



Kunnskap for en bedre verden

Fasadesprinkling som risikoreduserende tiltak mot brannspredning i tett trehusbebyggelse under vindfulle forhold

En simuleringsstudie

Ane Garten

Helse, miljø og sikkerhet

Innlevert: juni 2018

Hovedveileder: Trond Øystein Kongsvik, IØT

Medveileder: Jon Ivar Knarud, IBM

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for industriell økonomi og teknologiledelse

Oppgavetekst

Målet med denne oppgaven er å undersøke i hvilken grad fasadesprinkleranlegg er et godt tiltak mot brannspredning i tett trehusbebyggelse under vindfulle forhold. For å belyse dette skal det undersøkes hvilke brannspredningsmekanismer som ligger til grunn i et slikt scenario, utfordringer med fasadesprinkleranlegg samt sprinklersystemets effekt mot slik brannspredning. Vindens påvirkning skal også vektlegges. Dette skal utføres ved å gjennomføre et litteraturstudium og ved bruk av simuleringsverktøy. Simuleringsverktøyet skal brukes til å simulere scenarier med brann ved ulike vindhastigheter som et grunnlag for å vurdere sprinkleranleggets effekt.

Hovedinnhold:

- Litteraturgjennomgang av relevante tema
- Simulere scenarier med brann ved ulike vindhastigheter
- Drøfte funn fra litteratur og simuleringer
- Gi anbefalinger til hvordan identifiserte utfordringer kan håndteres

Forord

Jeg ønsker å uttrykke min takknemlighet for muligheten jeg har fått til å skrive denne oppgaven i et samarbeid mellom Institutt for industriell økonomi og teknologiledelse og Institutt for bygg- og miljøteknikk ved NTNU. Som student på masterutdanningen Helse, miljø og sikkerhet fattet jeg interesse for brannsikkerhet; en fordypning hovedsakelig rettet mot byggstudenter. Likevel fikk jeg muligheten til å velge denne fordypningen og avslutte utdanningen med å skrive masteroppgave om brannsikkerhet i tett trehusbebyggelse. Dette ville ikke vært mulig uten mine to veiledere Trond Kongsvik og Jon Ivar Knarud. Jeg vil takke dere for muligheten dere har gitt meg og for uvurderlig veiledning gjennom prosjektperioden — det har vært avgjørende for en fin avslutning på fem års studier. Tusen takk!

Videre vil jeg rette en stor takk til Geir Jensen, brannrådgiver i COWI, for utfyllende svar på mine spørsmål om utfordringer knyttet til fasadesprinkleranlegg. Dine innspill har vært svært verdifulle for meg.

Ane Garten
Trondheim, 11.06.2018

Sammendrag

Flere kommuner i Norge har i dag områder med tett trehusbebyggelse og denne bebyggelsen anses som en stor del av landets kulturarv. Brann er en stor trussel for bevaring av slike bygninger og hvis en brann først bryter ut kan den raskt spre seg ukontrollert, spesielt under vindfulle forhold. Det er derfor av interesse å se på hvordan brannsikkerheten i slike tette trehusområder kan ivaretas på best mulig måte.

Riksantikvaren oppgir fasadesprinkleranlegg som et godt tiltak mot utvendig brannspredning i tett trehusbebyggelse, og en undersøkelse utført av DSB i 2014 viser at det var utført eller planlagt utført tiltak med fasadeslokkeanlegg i 26 % av områder med tette trehusmiljøer i Norge. Til tross for dette er det mangel på retningslinjer for utførelse av slike slokkeanlegg og dokumentasjon på at de faktisk utfører tiltenkt funksjon. Fullskalatester som undersøker fasadesprinklers effekt er heller ikke utført. Det kan derfor stilles spørsmål ved hvorvidt praksisen som pågår i dag er forsvarlig sett fra et brannsikkerhetsperspektiv.

På bakgrunn av dette skal denne rapporten undersøke om fasadesprinkleranlegg er et godt tiltak mot spredning i tett trehusbebyggelse under påvirkning av vind. Følgende problemstilling skal besvares: *I hvilken grad er fasadesprinkleranlegg et godt tiltak mot brannspredning i tett trehusbebyggelse under vindfulle forhold?*

En litteraturgjennomgang og en brannteknisk analyse med simuleringer har blitt utført. Litteraturstudien fokuserer på å danne en oversikt over hvilken kunnskap som eksisterer rundt fasadesprinkleranlegg i dag, samtidig som det er vektlagt å danne et kunnskapsgrunnlag rundt fenomenet rombrann (compartment fire) og hvilke brannspredningsmekanismer som opptrer i et slikt scenario. Simuleringene studerer brannspredning mellom bygninger ved å måle blant annet temperaturøkning og eksponering for varmeffluks, samtidig som det undersøkes hvordan scenariet påvirkes av vind i ulike hastigheter. Simuleringene begrenses til å omhandle rombrann etter overtenning og vil derfor kun ta for seg forhold som er aktuelle ved fullt utviklet brann.

Litteraturstudien viser at pålitelig og utfyllende informasjon om fasadesprinkleranlegg er mangelfull, og informasjon fra fagfolk bekrefter at slike anlegg på flere måter er en utfordring i dag. Samtidig er det i litteratursøket identifisert utfordringer med andre typer sprinkleranlegg som er forsøkt knyttet opp mot fasadesprinkleranlegg.

Resultatene fra brannsimuleringene viser at ytre vindpåkjenning og antall fasadeåpninger påvirker utviklingen av en rombrann og fasadesprinkleranleggets effekt i stor grad. Simuleringene viser også at en vindhastighet på 7,8 m/s skiller seg ut med generelt høye verdier for varmeffluks og temperaturøkning til motstående bygg.

Rapporten konkluderer med at fasadesprinkleranlegg i stor grad *kan* være et godt tiltak mot brannspredning både under vindfulle forhold og ved fravær av vind, men at løsningene som eksisterer i dag bør vurderes og optimaliseres. Videre gir rapporten følgende anbefalinger:

- Det bør etableres et regelverk rundt utførelse av fasadesprinkleranlegg dersom det skal fortsette å brukes som risikoreducerende tiltak
- For å etablere et slikt regelverk bør det utføres fullskala tester som sier noe om sprinkler-systemets effekt i ulike situasjoner, herunder vindpåvirkning i ulike hastigheter og hvilke vannstrømmer som er mest hensiktsmessige
- Lovteksten som regulerer tett trehusbebyggelse bør gjennomgås for å unngå tvetydigheter og for å fremme systematisk sikkerhetsarbeid i slik bebyggelse
- Vannforsyningen i Norges kommuner bør kartlegges for å avgjøre om vannressursene strekker til ved et slokkearbeid

Abstract

Several municipalities in Norway today contains areas which are characterized by densely built old wooden structures, and such buildings are considered a valuable part of the country's cultural heritage. Fire is a major threat to the preservation of these buildings and if a fire breaks out it can quickly spread uncontrollably, especially during windy conditions. It is therefore of interest to look into how fire safety in such wooden houses and communities can be safeguarded in the best possible way.

The Directorate for Cultural Heritage reports external fire sprinklers as a satisfying measure to combat fire spread between wooden structures. A survey conducted by The Norwegian Directorate for Civil Protection (DSB) in 2014 also implies that measures with external sprinklers were conducted, or planned to be conducted, in 26 % of areas in Norway with such wooden communities. Despite this, there is a lack of guidelines for the design process of such extinguishing systems and documentation that they perform their intended function. In addition, full-scale tests which examines the effect of external sprinklers on the building façade has not been performed. It can therefore be questioned whether the practice carried out today is sufficient, seen from a fire safety perspective.

This report will therefore attempt to examine whether façade sprinkler systems are suitable measures against fire spread in densely built wooden houses, taking wind conditions into consideration. The following question will be answered: *To what extent is façade sprinklers a suitable measure to combat fire spread in densely built wooden houses during windy conditions?*

A literature study and a technical analysis with fire simulations has been carried out. The literature study's main focus is to provide an overview of existing knowledge regarding façade sprinkler systems, and to gain knowledge on the phenomenon of compartment fire and the mechanisms of fire spread which can occur in such a scenario. The purpose of the fire simulations has been to examine fire spread between buildings by measuring, amongst other things, temperature increase and heat flux exposure. The simulations also seek to assess how fire scenarios is affected by windy conditions and multiple façade openings, and are limited to a compartment fire after flashover. The analysis will therefore only deal with conditions that are relevant for a fully developed fire.

The findings from the literature study shows that reliable and complementary information about façade sprinklers is inadequate, and professionals from the fire safety community confirms that such systems are a challenge today in several ways. The literature study has also identi-

fied challenges regarding other types of sprinkler systems, and this knowledge has been linked together with façade sprinkler systems.

Results from the fire simulations indicates that windy conditions and the number of façade openings has a major impact on the development of a room fire and the effect of the façade sprinkler system. The results also indicate that the wind speed of 7.8 m/s stands out with generally high values for heat flux and temperature rise to the opposite building.

The report's main concluding remark is that a façade sprinkler system has the possibility to perform as an effective measure against fire spread in densely built wooden communities both in windy conditions and in absence of wind. However, this relates closely to the design of the sprinkler system; solutions which exists today should therefore be assessed and optimized. Furthermore, the report provides the following recommendations:

- A framework should be established for the design and regulation of façade sprinkler systems if it is to continue to be used as a risk reduction measure
- To establish such a regulatory framework, full-scale tests which examines the effect of the sprinkler systems in different situations should be carried out
- The legal text which regulates dense wooden buildings should be reviewed to avoid ambiguities and to promote systematic safety work in such buildings
- The water supply in Norway's municipalities should be mapped to determine whether water resources are sufficient for such sprinkler systems

Innhold

Sammendrag	iii
Abstract	v
1 Introduksjon	1
1.1 Målbeskrivelse og forskningsspørsmål	2
1.2 Omfang og avgrensninger	3
1.3 Disposisjon	4
2 Metode	5
2.1 Litteraturstudie og bakgrunnsinformasjon	5
2.2 Brannsimulering	8
2.3 Styrker og svakheter	9
3 Teori	12
3.1 Eldre trehusbebyggelse som kulturmiljø	12
3.1.1 Byggestil	13
3.2 Brannspredning mellom byggverk	14
3.2.1 Spredningsmekanismer	14
3.2.2 Vindens utfordringer	16
3.3 Grunnleggende brannteori	17
3.3.1 Varmeoverføring	17
3.3.2 Rombrann	19
3.4 Automatisk sløkkeanlegg	24
3.4.1 Fasadesprinkler som tiltak mot utvendig spredning	25

3.4.2	Utfordringer knyttet til sprinkleranlegg	26
3.5	Fire dynamics simulator og PyroSim	29
3.5.1	Mesh	30
3.5.2	Overflater	33
3.5.3	Stråling og varmeffluks	35
3.5.4	Sensorer og instrumenter	37
4	Simuleringsmodell	38
4.1	Målsetning	38
4.2	Kvalitative valg	39
4.3	Kvantitative valg	41
4.4	Simuleringsoppsett	50
5	Resultater	51
5.1	Én fasadeåpning	51
5.1.1	Uten sprinkling	55
5.1.2	Med sprinkling	58
5.2	Flere fasadeåpninger	60
5.2.1	Uten sprinkling	64
5.2.2	Med sprinkling	66
5.3	Oppsummering	69
6	Diskusjon	72
6.1	Spredningsmekanismer i tett trehusbebyggelse	73
6.1.1	Oppsummering forskningsspørsmål 1	76
6.2	Utfordringer med fasadesprinkler	76
6.2.1	Oppsummering forskningsspørsmål 2	80
6.3	Rombrann under vindpåvirkning	80
6.3.1	Oppsummering forskningsspørsmål 3	83
6.4	Fasadesprinklers effekt mot brannspredning	83
6.4.1	Oppsummerings forskningsspørsmål 4	86
6.5	Usikkerhet i simuleringsmodell og -resultater	86

7 Konklusjon	88
8. Videre arbeid	91
Referanser	
Vedlegg	
A Utregninger	A.1
B Vindhastigheter og omgivende temperatur	B.1
C Sensitivitetsanalyser	C.1
C.1 Meshinndeling	C.1
C.2 Gridstørrelse	C.8
C.3 Variablenes sensitivitet	C.10

Figurliste

1	Tett trehusbebyggelse på Øvre Møllenberg i Trondheim	13
2	Liggende og stående kledning montert på utlekting	14
3	Flammeforlengelse ved vindpåvirkning	17
4	Branntrekanten	18
5	De ulike fasene i en brann	20
6	Nøytralplan i ventilasjonsåpning	22
7	Fasadesprinkler	26
8	Intermittent flamme	28
9	Mesh- og celleinndeling i brannplumen	31
10	Meshinndeling som godkjennes og ikke godkjennes	32
11	Temperatur i brannplumen	33
12	Hydraulisk diameter	34
13	Trehusbebyggelse i Trondheim	39
14	Området for simuleringene	40
15	Meshinndeling sett fra to ulike vinkler	42
16	Inndeling av grid	42
17	Modell med én og tre fasadeåpninger	43
18	Modellens mål	44
19	Statistikk over vindretninger i Trondheim	44
20	Modellen sett ovenfra med vindretning	45
21	Modellert fasadesprinkleranlegg	47
22	Oversikt over nummererte sensorer	49
23	Varmeavgivelsesrate inne i brannrommet ved ulike vindhastigheter	52
24	Eksterne temperaturer sett ovenfra ved ulike vindhastigheter	54

25	Varmeutvikling ved ulike vindhastigheter med én fasadeåpning	55
26	Temperaturutvikling ved ulike vindhastigheter uten sprinkling	56
27	Varmefluksintensitet ved ulike vindhastigheter uten sprinkling	57
28	Temperaturutvikling ved ulike vindhastigheter med sprinkling	58
29	Varmefluksintensitet ved ulike vindhastigheter med Sprinkling	59
30	Varmeavgivelsesrate inne i brannrom	61
31	Eksterne temperaturer sett ovenfra ved ulike vindhastigheter	63
32	Varmeutvikling ved ulike vindhastigheter med flere fasadeåpninger	64
33	Temperaturutvikling ved ulike vindhastigheter med flere fasadeåpninger uten sprin- kling.	65
34	Varmefluksintensitet ved ulike vindhastigheter med flere fasadeåpninger uten sprin- kling	66
35	Temperaturutvikling ved ulike vindhastigheter med flere fasadeåpninger med sprin- kling	67
36	Varmefluksintensitet ved ulike vindhastigheter med flere fasadeåpninger med sprin- kling	68
37	Sammenheng mellom økt vindhastighet, HRR og luftinnstrømning	69
38	Vannforsyning i ulike områder	77
B.1	Vindhastigheter	B.1
B.2	Temperaturer fra det siste året	B.1
C.1	Meshinndeling oppsett 1	C.1
C.2	Tverrsnitt av plumen i oppsett 1	C.1
C.3	Meshinndeling oppsett 2	C.1
C.4	Tverrsnitt av plumen i oppsett 2	C.1
C.5	Meshinndeling oppsett 3	C.1
C.6	Tverrsnitt av plumen i oppsett 3	C.1
C.7	Temperaturvariasjon i de ulike oppsettene	C.1
C.8	Oversikt over temperaturutvikling ved ulike cellestørrelser	C.8
C.9	Temperaturvariasjon med ulikt antall diskrete vinkler	C.10
C.10	Temperaturvariasjon med ulik omgivelsestemperatur	C.10
C.11	Temperaturutvikling ved ulike varmeavgivelsesrater	C.10
C.12	Kombinasjoner av testede variabler i sensitivitetsanalysen	C.10

Tabelliste

1	Norske og engelske søkeord	6
2	Publiseringer som har vært viktige for studien.	7
3	Fordeler og ulemper med et litteratursøk.	10
4	Modellens utdata	48
5	Simuleringsoppsett	50
6	Gjennomsnittlig HRR i brannrom ved ulike hastigheter.	52
7	Gjennomsnittlig massestrøm av luft inn til brannrom ved ulike hastigheter.	53
8	Vindhastighet samt tilhørende høyeste målte temperatur og sensor.	56
9	Akkumulert varmekraft uten sprinkling ved ulike vindhastigheter.	57
10	Vindhastighet samt tilhørende maksimumstemperatur og sensor.	59
11	Akkumulert varmekraft med sprinkling ved ulike vindhastigheter.	60
12	Gjennomsnittlig HRR i brannrom ved ulike hastigheter.	61
13	Gjennomsnittlig massestrøm av luft	62
14	Vindhastighet samt tilhørende maksimumstemperatur og sensor.	65
15	Akkumulert varmekraft med flere fasadeåpninger uten sprinkling.	66
16	Vindhastighet samt tilhørende maksimumstemperatur og sensor.	67
17	Akkumulert varmekraft ved flere fasadeåpninger med sprinkling	68
18	Høyeste temperatur i brannrom etter 30 sekunder.	70
19	Høyeste registrerte temperaturer for alle scenarier	71
20	Akkumulert netto varmekraft for alle scenarier	71
C.1	Antall celler i meshene i oppsett 1	C.1
C.2	Antall celler i meshene i oppsett 2	C.1
C.3	Antall celler i meshene i oppsett 3	C.1
C.4	Resultater fra meshinndelingen	C.1

Nomenklatur

Greske symboler

$\delta_{x,y,z}$	cellestørrelse	m
ΔH	forbrenningsvarme	kJ/kg
ρ	omgivende lufttetthet	kg/m^3

Romerske symboler

A_0	ventilasjonsåpningens areal	m^2
A	areal	m^2
A_T	leilighetens omhyllingsflater ekskludert ventilasjonsareal	m^2
B	leilighetens bredde	m
c_p	luftens spesifikke varmekapasitet	kJ/kgK
D^*	brannens karakteristiske diameter	m
D	brannens diameter	m
D_H	hydraulisk diameter	m
D_L	leilighetens dybde	m
g	gravitasjonskonstanten	m/s^2
H_0	ventilasjonsåpningens høyde	m
\dot{m}	brannens massetapsrate	kg/s
\dot{m}_{luft}	lufttilførsel	kg/s
P	omkrets	m
p	atmosfærisk profileksponent	

Q^*	brannens karakteristiske varmeavgivelsesrate	
Q_{inn}	leilighetens indre varmeavgivelsesrate	kW
Q_{max}	maksimal varmeavgivelsesrate	kW
r	avstand fra brannen til mottakende objekt	m
T_∞	omgivende temperatur	K
U_0	målt vindhastighet ved Z_0	m/s
U	vindhastighet	m/s
V	ventilasjonsfaktor	$m^{5/2}$
Z_0	høyde over bakken vindhastigheten U_0 er målt i	m
Z	høyde over bakken	m

1 Introduksjon

Norge har i dag om lag 180 verneverdige tette trehusmiljøer som inneholder rundt 17 000 bygninger, der blant annet Bryggen i Bergen og Røros' trehusbebyggelse er på UNESCOs liste over verdens kultur- og naturarvsteder (DSB, 2005; Log, 2016). For å bevare disse bygningene på best mulig måte er det viktig å inkludere dem i det daglige liv, noe som også vil føre til at de utsettes for de mange farer som truer til enhver tid. Brann er et eksempel på en slik fare og blir ansett som en av de største truslene mot bevaring av våre uerstattelige kulturskatter. Dette har gitt opphav til en målsetning om at disse verdiene ikke skal gå tapt i brann (St.meld. nr. 35, 2008 - 2009). Brann i trehus har lenge vært en utfordring og i nyere tid anses bybrannen i Ålesund i 1904 som den verste i Norge der 850 bygninger ble totalskadd og over 10 000 mennesker mistet hjemmene sine.

Etter brannen i Lærdal i 2014 ble nasjonen igjen minnet på hvilke skader en brann i trehusbebyggelse kan gjøre; 60 bygninger ble skadd og 446 personer var til sammen innom Lærdal sykehus hvorav 270 ble innlagt (DSB, 2014). I tillegg ble kritisk infrastruktur som telenett, strøm og vannforsyning svekket, noe som igjen førte til utfordringer i forbindelse med slokkearbeidet og kommunikasjon mellom nødetatene. Dette viser oss hvor viktig det er å være forberedt på en slik hendelse, men også at arbeidet rundt brannsikkerhet er avgjørende for å avverge situasjoner som kan bli katastrofale — eller i verste fall fatale.

