understood; models are non-existent or known/believed to give poor predictions.
	Medium	Conditions between those characterising significant and minor uncertainty.
	Low	One or more of the following conditions are met: <ul style="list-style-type: none"> – The assumptions made are seen as very reasonable. – Much reliable data are available. – There is broad agreement/consensus among experts. – The phenomena involved are well understood; the models used are known to give predictions with the required accuracy.
Sensitivity	High	Relatively small changes in base case values needed to bring about altered conclusions.
	Medium	Relatively large changes in base case values needed to bring about altered conclusions.
	Low	Unrealistically large changes in base case values needed to bring about altered conclusions.
Importance	High/ medium/ low	Average of the other two aspect scores.

Det første som må gjøres er å identifisere alle antagelsene som gjøres ved bruk av den gitte modellen. I dette tilfellet gjøres følgende antagelser ved å si at brannens vekstfase kan beskrives ved en t^2 -brann (som nevnt i kapittel 2.2.4):

- a. Tennkilden har en rimelig stor flamme.
- b. Konstant varmeavgivelse per overflateareal, \dot{q}'' .
- c. Uniform brannbelastning.
- d. Brannstørrelsen kan beskrives ved arealet til en sirkel og brannens radius sprer seg med konstant hastighet i alle retninger.
- e. Verdien til brannens vekstfaktor (α).

Resultatet av evalueringen av antagelsene er presentert i Tabell 13. Etterpå er det en kort forklaring for valg av klassifisering.

Tabell 13: Klassifisering av antagelsene.

Antagelse	Usikkerhet	Sensitivitet	Viktighet
a. Tennkilde	Medium	Medium	Medium
b. Konstant \dot{q}''	Lav	Lav	Lav
c. Brannbelastning	Medium	Medium	Medium
d. Sirkulær brann	Høy	Medium	Medium-høy
e. Verdien til α	Høy	Høy	Høy

- a. *Tennkilden har rimelig stor flamme.* Antagelsen om at tennkilden har rimelig stor flamme har betydning for inkubasjonstiden t_0 , se Figur 9. Denne tiden kan tas hensyn til dersom det antas at det vil ta noe tid før det vil være etablert flammer ($\dot{Q} = \alpha(t - t_0)^2, t > t_0$). Beskrivelsen av energiproduksjonen vil være den samme uavhengig av tennkilden, men det vil ta lengre tid før brannens vekstfase begynner. Dette vil få betydning for den tilgjengelige rømningstiden. Usikkerheten vurderes som medium og sensitiviteten som medium ettersom det er usikkert hva tennkilden vil være og at type tennkilde kan påvirke den tilgjengelige rømningstiden relativt mye. Det er funnet at det er stor variasjon i hvor lang tid det tar før det vil være etablert flammer (Schifiliti et al., 2002).
- b. *Konstant varmeavgivelse per overflateareal.* I virkeligheten vil ikke brannens varmeavgivelse per areal være konstant. Varmeavgivelsen vil avhenge av hvilke materialer som brenner og plasseringen av brennbart materiale. Som følge av at det ikke er kjent hvordan brannbelastningen vil være til enhver tid vurderes det som fornuftig å anta at varmeavgivelsen er konstant per overflateareal og at det vil gi prediksjoner med tilstrekkelig nøyaktighet. Selv om brannbelastningen per areal kan variere, må det urealistisk store endringer til for å påvirke resultatet. Sensitiviteten vurderes derfor som lav. Usikkerheten vurderes også som lav, med bakgrunn i stor samstemthet i litteraturen på dette området (Drysdale, 2011; Karlsson & Quintiere; DeNinno, 2002).
- c. *Uniform brannbelastning.* Brannbelastning er en størrelse som varierer med tiden, det er ikke mulig å si hva den vil være på tidspunktet en brann vil inntreffe (Lie, 2002). Brannbelastningen vil være større i noen områder enn andre, men som følge av at plasseringen av brennbart materiale vil variere med tiden vil det være fornuftig å anta at brannbelastningen er uniform. Å angi brannbelastning per omhyllingsflate for å beskrive mengden brennbart materiale er en tilnærming som benyttes i stor grad ved brannmodellering. For ulike typer virksomheter finnes det statistisk data over hvilken brannbelastning per omhyllingsflate som kan forventes og som bør benyttes som dimensjonerende (Hicks, 2003), men dette er en grov tilnærming og det er usikkerhet knyttet til om den vil gjelde for det gitte byggverket. Variasjonen i brannbelastning kan variere mellom to bygg selv om de har samme type bruk. Usikkerheten vurderes derfor som medium. Det må være relativt store forskjeller i brannbelastningen i rommet dersom denne antagelsen skal påvirke resultatet. Sensitiviteten vurderes derfor som medium.

- d. *Brannstørrelsen kan beskrives ved arealet til en sirkel og brannens radius sprer seg med konstant hastighet i alle retninger.* Dersom det antas at brannbelastningen er uniform er det rimelig å anta at brannstørrelsen kan beskrives ved arealet til en sirkel og at brannens radius vil spre seg like mye og med konstant hastighet i alle retninger. I noen områder vil brannen i virkeligheten spre seg raskere ettersom det sannsynligvis vil være større brannbelastning i noen områder. Og motsatt, saktere der hvor brannbelastningen er mindre. Som følge av usikkerheten knyttet til brannbelastningen vil også hastigheten være usikker. At brannstørrelsen kan beskrives som en sirkel og at brannens radius sprer seg med konstant hastighet vurderes som en betydelig forenkling av en brann som involverer flere objekter. Modellering av flammespredning er vanskelig og gir dårlige prediksjoner (Jahn et al., 2011). På bakgrunn av dette vurderes usikkerheten som høy. Sensitiviteten vurderes som medium som følge av at energiproduksjonen og tid til kritiske forhold kan påvirkes av relativt store endringer i denne antagelsen.
- e. *Verdien til brannens vekstfaktor (α).* Det varierer hvilken vekstfaktor som anbefales for ulike virksomheter i ulik litteratur. For skoler og hoteller anbefales det i Karlsson og Quintiere (2000) å benytte $\alpha = 0,047 \text{ kW/s}^2$, mens Boverket (2011) anbefaler $\alpha = 0,012 \text{ kW/s}^2$. Etterforskning har også vist at hvor raskt en brann vokser kan variere betydelig (Holborn et al., 2004). Usikkerheten vurderes derfor som høy. Sensitiviteten vurderes også som høy ettersom det er relativt små endringer i vekstfaktoren som skal til for å endre resultatet, som simuleringene viste (se kapittel 4).

Parameterusikkerheten kan vurderes ved å benytte et troverdighetsintervall [a,b] (for eksempel 95 %). Dette uttrykker analytikerens grad av tro om at den sanne verdien til parameteren ligger i intervallet [a,b] (Aven, 2008). For modellen $M(t|\alpha)$ er den usikre parameteren vekstfaktoren α . Det vurderes at den sanne verdien til α vil ligge i intervallet [0,0001,0,20] med en (subjektiv) sannsynlighet på 95 %. Dette er på bakgrunn av analysen som Holborn et al. (2004) gjorde av virkelige branner. De fant at α var mindre enn $0,000412 \text{ kW/s}^2$ i noen av brannene og at det var noen branner som hadde en ultra-rask brannutvikling ($\alpha = 0,19 \text{ kW/s}^2$).

5.2.2 Subjektiv sannsynlighet

Subjektiv sannsynlighet er et mål på epistemisk usikkerhet og uttrykker analytikerens usikkerhet (grad av tro) om en hendelse/konsekvens vil inntreffe (Aven et al., 2014). Den tildelte sannsynligheten vil være basert på analytikerens bakgrunnskunnskap K og dermed vil en subjektiv sannsynlighet være avhengig av bakgrunnskunnskapen den er gitt på grunnlag av (Aven et al., 2014).

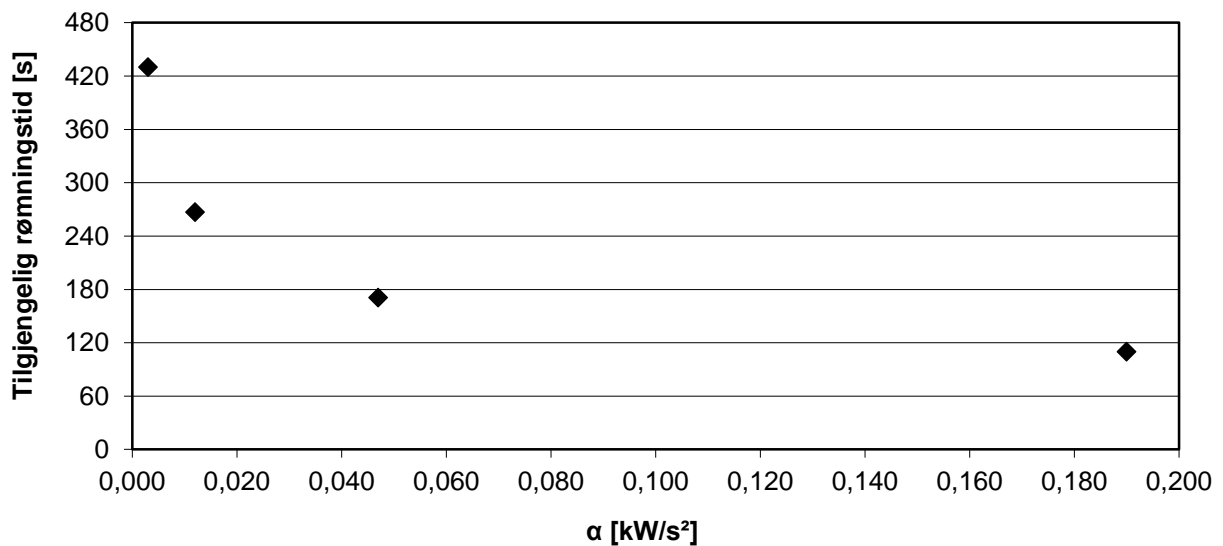
Blant risiko- og sikkerhetsanalytikere er det vanlig å forstå subjektiv sannsynlighet ved å referere til en standard for usikkerhet, en som benyttes mye er urnestandarden (Aven et al., 2014). Urnestandarden sier at dersom sannsynligheten for at en hendelse skal forekomme for eksempel er satt til 0,1 av en person, kan hans/hennes usikkerhet (grad av tro) knyttet til om hendelsen vil oppstå sammenlignes med usikkerheten (grad av tro) knyttet til det å trekke en bestemt ball ut av en urne som inneholder 10 baller.

Usikkerhet om verdien til modellfeilen er som sagt et resultat av både strukturell modellusikkerhet og parameterusikkerhet. Det er den strukturelle modellusikkerheten $\Delta_M(t|\alpha_0)$ til t^2 -brannen som vil vurderes her, det vil si at det antas at den sanne verdien til α er kjent. Det er bare del-modellen $M(t|\alpha)$ sitt bidrag til usikkerhet i prediksjonen av tilgjengelig rømningstid (tid til kritiske forhold) som betraktes. Modellfeilen til tilgjengelig rømningstid kan da uttrykkes

som $\Delta_G(\alpha_0) = G(\alpha) - G_0$. Når det da antas at den sanne verdien til α er kjent, vil den strukturelle modellfeilen være $\Delta_G(\alpha_0) = G(\alpha_0) - G_0$.

Den predikerte tilgjengelige rømningstiden kan sammenlignes med den sanne tilgjengelige rømningstiden for å kvantifisere den strukturelle modellfeilen $\Delta_G(\alpha_0) = G(\alpha_0) - G_0$. Den strukturelle modellfeilen kan vurderes for ulike verdier av α , men det vil her tas utgangspunkt i en α -verdi.

Figur 21 viser tilgjengelig rømningstid for $\alpha = 0,003, 0,012, 0,047$ og $0,19 \text{ kW/s}^2$ (dvs. for langsom, medium, rask og ultra-rask brannvekst). For en langsom, medium, rask og ultra-rask brannvekst er tiden henholdsvis 430, 267, 171 og 110 s. Dette er tiden det tar til kritiske forhold oppstår i lokale 1 når brannen starter i midten av rommet (se resultater i kapittel 4).



Figur 21: Tilgjengelig rømningstid som funksjon av $\alpha = 0,003, 0,012, 0,047$ og $0,19 \text{ kW/s}^2$.

Videre tas det utgangspunkt i $\alpha = 0,012 \text{ kW/s}^2$ (medium), ettersom Holborn et al. (2004) fant i etterforskning av virkelige branner at dette er den forventede vekstfaktoren for den gruppen bygninger et konferansesenter faller inn under. Den strukturelle modellfeilen blir da $\Delta_G(0,012) = G(0,012) - G_0 = 267 - G_0$. Den sanne tiden til kritiske forhold G_0 er ukjent og det er dermed nødvendig å gjøre en vurdering av denne tiden. Det må vurderes i hvilket intervall den sanne tilgjengelige rømningstiden trolig vil være. Den tilgjengelige rømningstiden vil være lenger enn 0 sekunder. Men det er lite sannsynlig at den vil være nær null ettersom det da må være urealistisk store mengder brennbart materiale eller materialer som brenner raskt i rommet. På den andre siden kan tiden til kritiske forhold være lang, for eksempel så kan inkubasjonstiden være opptil flere timer (Schifiliti et al., 2002). Det er heller ikke sikkert at det vil bli kritiske forhold i rommet. Teoretisk sett kan en derfor si at den tilgjengelige rømningstiden kan være uendelig lang. Den sanne tilgjengelige rømningstiden er vurdert å ligge i intervallet $(0, \infty)$. Dermed vil modellfeilen være i intervallet $(-\infty, 267)$ for $\Delta_G(0,012)$. Det vil si at forskjellen mellom den predikerte og virkelige framtidige tilgjengelige rømningstiden vil kunne være alt fra $-\infty$ til 267 sekunder.