Den tette trehusbebyggelsen i Trondheim blir ansett som en stor del av byens kulturarv og brannspredning i slik bebyggelse under ugunstige vindforhold er en utfordring som kan gjøre en brann svært uforutsigbar. Selv om vi nå har sett flere eksempler på hendelser der brann har gjort omfattende skade i trehusbebyggelser står fremdeles mye uløst, og en utfordring er å avgjøre hvilke risikoreducerende tiltak som kan iverksettes for å beskytte bebyggelsen på best mulig måte. Fasadesprinkler oppgis av Riksantikvaren som et godt tiltak mot utvendig spredning i tette trehusmiljø, men det foreligger likevel ikke regelverk og standarder for prosjektering av slike sprinklersystem i dag. Fullskalatester som sier noe om effekten av fasadesprinkler er heller ikke utført (Øverby & Jensen, 2010). På bakgrunn av dette kan fasadesprinkler bli valgt bort som tiltak. Rapporter fra for eksempel Risør og Vestby kommune viser at fasadesprinkler som tiltak i den tette trehusbebyggelsen ble nedprioritert på grunn av manglende dokumentasjon på blant annet ytelse og retningslinjer for prosjektering (Jarnskjold & Øverby, 2016). Det ble konkludert med at tiltaket kunne revurderes ved tilgang på dokumentasjon. Samtidig kommer det frem av undersøkelsen til DSB om brannsikring av tett trehusbebyggelse i Norge fra 2014 at fasadeslokkeanlegg enten er iverksatt tiltak eller planlagt iverksatt tiltak i 26 % av områdene

med slik bebyggelse (DSB, 2014). Da kan det stilles spørsmål ved hvorvidt disse anleggene blir installert på mest gunstig måte når det ikke foreligger regelverk for hvordan det skal utføres.

For å nå nullvisjonen om tap av våre kulturverdier som følge av brann er det viktig å føre et bevisst, konsekvent og omfattende brannsikringsarbeid både for brannvesen, kommune og beboere. For å kunne utføre dette arbeidet på best mulig måte er det viktig å ha solid kunnskap rundt brannspredning, hvordan risikoen for spredning kan reduseres og hvilke tiltak som fungerer godt. Siden 1960-tallet har det blitt forsket på brannspredning mellom bygninger, og i dag eksisterer det mye litteratur på spredning i brennbare fasader og hvilke mekanismer som ligger til grunn for slik spredning (f. eks. Law, 1960; McGuire, 1965; Oleszkiewicz, 1990). Det foreligger også mye litteratur på fenomenet rombrann (compartment fire) som tidlig ble utforsket av blant annet Thomas & Heselden (1961), Webster *et al.* (1961) og Thomas (1965). Slik forskning kan brukes til å undersøke hvordan en rombrann kan utvikle seg og føre til spredning i tett trehusbebyggelse, samtidig som det kan være interessant å undersøke hvordan utviklingen vil påvirkes av vind i ulike hastigheter. Vind er en parameter som ikke har fått nok oppmerksomhet når det kommer til brann i tett trehusbebyggelse, og heller ikke i lovverket. Den er for eksempel nevnt kun én gang i byggteknisk forskrift, i forbindelse med spredning mellom campingvogner (Eliassen, 2015).

Med bakgrunn i dette vil denne studien forsøke å vurdere om fasadesprinkler er et godt tiltak mot brannspredning i tett trehusbebyggelse under vindfulle forhold. For å få belyst dette er det vektlagt å undersøke hvilke mekanismer som fører til brannspredning, hvordan disse blir påvirket av vind og hvilke utfordringer som er knyttet til fasadesprinkler. Det er i tillegg utført brannsimuleringer som undersøker vindens påvirkning under en fullt utviklet rombrann og fasadesprinklers effekt i et slikt scenario. Med denne studien er det derfor et ønske å vie oppmerksomhet til viktigheten av vindens påvirkning på brannspredning i tett trehusbebyggelse, samt å bidra til å rydde opp i tvetydigheten som eksisterer rundt fasadesprinkleranlegg.

1.1 Målbeskrivelse og forskningsspørsmål

Målet med studien er å danne et kunnskapsgrunnlag rundt en fullt utviklet rombrann, vindens påvirkning ved ulike hastigheter, fasadesprinklers effekt mot spredning og om tilstedeværelse av vind i ulike hastigheter vil kompromittere fasadesprinklers integritet som risikoreduserende tiltak. Oppgaven vil også undersøke hvilke utfordringer som er knyttet til bruk av fasadesprinkleranlegg. Samtidig er det et mål å bevisstgjøre problematikken rundt manglende dokumentasjon på fasadesprinklers effekt og retningslinjer for prosjektering, med det formål å bidra til en positiv utvikling i brannsikring av tett trehusbebyggelse. På denne måten vil oppgaven søke å vie oppmerksomhet til utfordringene rundt brannspredning i tett trehusbebyggelse og til vindens påvirkning i et brannscenario som tidligere har fått katastrofale følger. Studien skal undersøke følgende problemstilling:

I hvilken grad er fasadesprinkleranlegg et godt tiltak mot brannspredning i tett trehusbebyggelse under vindfulle forhold?

For å kunne besvare dette på best mulig måte er problemstillingen brutt ned i følgende forskningsspørsmål:

1. Hvilke mekanismer ligger til grunn for brannspredning mellom byggverk og hvorfor er disse en utfordring for tett trehusbebyggelse under vindfulle forhold?
2. Hvilke utfordringer kan knyttes til bruk av fasadesprinkler i tett trehusbebyggelse?
3. Hvordan påvirkes en rombrann av ytre vindpåkjenning i ulike hastigheter, og på hvilken måte kan dette påvirke et fasadeslokkeanlegg?
4. Hvilken effekt har fasadesprinkler på brannspredning med og uten vind?

1.2 Omfang og avgrensninger

Studien bygger på et litteratursøk, empiri fra brannsimuleringer samt noe innhenting av informasjon fra brannrådgiver Geir Jensen i COWI. Informasjonsinnhentingene har bestått av mailkorrespondanse der Jensen svarte på spørsmål om utfordringer med fasadesprinkler som tiltak mot spredning i tett trehusbebyggelse.

Mekanismene som ligger til grunn for utvendig spredning skal undersøkes i lys av at en brann allerede er etablert og fullt utviklet. Årsaker til utvikling og hva som skjer i startfasen, branvesenets innsatstid og spredning inne i brannrommet vil derfor ikke belyses i oppgaven. Detaljer rundt evakuering av beboere og rømningstid vil heller ikke behandles. Studien omhandler tett trehusbebyggelse og vil således begrenses til trevirke som materiale. Ubrennbare fasader med klassiske materialer som stål og betong vil derfor ikke inkluderes.

Simuleringene tar utgangspunkt i en case der en brann allerede har oppstått og vokst til en fullt utviklet brann. Sprinklersystemet antas å være et automatisk slokkesystem og i analysen vil det være aktivert fra simuleringsstart. Det er gjort et utvalg av kvantitative parametere som testes i casestudien og resultatene vil derfor kun forholde seg til disse diskrete verdiene. Studien forholder seg også til FDS og PyroSim som eneste programvare og det er viktig å være bevisst på programvarens svakheter og begrensninger. Resultater og konklusjoner må ikke ses på som absolutte eller endelige, men heller som tendenser eller indikasjoner på mulige utfall. Det bør også nevnes at det eksisterer mange ulike sikkerhetstiltak mot brannspredning i tett trehusbebyggelse og at fasadesprinkler kun er et av flere. I tillegg må det belyses at simulering av vind foreløpig er en relativt enkel tilnærming i FDS, noe som kan være en begrensning i resultatene.

Forskningsspørsmål 1 og 2 vil besvares hovedsakelig med informasjon fra litteratursøket og samtaler med Jensen, mens spørsmål 3 og 4 besvares ved å benytte empirien fra simuleringene; problemstillingen er derfor todelt. Ellers er studien hovedsakelig myntet på personer med grunnleggende kunnskaper innen brannteknikk og -sikkerhet, men det er forsøkt å forklare grunnleggende begrep på en måte som gjør at studien kan være av interesse for lesere som er ukjent med tematikken.

1.3 Disposisjon

Oppgaven er til sammen delt inn i 7 hovedkapitler. Etter kapittel 1, *Introduksjon*, vil kapittel 2, *Metode*, gjennomgås. Dette kapitlet tar for seg hvilke metoder som er brukt, hvorfor de er valgt samt styrker og svakheter rundt metodene. Kapittel 3, *Teori*, legger det teoretiske grunnlaget som er nødvendig for å forstå resten av oppgaven. Videre vil kapittel 4, *Simuleringsmodell*, ta for seg simuleringsoppsettet i en kvalitativ og en kvantitativ del, og er beskrevet så detaljert at studien er etterprøvable. Dette kapitlet vil derfor være den delen som viser hvordan metoden er brukt. Kapittel 5, *Resultater*, presenterer funn fra simuleringene hovedsakelig i form av figurer, tabeller og bilder fra Smokeview. En diskusjon av resultatene fra simuleringene samt funn i litteratur og fra informasjonsinnhenting vil drøftes i kapittel 6, *Diskusjon*. En konkluderende del som nøster opp studiens spørsmål gjennomgås til slutt i kapittel 7, *Konklusjon*. Kapittel 8 vil presentere forslag til videre arbeid.

2 Metode

For at innholdet i et prosjekt skal være troverdig er det viktig å dokumentere hvilke metoder som er valgt for forskningen, hvordan metodene er brukt og hvorfor de foretrekkes. Dette kapitlet vil derfor redegjøre for hvilke metoder som brukes, hvordan de brukes og hvorfor de er valgt, samtidig som at metodenes styrker og svakheter vil redegjøres for og drøftes.

Metodene som benyttes i denne oppgaven er litteratursøk og brannsimulering, og er valgt med utgangspunkt i studiens mål og formål. Metodene vil redegjøres for i det følgende.

2.1 Litteraturstudie og bakgrunnsinformasjon

Det har vært nødvendig å danne en oversikt over eksisterende kunnskap rundt fasadesprinkler basert på tilgjengelig informasjon på internett. Søkemotorer som Google Scholar og Oria er brukt i denne sammenheng, samt tradisjonelle søk i Google. Søket har vist at det generelt er vanskelig å finne god og utfyllende informasjon om denne typen sprinkleranlegg, noe som ikke er overraskende med tanke på manglende regulering og dokumentasjon. Det har også vist seg at kreative søkeord har generert flere treff, og derfor vært en direkte årsak til funn av informasjon. Tabell 1 viser en oversikt over ulike ord som er brukt i søket for å finne informasjon om fasadesprinkler på norsk og engelsk.

Litteratursøket har gitt noe informasjon eksplisitt myntet på fasadesprinkler, men det har blitt nødvendig å knytte en del av informasjonen fra andre sprinklersystem opp mot fasadesprinkleranlegg. I tillegg til dette har Geir Jensen, brannrådgiver i COWI, bidratt med informasjon om utfordringer rundt slike anlegg. Denne kilden til kunnskap har vært svært verdifull da det skulle vise seg å være vanskelig å få tak i god og utfyllende informasjon om slike system på internett. Det er også forsøkt å opprette kontakt med andre bedrifter i næringslivet samt offentlige myndigheter uten hell.

På grunn av manglende datagrunnlag rundt fasadesprinkler er informasjon fra andre sprinklersystemer undersøkt og forsøkt knyttet opp mot fasadesprinkleranlegg. Utfordringene som er identifisert synes å være relevante for slike sprinkleranlegg men det er vanskelig å si om de er avgjørende for om fasadesprinkler kan fungere effektivt. Det har derfor vært noe utfordrende å vurdere om fasadesprinkler er et godt risikoreducerende tiltak.

Tabell 1: Ulike ord på norsk og engelsk som er brukt i litteratursøket for å finne informasjon om fasadesprinkleranlegg.

Norsk	Engelsk
Fasadesprinkler	Façade sprinkler
Utvendig sprinkleranlegg	Exterior sprinkler system
Utvendig branndeteksjon	Exterior fire detection
Sprinkleranlegg raft	Eave sprinkler system
Fasadeslokkeanlegg	—

Ellers er litteratursøket brukt til å danne et kunnskapsgrunnlag rundt spredningsmekanismer mellom bygninger og tilstanden rundt en fullt utviklet rombrann påvirket av vind. Dette er hovedsakelig brukt til å forstå hvordan brann sprer seg samt hvordan vind påvirker spredningen, som danner grunnlag for videre diskusjon. Samtidig er litteratursøket brukt til å kvantifisere parametere som brukes i simuleringsanalysen. Eksempler på slike parametere er varmeavgivelsesrate, materialer og sprinklersystemets vannmengde.

Søkemotorer som er brukt dekker anerkjente databaser som Springer Link, Research Gate og ScienceDirect. Samtidig er arkivet til The International Association for Fire Safety Science (IAFSS) gjennomgått for å finne eldre publiseringer. Litteraturen som presenterer grunnleggende teori er stort sett hentet fra vitenskapelige artikler, men noen steder er lærebøker benyttet; Drysdales *An Introduction to Fire Dynamics* fra 2011 har for eksempel vært en verdifull ressurs. Samtidig er litteratur som omhandler tett trehusbebyggelse stort sett hentet fra norske kilder. I tillegg har artikler og rapporter fra RISE Fire Research og Direktoratet for Samfunnssikkerhet og Beredskap (DSB) blitt flittig brukt. Faget TBA4175 *Brannteknikk* og TBA4177 *Brannsikkerhet i byggverk* har gitt teoretisk grunnlag i forkant av prosjektet, noe som har vært nyttig for å forstå ulike teorier og mekanismer. Litteraturen som er benyttet i prosjektet ble valgt ut ved å vurdere om forskningen er tilgjengelig fra en anerkjent database og om den fortsatt er relevant i dag. Dette er spesielt viktig å tenke over angående litteratur tilknyttet FDS og PyroSim da dette er programvare som oppdateres hyppig. Å bruke informasjon fra nyeste tilgjengelige versjon av bruker- og valideringsmanualer ble derfor vektlagt. I tillegg ble forfatter/utgiver vurdert i utvelgelsen. Forøvrig viser tabell 2 en oversikt over publiseringer som har vært viktige for oppgaven og i hvilken sammenheng publikasjonene hovedsakelig er benyttet. Det bør også nevnes at i passende tilfeller har empiri blitt hentet fra enklere websider som nettaviser, og det har vært nyttig å studere tidligere masteroppgaver innenfor brannssikkerhet. I tillegg har veiledere bidratt med gode kilder og relevant litteratur.

For å kvalitetssikre stoffet er det i litteratursøket lagt vekt på at uavhengige kilder formidler lik forskning og primærkilder er sporet opp så langt det har vært mulig. Mye av den grunnleggende brannforskningen ble derimot utført på 1970 og 1980-tallet og har av den grunn vært vanskelig å spore. Her har Arkitektur- og Byggbiblioteket på NTNU vært behjelpelig med å bestille artikler fra universitet i andre land som har forskningen tilgjengelig.

Tabell 2: Publiseringer som har vært viktige for studien.

Forfatter/Utgiver (År)	Bruksområde
DSB (2005)	Oversikt over situasjonen for tett trehusbebyggelse i Norge
McGuire (1965)	Spredningsmekanismer mellom byggverk
Steen-Hansen <i>et al.</i> (2014)	Spredning, vindpåvirkning og empiri fra brannen i Lærdal
Law & O'Brien (1981)	Ekstern flammepåvirkning
Thelin & Wighus (2016)	Vann til brannslukking og sprinkleranlegg
SINTEF Byggforsk (2004 - 2016)	Spredningsmekanismer, sprinklersystem, eldre byggestil
Drysdale (2011)	Generell litteratur på branndynamikk
Thomas (1983)	Brannforhold etter overtenning
Karlsson & Quintiere (2000)	Teori på fenomenet rombrann (compartment fire)
Babrauskas (1980)	Uttrykk for å beregne HRR i en rombrann
Law (1978)	Uttrykk for en branns massetapsrate ved eksterne flammer
NIST (2017)	FDS brukermanual
Thunderhead (2018)	PyroSim brukermanual
Nystedt & Frantzich (2011)	Metodisk fremgangsmåte for brannteknisk analyse

2.2 Brannsimulering

Fire Dynamics Simulator (FDS) 6 og PyroSim 2018.1 er valgt programvare for studien. FDS er et brannsimuleringsprogram utviklet av National Institute of Standards and Technology (NIST), og baserer seg på å skrive direkte kommandoer i en tekstfil. PyroSim er derfor utviklet som et grafisk brukergrensesnitt for å gjøre FDS mer brukervennlig. PyroSim er utviklet av Thunderhead Engineering og på deres nettsider ligger grundige brukermanualer og eksempler på scenarier tilgjengelig slik at en kan bli kjent med programmet på egenhånd. Det har vært nyttig å studere disse da all kunnskap om programvaren har blitt tilegnet gjennom prosjektperioden.

Selv om brannsimulering og FDS er foretrukket i denne studien er det derimot ikke sagt at den mest avanserte metoden alltid er den beste. Noen ganger kan enkle håndberegninger eller sonemodeller være like gode eller bedre metoder. Brannsimulering med FDS og PyroSim ble likevel vurdert som egnet metode i denne studien da komplekse parametere som ekstern flammepåvirkning, vindeksponering og sprinkleranlegg tas med i beregningene.

Det teoretiske grunnlaget for simuleringene er delt inn i en kvalitativ og en kvantitativ del, og for å være sikker på at delene dekker alle nødvendige aspekter har det blitt vektlagt å følge en systematisk prosess. I 2011 publiserte Fredrik Nystedt og Håkan Frantzich en fremgangsmetode for brannteknisk analyse i kjernekraftverk (Nystedt & Frantzich, 2011). Denne er i kombinasjon med ISO 16733-1 *Fire safety engineering - selection of design fire scenarios and design fires* i denne studien benyttet som fremgangsmetodikk for brannsimuleringene. Selv om publiseringen til Nystedt & Frantzich hovedsakelig er myntet på kjernekraftverk kan de overordnede stegene i deres systematiske fremgangsmåte benyttes i denne sammenhengen. Metoden som brukes i studien er i rapporten til Nystedt & Frantzich begrenset til kapittel 2, *Arbetsgång för brandtekniska analyser*.

Metoden til Nystedt & Frantzich er valgt fordi en slik fremgangsmåte sørger for at brukeren ikke hopper over viktige steg som må belyses i brannscenariet, og på denne måten vil resultatene fra simuleringene danne et godt grunnlag for å kunne svare på studiens problemstilling. Forøvrig er simuleringene kjørt på datamaskin tilhørende Institutt for bygg- og miljøteknikk ved NTNU med tilgang via eksternt skrivebord. Dette har vært avgjørende i forbindelse med oppgavens tidsbegrensning da simuleringene er tidkrevende å utføre og krever mye prosessorkraft.

Kvalitative valg

Den kvalitative delen kan ses på som et rammeverk for en tilnærming til den mer detaljerte kvantitative delen. Den kvalitative delen presenterer antakelser og overordnede valg som ligger til grunn uten å kvantifisere disse. Eksempler på slike valg kan være hvor i rommet brannen starter, casebyggets beliggenhet eller hvilket material som skal brenne. En del av denne fremgangsmåten bygger også på anbefalinger fra ISO 16733-1 for hva som bør tas hensyn til ved utforming av en designbrann. Ved å innlemme standarden i arbeidet kvalitetssikres innholdet og fremgangsmåten.

Det bør i tillegg nevnes at denne delen kunne vært utført som en fullverdig kvalitativ analyse for å avgjøre hvilke valg som er optimale for studiens målsetning. Simuleringene legger vekt på at brannen utvikler seg på et sted som vil gi god tilgang til spredning gjennom en fasadeåpning, men aspekter som brannens plassering er ikke avgjort med forankring i en kvalitativ analyse der det er undersøkt om dette er det beste stedet for utvikling. Valget om å ikke utføre en kvalitativ analyse er tatt med bakgrunn i oppgavens tidsbegrensning. Likevel er det forsøkt å ta valg basert på kunnskap og logikk som tilsier at simuleringene vil utfordre det oppgaven ønsker å undersøke på best mulig måte.

Kvantitative valg

Den kvantitative delen presenterer hvordan modellen er bygd opp og begrunner modellens inputverdier. Dette kan være for eksempel hvordan det er kommet frem til valgt cellestørrelse i beregningsdomenet, hvordan brannens varmeavgivelsesrate er tallfestet eller brannrommets dimensjoner. Kapitlet benytter hovedsakelig litteratur fra kapittel 3, *Teori*, men noe data er også hentet fra for eksempel yr.no og Meteorologisk institutts vær- og klimadata. Den kvantitative delen vil også presentere hvilke utdata som spesifiseres i modellen, altså hvilke verdier/parametere som det er interessant å analysere. Dette kan være for eksempel veggtemperatur eller varmeffluks.

2.3 Styrker og svakheter

Hvilke metoder en velger å bruke henger sammen med de ulike metodenes styrker og svakheter, og disse vil bli belyst i det følgende.