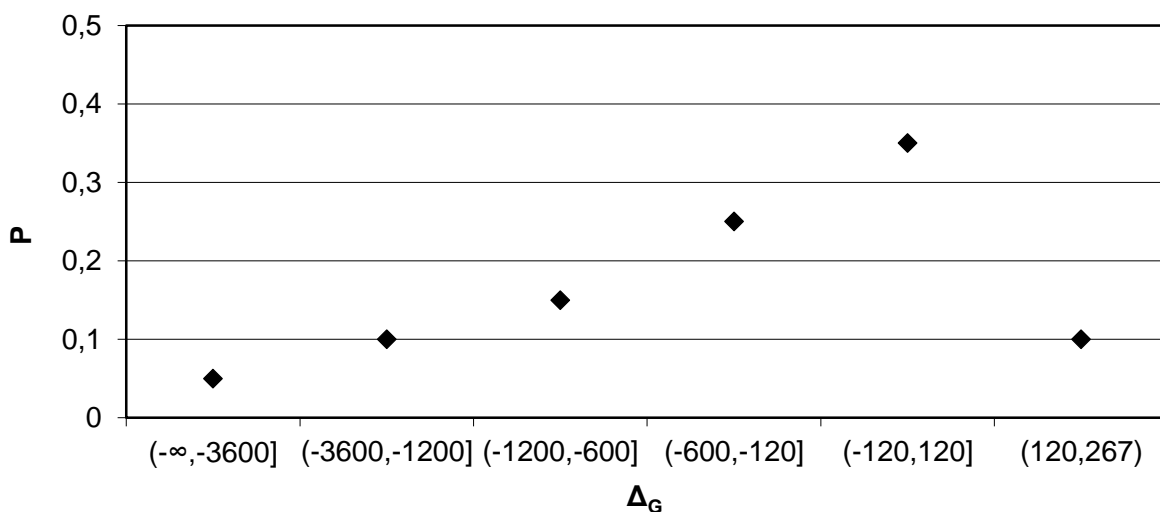
Det må videre tildeles subjektive sannsynligheter til verdiene i intervallet for modellfeilen. Modellfeilen er valgt å deles inn i intervaller for å tildele sannsynlighet. Intervallene og de

tilhørende tildelte sannsynlighetene er vist i Figur 22. For eksempel så er den strukturelle modellfeilen vurdert å være i intervallet $(-120,120]$ med en sannsynlighet på 0,35. Det vil si at sannsynligheten for at den virkelige tilgjengelige rømningstiden avviker med 2 minutter fra den predikerte tilgjengelige rømningstiden er vurdert å være 0,35.

Den virkelige tilgjengelige rømningstiden kan avvike fra den predikerte på grunn av antagelsene som gjøres i modellen $M(t|\alpha)$. Det vurderes at sannsynligheten for et negativt avvik er større enn for et positivt, altså at sannsynligheten er større for at den virkelige tilgjengelige rømningstiden er lengre enn den predikerte i forhold til sannsynligheten for at den virkelige tilgjengelige rømningstiden er mindre enn den predikerte. Dette er som følge av at det i simuleringene antas at inkubasjonstiden er $t_0 = 0$, som er det verst tenkelige scenarioet. Dersom tiden $t_0 > 0$ vil det resultere i en lengre tilgjengelig rømningstid og dermed et negativt avvik. Det er vist at det som regel vil ta noe tid før det er etablert flammer, altså at $t_0 > 0$ (Schifiliti et al., 2002). På grunnlag av at det er vanskelig å predikere hvordan en brann utvikler seg og energiproduksjonen og flammespredning (Rein et al., 2009; Jahn et al., 2011) kan den predikerte tilgjengelige rømningstiden avvike mye fra den virkelige tilgjengelige rømningstiden.

På grunnlag av dette vil en fordeling med negativ skjevhet og lang venstrehale være representativ for å uttrykke modellusikkerheten om modellfeilen knyttet til prediksjon av tilgjengelig rømningstid og den høyeste tildelte sannsynligheten er 0,35. Modellusikkerheten om verdien til modellfeilen er høy.

Den strukturelle modellusikkerheten avhenger av perfekt kunnskap om vekstfaktoren α til brannen. I noen perioder vil den kunne være høy og andre lav avhengig av brannbelastningen og plasseringen av brennbart materiale i bygget på tidspunktet en brann oppstår. Vekstfaktoren vil også variere etter hvor brannen starter og hvilken tennkilde som starter brannen.



Figur 22: Subjektiv sannsynlighet for modellfeilen Δ_G når $\alpha=0,012 \text{ kW/s}^2$.

5.2.3 Resultat

Det er stor usikkerhet knyttet til å benytte t^2 -brannen for å beskrive brannens energiproduksjon og å benytte denne modellen for å predikere den tilgjengelige rømningstiden. Det er en veldig forenklet modell som bidrar til modellusikkerhet. Formålet med analysen og situasjonen som vurderes må betraktes for å avgjøre om modellen gir tilstrekkelig nøyaktighet og beskriver virkeligheten godt nok.

Antagelsene som gjøres vil bidra til modellusikkerhet fordi brannens utvikling forenkles ved å gjøre disse antagelsene. Noen av antagelsene er mer kritiske enn andre. Det er antagelsen om hvordan brannen sprer seg og verdien til brannens vekstfaktor som er vurdert å være mest kritiske og å være de største bidragsyterne til usikkerhet.

Den relativt brede fordelingen av subjektiv sannsynlighet, se Figur 22, viser at det er stor usikkerhet knyttet til verdien til modellfeilen ved prediksjon av tilgjengelig rømningstid ved bruk av t^2 -brannen. Modellfeilen kan være stor. På grunnlag av dette konkluderes det med at usikkerheten er for høy.

Den strukturelle modellusikkerheten og parameterusikkerheten knyttet til t^2 -brannen vil diskuteres i kapittel 6.

6 Diskusjon

I dette kapitlet er diskusjonen først rettet generelt mot usikkerhet knyttet til prediksjon av brannforløp og tilgjengelig rømningstid. Deretter vil sensitivitetsanalysen og usikkerhetsanalysen bli diskutert. Den strukturelle modellusikkerheten og parameterusikkerheten knyttet til t^2 -brannen vil diskuteres. Til slutt vil det bli gitt anbefalinger om hvordan usikkerhet bedre kan behandles ved prediksjon av brannforløp og tilgjengelig rømningstid.

6.1 Generelt - Usikkerhet knyttet til prediksjon av brannforløp og tilgjengelig rømningstid

Et framtidig brannforløp er aldri kjent når det utføres en analyse av brannsikkerheten. Det er umulig å si nøyaktig hvordan en brann vil utvikle seg på forhånd. Som følge av at det virkelige framtidige brannforløpet ikke er kjent på tidspunktet når en analyse utføres er det ønskelig å predikere det så nøyaktig som mulig. Etersom det predikerte brannforløpet legges til grunn for å predikere den tilgjengelige rømningstiden er det også usikkerhet knyttet til hvor lang denne tiden vil være. For å ivareta sikkerheten må det da gjøres en vurdering av usikkerheten. For eksempel knyttet til energiproduksjonen. Det er flere bidragsytere til usikkerhet når brannforløp og tilgjengelig rømningstid predikeres. Det vil være både aleatorisk og epistemisk usikkerhet (modell-, parameter- og kompletthetsusikkerhet) knyttet til prediksjon av brannforløp og tilgjengelig rømningstid.

Det vil være variasjon i omgivelsene hvor brannen starter. Blant annet så kan geometri ventilasjonsforhold og antennelseskilde variere. Dette er variasjon i utvalg som er aleatorisk usikkerhet. Dette er en bidragsyter til usikkerhet ved prediksjon av brannforløp.

Mangel på kunnskap (epistemisk usikkerhet) bidrar også til usikkerhet om hvordan en brann vil utvikle seg. En brann er et komplekst fenomen som påvirkes av mange faktorer. Det er ikke alle prosesser knyttet til en brann det eksisterer like mye kunnskap om og er fullt ut forstått.

6.1.1 Parameter- og modellusikkerhet

Det er utviklet mange modeller for å beskrive hvordan en brann utvikler seg. Som følge av kompleksiteten til en brann representerer modellene som benyttes for å modellere et brannforløp en forenkling av forbrenningsprosessen og brannens dynamikk. Det vil dermed kunne forekomme et avvik mellom verdiene som modellen predikerer og de som vil forekomme i virkeligheten. Det er derfor nødvendig å vurdere usikkerheten knyttet til modellens prediksjon i forhold til den sanne ukjente verdien, altså usikkerheten om verdien til modellfeilen.

Modellene som benyttes for å prediker brannforløp er konstant under utvikling ettersom det forskes mye på hvordan en brann utvikler seg (Walton, 2002). Forskning fører til bedre forståelse og økt kunnskapsnivå, noe som reduserer modellusikkerheten. Noen av modellene som benyttes forenkler brannens dynamikk mer enn andre. Forenklingene og antagelsene som gjøres fører til strukturell modellusikkerhet. To-sonemodeller representerer en større grad av forenkling enn det CFD-modeller gjør. Ved bruk av to-sonemodeller kan ikke påvirkningen av alle fenomen modelleres, for eksempel flammer ut ventilasjonsåpninger (Quintiere, 2002). CFD-modeller har også sine begrensinger og gjør antagelser ved modellering. CFD-modeller baserer seg på å modellere strømninger. Selv om disse modellene er mer komplekse enn to-

sonemodeller er det også usikkerhet knyttet til disse. Blant annet så kan det benyttes ulike numerisk metoder for å gjøre beregninger i CFD-modeller. Dette introduserer usikkerhet.

Det er fordeler og ulemper med både to-sone- og CFD-modeller. Begge modellene introduserer strukturell modellusikkerhet. Ved valg av modell bør formålet med analysen vurderes sammen med forenklingene som gjøres og evnen programmene har til å modellere brannforløp i gitt analyseobjekt.

Det er mange parameterer som må defineres ved prediksjon av brannforløp og tilgjengelig rømningstid, som for eksempel vekstfaktoren og strålingsandelen. Inngangsparameterne kan avvike fra de sanne framtidige verdiene. For noen av inngangsparameterne som benyttes ved prediksjon av brannforløp eksisterer det både statistisk data og data fra eksperimentelle forsøk, mens for andre er datagrunnlaget lite eller manglende. Noen av parameterne er det vanskeligere å predikere enn andre som følge av at de vil variere mye fra brann til brann, mens andre er relativt like i alle brannforløp. Prediksjonen av brannforløp og tilgjengelig rømningstid vil være mer sensitiv overfor endring av noen parametere enn andre.

Det benyttes mange konservative verdier ved prediksjon av brannforløp og tilgjengelig rømningstid på grunn av usikkerheten som eksisterer. Målet med å benytte en modell er å beskrive fenomenet som analyseres så nøyaktig som mulig. Å benytte konservative data kan gi prediksjoner som ikke er en god tilnærming til virkeligheten. En annen utfordring ved bruk av anbefalte konservative verdier er at det ikke angis hvor konservative verdiene er.

6.1.2 Kompletthetsusikkerhet

Det er gjort mye forskning på hvordan en brann utvikler seg, men det er mange faktorer som påvirker en brann og det er vanskelig å identifisere alle faktorene. Det er ikke alle forhold som er kjente ved en brann.

I modellene som benyttes for å predikere et brannforløp gjøres det mange forenklinger og antagelser for at det skal være mulig å modellere hvordan en brann utvikler seg. Det eksisterer som nevnt enkle programmer og andre mer komplekse. Brannmodelleringsprogrammer er bygd opp av mange ulike del-modeller. Disse vil være usikkerhetsfaktorer og bidra til modellusikkerhet. Det kan være programmeringsfeil i programmene som ikke er kjent. Del-modellene kan også påvirke hverandre på måter som ikke er kjent og som dermed ikke er mulig å identifisere. Alle modellene gjør antagelser og det kan være at noen av antagelsene ikke samsvarer med hverandre.

Modelleringsprogrammene vil predikere noen forhold ved en brann bedre enn andre. Den termiske effekten fra en brann gis det blant annet relativt gode prediksjoner av, mens det gis dårlige prediksjoner av brannens vekst (Rein et al., 2009). Programmene har også varierende evne til å modellere alle fenomen som påvirker en brann. Det kan også være tilfellet at det er faktorer som ikke antas å bidra mye til usikkerhet, men som viser seg å ha stor betydning for brannforløpet i virkeligheten.

Dette introduserer usikkerhet og vil kunne føre til modellfeil. Det er vanskelig å få et komplett bilde av usikkerheten knyttet til prediksjon av brannforløp. Det er umulig å identifisere all usikkerhet som eksisterer og inkludere alle usikkerhetsfaktorene i en usikkerhetsanalyse.

6.2 Tilgjengelig rømningstid

Parameterusikkerhet er en av bidragsyterne til usikkerhet knyttet til prediksjon av brannforløp og tilgjengelig rømningstid. For å se på hvor stor betydning disse parameterne har ble det utført en sensitivitetsanalyse.

6.2.1 Vekstfaktor

Sensitivitetsanalysen viste tydelig at det er vekstfaktoren (α) som har størst innvirkning på tiden til kritiske forhold oppstår. Når brannen utviklet seg sakte var den tilgjengelige rømningstiden mest sensitiv overfor vekstfaktoren. Det vil si at når α -verdien var lav ble tiden til kritiske forhold oppsto påvirket mer ved en liten endring i forhold til når α -verdien var høy. Når α -verdien var høy måtte det en større endring til for å påvirke den tilgjengelige rømningstiden i like stor grad som når den var lav.

I sensitivitetsanalysen med hensyn på vekstfaktoren viste det seg at tiden til kritiske forhold først avtar når vekstfaktoren økes for deretter å bli lengre igjen når $\alpha = 0,009 \text{ kW/s}^2$, se Figur 16. Når dette skjer forekommer det en endring i hvilket kritisk forhold som oppstår. For $\alpha < 0,009 \text{ kW/s}^2$ var det siktlengden som ble for kort, mens for høyere α -verdier var det avstanden fra gulvet til røyklaget som ble for liten.

Årsaken til dette er antageligvis at når brannen utvikler seg sakte vil røyken fordele seg jevnt i hele rommet, mens når brannen utvikler seg raskere vil røyken stige opp til taket og danne et røyklag hovedsakelig på grunn av oppdriften til de varme forbrenningsproduktene. En høyere vekstfaktor vil altså ikke nødvendigvis bety en lengre tilgjengelig rømningstid.

6.2.2 Startbrannsted

Plasseringen av brannen i startbrannrommet hadde betydning for tiden til kritiske forhold i rommet hvor brannen startet. Dette var hovedsakelig når brannen utviklet seg langsomt. Betydningen til startbrannstedet ble mindre når brannens vekstrate økte.