Litteraturstudie

En litteraturstudie har både styrker og svakheter, og noen av disse er presentert i tabell 3. Det eksisterer mye forskning i ulike databaser, noe som kan gi et godt teoretisk grunnlag. Dette betyr også at en sparer mye tid på ikke å utføre egne forsøk. Samtidig er dette forskning som sannsynligvis er utført med ulik problemstilling, noe som betyr at den søker å finne svar på noe annet. Det er derfor essensielt å få oversikt over hva forskningen faktisk representerer. Allerede eksisterende litteratur er også sekundærkilder og ikke førstehåndsmateriale (Jacobsen, 2015). Dette innebærer at det er vanskelig for brukeren av stoffet å direkte vurdere forskningens pålitelighet. Likevel kan lik konklusjon av forskning utført av ulike forskere være med å kvalitetssikre stoffet. Ved et litteratursøk er det også vanskelig å bruke egen vinkling på stoffet og en er ofte avhengig av å stole på forskerens vinkling.

Tabell 3: Fordeler og ulemper med et litteratursøk.

Styrker	Svakheter
Teoretisk grunnlag	Allerede eksisterende litteratur
Bredt utvalg	Fravær av egen vinkling
Trenger ikke utføre egne forsøk	—

FDS og PyroSim

Å være bevisst på PyroSim og FDS' styrker og svakheter er viktig for å avgjøre hvordan simuleringene skal utføres og resultatene tolkes på best mulig måte. Følgende styrker utnyttes ved bruk av FDS og PyroSim, og ligger til grunn for valg av metode:

- Brannsimuleringer på datamaskin er kostnadsbesparende sammenlignet med å utføre reelle eksperimenter, og det er enklere å teste flere ulike design
- Eksperimenter ved bruk av simulering kan undersøke scenario som ville vært vanskelig å utføre i virkeligheten, for eksempel situasjoner som kan bli vanskelig å kontrollere eller der mennesker ikke kan oppholde seg
- FDS er anerkjent i brannmiljøet og blir derfor oppdatert jevnlig
- Mange ulike utdataparametere kan spesifiseres
- PyroSim er utviklet som et grafisk brukergrensesnitt til FDS og er intuitivt og relativt enkelt å bruke
- FDS er kompatibelt med Smokeview som visualiserer resultatene
- Grundige bruker-, validerings- og verifiseringsmanualer er utarbeidet og tilgjengelig på NIST sine nettsider

Samtidig er det viktig å være klar over svakheter og begrensninger ved bruk av numerisk simulering:

- Metoden kan være tidkrevende — tilgang på høy prosessorkraft er derfor en forutsetning for å holde tidsbruk nede
- En simulering vil alltid være en betydelig forenkling av virkeligheten, noe det er viktig å være bevisst på ved bruk av en slik metode
- En må være klar over at det finnes utallige scenarier og at det som velges bør være knyttet til problemstillingen og utfordre systemet som står i fokus
- Brukeren må ha god forståelse for fysikalske prinsipper som ligger til grunn for å bedømme hva som er et realistisk resultat; en kan fort se seg blind på flott og overbevisende visualisering ved mangelfullt kunnskapsgrunnlag
- Alle parametere det skal samles informasjon om må presiseres som utdata, noe som betyr at en på forhånd må vite hvilke verdier det er interessante å studere

3 Teori

Som et grunnlag for de senere delene av oppgaven er det essensielt med en grundig teorigjennomgang. Teorien som redegjøres for er forsøkt beskrevet så omfattende og nøyaktig som mulig uten at leseren må gå i unødvendig detalj, samtidig som at det skal være lesbart og enkelt å forstå. All teori som er redegjort for vil benyttes videre i studien i større eller mindre grad. Som en overordnet innledning til teorikapitlet vil eldre trehusbebyggelse som kulturmiljø og byggeskikk presenteres først.

3.1 Eldre trehusbebyggelse som kulturmiljø

Riksantikvaren (n.d.) definerer kulturmiljø som et område der kulturminner inngår som en del av en større helhet eller sammenheng for eksempel i en by eller et tettsted. Eldre trehusbebyggelse er derfor et typisk eksempel på et slikt kulturmiljø. Eldre konstruksjoner i tre er et særnorsk fenomen og en viktig del av Norges historie og identitet (SINTEF Byggforsk, 2004) — det er derfor av stor interesse å forvalte slike bygninger på best mulig måte.

DSB har publisert flere rapporter i samarbeid med Riksantikvaren med fokus på brannsikring av tette trehusbebyggelser, og karakteriserer slike områder etter følgende kriterier (DSB, 2005):

- Det er gjennomgående trehus i området
- Bebyggelsen er ansett som verneverdig
- Bebyggelsen skal hovedsakelig være bygget før 1900-tallet, men kan også omfatte nyere trebebyggelse med spesielle kulturhistoriske verdier
- Et område består normalt av minst 20 bygninger
- Avstanden mellom bygningene er overveiende mindre enn 8 meter

Som nevnt innledningsvis eksisterer det om lag 180 verneverdige tette trehusmiljøer i Norge i dag som det er et ønske om å ivareta på best mulig måte. Figur 1 illustrerer en del av bebyggelsen på Øvre Møllenberg i Trondheim, og det er tydelig hvor sårbare disse bygningene er for brann og brannspredning.

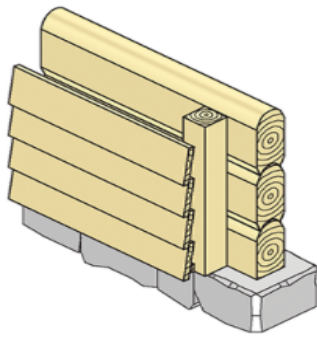


Figur 1: Tett trehusbebyggelse på Øvre Møllenberg i Trondheim (eget bilde).

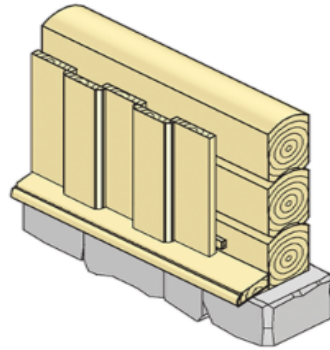
En god måte å ivareta verneverdige bygninger på er å bo i dem og inkludere dem i det daglige liv — baksiden med dette er derimot at det innebærer en større risiko for skade fra brann. Eldre trehusbebyggelser er særlig utsatt for slik skade på grunn av deres byggestil som gir mye tilgang på oksygen og brennbart materiale.

3.1.1 Byggestil

Eldre trehus består ofte av tømmer, bindingsverk eller reisverk i tre som ikke er bygd etter dagens forskrifter. Felles for slike konstruksjoner er at det er nødvendig med luftet kledning for å unngå råte, noe som gir skjulte hulrom bak kledningen (SINTEF Byggforsk, 2004). Bak slik kledning kan det også ofte forekomme materialer som lett antenner, som for eksempel støv og flis. Ved konstruksjoner i tre kan det også være fare for at veggen(e) forskyves, noe som kan gjøre den glissen. Disse hulrommene gjør konstruksjonen sårbar for brann og brannspredning, og det kan bli ekstra utfordrende å komme til med slukkeutstyr. Eksempel på slike hulrom i fasaden er illustrert i figur 2. I tillegg til hulrom i fasaden er eldre trehus ofte konstruert med luftespalter for å oppnå tilstrekkelig lufting på loftet. I dag er det mulig å isolere taket for å unngå slik lufting, men eldre trehusbebyggelse vil ofte bestå av kaldt, luftet loft (SINTEF Byggforsk, 2005). Slik lufting oppnås ofte ved luftespalter i mønet/gavl eller i raft, og kan være en stor trussel for brannspredning.



(a) Liggende kledning



(b) Stående kledning

Figur 2: Liggende og stående kledning montert på utlekting (SINTEF Byggforsk, 2016).

3.2 Brannspredning mellom byggverk

For å forstå hvordan brannspredning mellom bygninger kan forhindres eller begrenses, er det nødvendig å vite hvilke mekanismer som ligger til grunn for slik spredning. Samtidig er det viktig å vite hvordan tilstedeværelse av vind kan øke utfordringene rundt spredning for å kunne jobbe konstruktivt med problematikken. I det følgende vil derfor spredningsmekanismer og utfordringer relatert til vindens påvirkning presenteres.

3.2.1 Spredningsmekanismer

Informasjon om de ulike spredningsmekanismene er hentet fra McGuire (1965) og Steen-Hansen *et al.* (2014) om ikke annet er presisert.

Flyvebrann

Flyvebrann defineres som varme partikler som fraktes i luft og antenner brennbare materialer (KBT.no), og en slik spredningsmekanisme kan føre til brannutvikling flere kilometer fra arnestedet (Ganteaume *et al.*, 2011). De varme partiklene forflyttes hovedsakelig ved hjelp av termiske krefter fra brannen, vind, tyngdekraft eller annen strømming av røyk og gasser. Å forhindre brannspredning mellom byggverk hovedsakelig ved å kontrollere avstanden mellom dem er derfor ikke alltid tilstrekkelig og andre tiltak må vurderes. Utvendig overflatebehandling av fasade kan for eksempel bremse antennelse ved flyvebrann betraktelig. Samtidig kan det være hensiktsmessig å tette hull og sprekker i fasaden, samt å fjerne rusk og rask fra takutstikk og andre steder hvor glør kan sette seg fast.

Flammespredning

En fullt utviklet brann kan nå en tilstand der flammer står ut av fasadeåpningene som følge av at varme, uforbrente gasser siver ut av brannrommet og tar fyr ved kontakt med oksygenet i luften. Slik flammepåvirkning kan føre til antennelse ved direkte kontakt mellom flammen og fasaden, og henger sammen med blant annet avstanden mellom byggene. Law & O'Brien (1981) viser til flere uttrykk som kan benyttes til å beregne den horisontale avstanden fra flammens sentrum til fasaden, der denne avstanden henger sammen med blant annet fasadeåpningens dimensjoner og om det er en vegg tilstede over fasadeåpningen. Disse uttrykkene viser at den horisontale avstanden sjeldent vil bli svært stor, og at en smal fasadeåpning vil gi en smal flamme som rekker lenger enn en bred fasadeåpning med bred flamme. Steen-Hansen *et al.* (2014) beskriver også at en brann kan spre seg via flammespredning dersom avstanden mellom bygningene er mindre enn ca. 2 meter. Samtidig påpekes det i rapporten deres at dersom et hus står i full fyr kan brannen spre seg via flammespredning ved avstander som overstiger 2 meter. Uttrykkene til Law & O'Brien tar heller ikke hensyn til vind, noe som kan endre hele hendelsesbildet.

Konveksjon

For at antennelse skal skje via konveksjon må branngassenes temperatur være flere hundre grader celsius. Slike temperaturer kan eksistere nært flammene og dermed kan konveksjon være en truende spredningsmekanisme ved korte avstander. Videre antennelse via konveksjon er derimot ikke den største trusselen som spredningsmekanisme, men selv om mekanismen ikke vil føre til direkte antennelse kan likevel trevirket blir varmet opp og få lavere fuktinnhold, noe som kan føre til raskere antennelse.

Varmestråling

Antennelse eller spredning via varmestråling fra en brennende bygning kan oppstå ved avstander vesentlig større enn der spredning forårsakes av flammer og konveksjon, og varmestrålingsintensitet vil derfor være avgjørende for hvilke avstander mellom bygg som anses forsvarlig. I mange land er nødvendig avstand mellom hus ofte regulert etter strålingsintensitet og ignorerer vanligvis andre spredningsmekanismers påvirkning ved vurdering av avstander mellom bygg.

Steen-Hansen *et al.* (2014) hevder at følgende parametere er viktige ved bestemmelse av avstander mellom bygninger:

- Temperaturen i brannrommet
- Brannens effektive varmestråling
- Avstand og helningsvinkel på flamme og bygningsdel
- Brannens emissivitet

3.2.2 Vindens utfordringer

Forskning på vindens påvirkning i et brannscenario viser at den kan ha både økende og bremsende effekt på en branns utvikling. Steen-Hansen *et al.* (2014) hevder at følgende forhold berøres ved vindpåvirkning under en storbrann:

- Økt oksygentilførsel
- Spredningsretning
- Fuktinnhold
- Forvarming av brensel
- Økt transport av gnister og glør

Oksygentilførsel

Vindens tilførsel av oksygen i en brann kan ha motstridende effekt; forbrenningen kan eskalere eller avta ved at branngassene fortynnes, som vil henholdsvis øke og begrense brannens intensitet (Hitono *et al.*, 2009). Dette henger sammen med forholdet mellom brensel og luft, men også brannens forbrenningsegenskaper og rommets dimensjoner ved en rombrann. Samtidig kan varmeutviklingen i brannplumen eskaleres som følge av økt turbulens og miksing med oksygen. Turbulens har stor innvirkning på flammelengde, varmefluks og flammespredningsrate, og kan påvirke trykket inne i et brannrom som følge av at brannens intensitet øker (Drysdale, 2011).

Flammenes rekkevidde og retning

I et scenario uten vind vil brannen følge en aksesymmetrisk flammebane som stiger opp i atmosfæren ved hjelp av brannens oppdrift, og vil variere noe med fasadeåpningens og veggens dimensjoner (Law & O'Brien, 1981). Ved vindpåvirkning vil derimot flammene tiltes, noe som kan føre til uønsket spredning i ulike retninger samt at flammen blir tykkere. Margaret Law forsket på dette og basert på gjennomsnittlige verdier fant hun at eksterne flammer ut vinduene ved en rombrann bøyes med en vinkel på opp til 45° (se figur 3), men stort sett ikke over dette (Law, 1978). Law antok også jevn vindhastighet, altså at vinden ikke kommer i kast.

Antennelse og fuktinnhold

Trevirkets antennelsestemperatur er avhengig av fuktinnholdet i materialet. Ved tørre, vindfulle perioder i forkant av en brann kan fuktinnholdet være lavere enn normalt, noe som igjen kan føre til raskere antennelse. Samtidig kan en bieffekt av vinden være at den skyver varm luft fra brannen videre slik at materialet varmes opp på forhånd.



Figur 3: Flammeforlengelse ved vindpåvirkning sett ovenfra (Law, 1978).

Flyvebrann

Risikoen for spredning via flyvebrann kan bli større ved vindpåvirkning. Vinden vil være en direkte trussel fordi den kan frakte glør over lengre avstander. Samtidig kan en vind gjøre flammene fra en brann større og lengre som følge av ekstra oksygentilførsel, der en ringvirkning kan være at brannens termiske krefter frakter glør enda lengre (Ganteaume *et al.*, 2011).

3.3 Grunnleggende brannteori

For å forstå hvordan en brann kan utvikle og spre seg er det essensielt med en gjennomgang av grunnleggende brannteori. Dette delkapittelet vil derfor ta for seg basiskunnskap rundt varmeoverføring og de ulike fasene i en rombrann. Samtidig vil det presenteres matematiske uttrykk som vil benyttes i kapittel 4, *Simuleringsmodell*, til å blant annet beregne varmeavgivelsesraten i en brann.

3.3.1 Varmeoverføring

For at en brann skal oppstå og være bærekraftig må tre elementer være til stede (se figur 4): det må være varmt nok til at materialet kan brenne, det må være tilstrekkelig tilgang på oksygen (eller et annet oksidasjonsmiddel) og materialet må være brennbart.



Figur 4: Branntrekanten (Teknisk industrivern).

Tre ulike varmeoverføringsmekanismer kan føre til brann og brannspredning:

- Konduksjon
- Konveksjon
- Varmestråling

Disse mekanismene vil beskrives i det følgende hvor informasjonen er hentet fra Drysdale (2011).

Konduksjon

Ved konduksjon overføres varme via molekylær kollisjon der et område med høy temperatur overfører varme til et område med lavere temperatur. Dette fører til mer bevegelse blant partiklene med lavere temperatur, som igjen vil føre til en temperaturstigning. Konduksjon er den vanligste formen for varmeoverføring og skjer mellom faste stoffer eller internt i et stoff. Varmespredning internt i stoffer kan brukes til å for eksempel velge isolasjon i hus for å forsinke/hindre spredning ved brann.

Konveksjon

Konveksjon er strømmer som transporterer energi i gasser og væsker, og man skiller mellom konvektiv varmetransport i fluidstrømmer og mellom en fluidstrøm og et fast materiale. Varmetransport mellom en fluidstrøm og et fast materiale kan være for eksempel luft som overfører varme til en vegg.

Varm luft vil ha lavere tetthet enn kald luft og som en konsekvens av dette vil varm luft fra en brann stige oppover og fortrenge tilsvarende volum av kald luft som vil synke, for så å bli varmet opp av brannen. Utendørs vil dette føre til at varmen brer seg i luften, men i et rom vil den varme luften hindres av rommets grenser og legge seg oppunder taket. Dette kan føre til hurtig spredning inne i et hus. Konveksjon dominerer som spredningsmekanisme ved temperaturer lavere enn ca. 150 - 200 °C.

Varmestråling

Varmestråling er varme som overføres via elektromagnetisk stråling. Energien sendes ut med lysets hastighet i alle retninger frem til strålene treffer et objekt. Legemet som emitterer stråling er fargeløst opp til ca. 550 °C, og ved denne temperaturen oppstår en svak rød, synlig glød. Ved temperaturer over ca. 400 °C er stråling den dominerende varmespredningsmekanismen.

3.3.2 Rombrann

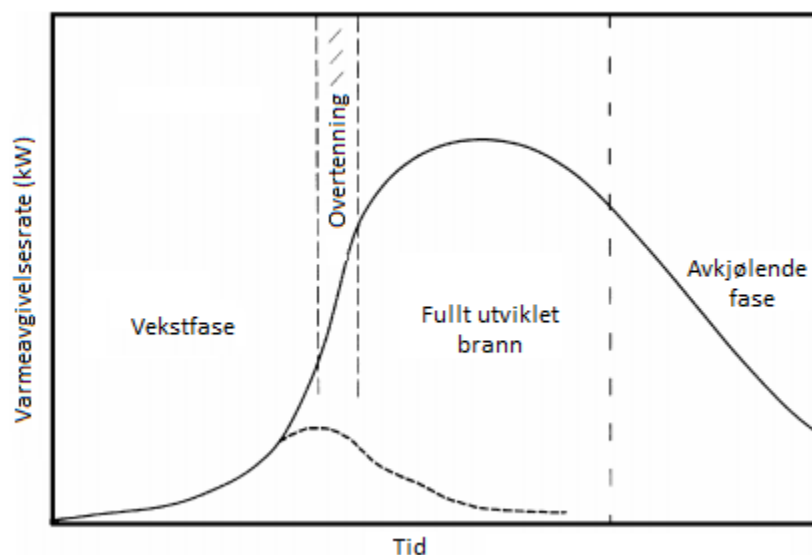
Fenomenet rombrann har lenge vært forsket på og det er essensielt å forstå mekanismene bak en rombrann for å prøve å forutsi brannutviklingen og for å bygge opp en realistisk brannsimuleringsmodell. En rombrann karakteriseres av flere ulike faser som alle avhenger av brannens varmeavgivelsesrate.

Varmeavgivelsesrate

En brann bruker en viss tid på å utvikle seg og dens størrelse representeres av korresponderende varmeavgivelsesrate (HRR). HRR sier noe om mengden varme en brann produserer per tidsenhet, og karakteriseres som den viktigste parameteren ved brann i bygninger (Babrauskas & Peacock, 1992). Dette knytter blant annet brannens utvikling, spredning og tid til evakuering av beboere til denne parameteren. Ved hjelp av varmeavgivelsesraten kan en rombrann deles inn i fire faser:

- Vekstfase
- Overtenning
- Fullt utviklet brann
- Avkjølede fase

Overtenning og fullt utviklet brann markerer kritiske tilstander og vil redegjøres for i det følgende. Studien tar ikke for seg hendelser under vekstfasen og den avkjølede fasen, og disse vil derfor ikke redegjøres for.



Figur 5: De ulike fasene i en brann (Oversatt fra Drysdale, 2011).

Overtenning

En rombrann kan grovt sett deles inn i to faser: før overtenning og etter overtenning/fullt utviklet brann (Thomas, 1983). Overtenning er et vendepunkt i brannen der det oppstår en faseovergang fra brenselskontrollert til ventilasjonskontrollert brann. Dette betyr at brannen er avhengig av oksygen heller enn brennbare materialer for å fortsette å være bærekraftig. Hvor mye tilgang på oksygen brannen vil få etter overtenning er avhengig av rommets geometri og ventilasjonsforhold. I et rom med naturlig ventilasjon vil ventilasjonsåpningene (f. eks. vinduer og dører) avgjøre brannens oksygentilførsel (Karlsson & Quintiere, 2000). Overtenning kan beskrives med kvalitative og kvantitative forhold (Drysdale, 2011).