I de omkringliggende rommene hadde det relativt liten påvirkning på den tilgjengelige rømningstiden å endre startbrannstedet. Dette var som følge av at brannen ikke spredde seg til disse rommene. Når det blir kritisk i disse rommene var derfor bare avhengig av at røyken spredde seg til disse. Det vil derfor ha liten betydning for de omkringliggende rommene om brannens startsted endres i brannrommet. Det vil muligens ha betydning dersom brannen er plassert ved dørene mellom rommene, men i Argos er det ikke mulig å angi en så nøyaktig plassering av brannen.

Den tilgjengelige rømningstiden var kortest i det rommet hvor brannen startet. Det var når brannens startsted var plassert i korridoren at kritiske forhold oppsto raskest. Denne brannen representerer det verst tenkelige scenarioet ettersom korridoren er en del av rømningsveien. Men dette scenarioet vurderes å være usannsynlig på grunn av at det trolig vil være lite brennbart materiale i korridoren. Ettersom korridoren er en del av rømningsveien bør det allikevel bli tatt med blant mulige scenario som følge av at det er kritisk for personsikkerheten dersom en brann oppstår her.

Når den tilgjengelige rømningstiden skal predikeres er det altså nødvendig å modellere ulike steder for hvor brannen starter. En kan da se hvordan den tilgjengelige rømningstiden i et rom

påvirkes av hvor brannen starter. En subjektiv sannsynlighetsfordeling kan da tildeles den tilgjengelige rømningstiden i rommet og det kan vurderes om sannsynligheten er tilstrekkelig liten for den korteste tilgjengelige rømningstiden som kan oppstå i det bestemte rommet.

I casen i denne oppgaven så vil for eksempel en høyere sannsynlighet for en kort tilgjengelig rømningstid aksepteres i lokale 1 enn i korridoren og spisesalen. Dette er som følge av at de to siste utgjør rømningsveien og det derfor vil være mer kritisk for personsikkerheten om den tilgjengelige rømningstiden er kort her.

6.2.3 Strålingsandel

Sensitivitetsanalysen viste at strålingsandelen hadde liten innvirkning på tiden til kritiske forhold ved en langsom brannvekst i startbrannrommet, men at den hadde større betydning når brannen utviklet seg raskere. Den tilgjengelige rømningstiden i brannrommet vil i større grad være avhengig av strålingsandelen når brannen utvikler seg raskere.

Det var i brannrommets omkringliggende rom denne parameteren påvirket den tilgjengelige rømningstiden mest. I det scenarioet hvor brannen utviklet seg langsomt førte endring av strålingsandelen til den største forskjellen i tid til kritiske forhold.

Totalt sett så vil strålingsandelen påvirke den tilgjengelige rømningstiden svært lite. Det må en betydelig endring til i denne inngangsparameteren for at den tilgjengelige rømningstiden skal påvirkes mye.

6.2.4 Maksimal energiproduksjon

Å endre den maksimale energiproduksjonen viste seg å ha liten innvirkning på tiden til kritiske forhold i rommet hvor brannen startet. Årsaken til dette er at kritiske forhold oppsto før den maksimale energiproduksjonen ble nådd. Dermed var det vekstfaktoren som påvirket den tilgjengelige rømningstiden.

Sensitivitetsanalysen viste at den maksimale energiproduksjonen påvirket tilgjengelig rømningstid mest i de omkringliggende rommene til startbrannrommet. Ved en lav α -verdi hadde den maksimale energiproduksjonen liten betydning, men når verdien til α økte fikk den maksimale energiproduksjonen større betydning. Det var når den maksimale energiproduksjonen var lav at den påvirket den tilgjengelige rømningstiden. Dette var som følge av at kritiske forhold ikke oppsto før den maksimale energiproduksjonen ble nådd.

Nystedt (2001) angir at den maksimale energiproduksjonen ikke vil påvirke når kritiske forhold inntreffer i brannrommet, men at parameteren hovedsakelig påvirker tiden i de omkringliggende rommene. Dette samsvarer med resultatet fra sensitivitetsanalysen som ble utført for å se på effekten av å endre maksimal energiproduksjon.

Selv om sensitivitetsanalysen viste at verdien til den maksimale energiproduksjonen hadde liten betydning for den tilgjengelige rømningstiden i brannrommet, kan den i noen tilfeller også påvirke tiden til kritiske forhold her. Dette viser en studie utført av Kong et al. (2012). Studien viste at i brannrommet var tiden til kritiske forhold avhengig av den maksimale energiproduksjonen når den var lav, den maksimale energiproduksjonen hadde en merkbar påvirkning for $\dot{Q}_{\text{maks}} < 3 \text{ MW}$.

Kong et al. (2012) modellerte en brann i et forretningsbygg som besto av et rom som var 50 x 50 x 5 m. Noe som er betydelig større enn dimensjonene til rommene i konferansesenteret som ble sett på i denne rapporten. Bygningens utforming og størrelse har altså betydning for hvor mye den maksimale energiproduksjonen påvirker resultatet. Dette viser at det i noen tilfeller vil ha betydning å endre den maksimale energiproduksjonen for den tilgjengelige rømningstiden også i startbrannrommet.

6.2.5 Åpninger

Å øke ventilasjonsfaktoren ved å sette inn et vindu i brannrommet (lokale 1) hadde liten innvirkning på den tilgjengelige rømningstiden i brannrommet i forhold til de endringene som ble gjort i simuleringene. Selv om den tilgjengelige rømningstiden i brannrommet var lite sensitiv overfor større åpninger er det verdt å merke seg at det utgjorde en betydelig forskjell i de omkringliggende rommene. Her oppsto det ikke kritiske forhold i løpet av brannforløpet.

I simuleringene som er utført var dørene lukket. Det er ikke sett på hvilken konsekvens det ville ha hatt dersom de hadde vært åpne. Antageligvis ville det ført til at det ble raskere kritisk i de omkringliggende rommene. I virkeligheten vil dørene åpnes når bygget evakueres. Dette er en faktor som vil påvirke brannutviklingen og røykspredningen.

Åpningene i geometrien er altså en parameter som påvirker den tilgjengelige rømningstiden i de omkringliggende rommene.

6.3 t^2 -brannen og usikkerhetsanalysen

Modellen $\dot{Q} = \alpha t^2$ er en veldig enkel modell som benyttes for å beskrive brannens energiproduksjon i vekstfasen. Det vil være flere faktorer som påvirker brannens utvikling og størrelse, som plassering av tennkilde og brensel. Når denne modellen er utviklet er det gjort flere antagelser. Modellen vil derfor representere en forenklet beskrivelse av energiproduksjonen i en virkelig brann. Usikkerheten om verdien til modellfeilen ved bruk av denne modellen er et resultat av parametersikkerhet om α og strukturell modellusikkerhet. Dette er en bidragsyter til usikkerhet både til prediksjon av brannforløp og tilgjengelig rømningstid.

6.3.1 Parameterusikkerhet

Når t^2 -brannen brukes for å modellere en brann benyttes som regel en av de fire anbefalte deterministiske verdiene for brannens vekstfaktor α . Men det er usikkerhet knyttet til verdien til denne parameteren. Brannmodelleringen og den tilgjengelige rømningstiden påvirkes i stor grad av hvilken verdi som velges, som sensitivitetsanalysen viste (se Figur 16). Ifølge Kong et al. (2013) vil usikkerheten ofte ignoreres når det gis slike anbefalinger ettersom det da tildeles en bestemt verdi til en usikker parameter. Siden vekstfaktoren er en parameter som har stor betydning for analysens resultat bør usikkerheten til denne vurderes.

Som Tabell 2 viser så varierer det hvilken vekstfaktor som anbefales for ulike typer virksomheter i ulike regelverk og annen litteratur. Variasjonen i anbefalt vekstfaktor for ulike bygningstyper tyder på at det er høy usikkerhet knyttet til denne parameteren. Det er også vist ved forsøk at vekstfaktoren ikke nødvendigvis er den samme gjennom hele brannens vekstfase (Schifiliti, 1986).

Holborn et al. (2004) har funnet ved etterforskning av virkelige branner at det var få tilfeller hvor brannen hadde utviklet seg raskt og ultra-raskt når de betraktet branner som hadde forekommet i offentlige bygninger (boliger er da ikke inkludert). Basert på etterforskningen konkluderte de med at den forventede vekstfaktoren ville være medium for denne type virksomhet.

Dersom resultatene til Holborn et al. (2004) sammenlignes med de vekstfaktorene som anbefales i regelverk og annen litteratur, så er de anbefalte verdiene som regel høyere enn det de fleste virkelige brannene hadde. Dette er antagelig for å inkludere til de sjeldne og ekstreme tilfellene som kan inntreffe. Det kan dermed sies at de anbefalte α -verdier er konservative.

Det benyttes ofte konservative verdier og gjøres konservative antagelser for å ta høyde for usikkerhet i beregninger. Kong et al. (2013) sier at å benytte konservative verdier vil føre til økt sikkerhet, men dette vil ikke alltid være tilfellet. Problemet oppstår når det i en analyse legges til en sikkerhetsfaktor på mellomliggende parametere som benyttes for å komme fram til størrelsen av interesse. Disse parameterne trenger ikke å være lineært relatert til det endelige resultatet (Notarianni, 2002). Ifølge Notarianni (2002) gjelder dette for beregninger som utføres ved brannteknisk prosjektering.

Energiproduksjonen som beregnes ved t^2 -modellen vil dermed ikke være lineært relatert til når kritiske forhold oppstår. Å doble α -verdien eller energiproduksjonen vil derfor ikke gi en sikkerhetsfaktor på 2 i den tilgjengelige rømningstiden. Dersom det for eksempel velges en høyere α -verdi for å representere det verst tenkelige scenarioet som kan forekomme, vil det ikke nødvendigvis representere en større grad av sikkerhet. Blant annet så vil en rask brann kunne utløse for eksempel et sprinkleranlegg på et tidligere tidspunkt enn hva en brann som utvikler seg sakte vil. Sensitivitetsanalysen viste også at å øke α -verdien ikke alltid resulterte i en kortere tilgjengelig rømningstid, se Figur 16. Å øke α -verdien med tanke på å øke sikkerheten bør derfor gjøres med forsiktighet.

Av parameterne som α -verdien består av, se kapittel 2.2.4, oppgir Jahn et al. (2011) at forbrenningsvarmen og massefluksen er funnet å ha relativt liten innvirkning på vekstfaktoren. Det er endring i hastigheten v som brannen sprer seg med vekstfaktoren α er mest sensitiv overfor. Årsaken til dette er at det ved etterforskning av virkelige branner er funnet at det vil være stor variasjon i hastigheten. Dermed vil intervallet som hastigheten vil kunne ligge i være bredt. Dette fører til at det er vanskelig å gi et godt estimat på hastigheten og dermed også vekstfaktoren. Dette fører til at det er hastigheten v som bidrar til mesteparten av usikkerheten knyttet til α . For å gi en god prediksjon av α er det derfor nødvendig å gjøre en vurdering av hastigheten. Det er usikkerhet knyttet til hastighetens sanne verdi. Dersom brannen sprer seg med en høy hastighet vil det føre til en raskere brannutvikling og dermed også antageligvis kortere tilgjengelig rømningstid. Hastigheten en brann sprer seg med påvirkes av mange faktorer. Dermed vil det være mye usikkerhet knyttet til denne størrelsen og det vil være vanskelig å angi en nøyaktig verdi til denne.

De anbefalte α -verdiene til ulike bygningstyper er basert på statistisk data. Å velge α -verdi kun basert på byggets bruk og type virksomhet er en enkel tilnærming. En brann trenger ikke nødvendigvis å utvikle seg med lik hastighet selv om to bygg benyttes til samme bruk. Bygningsinnholdet mellom byggverkene kan variere. Brannens veksthastighet vil i tillegg til faktorer relatert til materialet, som type og mengde brensel, påvirkes av faktorer som for eksempel ventilasjonsåpninger og byggets geometri. Slike forhold er sjelden tatt hensyn til i de anbefalte α -verdiene.

Å velge brannens α -verdi basert på en vurdering av forholdene i det faktiske tilfellet som analyseres vil gi en større grad av nøyaktighet, enn å kun basere valget på de anbefalte verdiene. Hensikten med en dimensjonerende brann er at den skal representere den brannen som kan oppstå. Derfor bør ikke inngangsparameternes verdi kun velges på grunnlag av anbefalte verdier for type bruk og bygning.

6.3.2 Strukturell modellusikkerhet

Den virkelige energiproduksjonen i en brann kan avvike fra prediksjonen som gis av t^2 -brannen som følge av strukturen til modellen. Strukturen til modellen $\dot{Q} = \alpha t^2$ er enkel og det er usikkerhet knyttet til denne. En brann vil i virkeligheten ikke følge en perfekt t^2 -kurve, den vil påvirkes av andre faktorer. t^2 -brannen beskriver den øyeblikkelige energiproduksjonen som starter ved tiden $t = 0$ og benyttes ofte for å beskrive hele vekstfasen.

Det er utført mange tester av ulike typer møbler og inventar for blant annet å se på hvor mye energi som produseres dersom de begynner å brenne. National Bureau of Standards (NBS) sammenlignet energiproduksjonen som ble målt under testene med t^2 -kurvene (Schifiliti et al., 2002). Det ble vist at energiproduksjonen i de fleste tilfellene ikke kunne tilnærmes t^2 -kurvene før etter en viss tid. I Schifiliti et al. (2002) angis det at den korteste tiden før t^2 -kurvene var en god tilnærming var 0 sekunder, mens den lengste var 3700 sekunder. Det er en betydelig tidsforskjell mellom disse. For å beskrive energiproduksjonen før denne tiden kunne ikke t^2 -brannen benyttes. Som følge av at det ikke er kjent hvilken kilde som vil føre til antennelse av brannen er det usikkerhet knyttet til når brannen vil begynne å følge t^2 -modellen.

Det er flere som har anbefalt at inkubasjonstiden ikke bør inkluderes ved prediksjon av brannforløp. Det anbefales med andre ord å velge det verst tenkelige scenarioet hvor tiden til det er etablert flammer er $t_0 = 0$. Blant annet gir Collier og Whiting (2008) denne anbefalingen med bakgrunn i at inkubasjonstiden var kort i forsøkene de utførte. På grunn av at inkubasjonstiden varierer betraktelig avhengig av hvilket scenarioet som blir sett på gir Sundström (1994) også denne anbefalingen ifølge Collier og Whiting (2008). Collier og Whiting (2008) anbefaler også at det burde utføres flere forsøk for å se på betydningen inkubasjonstiden får for tilgjengelig og nødvendig rømningstid dersom den inkluderes.

Modellen $\dot{Q} = \alpha t^2$ sier ingenting om når brannens energiproduksjon ikke vil følge t^2 -kurven og ikke bør benyttes for å predikere energiproduksjonen. Den har heller ikke mulighet til å si noe om når brenselet vil være forbrukt, med andre ord når brannen vil slukke og t^2 -brannen ikke vil være representativ for å beskrive brannens energiproduksjon. Å gjøre en vurdering av ved hvilket tidspunkt denne modellen ikke vil være representativ lenger er noe som ifølge Schifiliti et al. (2002) ofte ikke gjøres.

At brannens energiproduksjon kan beskrives ved $\dot{Q} = \alpha t^2$ er som regel basert på tester av et enkelt brensel. t^2 -kurvene sammenlignes da med energiproduksjonen fra en brann i et enkelt objekt. Det er som regel bare tidlig i brannens vekstfase at brannen kun vil involvere et brenselobjekt. Når brannen sprer seg til omkringliggende brenselpakker vil det ikke være representativt å benytte disse testresultatene som grunnlag for å si at modellen $\dot{Q} = \alpha t^2$ vil være en god tilnærming for å beskrive brannens energiproduksjon. Modellens evne til å predikere brannstørrelsen når brannen har spredd seg til flere objekter er dermed uviss.

Den videre forbrenningen vil påvirkes av at det er flere objekter som brenner. At brannen vil spre seg med konstant hastighet i alle retninger er ikke nødvendigvis tilfellet. Brannspredningen vil påvirkes av flere faktorer. Selv om brenselet er homogent vil nødvendigvis ikke brannen spre seg like raskt i alle retningene. Når brannen har spredd seg til flere objekter vil det være større usikkerhet knyttet til hvordan brannen vil utvikle seg videre. Den videre utvikling er da avhengig av plasseringen til det brennbare materialet i rommet. Det vil antagelig være mer brennbart materiale i noen områder enn andre og brannen vil spre seg raskere i disse retningene.

Fra virkelige branner eksisterer det lite data over hvordan energiproduksjonen har vært (Jahn et al., 2008). Den kan estimeres, men det er så stor usikkerhet knyttet til hvordan den har vært at dette er vanskelig å gjøre i praksis. Når det er stor mangel på hvordan energiproduksjonen har vært i virkelige branner er det også vanskelig å utvikle modeller som gir gode prediksjoner.

På grunnlag av dette kan en si at t^2 -brannen vil kunne benyttes for å beskrive brannens energiproduksjon og gi prediksjoner med tilstrekkelig nøyaktighet i en tidlig fase av brannforløpet, det vil si når brannens omfang er begrenset til et objekt. Det eksisterer da tester som viser at denne modellen gir prediksjoner med tilstrekkelig nøyaktighet. Modellen kan benyttes til formål hvor det bare er brannens tidlige fase som er av interesse, som for eksempel branndeteksjon. Men en må være oppmerksom på at det eksisterer strukturell modellusikkerhet. Det er vist gjennom en studie utført av Schifiliti (1986) at en t^2 -brann ikke alltid er den beste tilnærmingen til brannens energiproduksjon. Noen ganger var for eksempel t^3 ($n = 3$) en bedre tilnærming.

Senere i brannforløpet, når brannen har spredd seg til omkringliggende brenselpakker, må t^2 -brannen brukes med større forsiktighet. Det er stor mangel på kunnskap (og dermed høy epistemisk usikkerhet) knyttet til hvordan en brann sprer seg. Ifølge Jahn et al. (2011) gir modellering av flammespredning dårlige prediksjoner. Det er et område med behov for videre forskning slik at det kan utvikles modeller som kan gi prediksjoner med nødvendig nøyaktighet.

6.3.3 Er t^2 -brannen en passende modell?

Selv om t^2 -brannen benyttes i mange tilfeller er det ikke nødvendigvis en modell som gir gode prediksjoner. Ifølge Rein et al. (2009) er modellene som eksisterer for å predikere brannforløp generelt dårlige til å beskrive brannens energiproduksjon og vekst. Det er mye usikkerhet knyttet til brannens vekstfase og den påvirkes av mange faktorer.

Det er uenighet mellom eksperter om t^2 -brannen er en passende modell å benytte for å predikere brannforløp. Blant annet så mener Babrauskas (1996) at den ikke bør benyttes til dette formålet, mens andre mener at t^2 -branner gir en god nok tilnærming til virkeligheten og kan benyttes som grunnlag for å ta beslutninger, NFPA (2012) er blant de som mener dette.

Babrauskas (1996) påpeker at disse brannene originalt ble benyttet for å karakterisere responsen til detektorer og ikke for å modellere brannforløp. Som følge av at en detektor skal oppdage en brann i en tidlig fase, brannen vil da som regel være mindre enn 100 kW, vil t^2 -brannene være utviklet for å beskrive energiproduksjonen for små branner. Babrauskas (1996) mener derfor at brannkurvene fra t^2 -brannene kun bør benyttes for små branner.

I et brannforløp vil brannens størrelse være større enn 100 kW. Det brennbare materialet vil som regel produsere energi i størrelsesorden mega watt (MW) når en ser på hva som skjer etter den tidlige fasen (Babrauskas, 1996). Når t^2 -brannen benyttes for å beskrive hele vekstfasen vil den beskrive en brann som er betydelig større enn 100 kW.

Kurvene til t^2 -brannen er ekstrapolert slik at de kan benyttes for større branner. I Figur 8, som viser energiproduksjonen for t^2 -brannene, går y-aksen opp til 5 MW. Andre steder hvor t^2 -kurvene framstilles er den største verdien for energiproduksjonen ofte enda høyere, blant annet så er den så høy som 30 MW i Babrauskas (1996). Det er ikke angitt en maksimal energiproduksjon disse kurvene kan benyttes for i litteraturen. Kurvene kan dermed i prinsippet gå til uendelig. Det er stor forskjell mellom en brann på 100 kW og 30 MW. I litteraturen angis det ikke hva den øvre grensen bør være, men Babrauskas (1996) mener at den bør være 100 kW. Den strukturelle usikkerheten knyttet til t^2 -brannen er høyere når modellen benyttes for å predikere branner som er større enn 100 kW.

Byggforsk (2006) mener at t^2 -brannen er en modell som kan benyttes dersom det er lite informasjon tilgjengelig over plassering av innholdet i rommet eller overtenning inntreffer som følge av at brennbare materialer avgir mye varme. Jahn et al. (2011) mener at antagelsene som gjøres vil være fornuftige i begynnelsen av brannforløpet. Dette er som følge av at da vil veggens varmeavgivelse være liten og flammene vil være så små at de ikke vil rekke opp til røyklaget.

En ulmebrann karakteriseres som en brann uten flammer (Ohlemiller, 2002). Ved å benytte en t^2 -brann antas det at tennkilde har en rimelig stor flamme slik at det vil etableres flammer. En t^2 -brann vil derfor ikke være egnet til å modellere ulmebranner.

Med andre ord så vil t^2 -brannen være passende til å modellere flammebranner. Modellen gir tilstrekkelig nøyaktige prediksjoner av et brannforløp i den tidlige fasen før brannen har spredd seg til flere objekter og bør begrenses til å modellere små branner (< 100 kW). Som følge av at det er mangel på modeller som gir gode prediksjoner av flammespredning vurderes det at modellen kan benyttes dersom det ikke eksisterer andre modeller som vil gi bedre prediksjoner, men den må da benyttes med forsiktighet.

6.3.4 Nytteverdi usikkerhetsanalysen

Å benytte t^2 -brannen for å beskrive brannens størrelse er en tilnærming som er blitt brukt flere tiår. Det er en modell som i dag benyttes ved prediksjon av brannforløp i mange sammenhenger. Når en modell er benyttet lenge og i mange sammenhenger er det lett å overse hva modellen egentlig bygger på og hvilke antagelser som gjøres når den benyttes.

En usikkerhetsanalyse retter fokuset mot bidragsyterne til usikkerhet ved å benytte en modell og gir mulighet for å redusere usikkerheten. I denne rapporten rettet den kvalitative klassifisering fokuset mot de bakenforliggende antagelsene som gjøres ved å benytte t^2 -modellen. De antagelsene som er de største bidragsyterne til usikkerhet ble identifisert gjennom denne tilnærmingen. For t^2 -brannen er det antagelsen om hvordan brannen sprer seg og verdien til vekstfaktoren som er vurdert å være de mest usikre antagelsene.

Ved å utføre en usikkerhetsanalyse ble det vist at kunnskapsgrunnlaget om hvordan en brann sprer seg er for dårlig. Den relativt brede fordelingen av subjektiv sannsynlighet, se Figur 22, viser at det er stor usikkerhet knyttet til prediksjonen av tilgjengelig rømningstid ved bruk av t^2 -brannen. På grunnlag av dette kan det konkluderes med at usikkerheten er for stor og at det er behov for utbedring av eksisterende modeller eller utvikling av nye modeller for å predikere brannens vekst og spredning. Tilgjengelig rømningstid er en størrelse som har stor betydning for personsikkerhet og derfor bør usikkerheten som aksepteres være liten. Modellen $\dot{Q} = \alpha t^2$ bør begrenses til å benyttes for en brann i et objekt.

Det er viktig å skille sensitivitetsanalysen fra usikkerhetsanalysen. Sensitivitetsanalysen viste bare hvor sensitivt resultatet var for endring av inngangsparameteren α , mens i usikkerhetsanalysen ble usikkerheten knyttet til parameteren α og strukturen til modellen vurdert.

Gjennom usikkerhetsanalysen ble kunnskapsgrunnlaget som t^2 -brannen baseres på evaluert og det ble vurdert om usikkerheten knyttet til modellfeilen var akseptabel. Analysen avdekket hvilke områder det er behov for mer forskning slik at det kan utvikles en bedre modell for å beskrive brannens størrelse.

6.4 Anbefalinger

Som følge av at det er mangel på metoder for å håndtere usikkerhet knyttet til prediksjon av brannforløp og tilgjengelig rømningstid vil det her gis anbefalinger om hvordan usikkerheten bedre kan håndteres.

Det er i denne rapporten presentert et rammeverk som kan benyttes for å behandle modellusikkerhet. Det anbefales å bruke dette for å håndtere usikkerhet knyttet til prediksjon av brannforløp og tilgjengelig rømningstid.

Brann er et komplekst fenomen og det er derfor gjort en del forenklinger og antagelser når modellene som benyttes er utviklet. Metoden vil rette fokus mot antagelsene som gjøres og evaluere styrken til bakgrunnskunnskapen. Dermed vil det være en god metode for å vurdere usikkerheten knyttet til prediksjon av brannforløp og tilgjengelig rømningstid.

Det første som anbefales å gjøre når det skal utføres en usikkerhetsanalyse i forbindelse med prediksjon av brannforløp er å klargjøre hvilken størrelse som er av interesse og hvilken del av brannforløpet som er viktig i den gitte situasjonen. Det vil være av interesse å predikere et brannforløp i ulike sammenhenger. For eksempel så kan det være for å predikere den tilgjengelige rømningstiden, som har vært fokuset i denne rapporten, eller det kan være prosjektering av et deteksjonsanlegg. Dersom det er den tilgjengelige rømningstiden som skal predikeres vil en lengre periode av brannforløpet være av interesse enn om det er prosjektering av et deteksjonsanlegg som gjøres.

Deretter må det klargjøres hvilke modeller som benyttes for å predikere brannforløpet og størrelsen av interesse. Ved modellering av brannforløp benyttes det som regel flere modeller eller modelleringsprogrammer som er satt sammen av mange del-modeller. Noen av disse modellene vil gi bedre prediksjoner enn andre som følge av at det er noen forhold ved en brann det er bedre kunnskap om.

Det er også mange parametere som inngår i programmene og modellene som benyttes for å modellere et brannforløp. Noen av disse parameterne vil være mer usikre enn andre. Det anbefales i tillegg å gjøre en sensitivitetsanalyse for å få en indikasjon på hvilke inngangsparametere størrelsen av interesse er mest sensitiv overfor.

Det er ulike metoder som kan benyttes for å gjøre usikkerhetsvurderingen. Hvilken tilnærming som velges å benytte for å vurdere usikkerheten må betraktes i sammenheng med formålet til analysen. For å vurdere usikkerhet knyttet til prediksjon av brannforløp anbefales det å benytte de to metodene som er brukt i denne rapporten: kvalitativ klassifisering av antagelsene og subjektiv sannsynlighet.

En vurdering av antagelsene vil vise hva som er de største bidragsyterne til usikkerhet. Styrken i kunnskapsgrunnlaget vil evalueres gjennom den kvalitative klassifiseringen. Fokuset vil rettes mot forståelsen av brannens dynamikk. Det vil gi økt forståelse for hvordan antagelsene påvirker prediksjonen og om de er fornuftig i det bestemte tilfellet som analyseres. I tillegg vil metoden vise om det er behov for å bedre kunnskapsgrunnlaget slik at den epistemiske usikkerheten kan reduseres.

Ved å tildele en subjektiv sannsynlighetsfordeling til modellfeilen kan en vurdere om størrelsesordenen til modellfeilen er akseptabel. Ettersom prediksjon av brannforløp og tilgjengelig rømningstid har stor betydning for personsikkerheten bør sannsynligheten for en stor modellfeil være lav.

For å predikere brannforløp og tilgjengelig rømningstid eksisterer det som sagt mange modeller. Det er både fordeler og ulemper knyttet til modellene som eksisterer. Når det er flere modeller som kan benyttes anbefales det å vurdere de opp mot hverandre. Dette vil gi bedre innsikt til fenomenet og en vil kunne vurdere hvilken modell som er best for å predikere brannforløpet i en gitt situasjon.

Ved å gjøre en analyse av modellusikkerheten gjennom denne metoden får en vurdert om modellen gir tilstrekkelig nøyaktighet. På bakgrunn av dette kan en vurdere om det er nødvendig å gjøre endringer med modellen eller om det bør benyttes en annen modell for å predikere den størrelsen av interesse. Dersom dette blir konklusjonen av usikkerhetsanalysen vil det føre til at usikkerheten reduseres.

Denne metoden evaluerer styrken til bakgrunnskunnskapen og en kan ved hjelp av denne vurdere om usikkerheten knyttet til modellene som benyttes er akseptabel. Denne metoden vil også rette fokus mot hvilke områder kunnskapsgrunnlaget er for dårlig og hvor det dermed er behov for videre forskning slik at det kan utvikles bedre modeller.