Kvalitative forhold:

- En overgang til der alle brennbare overflater er involvert
- Overgang fra brenselskontrollert til ventilasjonskontrollert brann
- Uforbrente gasser oppunder taket tar fyr
- Flammer ut vinduer/åpninger

Kvantitative forhold:

- Røyksjiktet oppunder taket når en temperatur på 600 °C.
- Varmestråling til gulvet fra røyksjiktet er over 20 kW/m².
- Forbrenningshastigheten til materialene er over en bestemt verdi — denne verdien er imidlertid materialavhengig.

Fullt utviklet brann

Etter overtenning vil alle overflater i rommet brenne og HRR når sin maksimale verdi. Temperaturen i rommet ligger vanligvis mellom 900 - 1100 °C men høyere temperaturer kan nås under visse forhold (Drysdale, 2011). Temperaturen henger sammen med blant annet lufttilførsel, brannens forbrenningshastighet og varmetap fra konstruksjonen (Steen-Hansen *et al.*, 2014). Etter hvert kan temperaturene i konstruksjonen bli så høye at den kanskje ikke klarer å bære lastene den er designet til og full kollaps kan oppstå.

Ventilasjonsåpningenes dimensjoner i et brannrom kan brukes til å beregne ventilasjonsfaktoren (likning 1) som videre kan brukes til å beregne en branns varmeavgivelsesrate. Likningen er gjengitt fra Drysdale og er utledet med følgende antakelser og forutsetninger som det er viktig å ta høyde for ved bruk:

- Rommets gasser har uniforme egenskaper i hele volumet
- Det eksisterer ikke netto strømmer som er forårsaket av oppdrift i rommet
- Ventilasjonsåpningene deles av et nøytralplan der varme gasser strømmer ut over planet og kald luft strømmer inn under (se figur 6)
- Strømmen av gasser inn og ut av rommet er drevet av oppdriftskrefter
- Gasser som strømmer ut og inn samhandler ikke

$$V = A_0 \sqrt{H_0} \quad [m^{5/2}] \quad (1)$$

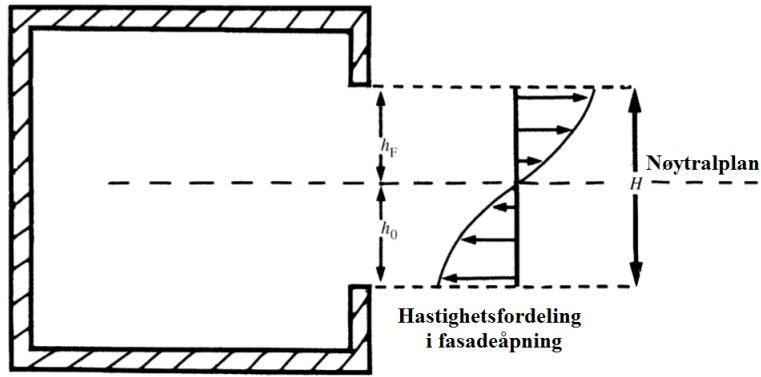
der

- A_0 = ventilasjonsåpningens areal [m^2]
- H_0 = ventilasjonsåpningens høyde [m]

Samtidig er det viktig å nevne at disse uttrykkene ikke bør brukes ved unormale ventilasjonsforhold, som for eksempel veldig små åpninger ved ulike høyder på veggen eller ventilasjonsåpninger i taket.

Som figur 6 viser strømmer det kald luft inn under horisontalplanet til åpningen og varm luft og uforbrente gasser strømmer ut over. Dette skjer som en konsekvens av trykkdifferanse på inn- og utsiden av brannrommet. Innstrømmingen av luft (\dot{m}_{luft}) er funnet å være proporsjonal med ventilasjonsfaktoren, og uttrykkes i likning 2:

$$\dot{m}_{luft} = C \times A_0 \sqrt{H_0} \quad [kg/s] \quad (2)$$



Figur 6: Nøytralplan i ventilasjonsåpning (Oversatt fra Drysdale, 2011).

der C er en konstant som bestemmes av en koeffisient som er avhengig av ventilasjonsåpningen og gravitasjonskonstanten (Zhao *et al.*, 2015). Denne konstanten kan variere mellom 0,4 - 0,61 $kg/s \times m^{5/2}$, men 0,5 er etablert verdi i litteraturen. Videre kan maksimal verdi for varmeavgivelsesraten inne i brannrommet bestemmes ved å anta at all innstrømmende luft forbrukes i forbrenningen. Forbrenningsvarmen til luft er omtrent 3000 kJ/kg (Drysdale, 2011), og man ender da opp med likning 3:

$$Q_{inn} = 1500A_0\sqrt{H_0} [kW] \quad (3)$$

der Q_{inn} representerer varmeavgivelsesraten inne i selve brannrommet. For å oppnå ventilasjonskontrollerte forhold må derfor varmeavgivelsesraten i scenariet være større enn Q_{inn} .

Ekstern flammepåvirkning

Under en fullt utviklet rombrann med ekstern flammepåvirkning er en av de viktigste parametrene massetapsraten — denne parameteren påvirker blant annet flammestørrelse og en branns varighet (Law, 1978). Eksperimenter har vist at massetapsraten under en fullt utviklet brann vil være tilnærmet konstant (Heselden, 1968), og den er sterkt avhengig av brannrommets ventilasjonsforhold. Babrauskas (1980) viser til følgende uttrykk som kan brukes for å beregne varmeavgivelsesrate ved å inkludere massetapsraten i uttrykket:

$$Q_{max} = \dot{m}\Delta H_c [kW] \quad (4)$$

der

- \dot{m} = brannens massetapsrate [kg/s]
- ΔH_c = materialets effektive forbrenningsvarme [kJ/kg]

ΔH_c refereres til som materialets *effektive* forbrenningsvarme fordi det inkluderer effekten av ufullstendig forbrenning. I en ventilasjonskontrollert brann er den effektive forbrenningsvarmen ca. 18 800 kJ/kg (Drysdale, 2011).

Drysdale omtaler også likning 4 og hevder at den vil være anvendelig som maksimal varmeavgivelsesrate i en fullt utviklet brann da Q_{max} antas å være konstant frem til all brensel er forbrent og brannen går over til avkjølelse fase. Uttrykket ignorerer også forkullingslaget som blir dannet ved pyrolyse, noe som vil føre til konservative tall.

Thomas og Heselden utledet i 1972 uttrykket i likning 5 (Thomas & Heselden, 1972), som kan benyttes til å beregne en branns massetapsrate under en fullt utviklet rombrann med ekstern flammepåvirkning. Uttrykket er tidligere brukt av den anerkjente brannforskeren Margaret Law (Gollner, 2017) i det grunnleggende arbeidet rundt beskyttelse av stålkonstruksjoner ved ekstern branneksponeering (Law, 1978). Laws metodikk anbefales i dag i Eurokode 1 og 3 (tillegg B) med noen justeringer. Uttrykket er gjengitt fra Law (1978):

$$\dot{m} = 0,18 \frac{(1 - e^{-0,036\eta}) A_0 H_0^{1/2}}{(D/B)^{1/2}} \text{ [kg/s]} \quad (5)$$

der

$$\eta = \frac{A_T}{A_0 H_0^{1/2}} \quad (6)$$

der A_T representerer rommets omhyllingsflater ekskludert fasadeåpningene.

Uttrykket benyttes ved enkle rettvinklede cuboidformede rom og det kan være et vilkårlig antall åpninger i rommet såfremt det minst er én.

3.4 Automatisk slokkeanlegg

Et mål med litteratursøket har vært å samle inn relevant informasjon om automatiske slokkeanlegg. Dette kapittelet vil derfor ta for seg et slokkeanleggs ulike funksjoner, ulike typer slokkeanlegg og utfordringer med slokkeanleggene. Kunnskapen vil videre benyttes til modelleringen i kapittel 4, samt drøftingen av fasadeslokkeanlegg i kapittel 6.

Formålet med et automatisk slokkeanlegg er å holde en brann under kontroll frem til branvesenet kan begynne slokkearbeidet eller slokking kan utføres på andre måter. Sprinkleranlegget er følsomt for temperatur og de fleste anlegg utløses ved 68 °C. Et slokkeanlegg kan ha flere funksjoner:

- Slokke brann
- Begrense brann
- Forhindre spredning
- Redusere termisk påvirkning
- Øke rømningstid
- Øke innsatstid
- Redusere slokkeinnsats

Videre er sprinkleranlegg generelt svært pålitelige. De fleste undersøkelser viser at sprinkler-systemet aktiveres og fungerer som det skal i over 90 % av tilfellene når brannen er stor nok til å oppdages av systemet og driftspåliteligheten ville vært nær 100 % dersom menneskelige feil ble eliminert (Sorthe *et al.*, 2015; Brannteknisk Forening, 2018).

Når det er snakk om automatiske slokkeanlegg vil det som oftest gjelde sprinkleranlegg eller vanntåkeanlegg.

Sprinkleranlegg

Sprinkleranlegg er det som tradisjonelt er mest brukt og ble utviklet rundt 1870 i USA (Brannteknisk Forening, 2018). I motsetning til hva mange kanskje tror, brukes stort sett et system som utløser en og en dyse etter hvert som individuelle sprinklerhoder detekterer en viss temperaturøkning. I noen tilfeller kan det derimot være nødvendig å installere et såkalt delugesystem som utløser flere dyser samtidig, men det vil ikke utdypes nærmere i denne studien.

Tradisjonelt sprinkleranlegg utføres som oftest enten i våt- eller tørranlegg. Av disse to er våtanlegg mest brukt, og karakteriseres ved at vannet når helt frem til sprinklerhodet. Ved aktivering strømmer derfor vannet ut med en gang. I et tørranlegg når vannet bare frem til sprinklerventilen og resterende rør er fylt med luft. Slike anlegg benyttes ved frostfare og kan ha en noe lavere pålitelighet enn våtrør (OFAS, n.d.; Sorthe *et al.*, 2015).

Vanntåkeanlegg

Vanntåkeanlegg er et relativt nytt slokkesystem sammenlignet med tradisjonelt sprinklersystem. Forskjellen mellom disse er at vanddråpene i vanntåkeanlegget er svært små i forhold til vanddråpene fra et sprinklersystem. Vanntåkeanlegg brukes gjerne på steder som har begrenset vannforsyning eller der det er et ønske om å bruke mindre mengder vann. Dette kan være for eksempel i verneverdige bygninger eller museer. Samtidig krever slike system dokumentasjon for at de fungerer som tiltenkt da de kan avvike fra standarder for utførelse. Slike system krever også mindre rørdimensjoner som følge av lavere vannforbruk (Sorthe *et al.*, 2015).

3.4.1 Fasadesprinkler som tiltak mot utvendig spredning

Sprinkleranlegg har vært brukt som brannbegrensende tiltak i mange tiår og er et svært effektivt og pålitelig system som berger mange liv og verdier fra å gå tapt i brann (NFPA, 2017). At sprinklersystem for innvendig spredning er effektivt og stort sett fungerer slik det skal er i dag godt kjent og dokumentert, i motsetning til fasadesprinkleranlegg som har blitt viet mindre oppmerksomhet.

Som nevnt innledningsvis foreligger det per dags dato ikke regelverk og standarder for prosjektering av fasadesprinkler, men det kan nevnes at Direktoratet for Byggkvalitet (DiBK) tidligere har oppgitt generelle retningslinjer i en HO-melding som kan følges (DiBK, 1999). Samtidig hevder Riksantikvaren (n.d.) at fasadesprinkler er den beste sikringen mot utvendig brannspredning, selv om det ikke foreligger regelverk rundt slike anlegg.

Fasadesprinklers funksjon

Tanken bak et sprinkleranlegg er at det skal holde en brann under kontroll til brannvesenet ankommer og kan starte arbeidet, og utfallet er derfor avhengig av brannvesenets innsatstid. Fasadesprinkler holder utvendig brannspredning under kontroll ved å væte ytterveggen slik at den får økt brannmotstand. Dette skal forhindre spredning mellom bygninger eller vertikal spredning til øvre etasjer/loft via fasade og fasadeåpninger (Riksantikvaren, n.d.). Jo høyere vannmengde som tilføres fra sprinklerhodene desto høyere kjøleeffekt har sprinkleranlegget (Thelin & Wighus, 2016). I tillegg vil dråpene absorbere varme fra eventuell varmestråling. Figur 7 viser hvordan et fasadesprinkleranlegg kan se ut.

Et fasadeslokkeanlegg kan også forhindre spredning gjennom vindu. Et vindu fungerer som et skjold mot brannen før ødeleggelse — det hindrer brannen fra å trenge ut og spre seg samtidig som at oksygen ikke slipper inn. På en annen side vil det fungere som ekstra ventilasjon etter ødeleggelse, og på grunn av dette spiller vinduene en viktig rolle i en brann. Samtidig kan vinduer som blir utsatt for stråling slippe varme gjennom selv om glasset ikke går til brudd, og inventar på en uekspontert side kan i så måte varmes opp. Dette betyr at fasadesprinkler også kan forhindre spredning gjennom vinduer ved at vannet absorberer varmen (McGuire, 1965; Oleszkiewics & Richardson, 1986).



Figur 7: Fasadesprinkler (SINTEF Byggforsk, 2007).

3.4.2 utfordringer knyttet til sprinkleranlegg

De fleste tiltak kommer med ulike utfordringer og sprinkleranlegg er ikke et unntak. For å prøve å vurdere om fasadesprinkler er et passende tiltak å iverksette for å redusere risiko for spredning må disse utfordringene redegjøres for. Som nevnt foreligger det lite dokumentasjon på fasadesprinkler som tiltak og det er derfor undersøkt hvilke generelle utfordringer som gjelder ved bruk av sprinklersystem i tillegg til det som er nevnt om fasadesprinkler.

Følgende utfordringer er knyttet til utvendig sprinkling og vil utdypes nærmere:

- Vannforsyning
- Frost
- Inngrep i bygningsmassen
- Begrenset tilgang til brannen
- Brannens oppdriftskrefter
- Deteksjon

Vannforsyning

Et automatisk sprinkleranlegg kan bruke store mengder vann og en ringvirkning av dette kan være trykktap i vannforsyningsnettet, som igjen kan føre til utfordringer i brannvesenets slokkearbeid. På grunn av dette er det svært viktig for en kommune å kartlegge slokkevannskapasiteten i aktuelle områder slik at det på forhånd er klart hvilken vannmengde som kan leveres under et slokkearbeid (Thelin & Wighus, 2016). Samtidig er det angitt i Forskrift om brannforebyggende tiltak og tilsyn (Forskrift om brannforebygging, 2002, § 5-4) at enhver kommune er ansvarlig for tilstrekkelig vannforsyning i tettbygde strøk etter brannvesenets behov. Preakseptert krav for vannforsyning i veiledning til byggt teknisk forskrift (TEK17, 2017, § 11-17) er 1200 liter per minutt i småhusbebyggelse, eller 20 liter per sekund.

Frost

Frost i rør kan bli et problem i kalde områder og et standard våtanlegg vil da ikke fungere som tiltenkt. Dette problemet kan løses enten ved å bruke et tørranlegg eller tilsette frostvæske.

Et tørranlegg er fylt med luft eller annen inert gass under trykk, og har et litt høyere krav til vannmengde og vanntrykk enn standard våtanlegg (Trøan, 2008; SINTEF Byggforsk, 2009). Når dysene utløses vil luften i røret slippe ut og vann vil komme til, og anlegget får dermed samme funksjon som et standard våtanlegg. Tørranlegg brukes for eksempel i kjølerom, på loft, i parkeringsanlegg og på fasader. I henhold til NS-EN 12845 *Automatiske sprinklersystemer* (2016) skal tørranlegg kun installeres der det er fare for frostskaader eller temperaturer på over 70 °C, og det må installeres permanent luft- eller inertgasstilførsel for å opprettholde trykket i rørnettet. Vannet skal nå frem til dysen på maksimalt 60 og 90 sekunder for fareklasser med henholdsvis ordinær og lav risiko, der lav risiko er gjeldende for private boliger. Det eksisterer derimot ventiler som sørger for at vannet kommer raskere frem.

Våtanlegg med frostvæske kan brukes som et alternativ til tørranlegg. Denne typen sprinkleranlegg brukes gjerne som en del av et våtanlegg som er utsatt for frost, og antall sprinkler fylt med frostvæske skal ikke overskride 20. Det er viktig at frostvæsken har en frysetemperatur som er lavere enn forventet minimumstemperatur for området (NS-EN 12845). Glykol brukes gjerne som frostvæske, og det er et krav at væsken må være giftfri og med så lav konsentrasjon at den ikke er brannfarlig (SINTEF Byggforsk, 2009).

Inngrep i bygningsmassen

I dag er det et krav at eksisterende bygg skal ha et brannsikkerhetsnivå tilsvarende dagens nivå så langt det er praktisk og økonomisk forsvarlig (Forskrift om brannforebygging, 2002, § 2-1). Samtidig sier kulturminneloven at eldre bygningers kulturelle verdi skal vernes om, og at dersom annen lov påvirker dette vernet skal det legges vekt på kulturminnelovens formål (Kulturminneloven, 1979, § 1). Det er derfor et ønske å bruke løsninger som ikke fører til større inngrep i bygningsmassen, og at inngrep som gjøres skal være reversible — det vil si at tiltakene kan

fjernes og at bygningen da vil gå tilbake til sin opprinnelige stand før tiltaket ble innført (Riksantikvaren, n.d.). Sprinklersystem krever generelt store rørdimensjoner og vanninnlegg (Wighus, 2016), og installering av utvendig sprinkleranlegg vil således være et inngrep i bygningsmassen som kan svekke byggverkets antikvariske verdi.

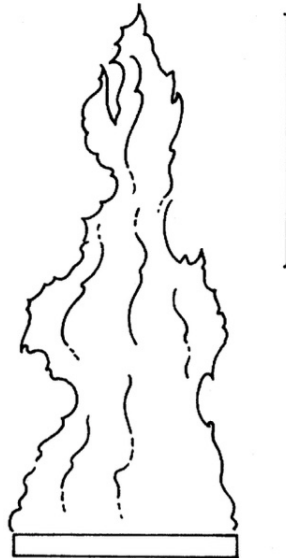
Brannens oppdriftskrefter

For at et sprinklersystem skal klare å holde en voksende brann under kontroll er det essensielt at vanndråpene har høy nok hastighet til å penetrere brannens flammer. Samtidig kan dråper som fordampes når de kommer i kontakt med flammene bidra til å kjøle ned branngassene i rommet eller atmosfæren, men de vil bidra lite til å holde en voksende brann under kontroll.

Brannens oppdriftskrefter er med på å avgjøre vanndråpenes interaksjon med flammene. Drysdale hevder at brannens maksimale oppdriftshastighet i den intermitterende delen av flammen (se figur 8), der hastigheten også er nær konstant. Denne hastigheten kan regnes ut ved hjelp av følgende uttrykk (Drysdale, 2011):

$$u_0 = 1,9Q^{1/5} [m/s] \quad (7)$$

der Q er brannens varmeavgivelsesrate i kW. For at dråpene skal penetrere brannens flammer må hastigheten være høyere enn brannens oppdriftshastighet.



Figur 8: Inndelingen viser den intermitterende delen av en flamme. Figuren er modifisert fra Drysdale (2011).

Begrenset tilgang til brannen

Et hus er laget for å holde vann ute — å slokke en brann fra utsiden kan derfor være utfordrende. Ragnar Wighus, brannforsker i RISE Fire Research, hevder i en artikkel om brannsikring av tett trehusbebyggelse i bygg og bevar at brannvesenet vanligvis har tilgang på nok vann ved slokking, men at et større problem er å nå stedene det brenner (Wighus, 2016). Dette gjelder spesielt for eldre trehus da de ofte er preget av hulrom i konstruksjonen, som beskrevet i kapittel 3.1.1, *Byggestil*. Her vil det typisk være snakk om luftespalter i raftekasse, hulrom bak kledningen eller lufteventil inn til loft (SINTEF Byggforsk, 2007), som kan føre til at vannet ikke treffer flammene. Dette kan gjøre et utvendig sprinkleranlegg usikkert og lite pålitelig.

Deteksjon

Veiledningen til TEK17 sier at et sprinkleranlegg skal detektere en brann tidlig i forløpet og slokke eller holde brannen under kontroll inntil slokking kan utføres på andre måter. Sprinkleranlegget utløses ved en bestemt temperatur og det er variasjon i denne temperaturen som utløser systemet. Det er kun sprinklene som befinner seg nært brannen som utløses (med mindre en benytter et delugeanlegg der alle dysene utløses samtidig). Hvorvidt systemet detekterer en brann er derfor avhengig av at detektoren fanger opp en temperaturendring, noe som kan være en utfordring ved utvendig sprinkling.

3.5 Fire dynamics simulator og PyroSim

Informasjonen fra dette kapittelet er hentet fra National Institute of Standards and Technology (NIST, 2017) og Thunderhead Engineering (Thunderhead, 2018) dersom ikke annet er presisert. Kapittelet vil ta for seg viktige parametere for å sette opp en realistisk feltmodell, da spesielt de innstillingene som vil være relevant for oppsettet i kapittel 4. PyroSim — FDS' grafiske brukergrensesnitt — er utviklet av Thunderhead Engineering, og der det er hensiktsmessig vil PyroSims løsninger presenteres.

FDS er en Computational Fluid Dynamics (CFD) modell for branndreven fluidstrøm, der CFD er en fellesbetegnelse for simuleringer innen fluidtransport. Programmet løser Navier-Stokes likninger tilpasset strømming som er termisk drevet og har lav hastighet. Programmet er utviklet hovedsakelig for å løse praktiske problemer innen brannsikkerhet som aktivering av sprinkleranlegg og røykdeteksjon, men kan samtidig benyttes for å studere grunnleggende branndynamikk og forbrenning. FDS er også effektivt for å undersøke varmestråling og konvektiv strømming.

3.5.1 Mesh

For å kunne løse de fundamentale likningene som legger grunnlaget for en CFD-simulering må kalkulasjonene utføres i et beregningsdomene. Dette beregningsdomenet kalles for et *mesh* og består av mange små kontrollvolum, eller celler. Antall celler bestemmer meshets finhet og er avgjørende for hvor nøyaktig resultatet av kalkulasjonene blir. For optimal beregning av meshet er det hensiktsmessig at cellene har en kubisk struktur — altså at alle sidene er like lange. All modellering som foregår utenfor beregningsdomenet, det vil si objekt e.l. som blir plassert utenfor meshet, vil ikke inkluderes i simuleringen. En viktig del av kalkulasjonen bruker en løsning basert på fast fourier transforms (FFS) i y og z retningen, så antall celler i andre og tredje dimensjon av meshet bør være på formen $2^l 3^m 5^n$, der l, m og n er heltall. x -dimensjonen i meshinndelingen er ikke basert på FFS og kan være et vilkårlig tall. FDS' brukermanual inneholder en oversikt over alle tall opp til 1024 som kan faktoriseres ned til 2, 3 og 5.

Det er mulig å dele et domene inn i flere mesh og på denne måten kan prosesseringstiden optimaliseres ved at utregningene i de ulike meshene skjer parallelt. Dette gjøres ved å enten tildele et mesh til hver prosessorkjerne i maskinens CPU eller tildele likt antall mesh til hver kjerne. For at parallellkjøringen av mesh skal være tidsbesparende bør også antall celler i hvert mesh være noenlunde likt, ellers vil prosessorkjernen med tyngst arbeidsmengde (kjernen som blir tildelt meshet med flest celler) få rom fra de andre kjernene til å jobbe raskere. Det går også an å prøve å dele opp meshene etter lik arbeidsmengde, altså å anta at områder med mye aktivitet krever mer prosessorkraft. Likevel er det vanskelig å vite hvilket oppsett som gir raskest kjøretid, så ulike alternativer bør undersøkes i en sensitivitetsanalyse.

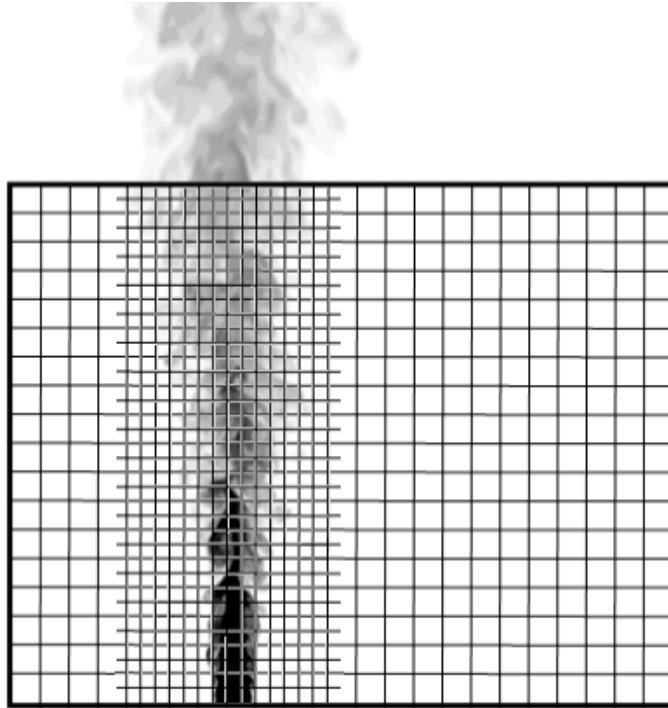
Områder med mye aktivitet, som for eksempel midt i brannplumen, bør ikke splittes i flere mesh. Det anbefales også at plumen får utvikle seg vertikalt helt til domenets grense eller til en eventuell stopp i en obstruksjon uten å splittes av et eller flere mesh (se figur 9) — dette kommer av at informasjonen som utveksles i meshgrensene ikke er like nøyaktig som informasjonen fra celle til celle. Samtidig er det viktig at cellene i de ulike meshene har heltallsratio eller likt tverrsnittsareal (se figur 10).

Størrelsen på celleinndelingen i et mesh kan være utfordrende å bestemme og det fins ingen fasit — det kommer an på hvilket problem som skal studeres. Likevel er det utviklet retningslinjer for å få en indikasjon på om inndelingen i en aktiv sone med oppdrift er fin nok, og en fremgangsmetodikk er å bruke likning 8:

$$\frac{D^*}{\delta_{x,y,z}} \quad (8)$$

der D^* er brannens karakteristiske diameter og kan beregnes ved hjelp av likning 9:

$$D^* = \left(\frac{Q}{\rho_\infty c_p T_\infty \sqrt{g}} \right)^{2/5} [m] \quad (9)$$

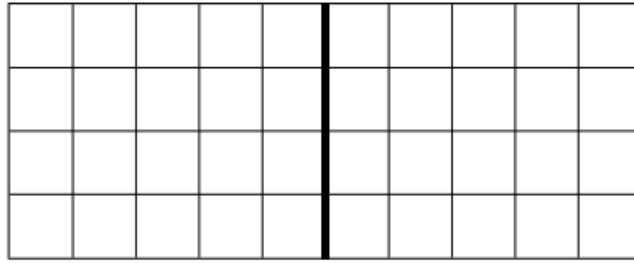


Figur 9: Mesh- og celleinndeling i brannplumen (Jakobsen et al, 2009).

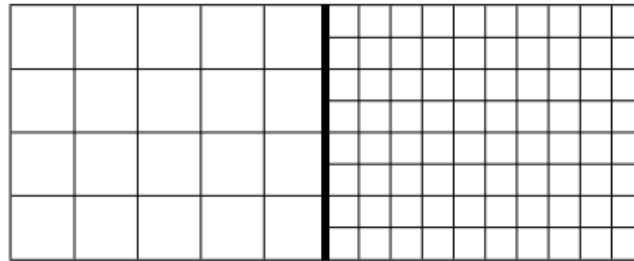
der

- Q = brannens totale varmeavgivelsesrate [kW]
- ρ_∞ = omgivende lufttetthet [kg/m^3]
- c_p = luftens spesifikke varmekapasitet [kJ/kgK]
- T_∞ = omgivende temperatur [K]
- g = gravitasjonskonstanten [$9,81 \text{ m}/\text{s}^2$]

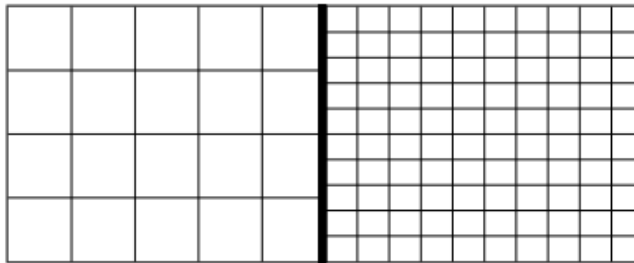
Resultatet av likning 8 sier noe om antall beregningsceller som omgir brannens karakteristiske diameter; jo flere celler desto bedre oppløsning. Ifølge Nystedt & Frantzich (2011) viser erfaringer at dersom likningen gir et tall på mellom 5 og 10 vil en kunne oppnå et tilfredsstillende resultat. Samtidig hevder de at i noen tilfeller bør likningen gi et tall mellom 15 og 20 — det avhenger av hvilke brannfysikalske egenskaper som skal studeres. For tilfredsstillende resultat av turbulent strømning rundt detaljer som åpninger, vents og brannkilde er det anbefalt at gridet som dekker disse detaljene spenner 10 celler i hver retning. Sensitivitetsanalyser har også vist at cellestørrelsen er avgjørende for at temperaturen i brannplumen skal bli så nøyaktig som mulig. Dersom gridcellene er for store blir luftinnblandingen i plumen for dårlig, noe som fører til en høyere temperatur enn det som er realistisk (se figur 11).



(a) Godkjent



(b) Godkjent



(c) Ikke godkjent

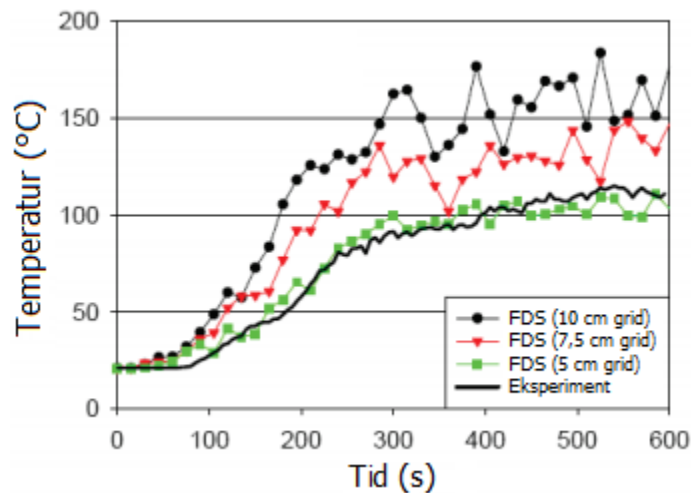
Figur 10: Meshinndeling som godkjennes og ikke godkjennes (NIST, 2017).

Ifølge Boehmer *et al.* (2010) er meshgrensenes plassering avgjørende for resultatet. Dersom en brann oppstår i et rom med ventilasjonsåpninger er det ikke tilstrekkelig å bruke veggene som domenegrenser da dette vil påvirke strømningsforholdene og resultatene fra simuleringen. For ventilasjonskontrollert brann anbefales det å utvide meshgrensene med åpningens hydrauliske diameter, som kan regnes ut ved hjelp av likning 10. Se forøvrig figur 12.

$$D_H = \frac{4A}{P} [m] \quad (10)$$

der

- A = åpningens areal [m^2]
- P = åpningens omkrets [m]



Figur 11: Temperatur i brannplumen avhengig av gridstørrelse, FDS sammenlignet med eksperiment (Oversatt fra Nystedt & Frantzych, 2011).

3.5.2 Overflater

Overflater brukes til å definere egenskapene til faste objekter og vents i FDS modellen. Dette kan være for eksempel en ytre grense i beregningsdomenet eller et objekts materialtype. PyroSim har ulike overflater som på forhånd er lagt inn i programmet og ikke kan endres, og hvis det er ønskelig med overflater som innehar egenskaper utover disse må dette brukerdefineres. Samtidig er det mulig å definere brenner, spesifisere antennelsestemperatur samt mange andre egenskaper. Overflatene som er relevante for oppgaven vil beskrives i det følgende.

”Open”

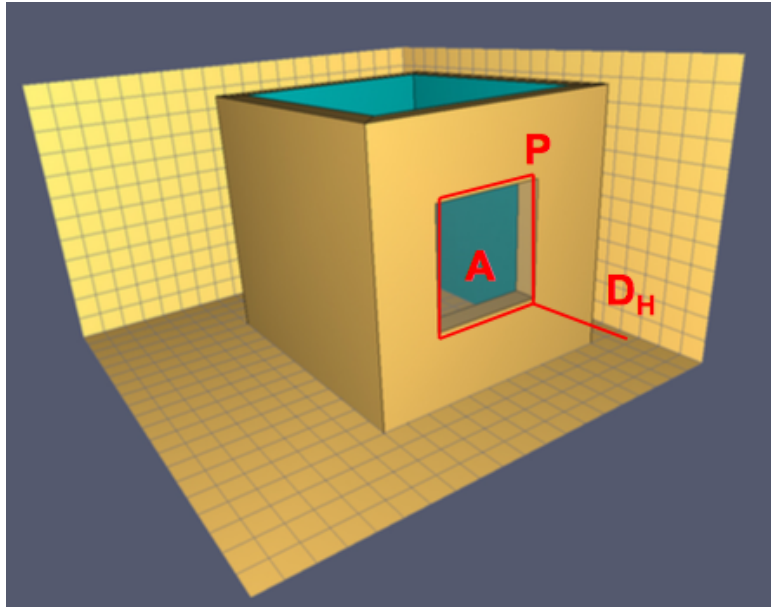
Overflaten ”open” brukes ofte som ytre meshgrense og betegner en passiv åpning til utsiden. Den kan brukes til å modellere for eksempel åpne dører og vinduer, men også til å definere slutten på en meshgrense i åpent landskap.

”Adiabatic”

Netto varmeffluks til overflaten er lik null og det skjer ingen varmeoverføring fra gassen til den adiabatisk flaten. Samtidig vil adiabatisk overflater holde omgivelsestemperatur.

”Inert”

Alle obstruksjoner og grenser tildeles inert overflate i PyroSim med mindre annet spesifiseres. Overflaten holder omgivelsestemperatur og varmeoverføring skjer fra gasser til objekter.



Figur 12: Hydraulisk diameter (Knarud, 2017).

Supply (vind)

Vind i FDS simuleres ved å velge overflatetype *supply* og parabolisk eller atmosfærisk vindprofil. Atmosfærisk vindprofil tar hensyn til høyde over bakken i tillegg til en atmosfærisk profileksponent og simulerer en vindprofil etter likning 11.

$$U = U_0 \left(\frac{Z}{Z_0} \right)^p \quad [m/s] \quad (11)$$

der

- U_0 = målt vindhastighet [m/s]
- Z = høyde over bakken [m]
- Z_0 = høyden vindhastigheten U_0 er målt i [m]
- p = atmosfærisk profileksponent

I dag måles vind på værstasjoner stort sett med instrumenter som er plassert i en mast 10 meter over bakken, og det vil derfor være logisk å sette Z_0 til 10 i de fleste tilfeller. Samtidig varierer den atmosfæriske eksponenten mellom 0,1 og 0,6 der verdien henholdsvis indikerer en solfylt ettermiddag og en skyfri natt. Jo større eksponent desto større vertikal gradient i vindhastigheten. Selv om dette er en relativt grei tilnærming er det viktig å huske på at ekte vindprofiler vil avvike fra beskrivelsen (MRC, 2002).

Layered (materialer)

Ønskede materialer kan legges inn i FDS. I PyroSim defineres materialene som overflatetype *layered* og ulike materialer, som for eksempel betong, gipsplater og tre, kan hentes fra en database. Det er også mulig å definere egne materialer.

”Burner”

Brenneren simulerer selve brannen og den enkleste måten å definere denne på er å spesifisere en verdi for varmeavgivelsesrate per arealenheter. Dette er den viktigste parameteren som angår brannens utvikling (Babrauskas & Peacock, 1992) og derfor er en korrekt beregning av varmeavgivelsen avgjørende for et realistisk resultat.

Brannens overflateareal må også vurderes. Dersom brannen er definert etter en kjent HRR men har for lite overflateareal kan dette føre til at brannen oppfører seg som en jetbrann. Cox & Kumar (2002) definerte det dimensjonsløse uttrykket i likning 12 som kan brukes for å undersøke hvilke krefter en brann drives av, og bidrar til en kvalitetssikring av modelleringen. Verdiene for en brann som er drevet at oppdrift bør ligge mellom 0,3 og 2,5.

$$Q^* = \frac{Q}{\rho_{\infty} c_p T_{\infty} \sqrt{g D D^2}} \quad (12)$$

der

- Q = brannens totale varmeavgivelsesrate [kW]
- ρ_{∞} = omgivende lufttetthet [kg/m³]
- c_p = luftens spesifikke varmekapasitet [kJ/kgK]
- T_{∞} = omgivende temperatur [K]
- g = gravitasjonskonstanten [9,81 m/s²]
- D = brannens diameter [m]

3.5.3 Stråling og varmefluks

FDS kan måle ulike varmeflukser på objekter eller i rommet. Ifølge Kristopher Overholt, som har arbeidet med å verifisere og validere FDS, kan de ulike varmefluksene deles inn i flere kategorier Overholt (2014). Kategoriene som er relevante for denne studien er strålingsfluks, konvektiv varmefluks samt netto varmefluks som er summen av strålingsfluks og konvektiv varmefluks.

Begrensninger

Som så mange andre parametere i FDS har også måling av varmeffluks sine begrensninger. NIST skriver i sin verifiseringsmanual for FDS at den forenklete forbrenningsmodellen kan føre til at røykgassenes kjemiske sammensetning påvirker både absorpsjon og utslipp av termisk stråling. Dette kommer av at den røykbelastede gassens absorpsjonskoeffisient er svært kompleks. FDS har flere alternativer til valg av strålingsmodell, der gray gas model er mest relevant i en typisk rombrann.

Stråling over lengre avstander kan føre til usikre resultater på grunn av måten dette regnes ut på i FDS. Imidlertid hevder NUREG-1934 (2012) at radial distance ratio (RDR) (likning 13) kan si noe om FDS er egnet til å beregne strålingen i en gitt situasjon, der RDR er forholdet mellom avstanden fra brannkilden til mottakende flate og brannens diameter.

$$\text{Radial Distance Ratio} = \frac{r}{D} \quad (13)$$

der

- r er avstanden fra brannen til mottakende flate [m]
- D er brannens diameter [m]

Dersom uttrykket gir et tall mellom 2,2 og 5,7 er avstanden godkjent.

Strålingens transport i FDS diskretiseres via ca. 100 faste vinkler og dersom målet befinner seg for langt unna strålekilden kan denne diskretiseringen føre til ujevn fordeling av strålingsenergi. Ved å inkludere flere vinkler kan problemet bøtes på og dette kan stilles inn i FDS, men prosesseringstiden vil til gjengjeld gå opp — dette er derfor en vurdering som må gjøres for hver unike simuleringssituasjon. Samtidig presiseres det at å måle stråling fungerer bedre på objekter som befinner seg nært en strålingskilde, men det er viktig å ikke komme for nært (ref. likning 13).

Nystedt & Frantzich (2011) beskriver også at modeller som har studert ulik varmestråling gir tilfredsstillende resultater, men at mottakende objekt bør ha enkel geometri slik at modellens diskrete varmestråler ikke bommer på objektet. Samtidig påpeker de at FDS har noe problem med å kalkulere flammehøyde og temperatur i plumen, noe som kan gi usikkerhet i resultatene. På bakgrunn av dette graderes FDS' kapasitet til å måle stråling til gul i deres rapport. Samtidig påpeker NIST i deres valideringsguide at å simulere stråling med FDS kan gi relativt nøyaktige resultater med gode programvare- og fysikkunnskaper.

3.5.4 Sensorer og instrumenter

FDS og PyroSim er utstyrt med ulike sensorer og instrumenter (såkalte *devices*) som kan brukes til å gi ulik utdata fra simuleringsmiljøet, eller de kan representere et system. Utdata kan være for eksempel temperatur på en overflate eller konvektiv varmeoverføringskoeffisient. Eksempel på et system kan være sprinklersystem, røykvarslere, sensorer for varmefluks eller temperatur. I noen tilfeller kan det være ønskelig at disse sensorene trigges, som for eksempel at et sprinklersystem aktiveres ved en viss temperatur.

4 Simuleringsmodell

Høy kvalitet er viktig for at en analyse av et brannscenario skal være pålitelig. Ifølge Nystedt & Frantzich (2011) kan grunnlaget fra en brannteknisk analyse være avgjørende i en beslutningsprosess — dette understreker viktigheten av analysens kvalitet.

I dette kapitlet vil valgene som er tatt i forbindelse med simuleringsmodellen begrunnes og redegjøres for, med bakgrunn i teorien fra kapittel 3. Der det er nødvendig med en dyptgående begrunnelse, som detaljert utregning eller sensitivitetsanalyse, refereres det til vedlegg. Nystedt & Frantzichs fremgangsmetodikk for brannteknisk analyse er brukt i dette kapitlet og tilpasset valgene for simuleringene. Resultatene fra simuleringene vil presenteres i kapittel 5, *Resultater*.

4.1 Målsetning

Nystedt & Frantzich hevder at det første steget i en brannteknisk analyse er å identifisere analysens målsetning. Det er nødvendig for å beskrive valg av brannscenarier og -modeller.