7 Konklusjon

I denne rapporten vurderes usikkerhet knyttet til prediksjon av brannforløp og tilgjengelig rømningstid. En brann er et komplekst fenomen som påvirkes av mange faktorer og det gjøres mange forenklinger og antagelser når et brannforløp predikeres. Det finnes ulike modeller som kan benyttes for å predikere brannforløp, men ingen av disse vil kunne gi eksakte prediksjoner av hvordan en brann vil utvikle seg. Dette fører til at det virkelige brannforløpet og den virkelige tilgjengelige rømningstiden kan avvike fra det som predikeres. Innen det brannfaglige feltet er det mangel på metoder for å håndtere usikkerhet.

Det er utført en sensitivitetsanalyse for å se på hvilke inngangsparametere som påvirker prediksjonen av tilgjengelig rømningstid. I denne er det antatt at brannens vekstfase kan beskrives ved t^2 -brannen. Sensitivitetsanalysen viser tydelig at det er vekstfaktoren α som har størst innvirkning på den tilgjengelige rømningstiden. Tiden til kritiske forhold oppsto var mest sensitiv overfor endring av denne inngangsparameteren når α -verdien var lav. Når α -verdien var høy måtte det en større endring til for å påvirke den tilgjengelige rømningstiden.

De andre inngangsparametere som er undersøkt påvirket den tilgjengelige rømningstiden i mindre grad. Plasseringen av brannen påvirket hovedsakelig tiden i starbrannrommet når brannen utviklet seg langsomt. Når brannen utvikler seg raskere ble effekten av plasseringen av brannen på den tilgjengelige rømningstiden mindre.

Både strålingsandelen og den maksimale energiproduksjonen hadde liten innvirkning på den tilgjengelige rømningstiden i startbrannrommet. Disse inngangsparametere hadde størst betydning for tiden til kritiske forhold oppsto i de omkringliggende rommene. Strålingsandelen påvirket tiden til kritiske forhold i størst grad når brannen hadde en langsom utvikling. Det samme gjorde den maksimale energiproduksjonen. Det var ved en lav maksimal energiproduksjon at denne inngangsparameteren hadde størst betydning.

Åpninger i brannrommet påvirket i liten grad den tilgjengelige rømningstiden i startbrannrommet. I de omkringliggende rommene oppsto det ikke kritiske forhold når det ble satt inn større åpningsareal i brannrommet.

I denne rapporten er det presentert en metode for hvordan usikkerhet kan håndteres. Denne er anvendt på modellen $\dot{Q} = \alpha t^2$ som ofte benyttes for å beskrive brannens vekstfase. Å benytte denne modellen kan føre til at prediksjonen av brannforløp og tilgjengelig rømningstid avviker fra det virkelige (ukjente) framtidige brannforløpet og tilgjengelige rømningstiden. Det er en kombinasjon av strukturell modellusikkerhet og parameterusikkerhet som vil bidra til modellusikkerhet.

På grunnlag av usikkerhetsanalysen kan en si at t^2 -brannen vil kunne benyttes for å beskrive brannens energiproduksjon og gi prediksjoner med tilstrekkelig nøyaktighet i en tidlig fase av brannforløpet, det vil si når brannens omfang er begrenset til et objekt. Som følge av at det er lite kunnskap (og dermed høy epistemisk usikkerhet) knyttet til hvordan en brann sprer seg bør t^2 -brannen brukes med større forsiktighet for å beskrive brannens energiproduksjon når brannen har spredd seg til omkringliggende objekt.

Rammeverket for å håndtere usikkerhet som er presentert i denne rapporten anbefales brukt ved prediksjon av brannforløp og tilgjengelig rømningstid. Metoden evaluerer styrken til bakgrunnskunnskapen og en kan ved hjelp av denne vurdere om usikkerheten knyttet til modellene som benyttes er akseptabel. Denne metoden for usikkerhetsanalyse vil også rette fokus mot hvilke områder kunnskapsgrunlaget er for dårlig og hvor det dermed er behov for videre forskning slik at det kan utvikles bedre branntekniske modeller.

8 Videre arbeid

Resultatene viste at det er behov for videre forskning av hvordan en brann utvikler seg. Ettersom modellene som eksisterer i dag for å predikere brannens energiproduksjon og flammespredning er relativt dårlige er det behov for å utvikle nye modeller som kan gi prediksjoner med tilstrekkelig nøyaktighet. Dette vil redusere usikkerheten knyttet til prediksjon av brannforløp og tilgjengelig rømningstid.

Videre kan det også undersøkes hvor godt t^2 -brannen beskriver størrelsen til en brann som involverer flere brennende objekt og hvor godt t^2 -kurvene kan tilnærmes brannens energiproduksjon når brannen er større enn 100 kW.

Det er i denne rapporten benyttet to tilnærminger, kvalitativ klassifisering og subjektiv sannsynlighet, for å vurdere usikkerheten knyttet til prediksjon av brannforløp og tilgjengelig rømningstid. Det kan videre utprøves om det eksisterer andre tilnærminger som vil være egnet og vil kunne benyttes til å vurdere modellusikkerhet knyttet til prediksjon av brannforløp og tilgjengelig rømningstid.

Målet med å predikere tilgjengelig og nødvendig rømningstid er å sikre at mennesker vil ha evakuert før det blir kritisk. En utfordring ved brannteknisk prosjektering er valg av sikkerhetsmargin. Det er lite informasjon om hvor stor denne bør være. Det gis bare en indikasjon om at den bør være minst to til tre ganger den nødvendige rømningstiden. Usikkerheten knyttet til sikkerhetsmarginen vil påvirkes av usikkerheten knyttet til prediksjonene av tilgjengelig og nødvendig rømningstid. Forslag til videre arbeid er å vurdere usikkerhet knyttet til sikkerhetsmarginen.

9 Referanser

- Alpert, R. L. (2002). Ceiling Jet Flows. I P. J. DeNinno (Red.), *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* (3rd. ed., s. 2-18 – 2-31). Quincy, Massachusetts: National Fire Protection Association.
- Aven, T. (2008). *Risk analysis: assessing uncertainties beyond expected values and probabilities*. Chichester: Wiley.
- Aven, T. (2010). *Misconception of risk*. Chichester: Wiley.
- Aven, T. (2012). The risk concept – historical and recent development trends. *Reliability Engineering and System Safety*, 99, 33-44.
- Aven, T., Baraldi, P., Flage, R., & Zio, E. (2014). *Uncertainty in risk assessment: the representation and treatment of uncertainties by probabilistic and non-probabilistic methods*. Chichester: Wiley.
- Aven, T., & Krohn, B. S. (2014). A new perspective on how to understand, assess and manage risk and the unforeseen. *Reliability Engineering and System Safety*, 121, 1-10.
- Aven, T., & Zio, E. (2013). Model Output Uncertainty in Risk Assessment. *International Journal of Performability Engineering*, 9(5), 475-486.
- Babrauskas, V., & Peacock, R. D. (1992). Heat Release Rate: The single most Important Variable in Fire Hazard. *Fire Safety Journal*, 18(3), 255-272.
- Babrauskas, V. (2002). Heat Release Rate. I P. J. DeNinno (Red.), *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* (3rd. ed., s. 3-1 – 3-37). Quincy, Massachusetts: National Fire Protection Association.
- Babrauskas, V. (1996). Appendix: the T2 Fire and Its Tenuous Relation To Reality. *Journal of Fire Protection Engineering*, 8(2), 93-95.
- Bedford, T., & Cooke, R. (2001). *Probabilistic risk analysis: foundations and methods*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Bjerga, T., Aven, T., & Zio, E. (2014). An illustration of the use of an approach for treating model uncertainties in risk assessment. *Reliability Engineering and System Safety*, 125, 46-53.
- Boverket. (2011). *Boverkets allmänna råd 2011:xx: Vägledning i analytisk dimensionering av byggnaders brandskydd*. Boverket.
- BSI. (2003). *Application of fire safety engineering principles to the design of buildings - Part 1: Initiation and development of fire within the enclosure of origin* (PD 7974-1:2003). London: British Standards Institution.
- Buchanan, A. H. (2001). *Structural design for fire safety*. Chichester: Wiley.
- Bukowski, R. W. (2003). Fire Hazard Analysis. I A. E. Cote (Red.), *Fire Protection Handbook* (19th ed., s. 3-105 – 3-114). Quincy, Massachusetts: National Fire Protection Association.

- Byggforsk. (2006). *Byggdetaljer 520.387 Tilgjengelig rømningstid ved brann*. Oslo: Norges byggforskningsinstitutt.
- Byggteknisk forskrift. (2010). *Forskrift om tekniske krav til byggverk*. Hentet 10. februar 2014 fra http://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2010-03-26-489?q=byggteknisk%20-forskrift*.
- Bwalya, A. (2008). An Overview of Design Fires for Building Compartments. *Fire Technology*, 44(2), 167-184.
- Collier, P. C. R., & Whiting, P. N. (2008). *Timeline for incipient fire development* (BRANZ Study Report 194). Judgeford, New Zealand: BRANZ Ltd.
- Custer, R. L. P. (2003a). Dynamics of Compartment Fire Growth. I A. E. Cote (Red.), *Fire Protection Handbook* (19th ed., s. 2-73 – 2-81). Quincy, Massachusetts: National Fire Protection Association.
- Custer, R. L. P. (2003b). Applying Models to Fire Protection Engineering Problems and Fire Investigations. I A. E. Cote (Red.), *Fire Protection Handbook* (19th ed., s. 3-169 – 3-179). Quincy, Massachusetts: National Fire Protection Association.
- DiBK. (2010). *Veiledning om tekniske krav til byggverk*. Hentet 10. februar 2014 fra <http://byggeregler.be.no/dxp/content/tekniskekrav/>.
- Deibjerg, T., Husted, B. P., Bygbjerg, H., & Westerman, D. (2003). *Argos User's Guide: A step by step guide to fire simulation* (revised 2005). Hvidovre: Danish Institute of Fire and Security Technology.
- DeNinno, P. J. (Red.). (2002). *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* (3rd. ed.). Quincy, Massachusetts: National Fire Protection Association.
- Drysdale, D. (2011). *An introduction to fire dynamics* (3rd ed.). Chichester: Wiley.
- Flage, R., & Aven, T. (2009). Expressing and communicating uncertainty in relation to quantitative risk analysis. *Reliability & Risk Analysis: Theory & Application*, 2(13), 9-18.
- Hagen, B. C. (2004). *Grunnleggende brannteknikk*. Haugesund: Bjarne Christian Hagen.
- Hagen, B. C. (2008). *Brannteknisk rømningsanalyse*. Trondheim: Tapir Akademiske Forlag.
- Haines, Y. Y. (2009). On the Complex Definition of Risk: A Systems-Based Approach. *Risk analysis*, 29(12), 1647-1654.
- Hicks, Jr. H. D. (2003). Confinement of Fire in Buildings. I A. E. Cote (Red.), *Fire Protection Handbook* (19th ed., s. 12-93 – 12-112). Quincy, Massachusetts: National Fire Protection Association.
- Holborn, P. G., Nolan, P. F., & Golt, J. (2004). An analysis of fire sizes, fire growth rates and times between events using data from fire investigations. *Fire Safety Journal*, 39(6), 481-524.
- Husted, B. P., & Westerman, D. (2009). *ARGOS Theory Manual* (Version 8.02). Hvidovre: Danish Institute of Fire and Security Technology.

- Jahn, W., Rein, G., & Torero, J. L. (2008). The Effect of Model Parameters on the Simulation of Fire Dynamics. *Fire Safety Science*, 9, 1341-1352.
- Jahn, W., Rein, G., & Torero, J. L. (2011). Forecasting fire growth using an inverse zone modelling approach. *Fire Safety Journal*, 46(3), 81-88.
- Karlsson, B., & Quintiere, J. G. (2000). *Enclosure fire dynamics*. Boca Raton, Fla.: CRC Press.
- Kong, D., Johansson, N., Van Hees, P., Lu, S., & Lo, S. (2013). A Monte Carlo analysis of the effect of heat release rate uncertainty on available safe egress time. *Journal of Fire Protection Engineering*, 23(1), 5-29.
- Leitch, M. (2010, 6. aug.). *Defining 'risk': How we use the word and why understanding its use matters*. Hentet fra: http://www.internalcontrolsdesign.co.uk/risk_defined/index.shtml.
- Lie, T. T. (2002). Fire Temperature - Time Relations. I P. J. DeNinno (Red.), *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* (3rd. ed., s. 4-201 – 4-208). Quincy, Massachusetts: National Fire Protection Association.
- Mostue, B. A. (2002). *En innføring i branntekniske analyser og beregninger – Muligheter og begrensninger* (SINTEF-rapport NBL A02101). Trondheim: SINTEF Norges branntekniske laboratorium.
- Mulholland, G. W. (2002). Smoke Production and Properties. I P. J. DeNinno (Red.), *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* (3rd. ed., s. 2-258 – 2-268). Quincy, Massachusetts: National Fire Protection Association.
- Nelson, H. E. (1987). *An Engineering Analysis of the Early Stages of Fire Development: The Fire at the Dupont Plaza Hotel and Casino-December 31, 1986* (NBSIR 87-3560). Gaithersburg: US Department of Commerce, National Bureau of Standards.
- NFPA. (2012). *Standard for Smoke Control Systems* (NFPA 92). Quincy, MA: National Fire Protection Association.
- Nilsen, T., & Aven, T. (2003). Models and model uncertainty in the context of risk analysis. *Reliability Engineering and System Safety*, 79(3), 309-3017.
- Notarianni, K. A. (2002). Uncertainty. I P. J. DeNinno (Red.), *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* (3rd. ed., s. 5-40 – 5-64). Quincy, Massachusetts: National Fire Protection Association.
- NRC. (2009). *Guidance on the treatment of uncertainties associated with PRAs in risk-informed decision making* (NUREG-1855). Washington, DC: Nuclear Regulatory Commission.
- Nystedt, F. (2001). *Bostandsbränder och sprinkler: En koppling til brandteknisk dimensionering* (Rapport 3108). Lund: Department of Fire Safety Engineering, Lund University.
- Ohlemiller, T. J. (2002). Smoldering Combustion. I P. J. DeNinno (Red.), *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* (3rd. ed., s. 2-200 – 2-210). Quincy, Massachusetts: National Fire Protection Association.

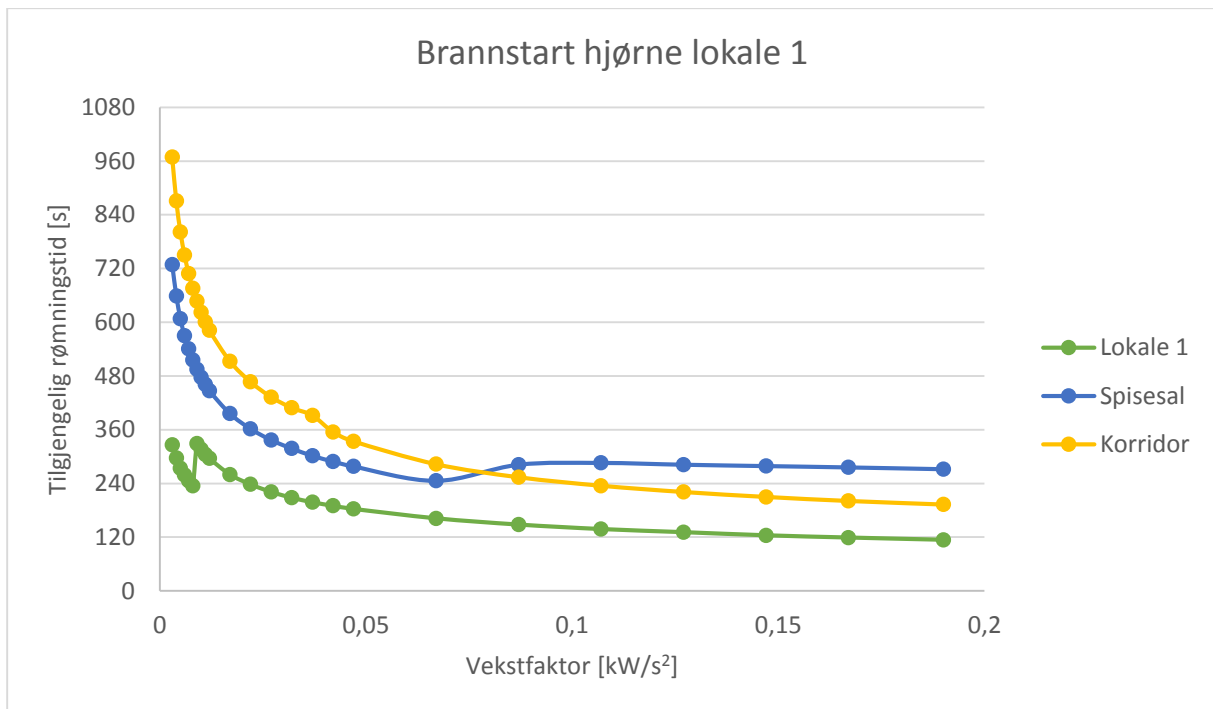
- Parry, G. W. (1996). The characterization of uncertainty in Probabilistic Risk Assessments of complex systems. *Reliability Engineering & System Safety*, 54(2), 119-126.
- Paté-Cornell, M.E. (1996). Uncertainties in risk analysis: Six levels of treatment. *Reliability Engineering & System Safety*, 54(2-3), 95-111.
- Quintitere, J. G. (2002). Compartment Fire Modeling. I P. J. DeNinno (Red.), *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* (3rd. ed., s. 3-162 – 3-170). Quincy, Massachusetts: National Fire Protection Association.
- Reinert, J. M., & Apostolakis, G. E. (2006). Including model uncertainty in risk-informed decision making. *Annals of Nuclear Energy*, 33(4), 354-369.
- Rein, G., Torero, J. L., Jahn, W., Stern-Gottfried, J., Ryder, N. L., Desanghere, S., . . . Reszka, P. (2009). Round-robin study of a priori modelling predictions of the Dalmarnock Fire Test One. *Fire Safety Journal*, 44(4), 590-602.
- Schifiliti, R. P. (1986). *Use of Fire Plume Theory in the Design and Analysis of Fire Detector and Sprinkler Response* (Master's Thesis, Worcester Polytechnic Institute). Hentet fra <http://www.wpi.edu/Pubs/ETD/Available/etd-0118100-164502/>
- Schifiliti, R. P., Meacham, B. J., & Custer, R. L. P. (2002). Design of Detection Systems. I P. J. DeNinno (Red.), *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* (3rd. ed., s. 4-1 – 4-43). Quincy, Massachusetts: National Fire Protection Association.
- Selvik, J. T., & Aven, T. (2011). A framework for Reliability and Risk Centered Maintenance. *Reliability Engineering and System Safety*, 96(2), 324-331.
- SFPE & NFPA. (2000). *SFPE engineering guide to performance-based fire protection analysis and design of buildings*. Quincy, MA: National Fire Protection Association.
- Staffansson, L. (2010). *Selecting desing fires* (Report 7032). Lund: Department of Fire Safety Engineering and Systems Safety, Lund University.
- Standard Norge. (2012). *Krav til risikovurdering av brann i byggverk* (NS 3901:2012). Lysaker: Standard Norge.
- Sundström, B. (1994). *Combustion Behaviour of Upholstered Furniture: Fire Safety of Upholstered Furniture: The Final Report on the CBUF Research Programme* [S. I.]. Stockholm, Sweden: Swedish National Testing and Research Institute, European Commission Standards, Measurements and Testing.
- Walaker, S. H. (2014). *Usikkerhet knyttet til prediksjon av nødvendig rømningstid ved brann* (Mastergradsoppgave, Universitetet i Stavanger).
- Walton, W. D. (2002). Zone Computer Fire Model for Enclosures. I P. J. DeNinno (Red.), *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* (3rd. ed., s. 3-189 – 3-193). Quincy, Massachusetts: National Fire Protection Association.

10 Vedlegg

Vedlegg A – Tilgjengelig rømningstid som funksjon av vekstfaktor

Tabell 14: Tilgjengelig rømningstid ved brannstartsted i hjørne lokale 1.

Vekstfaktor [kW/s ²]	Tilgjengelig rømningstid [s]					
	Lokale 1	Spisesal	Korridor	Lokale 2		
Langsom	0,003	326	729	969	Blir ikke kritisk	
	0,004	297	659	871	Blir ikke kritisk	
	0,005	274	608	802	Blir ikke kritisk	
	0,006	259	570	750	Blir ikke kritisk	
	0,007	246	541	709	Blir ikke kritisk	
	0,008	235	516	676	Blir ikke kritisk	
	0,009	329	495	647	Blir ikke kritisk	
	0,010	316	477	622	Blir ikke kritisk	
	0,011	305	461	601	Blir ikke kritisk	
	Medium	0,012	296	447	582	Blir ikke kritisk
		0,017	260	396	513	Blir ikke kritisk
0,022		238	362	467	Blir ikke kritisk	
0,027		221	337	433	Blir ikke kritisk	
0,032		208	318	409	Blir ikke kritisk	
0,037		198	302	392	Blir ikke kritisk	
0,042		190	289	355	Blir ikke kritisk	
Rask	0,047	183	278	334	Blir ikke kritisk	
	0,067	162	246	283	Blir ikke kritisk	
	0,087	148	282	254	Blir ikke kritisk	
	0,107	138	286	235	Blir ikke kritisk	
	0,127	131	282	221	Blir ikke kritisk	
	0,147	124	279	210	Blir ikke kritisk	
	0,167	119	276	201	Blir ikke kritisk	
Ultra-rask	0,190	114	272	193	Blir ikke kritisk	



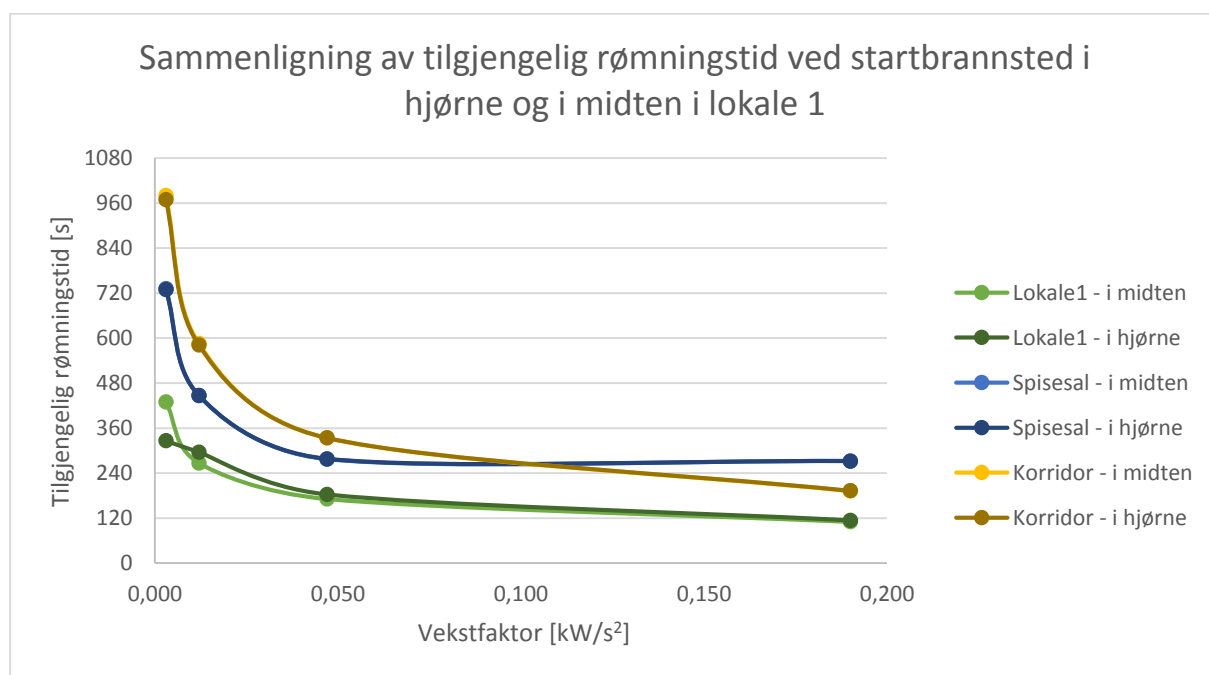
Figur 23: Tilgjengelig rømningstid vs. vekstfaktor ved brannstartsted i hjørne av lokale 1.

Vedlegg B – Tilgjengelig rømningstid som funksjon av startbrannsted

Startbrannsted – lokale 1

Tabell 15: Tilgjengelig rømningstid ved brannstartsted i lokale 1.

Plassering	Vekstfaktor	Tilgjengelig rømningstid [s]			
		Lokale 1	Spisesal	Korridor	Lokale 2
I hjørne	Langsom $\alpha=0,003 \text{ kW/s}^2$	326	729	969	Ikke kritisk
	Medium $\alpha=0,012 \text{ kW/s}^2$	296	447	582	Ikke kritisk
	Rask $\alpha=0,047 \text{ kW/s}^2$	183	278	334	Ikke kritisk
	Ultra-rask $\alpha=0,19 \text{ kW/s}^2$	114	272	193	Ikke kritisk
I midten	Langsom $\alpha=0,003 \text{ kW/s}^2$	430	732	980	Ikke kritisk
	Medium $\alpha=0,012 \text{ kW/s}^2$	267	447	586	Ikke kritisk
	Rask $\alpha=0,047 \text{ kW/s}^2$	171	277	334	Ikke kritisk
	Ultra-rask $\alpha=0,19 \text{ kW/s}^2$	110	272	192	Ikke kritisk

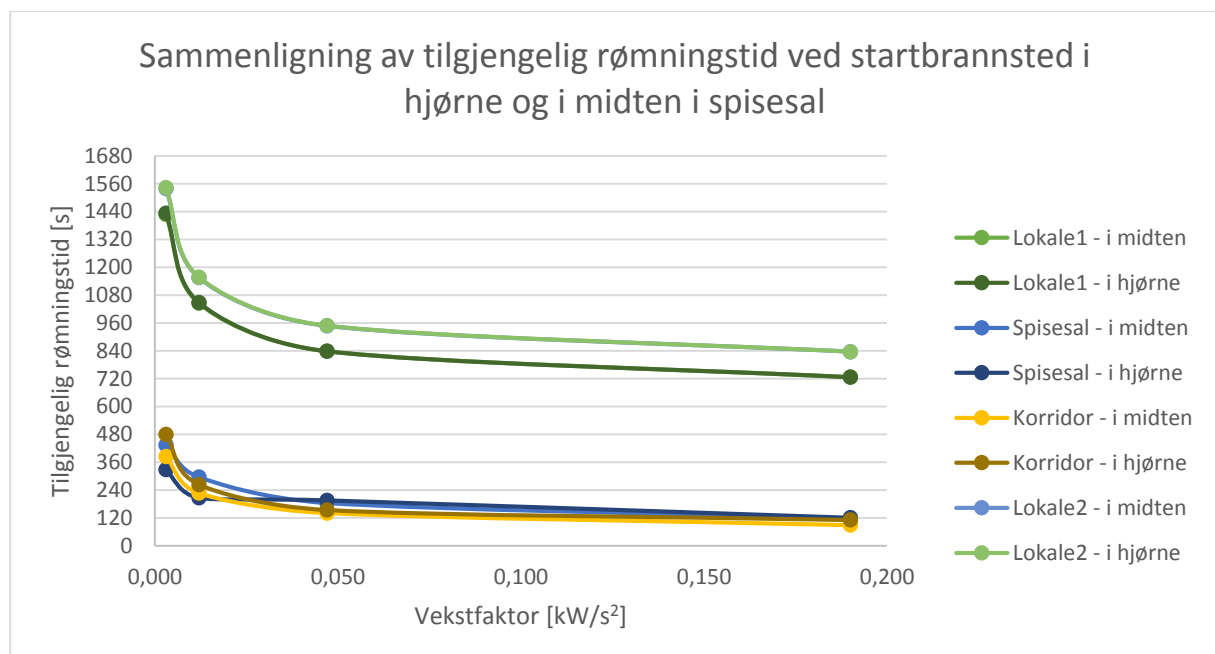


Figur 24: Sammenligning av tilgjengelig rømningstid når startbrannstedet er i hjørne og midten i lokale 1.

Startbrannsted – spisesal

Tabell 16: Tilgjengelig rømningstid ved brannstartsted i spisesal.