Analysens mål er å undersøke hvilken effekt vind har på en rombrann samt hvilken effekt fasadesprinkler har på brannspredning i tett trehusbebyggelse, og i så måte avgjøre om det er et godt tiltak mot brannspredning under slike forhold. For å nå dette målet vil en brannteknisk analyse med simuleringer utføres, med FDS og PyroSim som valgt programvare. Analysen vil ta for seg scenarier med ulike vindhastigheter som er basert på tidligere værdata. Grunnlaget for analysen er basert på en kvalitativ og en kvantitativ del og er utført med fokus på studiens forskningsspørsmål 3 og 4 som gjengis i det følgende:

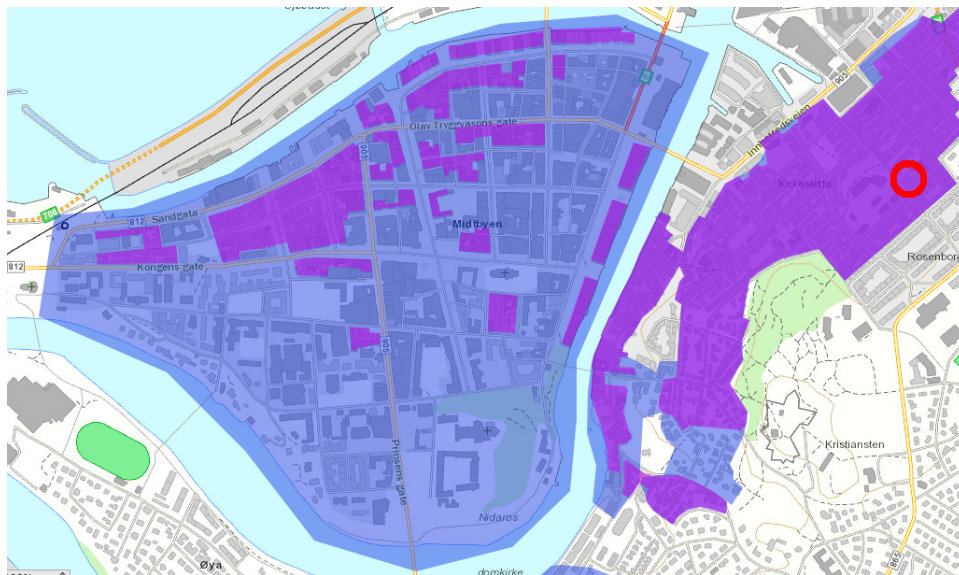
3. Hvordan påvirkes en rombrann av ytre vindpåkjenning i ulike hastigheter, og på hvilken måte kan dette påvirke et fasadeslokkeanlegg?
4. Hvilken effekt har fasadesprinkler på brannspredning med og uten vind?

4.2 Kvalitative valg

For å nå målene som er satt for analysen er det viktig å beskrive relevant(e) brannscenario. Brannscenarioet skal være en kvalitativ beskrivelse og bør skje i tråd med en systematisk prosess. I dette kapitlet er det derfor lagt vekt på å inkludere punkter fra ISO 16733-1 (2015) i tillegg til Nystedt & Frantzichs fremgangsmåte. Standarden beskriver også at relevante brannscenario kan identifiseres ved å gjøre en kvalitativ analyse, men som nevnt i kapittel 2, *Metode*, er ikke dette inkludert som følge av tidsbegrensning.

Område og casebygg

Området som benyttes i casen er valgt ved først og fremst å se på hvilke områder i Trondheim som består av tette trehusmiljø, og hvor disse trehusmiljøene er særlig utsatt for brannsmitte. Et søk på kulturminnedata.no viser at slike områder gjelder hovedsakelig Møllenberg, Bakklandet og visse deler av sentrum. Figur 13 illustrerer dette, og valgt område for analysen er representert med rød sirkel.



Figur 13: Oversikt over tett trehusbebyggelse i Trondheim. Blå og lilla markering representerer henholdsvis tette trehusmiljø og stor brannsmittefare (kulturminnedata.no). Rød ring representerer valgt område for analyse.

Selve casebygget er valgt med utgangspunkt i at det er korte avstander mellom bygningene og at det er brennbar fasade i tre. Samtidig er det vektlagt at vinduer peker mot hverandre i to parallelle yttervegger. Ved fullt utviklet brann i en av disse bygningene er det sannsynlig at brannen kan spre seg til nabobygg gjennom fasadeåpningene via ulike spredningsmekanismer. Figur 14 illustrerer casebygget samt avstanden mellom dem.



(a) Casebygget for analysen (eget bilde).



(b) Avstand mellom bygningene (Google Maps).

Figur 14: Området for simuleringene.

Som figur 14a viser, tar casen for seg to bygninger der det ene bygget brenner og det andre skal fungere som mottakende objekt for varme fra brannen. Bygningene har en enkel rektangulær geometri som er optimalt for å bygge opp en så enkel og presis modell som mulig.

Brannen og dens lokasjon

Materialet som brenner i brannrommet er fleksibelt polyuretanskum, og dette materialet er valgt fordi det er mye brukt i polstrede møbler som for eksempel sofaer og stoler. For å spare prosesseringskraft er ikke brannrommet innredet. Samtidig er oppgavens fokus utvendig brannspredning og det antas derfor at dette ikke vil ha stor innvirkning på resultatene. Brannens lokasjon er ca. midt i rommet foran døren og er basert på hvor den vil utfordre sprinklersystemet mest. Dette er også tatt hensyn til ved å plassere brenneren slik at strålingen og flammene skal få en enkel bane gjennom fasadeåpningen og til mottakende flate.

Fare for spredning til omkringliggende bygninger er som oftest først en reell trussel etter overtenning og når flammer står ut av fasadeåpningene, og scenariet vil derfor være en fullt utviklet rombrann. En mer kvantitativ beskrivelse av modellen presenteres i delkapittel 4.2, *Kvantitative valg*.

Brannbeskyttelse

I casen er det valgt å bruke sprinkleranlegg som brannbeskyttelse da dette skal forhindre brannspredning mellom bygg. Det er bevisst valgt sprinkler og ikke vanntåkeanlegg, da Riksantikvaren (n.d.) opplyser om at effekten av sprinkleranlegg sannsynligvis vil være bedre egnet til utvendig sløkking. Videre skriver Mostue og Stensaas (2002) i sin rapport om sprinkling i omsorgsboliger at de fleste fasadesprinkler som er montert er tørrørssprinkling der vannet slippes frem til dysene ved at en ventil åpner for vanntilførsel. Dette betyr at det vil være en forsinkelse i når vannet strømmer ut av dysene sammenlignet med våtanlegg, men denne forsinkelsen er ikke inkludert i modelloppsettet. Det er også sannsynlig at det i et reelt scenario ville vært flere barrierer mot brannspredning enn kun sprinkleranlegg, men analysen skal utfordre sprinklersystemets effekt og det ses derfor på sprinklersystemet som eneste barriere. Det antas at sprinklersystemet har tilstrekkelig vannforsyning gjennom hele scenariet og at det ikke vil få problemer med frost.

Ventilasjonsforhold

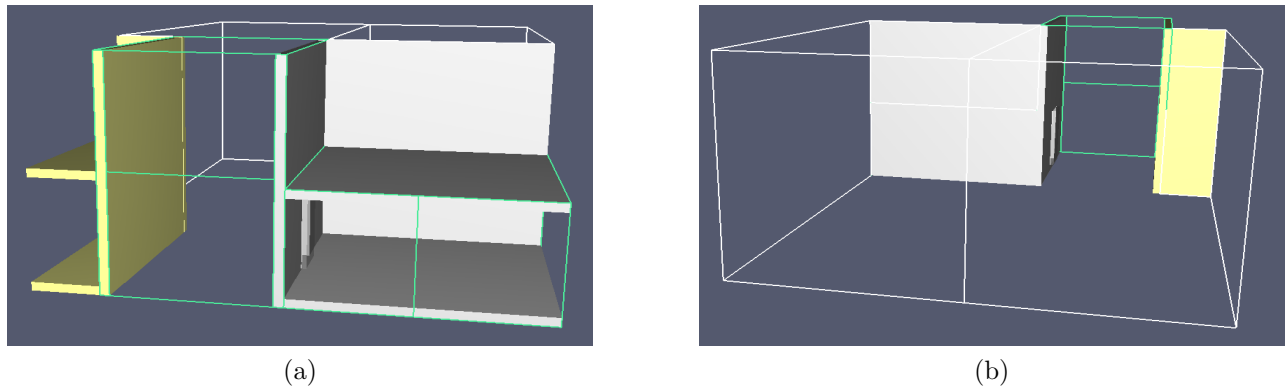
Fasadeåpningene er rommets eneste kilde til luft, og rommet er ikke utstyrt med mekanisk ventilasjonssystem. Scenariet er rombrann etter overtenning og det antas derfor at glass har knust og at fasadeåpningene står åpne — disse vil derfor modelleres som hull i FDS.

4.3 Kvantitative valg

I dette delkapittelet vil modelloppsettet beskrives, det vil redegjøres for ulike inn- og utdata og modellen vil beskrives i et mer kvantitativt omfang. Ulike inndataparametere er beregnet ved hjelp av teori og likninger beskrevet i kapittel 3, *Teori*, og vil presenteres ettersom de ulike delene redegjøres for. Detaljert beregning kan studeres i vedlegg A.

Meshinndeling

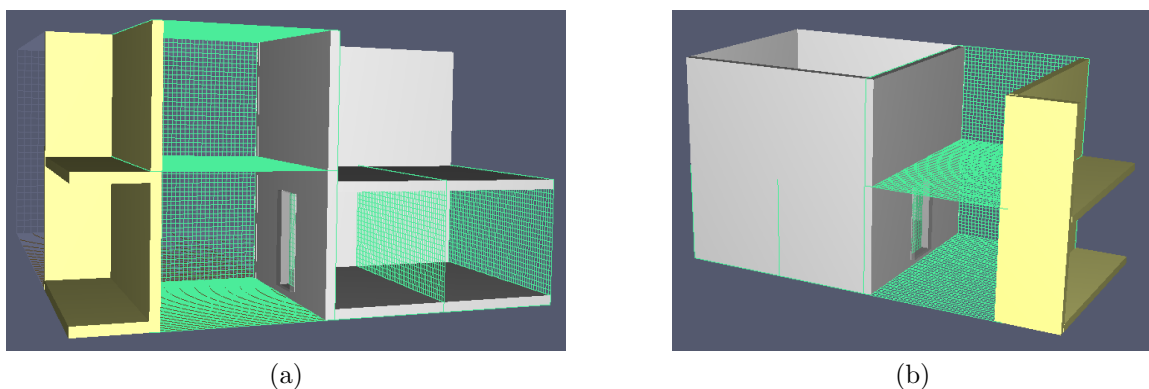
For å optimalisere meshinndelingen er det utført en sensitivitetsanalyse som tar for seg tre ulike oppsett. Maskinen som simuleringene er utført på har 6 prosessorkjerner og i teorien vil det derfor være optimalt å dele modellen inn i minst 6 mesh. Det ble undersøkt tre ulike inndelinger og det viste seg at inndelingen med 6 mesh og en noe skjev cellefordeling hadde raskest prosesseringstid. Det valgte oppsettet deler plumen på to steder selv om det bør etterstrebtes å dele slike kritiske områder så lite som mulig. Resultatene fra analysen viste likevel at oppdelingen av plumen ikke påvirket resultatet nevneverdig til sammenligning med kun én oppdeling, og det ble derfor valgt å gå videre med dette oppsettet. Oppsettet sørger også for at meshgrensenes avstand fra bygningene er innenfor anbefalte kriterier for å sikre et realistisk strømningsbilde. Oppsettet er forøvrig vist i figur 15. Detaljert sensitivitetsanalyse kan studeres i vedlegg C.



Figur 15: Meshinndeling sett fra to ulike vinkler

Grid

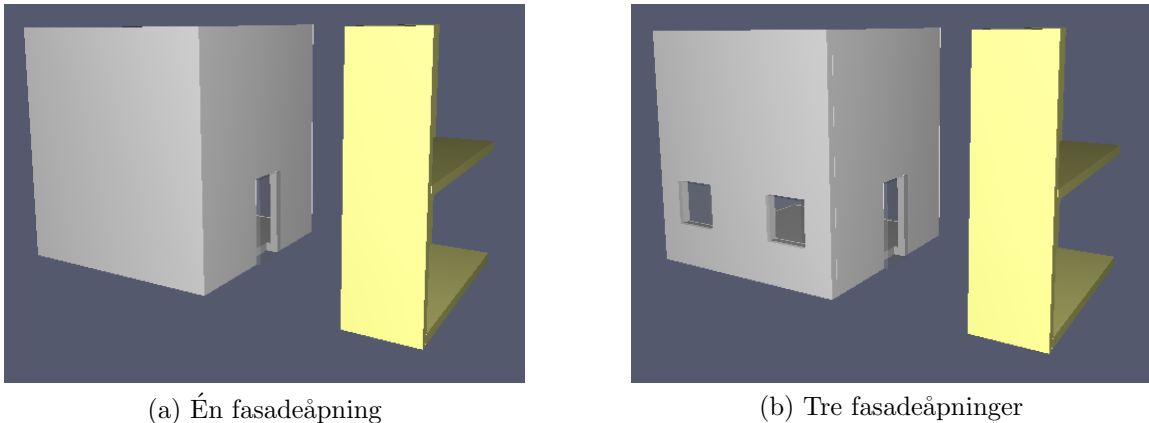
Cellestørrelsen i de ulike meshene ble også undersøkt i en sensitivitetsanalyse (vedlegg C) og som forventet viste resultatene at mindre cellestørrelse fører til et mer nøyaktig resultat samtidig som at prosesseringstiden går vesentlig opp. Det ble konkludert med at det mest hensiktsmessige var å dele meshene med mye og lite aktivitet inn i størrelser på henholdsvis 0,1 og 0,2 meter. Oppsettet er presentert i figur 16. Likningene fra kapittel 3.5, *Fire dynamics simulator* og *PyroSim*, er brukt som en kvalitetssikring for å sjekke at inndelingen er akseptabel. Likning 9 ble brukt for å estimere brannens karakteristiske diameter som ble brukt til å regne ut om meshet er fint nok med likning 8. Verdien for cellestørrelse med 0,1 og 0,2 meter ble satt til henholdsvis 21 og 10,5, som er innenfor de anbefalte verdiene. Samtidig oppfyller en cellestørrelse på 0,1 meter kravet om at gridet bør spenne 10 celler i områder med turbulente forhold da alle fasadeåpningene har bredde på 1 meter og høyde på minst 1 meter. Dette kravet oppfylles ikke i mesh med cellestørrelse på 0,2 meter, men i disse områdene simuleres det vind uten nevneverdig påvirkning av turbulens og det er derfor ikke et like relevant krav der.



Figur 16: Inndeling av grid sett fra to ulike vinkler der farget grid indikerer cellestørrelse på 0,1 m.

Modell

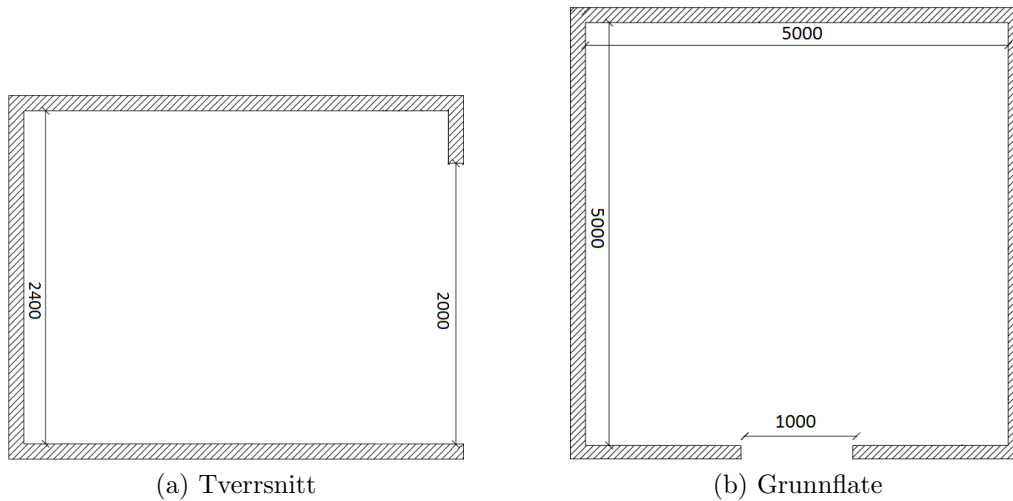
Modelleringen tar for seg to varianter med én og tre fasadeåpninger. Dette tilsvarer henholdsvis en dør, og en dør og to vinduer (se figur 17). Begge modellene består av et rom med vegger, gulv og tak, med dimensjoner $L \times B \times H = 5 \times 5 \times 2,4$ meter. Alle vegger er 0,2 meter tykke, og takets høyde på 2,4 meter tilfredsstiller kravet i byggeteknisk forskrift. Vinduene dimensjoner i modellen (figur 17b) er 1 meter \times 1 meter. På denne måten tilfredsstiller størrelsen kravet til 10 gridceller i hver retning i områder med turbulente forhold. Det ble valgt å sette inn to vinduer for å slippe inn mer luft, samtidig som at det er en realistisk tilnærming til et reelt scenario. Se forøvrig figur 18 for oversikt over modellens mål der (a) og (b) viser henholdsvis grunnflaten og tverrsnittet av rommet som brenner. Alle målene er i millimeter.



Figur 17: Modell med én og tre fasadeåpninger

Bygningen har to etasjer som er skilt med en etasjeskiller. Andre etasje er ikke delt inn i mesh da det ikke vil skje beregninger der som er interessante for resultatene, men den er likevel inkludert for å opprettholde naturlige strømningsforhold i forbindelse med brannens oppdrift da plumen vil påvirkes av veggene i scenarier uten vindpåvirkning. Vinduer er heller ikke inkludert da analysen fokuserer på varme til motstående objekt og ikke eventuelle vindusbrudd.

Mottakende objekt er som en forenkling modellert kun som et utsnitt med yttervegg og vinduer da det ikke ses på som nødvendig for resultatene å inkludere hele bygningen for å undersøke veggens temperatureksponering.



Figur 18: Modellens mål i mm (modifisert fra Brohus et al. (2007)).

Vind

Retning

Sidevind skal undersøkes i casen og det er interessant å se på blant annet om vannet fra sprinklersystemet vil blåse vannet vekk fra fasaden og dermed forringe sprinklersystemets funksjon. I tillegg vil vannets effekt av å væte veggen undersøkes. Figur 19 viser statistikk over vindretningen i Trondheim i perioden januar 2017 - desember 2017.

Vindrose, frekvensfordeling av vind

Vindretning deles i sektorer på 30°
Frekvensfordeling av vindhastighet i prosent %

Vindhastighet (m/s)

- > 20.2
- 15.3-20.2
- 10.3-15.2
- 5.3-10.2
- 0.3-5.2

Stille (%)

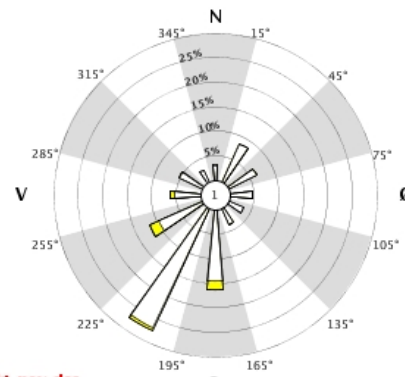


År: 2017 - 2017

jan, feb, mar, apr, mai, jun, jul, aug, sep, okt, nov, des

Tidspunkt: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23 (NMT)

68860 TRONDHEIM - VOLL



Figur 19: Statistikk over vindretninger i Trondheim.

Figuren er hentet fra Meteorologisk institutts vær- og klimadata der en spesifikk rapport over Trondheim og Voll værstasjon ble generert (eklima.no). Statistikken viser at 40 % av vindretningen i Trondheim kommer fra sør/sør-vest (165 - 225°), og ca 10 % kommer fra sør-øst (105 - 165°).

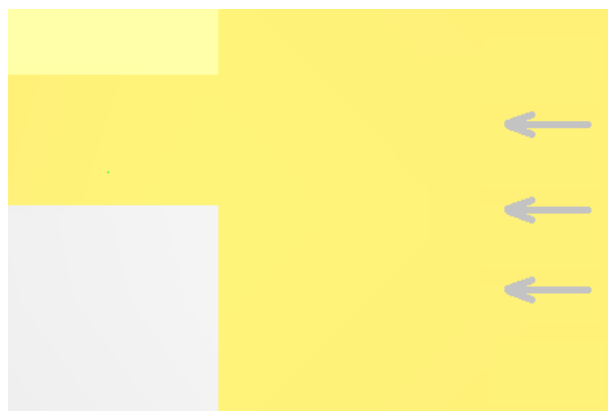
Figur 20 viser simuleringsmodellen sett ovenfra. Pilene illustrerer vindretningen, som tilsvarer mellom 135 og 165° i figur 19. Denne vindretningen ble valgt for å utfordre oppsettet i simuleringsmodellen mest mulig, selv om det ikke er den vindretningen som forekommer hyppigst i Trondheim. Dette begrunnes også med at analysens fokus er et verst tenkelig scenario, og ikke hva som er mest sannsynlig at vil inntreffe. Det kan også nevnes at en vindretning mellom 195 - 225° i figuren ville dekket mellom 25 - 30 % av tilfeller med vind i Trondheim i 2017 men samtidig truffet bygningen bakfra, og dermed ikke fått utfordret oppsettet på den beste måten.

Hastighet

Følgende hastigheter skal undersøkes i simuleringene:

- 0 m/s
- 2,7 m/s
- 7,8 m/s
- 12,9 m/s

Hastighetene er beregnet fra gjennomsnittsdata hentet fra yr.no, og detaljer rundt dette kan studeres i vedlegg B. I tillegg er det valgt en atmosfærisk vindprofil som tar hensyn til ulike høyder over bakkenivå. Som nevnt i kapittel 3.5, *Fire dynamics simulator og PyroSim*, defineres vindprofilen etter likning 11. Z_0 settes til 10 m som er standard høyde for vindmåling og p settes til 0,3 som er midt imellom en solrik dag og skyfri natt, som vil gi en middels bratt vertikal hastighetsgradient. Det tas ikke hensyn til atmosfærens temperaturfall da maks høyde i simuleringen kun er 6 meter, noe som også vil spare prosesseringstid.



Figur 20: Modellen sett ovenfra. Pilene illustrerer vindretningen (sør-øst).

Reaksjoner, materialer og overflater

I modellen er det definert en reaksjon i brenneren, samt flere overflater og et materiale, som vil beskrives etter tur. Disse er:

- Adiabatisk overflate
- Inert overflate
- Åpen overflate
- Polyuretan reaksjon
- Gul furu materiale

Adiabatisk og inert

Brannrommet har fått tildelt adiabatisk overflater som vil si at omhyllingsflatene ikke gjennomgår varmeoverføring, men de vil ha lik temperatur som temperaturen i rommet. Dette kan føre til høyere temperaturer inne i brannrommet og en raskere utvikling sammenlignet med en reell brann, men vil samtidig gi konservative resultater og utfordre sprinklersystemet. Bakken er satt til å være inert, og den vil derfor gjennomgå varmeoverføring og holde omgivelsestemperatur.

Åpen overflate

Alle domenegrenser utenom bakken har fått åpen overflate for å etterligne et realistisk strømningsbilde. Åpen overflate fører til at gasser strømmer ut av beregningsdomenet og ikke holdes inne.

Polyuretan (reaksjon i brenner)

Materialet som brenner er fleksibelt polyuretanskum da det er et mye brukt material i polstrede møbler. Denne typen polyuretan har lav tetthet og høyere sotproduksjon i forbrenning enn for eksempel rigid polyuretanskum, som er en av hovedgrunnene til valg av materiale da sotproduksjon er viktig for varmestrålingen. Ifølge Beyler (2008) har fleksibelt polyuretanskum en sot- og CO-produksjon på henholdsvis 0,227 g/g og 0,031 g/g, som er spesifisert i modellen. Disse verdiene gjelder for godt ventilerte tilfeller men FDS tar høyde for dette og estimerer hva verdien vil bli ved begrenset tilgang på oksygen.

Gul furu

Valgt material på mottakende objekt er gul furu da studien fokuserer på tre som byggemateriale. Wickström *et al.* (2007) hevder at de fleste konstruksjonsmaterialers emissivitet kan settes til 0,8 (bortsett fra stål) og materialets emissivitet har derfor fått denne verdien.

Strålingsmodell

I PyroSim er gray gas model valgt som strålingsmodell, samtidig som at antall diskrete vinkler er satt til 100 på bakgrunn av sensitivitetsanalysen (vedlegg C). I tillegg er likning 13 brukt til å avgjøre om avstanden mellom brannen og bygningen er innenfor godkjente verdier. Likningen gir en verdi på 3,3 som ligger mellom 2,7 og 5,7, og avstanden er derfor godkjent.

Brennerens varmeavgivelsesrate og dimensjoner

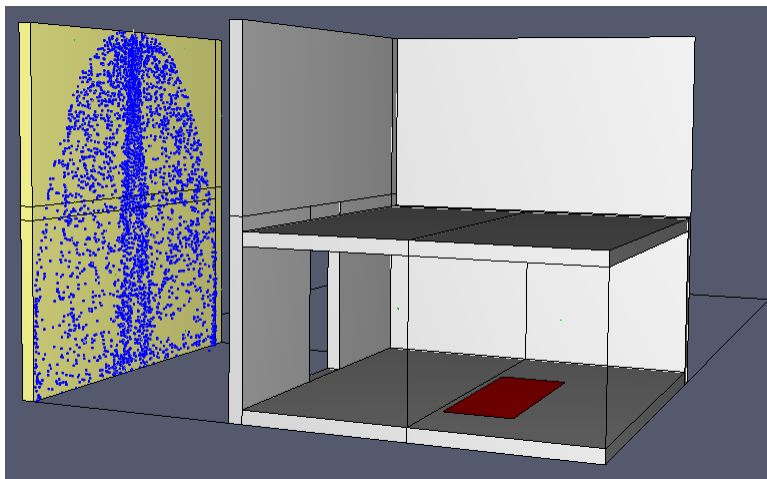
Brennerens dimensjoner og varmeavgivelsesrate er avgjørende for simuleringenes resultater, og disse er beregnet ved å bruke teorien presentert i kapittel 3.3, *Grunnleggende brannteori*. Brennerens varmeavgivelsesrate og areal er satt til henholdsvis 6800 kW og 2,5 m², og HRRPUA i modellen er derfor satt til 2720 kW/m². Uttrykk for å kvalitetssikre varmeavgivelsesraten er også brukt i avgjørelsen. En detaljert oversikt over utregningene kan studeres i vedlegg A.

Samtidig er det valgt å bruke lik varmeavgivelsesrate for scenariene med én og flere fasadeåpninger. I et reelt scenario kan det tenkes at varmeavgivelsesraten ville vært høyere i et tilfelle med flere fasadeåpninger som følge av tilgang på mer luft. Et mål med simuleringene er derimot å direkte sammenligne temperaturøkningen ved én og flere fasadeåpninger, noe som ikke vil være mulig dersom varmeavgivelsesraten endres. Det ble derfor valgt å benytte lik varmeavgivelsesrate i begge scenariene.

Sprinkleranlegg

Som nevnt i kapittel 3.4, *Automatisk slokkeanlegg*, foreligger det ikke regelverk eller standarder rundt prosjektering av fasadesprinkling, og det er derfor ikke fulgt en spesifikk fremgangsmåte for modelleringen. Likevel er det forsøkt å sette opp en realistisk modell ved å studere andre typer sprinklersystem.

Det er valgt å sette sprinklerhodet øverst på veggen til motstående objekt, og i x -koordinaten som tilsvarer punktet midt i fasadeåpningen slik at vannet dekker et like stort areal på veggens begge sider overfor fasadeåpningen. Samtidig er vinkelen vannet strømmer ut med stilt inn for å etterligne fasadesprinkleranleggets vannstrøm mest mulig. Inspirasjon til dette er hentet fra figur 7.



Figur 21: Modellert fasadesprinkleranlegg.

I FDS er det mulig å enten oppgi vannstrøm i liter per minutt (L/min) eller å angi verdier for trykk og k -faktor som beregner vannstrømmen. For å gjøre modellen så enkel som mulig er det valgt å undersøke hvilken vannstrøm som er brukt i boligsprinkling da det ikke foreligger tall eksplisitt for fasadesprinkling. Søk på internett viser at vannstrøm bruker å ligge mellom 50 - 80 L/min per dyse, og i henhold til British Standard skal et sprinklersystem levere 60 L/min per dyse til husholdninger og boligstrøk (BS 9251, 2005). I analysen er det derfor valgt en vannstrøm på 60 L/min.

Utdata

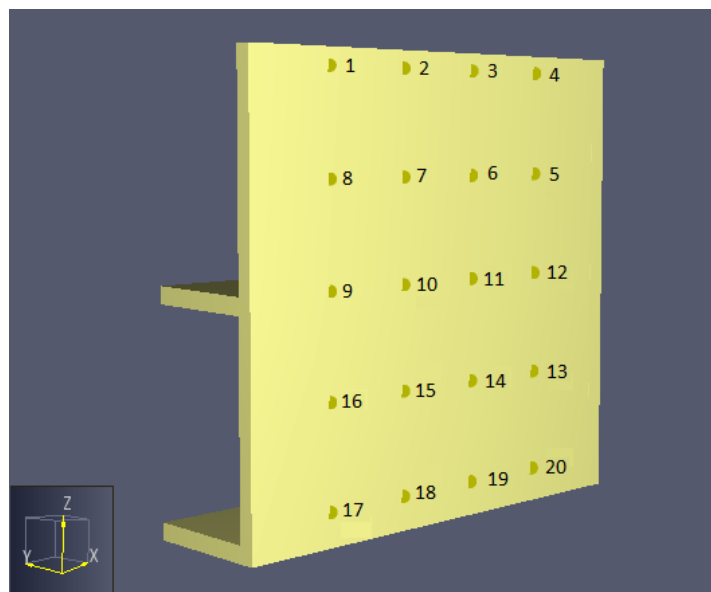
FDS har flere alternativ til enheter som måler ulike verdier, og tabell 4 viser en oversikt over enhetene som er brukt i modellen og hva disse måler.

For å undersøke hvor mye varme som genereres inne i brannrommet settes det opp et heat release rate device der inne. Samtidig er det av interesse å måle temperaturutviklingen inne i brannrommet, og det settes derfor opp et temperaturslice som viser denne utviklingen i et plan. Det er vektlagt at dette planet går gjennom fasadeåpningen for å kunne studere nøytralplanet som i teorien skal oppstå der. I tillegg vil temperaturen på utsiden av fasadeåpningen måles i et temperaturslice som tar for seg et spesifisert volum, og vil i dette tilfellet gjelde hele volumet mellom de to bygningene.

Tabell 4: Modellens utdata.

Sensor	Verdi
Solid-phase device	Veggtemperatur (°C)
Solid-phase device	Netto varmeffluks (kW/m ²)
Solid-phase device	Konvektiv varmeffluks (kW/m ²)
Heat release rate device	HRR i et volum (kW)
Temperaturslice	Temperatur i et plan (°C)
Temperaturslice	Temperatur i et volum (°C)

Figur 22 viser en oversikt over hvor sensorene som måler temperatur og varmekraft er plassert i modellen. Sensorer som er nummerert med oddetall og partall representerer henholdsvis temperatur i celsius og varmekraft i kW/m^2 , der 10 sensorer måler varmekraft og 10 måler temperatur. Det ble valgt å ikke sette opp flere sensorer for å spare prosesseringstid, samtidig som at 20 sensorer anses som tilstrekkelig til å fange opp kritiske punkter.



Figur 22: Oversikt over nummererte sensorer. Oddetall og partall representerer henholdsvis temperatur i celsius og varmekraft i kW/m^2 .

4.4 Simuleringsoppsett

Oppsettet er delt inn i 16 ulike scenarier der alle scenariene kjøres med simuleringslengde på 60 sekunder. Scenariene er undersøkt med fire ulike vindhastigheter med og uten sprinkler, og to ulike oppsett for ulikt antall fasadeåpninger.

Tabell 5: Simuleringsoppsett.

Nr	Vindhastighet (m/s)				Fasadeåpninger		Sprinkler	
	0	2,7	7,8	12,9	1	3	Ja	Nei
1	x				x		x	
2		x			x		x	
3			x		x		x	
4				x	x		x	
5	x					x	x	
6		x				x	x	
7			x			x	x	
8				x		x	x	
9	x				x			x
10		x			x			x
11			x		x			x
12				x	x			x
13	x					x		x
14		x				x		x
15			x			x		x
16				x		x		x

5 Resultater

Dette kapitlet er studiens resultatdel der data fra simuleringene vil presenteres på en ryddig og systematisk måte. 16 ulike scenario er undersøkt og det er store mengder rådata som skal bearbeides. På grunn av dette er det gjort et utvalg av de mest interessante og distinkte funnene og disse vil presenteres i form av kurver, tabeller og illustrasjoner fra Smokeview. Simuleringslengde på 60 sekunder ble valgt på grunnlag av sensitivitetsanalysen (vedlegg C) og er brukt i alle scenariene. Simuleringene er kjørt i ulike kombinasjoner av en eller flere fasadeåpninger, ulike vindhastigheter og med eller uten sprinkleranlegg. Resultatene er hovedsakelig delt i to deler med én fasadeåpning og flere fasadeåpninger, som igjen er delt inn i ulike deler. I resultatene vil det også refereres til ulike sensorer, så det anbefales å ha oversikten over hvor disse er plassert lett tilgjengelig (figur 22).

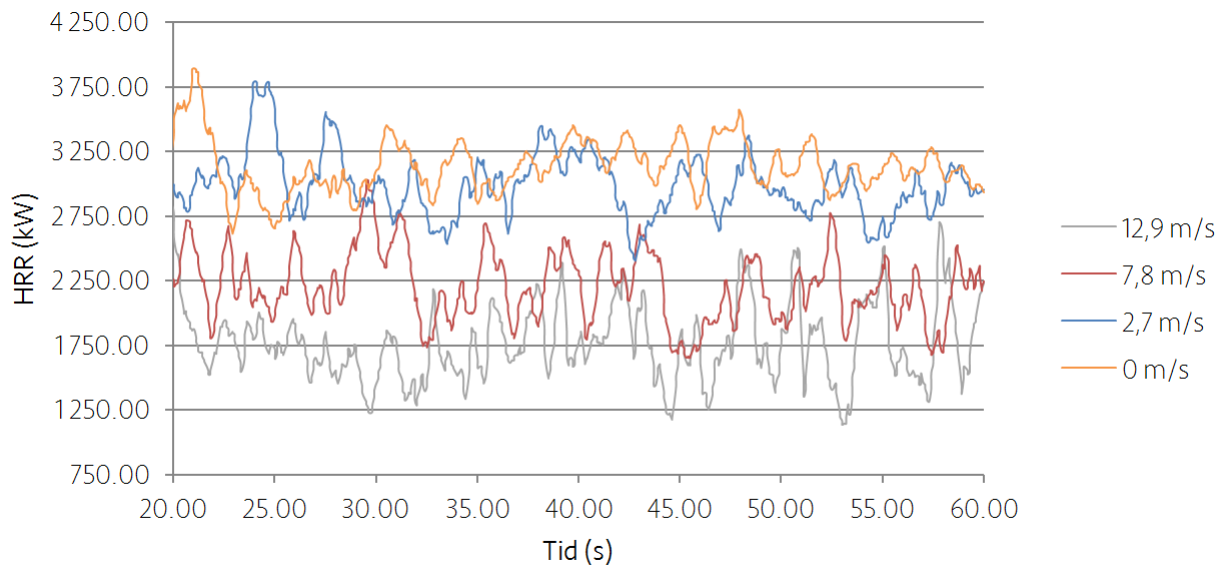
5.1 Én fasadeåpning

I alt er det kjørt åtte simuleringer i scenariet med én fasadeåpning (én dør og ingen vinduer) som er delt opp i scenarier med og uten sprinkling. Noen forhold er derimot like i begge scenariene, som varmeutvikling og varmeavgivelsesrate inne i brannrommet samt temperaturer utenfor fasadeåpningen i brannrommet og massestrøm av luft inn til brannrommet. Disse resultatene vil derfor presenteres først uavhengig av sprinkling.

Varmeavgivelsesrate

Varmeavgivelsesraten inne i brannrommet er målt i alle simuleringene. Figur 23 viser varmeavgivelsesratens utvikling ved de ulike vindhastighetene. Brannen bruker ca. 20 sekunder på å stabilisere seg og derfor tar figuren for seg tiden fra 20 - 60 sekunder.

Som figuren viser så avgir scenariene med fravær av vind og vindhastighet på 2,7 m/s ca. lik varmeavgivelsesrate over hele tidslinjen, bare at verdiene ved 2,7 m/s fluktuerer litt mer. Deretter vil økt vindhastighet føre til generelt lavere gjennomsnittlig varmeavgivelsesrate, samt større fluktueringer i verdiene. Tabell 6 viser en oversikt over gjennomsnittlig HRR for de ulike vindhastighetene fra 20 - 60 sekunder. Det kommer tydelig frem at varmeavgivelsesraten synker med økt vindhastighet, noe figur 23 også viser. Tabellen fanger derimot ikke opp tendensene til større variasjoner i verdiene med økt vindhastighet.



Figur 23: Varmeavgivelsesrate inne i brannrommet ved ulike vindhastigheter.

Tabell 6: Gjennomsnittlig HRR i brannrom ved ulike hastigheter.

Vind (m/s)	HRR (kW)
0	3140
2,7	3000
7,8	2210
12,9	1770

Luftstrøm

Flow measuring device som er satt opp i fasadeåpningen viser at luftstrømmen inn til brannrommet går ned med økt vindhastighet, noe som samsvarer med at varmeavgivelsesraten også går ned. Tabell 7 viser en oversikt over gjennomsnittlig luftstrøm inn til brannrommet ved ulike vindhastigheter. Også her er verdiene regnet fra en tid på 20 - 60 sekunder.

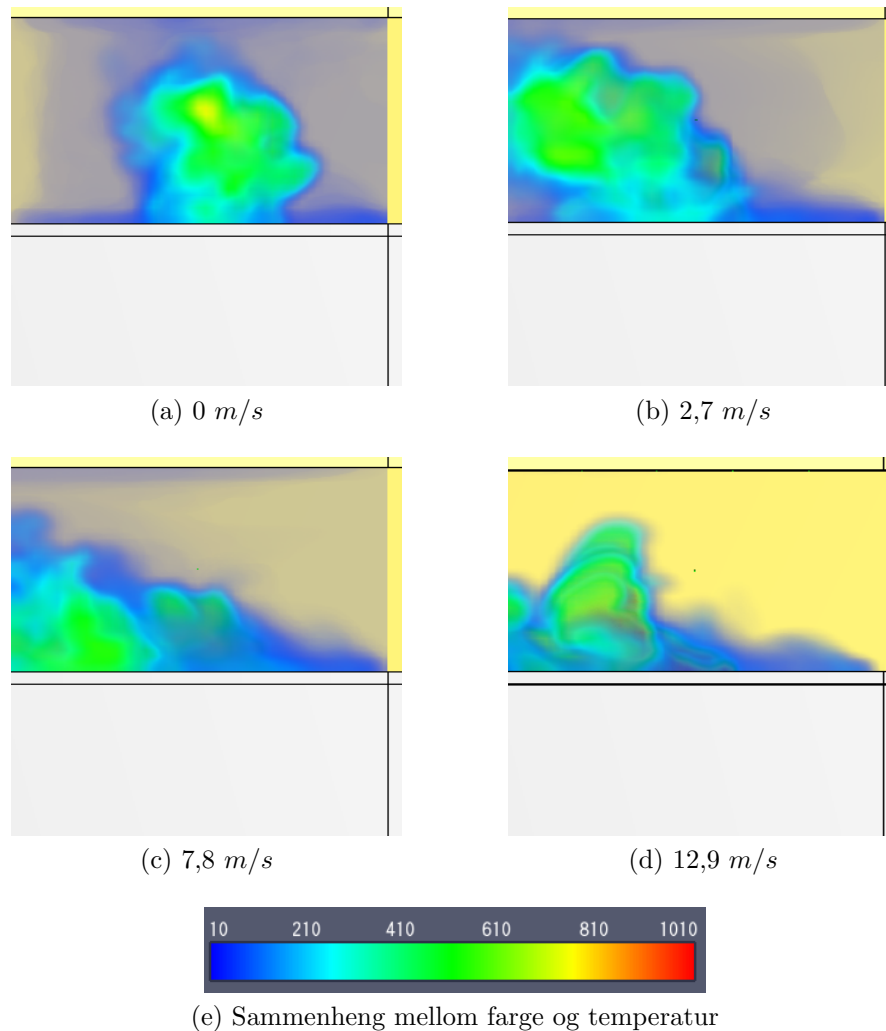
Tabell 7: Gjennomsnittlig massestrøm av luft inn til brannrom ved ulike hastigheter.