Plassering	Vekstfaktor	Tilgjengelig rømningstid [s]			
		Lokale 1	Spisesal	Korridor	Lokale 2
I hjørne	Langsom $\alpha=0,003 \text{ kW/s}^2$	1433	328	480	1543
	Medium $\alpha=0,012 \text{ kW/s}^2$	1048	207	264	1157
	Rask $\alpha=0,047 \text{ kW/s}^2$	838	196	154	948
	Ultra-rask $\alpha=0,19 \text{ kW/s}^2$	726	121	111	836
I midten	Langsom $\alpha=0,003 \text{ kW/s}^2$	1427	434	385	1539
	Medium $\alpha=0,012 \text{ kW/s}^2$	1045	296	227	1155
	Rask $\alpha=0,047 \text{ kW/s}^2$	838	184	141	947
	Ultra-rask $\alpha=0,19 \text{ kW/s}^2$	726	116	89	836

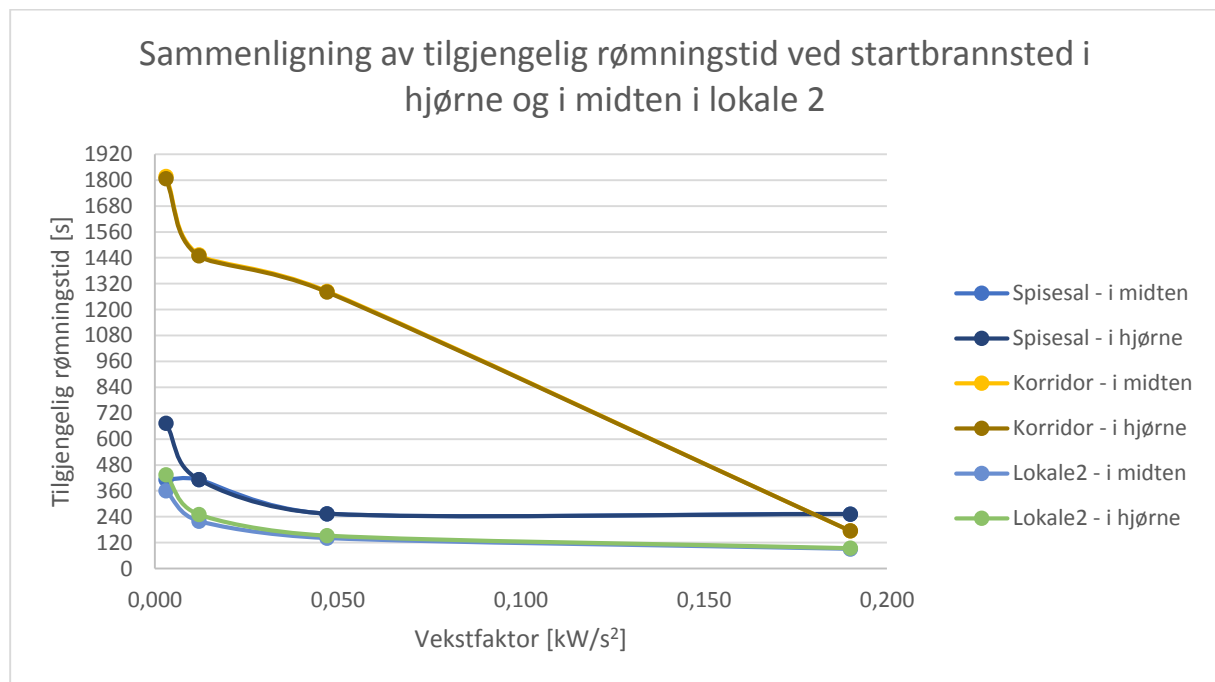


Figur 25: Sammenligning av tilgjengelig rømningstid når startbrannstedet er i hjørne og midten i spisesalen.

Startbrannsted – lokale 2

Tabell 17: Tilgjengelig rømningstid ved brannstartsted i lokale 2.

Plassering	Vekstfaktor	Tilgjengelig rømningstid [s]			
		Lokale 1	Spisesal	Korridor	Lokale 2
I hjørne	Langsom $\alpha=0,003 \text{ kW/s}^2$	Ikke kritisk	674	1807	435
	Medium $\alpha=0,012 \text{ kW/s}^2$	Ikke kritisk	412	1449	251
	Rask $\alpha=0,047 \text{ kW/s}^2$	Ikke kritisk	254	1282	153
	Ultra-rask $\alpha=0,19 \text{ kW/s}^2$	Ikke kritisk	252	175	95
I midten	Langsom $\alpha=0,003 \text{ kW/s}^2$	Ikke kritisk	413	1818	361
	Medium $\alpha=0,012 \text{ kW/s}^2$	Ikke kritisk	413	1454	220
	Rask $\alpha=0,047 \text{ kW/s}^2$	Ikke kritisk	254	1285	141
	Ultra-rask $\alpha=0,19 \text{ kW/s}^2$	Ikke kritisk	253	175	91

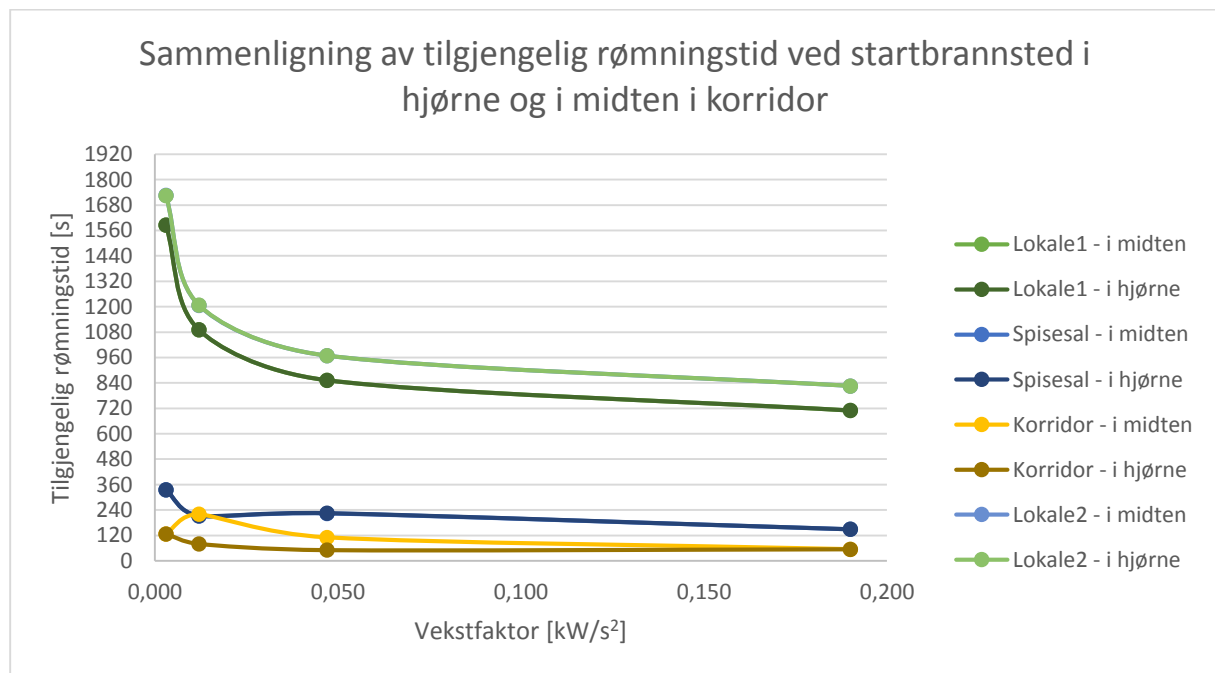


Figur 26: Sammenligning av tilgjengelig rømningstid når startbrannstedet er i hjørne og midten i lokale 2.

Startbrannsted – korridor

Tabell 18: Tilgjengelig rømningstid ved brannstartsted i korridor.

Plassering	Vekstfaktor	Tilgjengelig rømningstid [s]			
		Lokale 1	Spisesal	Korridor	Lokale 2
I hjørne	Langsom $\alpha=0,003 \text{ kW/s}^2$	1586	336	127	1725
	Medium $\alpha=0,012 \text{ kW/s}^2$	1091	213	80	1208
	Rask $\alpha=0,047 \text{ kW/s}^2$	853	225	51	969
	Ultra-rask $\alpha=0,19 \text{ kW/s}^2$	710	149	55	826
I midten	Langsom $\alpha=0,003 \text{ kW/s}^2$	1586	336	127	1727
	Medium $\alpha=0,012 \text{ kW/s}^2$	1091	212	220	1207
	Rask $\alpha=0,047 \text{ kW/s}^2$	853	224	111	969
	Ultra-rask $\alpha=0,19 \text{ kW/s}^2$	710	149	55	826

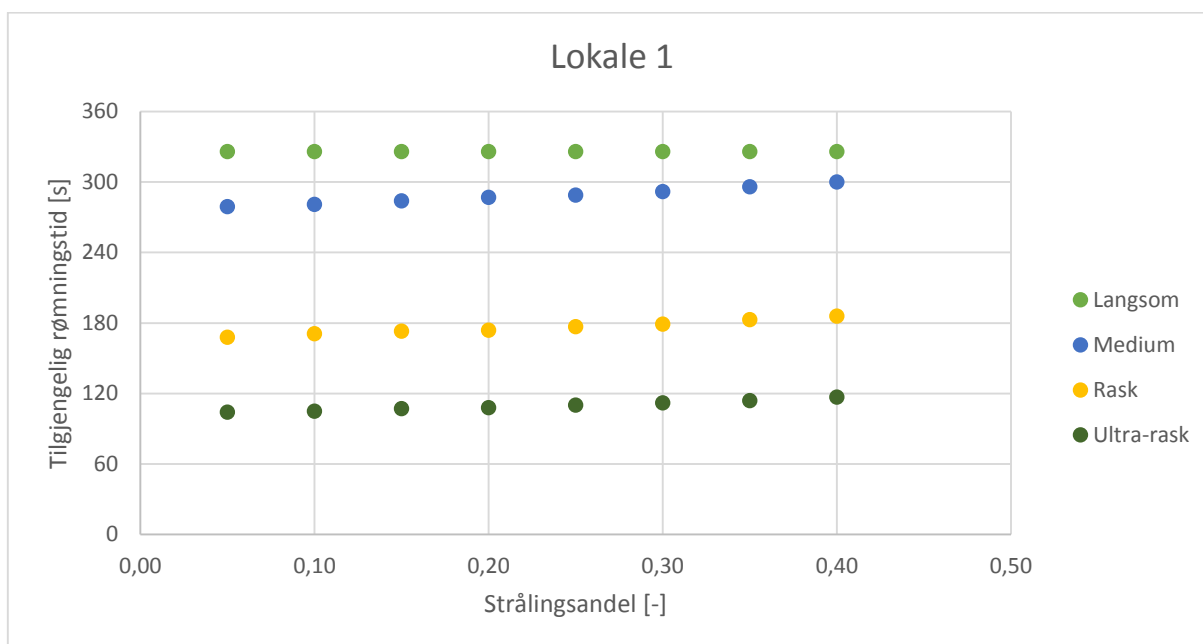


Figur 27: Sammenligning av tilgjengelig rømningstid når startbrannstedet er i hjørne og midten i korridoren.

Vedlegg C – Tilgjengelig rømningstid som funksjon av strålingsandel

Tabell 19: Tilgjengelig rømningstid i lokale 1 ved ulike strålingsandeler.

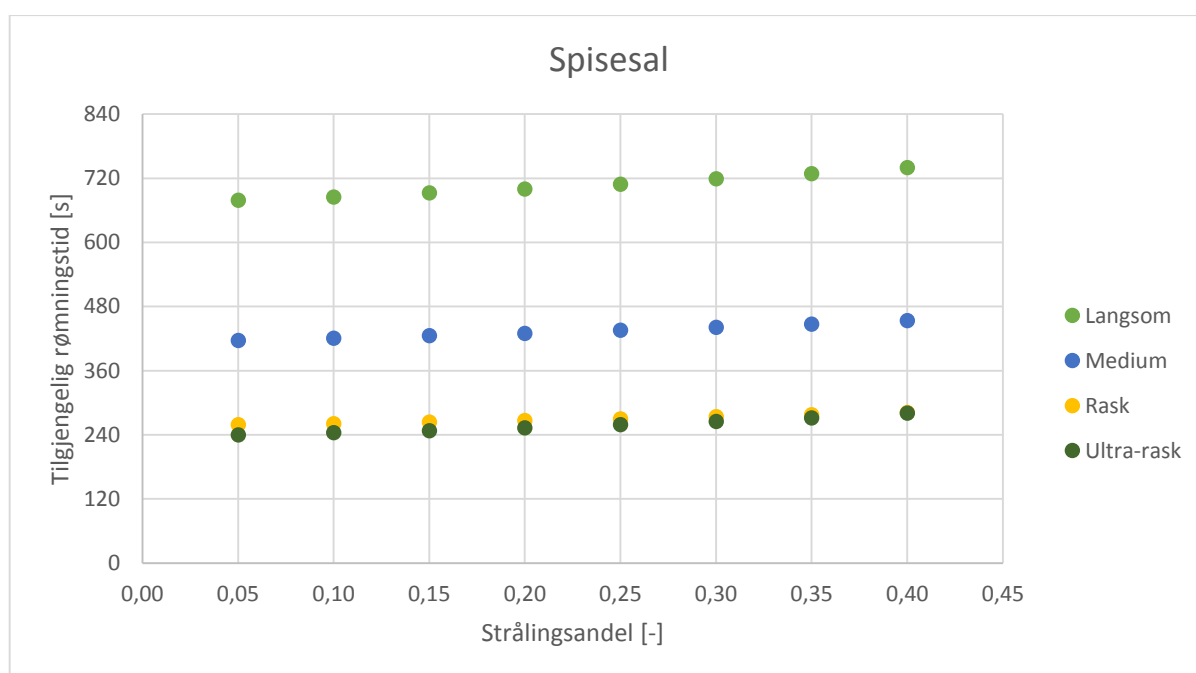
Strålingsandel [%]	Tilgjengelig rømningstid [s]			
	Langsom $\alpha=0,003 \text{ kW/s}^2$	Medium $\alpha=0,012 \text{ kW/s}^2$	Rask $\alpha=0,047 \text{ kW/s}^2$	Ultra-rask $\alpha=0,19 \text{ kW/s}^2$
5	326	279	168	104
10	326	281	171	105
15	326	284	173	107
20	326	287	174	108
25	326	289	177	110
30	326	292	179	112
35	326	296	183	114
40	326	300	186	117



Figur 28: Tilgjengelig rømningstid vs. strålingsandel lokale 1.

Tabell 20: Tilgjengelig rømningstid i spisesal ved ulike strålingsandel.

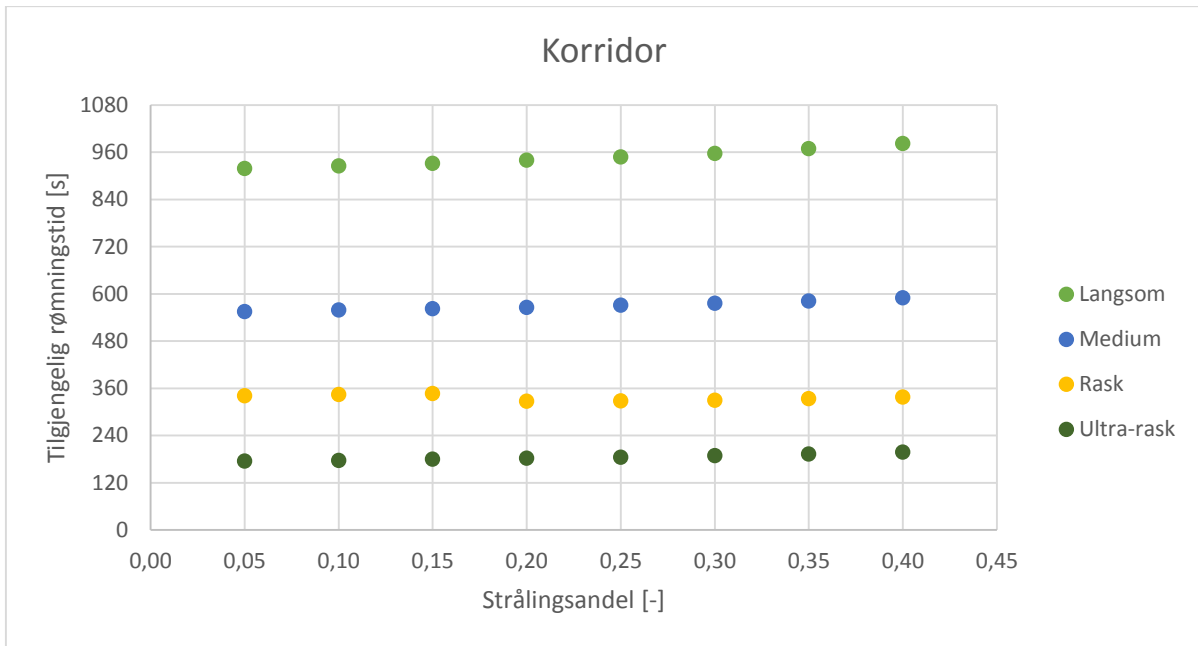
Tilgjengelig rømningstid [s]				
Strålingsandel [%]	Langsom $\alpha=0,003 \text{ kW/s}^2$	Medium $\alpha=0,012 \text{ kW/s}^2$	Rask $\alpha=0,047 \text{ kW/s}^2$	Ultra-rask $\alpha=0,19 \text{ kW/s}^2$
5	679	417	259	240
10	685	421	261	244
15	693	426	264	248
20	700	430	267	253
25	709	436	270	259
30	719	441	274	265
35	729	447	278	272
40	740	454	282	281



Figur 29: Tilgjengelig rømningstid vs. strålingsandel spisesal.

Tabell 21: Tilgjengelig rømningstid i korridor ved ulike strålingsandel.

Tilgjengelig rømningstid [s]				
Strålingsandel [%]	Langsom $\alpha=0,003 \text{ kW/s}^2$	Medium $\alpha=0,012 \text{ kW/s}^2$	Rask $\alpha=0,047 \text{ kW/s}^2$	Ultra-rask $\alpha=0,19 \text{ kW/s}^2$
5	919	555	341	175
10	925	559	344	177
15	932	562	347	180
20	940	566	327	182
25	948	571	328	185
30	957	576	330	189
35	969	582	334	193
40	982	590	338	198

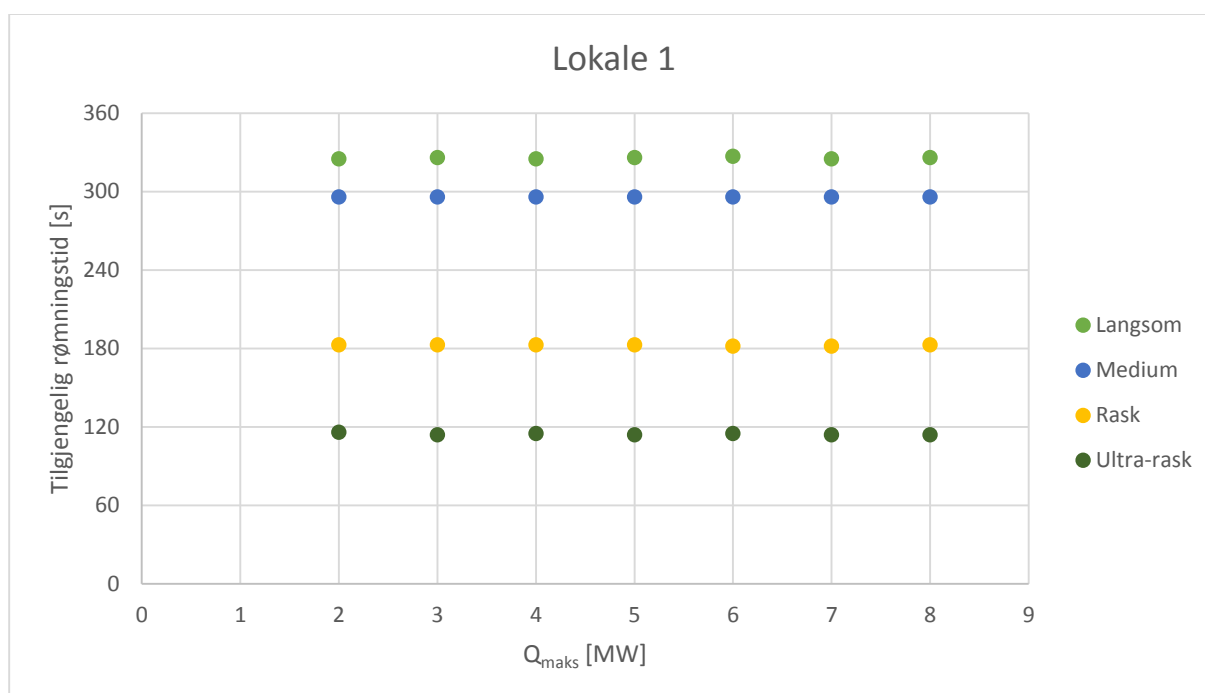


Figur 30: Tilgjengelig rømmingstid vs. strålingsandel korridor.

Vedlegg D – Tilgjengelig rømningstid som funksjon av maksimal energiproduksjon

Tabell 22: Tilgjengelig rømningstid i lokale 1 ved ulike maksimal energiproduksjon.

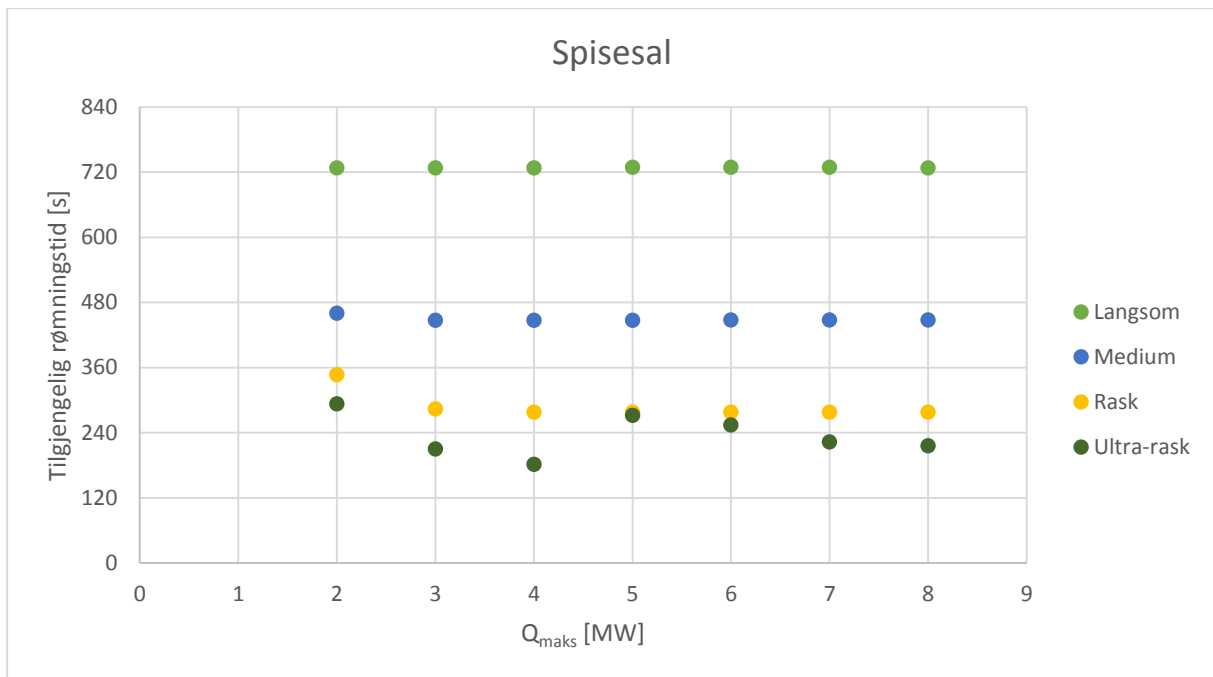
Max Q [MW]	Tilgjengelig rømningstid [s]			
	Langsom $\alpha=0,003 \text{ kW/s}^2$	Medium $\alpha=0,012 \text{ kW/s}^2$	Rask $\alpha=0,047 \text{ kW/s}^2$	Ultra-rask $\alpha=0,19 \text{ kW/s}^2$
2	325	296	183	116
3	326	296	183	114
4	325	296	183	115
5	326	296	183	114
6	327	296	182	115
7	325	296	182	114
8	326	296	183	114



Figur 31: Tilgjengelig rømningstid vs. maksimal energiproduksjon lokale 1.

Tabell 23: Tilgjengelig rømningstid i spisesal ved ulike maksimal energiproduksjon.

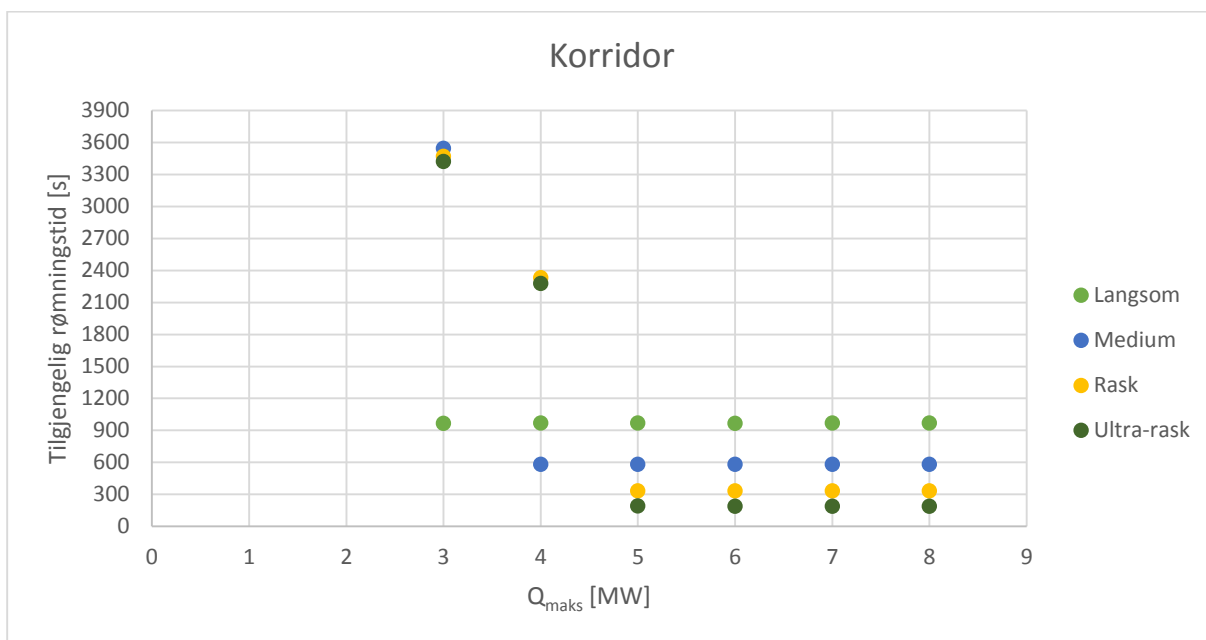
Max Q [MW]	Tilgjengelig rømningstid [s]			
	Langsom $\alpha=0,003 \text{ kW/s}^2$	Medium $\alpha=0,012 \text{ kW/s}^2$	Rask $\alpha=0,047 \text{ kW/s}^2$	Ultra-rask $\alpha=0,19 \text{ kW/s}^2$
2	728	460	347	293
3	728	447	284	210
4	728	447	278	182
5	729	447	278	272
6	729	448	278	254
7	729	448	278	223
8	728	448	278	216



Figur 32: Tilgjengelig rømningstid vs. maksimal energiproduksjon spisesal.

Tabell 24: Tilgjengelig rømningstid i korridor ved ulike maksimal energiproduksjon.

Max Q [MW]	Tilgjengelig rømningstid [s]			
	Langsom $\alpha=0,003 \text{ kW/s}^2$	Medium $\alpha=0,012 \text{ kW/s}^2$	Rask $\alpha=0,047 \text{ kW/s}^2$	Ultra-rask $\alpha=0,19 \text{ kW/s}^2$
2	Blir ikke kritisk	Blir ikke kritisk	Blir ikke kritisk	Blir ikke kritisk
3	968	3545	3471	3423
4	969	582	2333	2279
5	969	582	334	193
6	968	582	333	189
7	969	582	334	189
8	969	582	334	189



Figur 33: Tilgjengelig rømningstid vs. maksimal energiproduksjon korridor.