Hastighet (m/s)	Luftstrøm (kg/s)
0	1,12
2,7	1,08
7,8	0,85
12,9	0,78

Eksterne temperaturer og flammer

Et 3D-slice som måler temperatur i et volum er satt inn for å undersøke temperaturene utenfor fasadeåpningen. Det må understrekes at det er snakk om temperatur i figur 24 og ikke selve brannplumen, da det kan se slik ut på figuren. Samtidig er det i Smokeview mulig å se plumen i simuleringen, og den vil derfor også kommenteres. Figurer fra dette er derimot ikke inkludert da det som er interessant å se på er hvor plumen befinner seg gjennom scenariet (altså hvor det foregår forbrenning) og ikke kun et stillbilde.

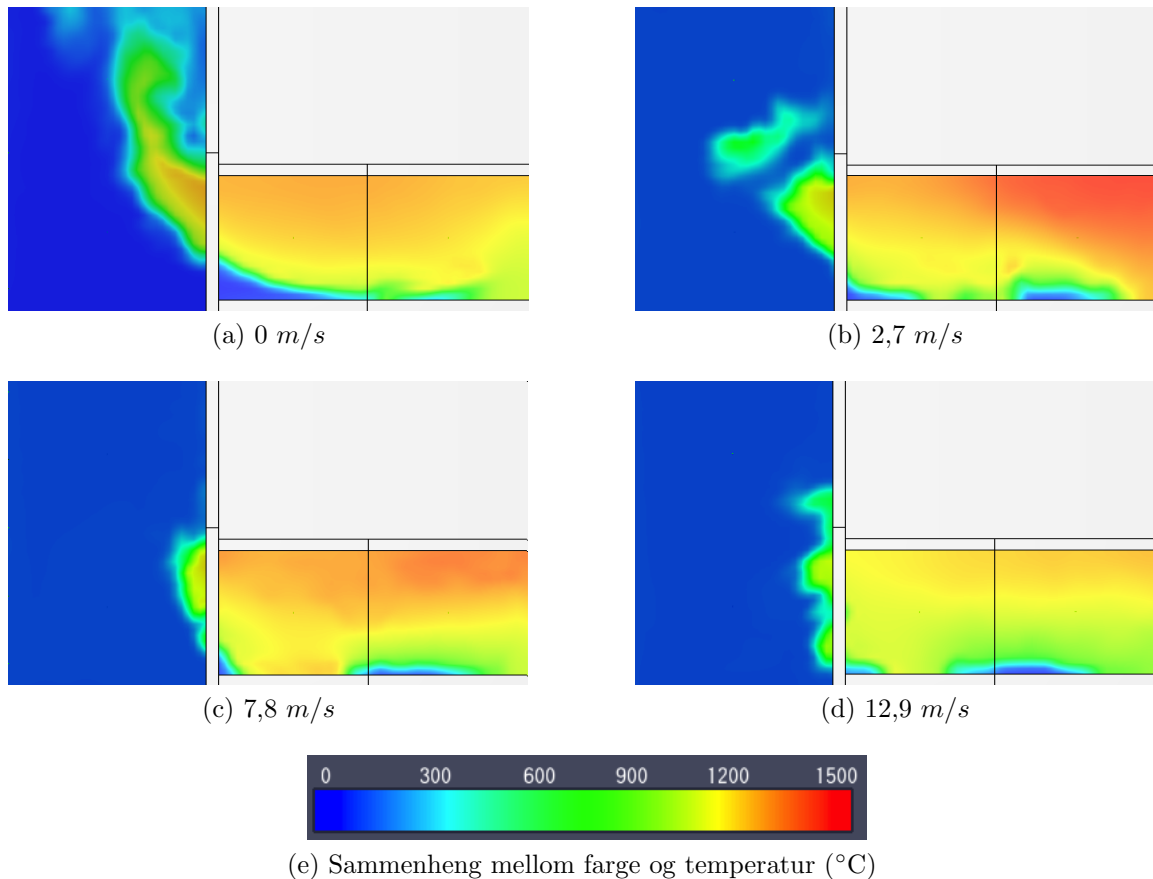
Figur 24 viser at temperaturfordelingen varierer og føres medvinds i økt omfang etter hvert som vindhastigheten øker. Scenariet på 7,8 m/s viser den jevneste temperaturskyen, samtidig som at det i scenariet med 12,9 m/s kan se ut til at temperaturene blir mer undertrykt. Det ser også ut til at omgivende temperatur er lavere i dette tilfellet. De høye temperaturene rekker nesten bort til motstående vegg i scenariet med 2,7 m/s. I scenariet med fravær av vind er situasjonen mer enkel å forutsi da plumen vil stige til værs som følge av brannens oppdriftskrefter, og det er mer forutsigbart hvor høye temperaturer vil oppstå. Det kommer også frem fra Smokeview at den eksterne flammen er til stede utenfor fasadeåpningen gjennom hele scenariet ved alle vindhastighetene etter at brannen har stabilisert seg, og den vil få en mer uforutsigbar flammebane ved tilstedeværelse av vind.



Figur 24: Eksterne temperaturer sett ovenfra ved ulike vindhastigheter.

Varmeutvikling

Simuleringene viser at varmeutviklingen inne i brannrommet øker ved visse vindhastigheter. Scenariet med 2,7 m/s øker raskest, etterfulgt av 7,8 m/s. Ved fravær av vind øker temperaturen litt raskere enn scenarioet med 12,9 m/s. Figur 25 viser denne utviklingen etter 30 sekunder og er gjengitt fra Smokeview. Samtidig viser figuren at temperaturdistribusjonen i alle tilfellene bortsett fra vindhastighet på 2,7 m/s er relativt jevn. Dog bør leseren være obs på at utviklingen kun er målt i et plan og ikke i et volum. Verdiene som kan tydes på figuren er derfor sannsynligvis ikke uniforme i hele brannrommet.



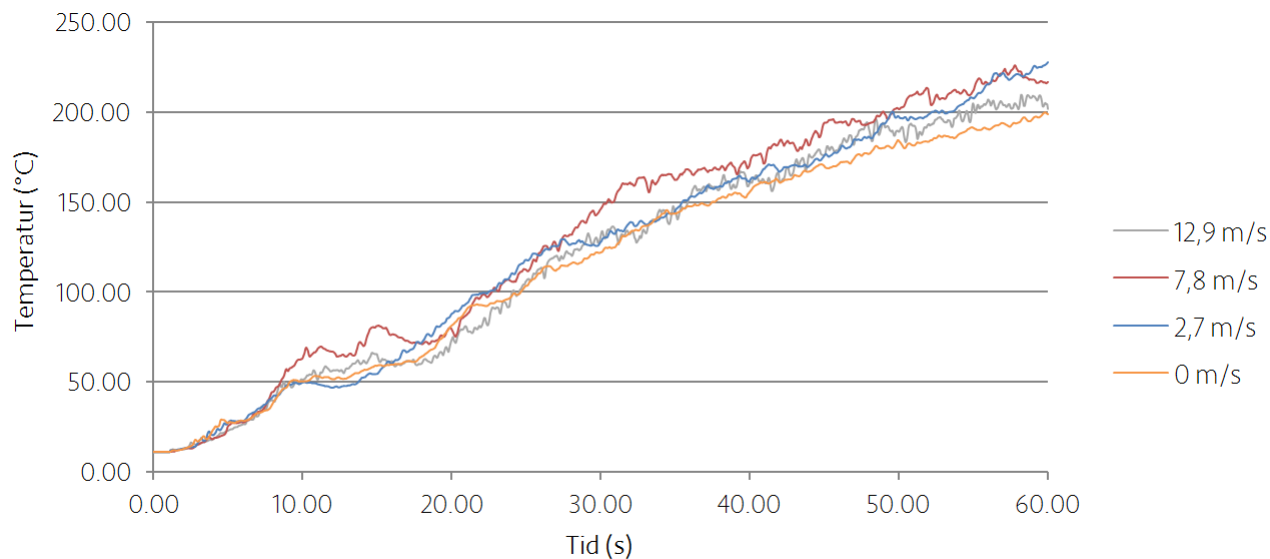
Figur 25: Varmeutvikling ved ulike vindhastigheter med én fasadeåpning.

5.1.1 Uten sprinkling

Scenariene uten sprinkleranlegg og én fasadeåpning tar for seg tilfeller med fire ulike vindhastigheter.

Temperatur

Temperaturutviklingen ved de ulike hastighetene varierer noe og figur 26 viser en oversikt over temperaturutviklingen i sammenheng med vindhastighetene. Figuren viser at scenariet med høyest og lavest maksimaltemperatur er henholdsvis 2,7 m/s og 0 m/s med en temperatordifferanse på 28 °C. Likevel er det tydelig at scenariet med hastighet på 7,8 m/s har mest kritisk utvikling frem til rundt de siste 5 sekundene av simuleringen. Temperaturutviklingen ved 12,9 m/s følger ca. samme utvikling som ved fravær av vind, bare at temperaturen generelt ligger litt høyere etter ca. 35 sekunder. Utviklingen ved 0 m/s ser ut til å være den mest stabile med minst fluktueringer. Tabell 8 viser en oversikt over de høyeste temperaturene som er målt med tilhørende sensor.



Figur 26: Oversikt over temperaturutvikling ved ulike vindhastigheter uten sprinkling. Tallene i parentes representerer vindhastighet.

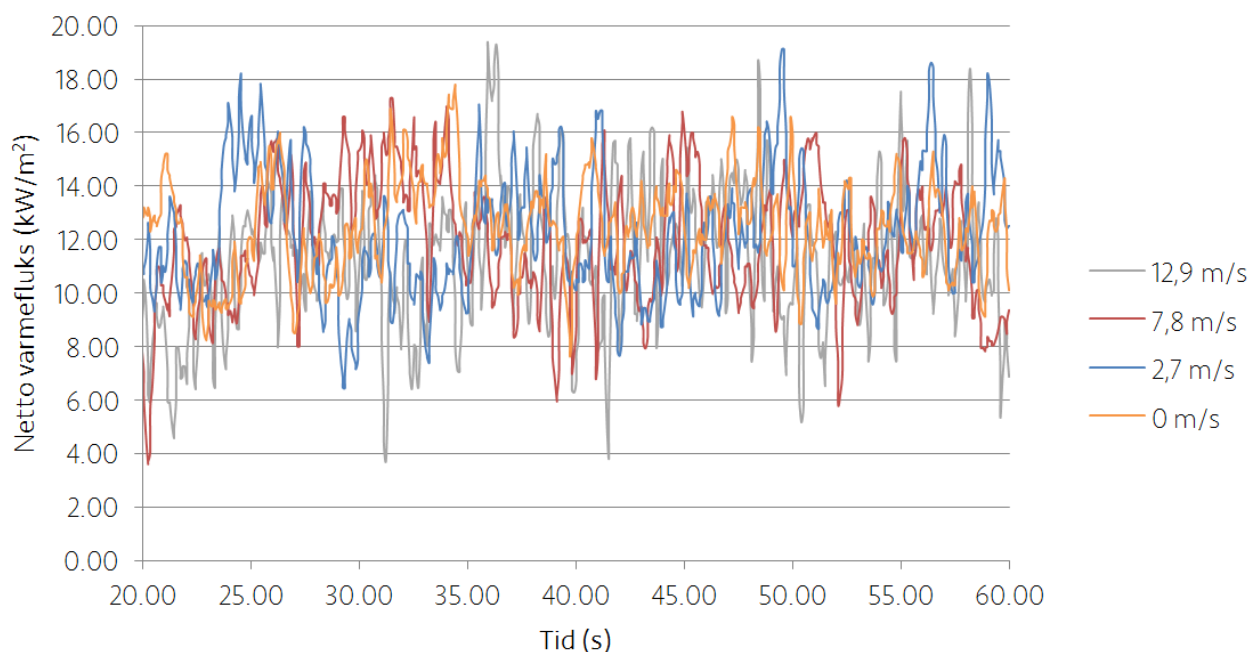
Tabell 8: Vindhastighet samt tilhørende høyeste målte temperatur og sensor.

Vind (m/s)	Makstemp. (°C)	Sensor
0	199	14
2,7	227	14
7,8	217	14
12,9	202	14

Varmefluks

Brannen bruker litt tid på å nå en stabil tilstand og verdiene for varmekraft er derfor beregnet fra 20 - 60 sekunder og ikke fra simuleringstart.

Figur 27 viser en oversikt over netto varmekraft ved ulike vindhastigheter. Netto varmekraft er den sammenlagte effekten av strålingskraft og konvektiv varmekraft. Det kan være noe vanskelig å hente ut konkret data fra figuren, men den er likevel inkludert for å skape et overordnet inntrykk av hvordan varmekraften varierer. For å få eksakte tall på akkumulert



Figur 27: Oversikt over varmekraftintensitet ved ulike vindhastigheter uten sprinkling.

varmekraft er arealet under kurven estimert ved bruk av numerisk integrasjon i MatLab, og tabell 9 viser en oversikt over disse verdiene. Tabellen inkluderer verdier for netto varmekraft, strålingskraft og konvektiv varmekraft. Negative verdier for konvektiv varmekraft indikerer et konvektivt varmetap. Tabellen inneholder også informasjon om hvor temperaturene er målt ved å inkludere nummerert sensor. Det kommer tydelig frem fra tabell 9 at jo høyere vindhastighet desto høyere konvektivt varmetap. Samtidig kommer det frem at vindhastighet på 7,8 m/s viser høyere verdi av absorbert strålingskraft sammenlignet med 2,7 og 12,9 m/s.

Tabell 9: Akkumulert varmekraft uten sprinkling ved ulike vindhastigheter.

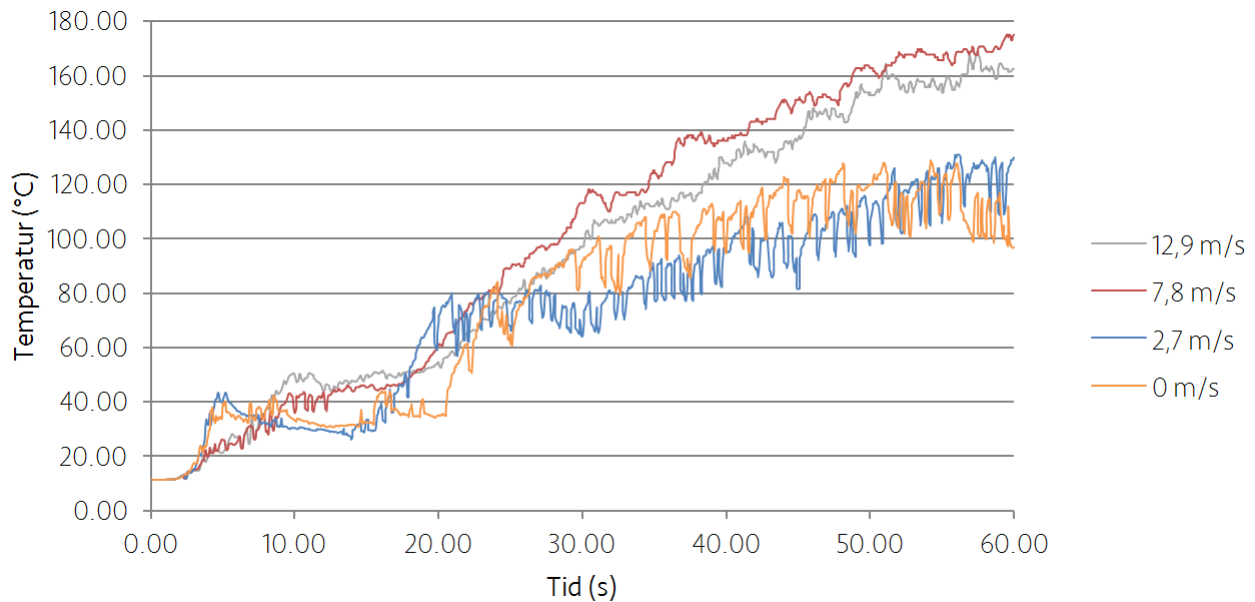
Vindhastighet (m/s)	Stråling (kW/m ²)	Konvektiv (kW/m ²)	Netto (kW/m ²)	Sensor
0	534,1	-34,7	499,4	10
2,7	524,6	-37,2	487,4	10
7,8	528,4	-50,9	477,5	10
12,9	515,6	-68,2	447,4	10

5.1.2 Med sprinkling

Scenariet med sprinkling tar for seg en vannstrøm på 60 L/min som strømmer nedover fasaden gjennom hele simuleringstiden. Sprinklingen er forsøkt modellert slik at vandråpene berører veggene hele veien for å simulere effekten fasadesprinkler i teorien skal ha. Det er kjørt fire simuleringer med sprinkling og én fasadeåpning, med tilhørende fire ulike vindhastigheter.

Temperatur

Figur 28 viser temperaturutviklingen ved ulike vindhastigheter under påvirkningen av sprinkleranlegget. Vindhastighetene med mest og minst kritisk temperaturutvikling er henholdsvis 7,8 og 0 m/s. Samtidig viser figuren at scenariet med vindhastighet på 12,9 m/s har en mer kritisk temperaturutvikling enn 2,7 m/s, i motsetning til i scenariet uten vind. I tillegg er det scenariet med fravær av vind som fluktuerer mest.



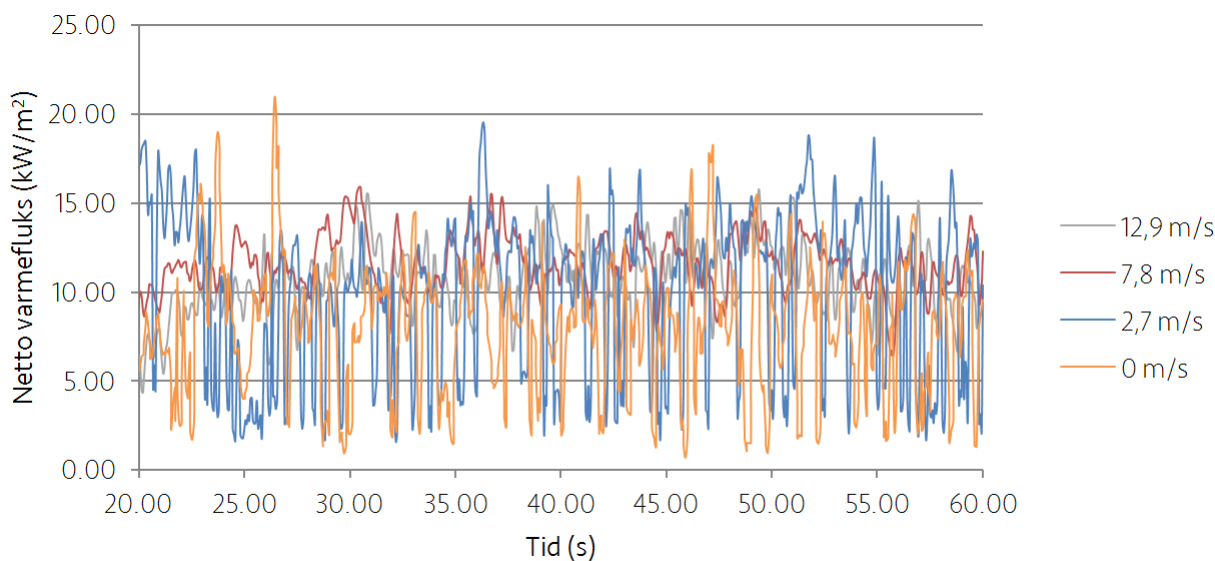
Figur 28: Oversikt over temperaturutvikling ved ulike vindhastigheter med sprinkling på 60 L/min.

Tabell 10: Vindhastighet samt tilhørende makstemperatur og sensor.

Vind (m/s)	Makstemp. (°C)	Sensor
0	96,9	11
2,7	118	11
7,8	175	9
12,9	163	11

Varmefluks

Figur 29 viser en oversikt over varmekraftintensiteten ved ulike vindhastigheter fra 20 - 60 sekunder. Sammenlignet med figur 27 kan en tydelig se at verdiene generelt er lavere. I dette tilfellet er det ikke like tydelig hvilke scenarier som har de laveste verdiene, men det kan fortsatt tydes hvilke topper som skiller seg ut og at disse toppene øker med økt vindhastighet. Det kan også tydes av figuren at fravær av vind holder lavere verdier. Tabell 11 viser verdier for akkumulert varmekraft for ulike vindhastigheter med sprinkling.



Figur 29: Oversikt over varmekraftintensitet ved ulike vindhastigheter med vannstrøm på 60 L/min.

Tabell 11: Akkumulert varmefluks med sprinkling ved ulike vindhastigheter.

Vindhastighet (m/s)	Stråling (kW/m ²)	Konvektiv (kW/m ²)	Netto (kW/m ²)	Sensor
0	334,2	-15,4	318,8	7
2,7	425,5	-32,8	392,7	10
7,8	511,7	-45,2	466,5	15
12,9	496	-66	430	15

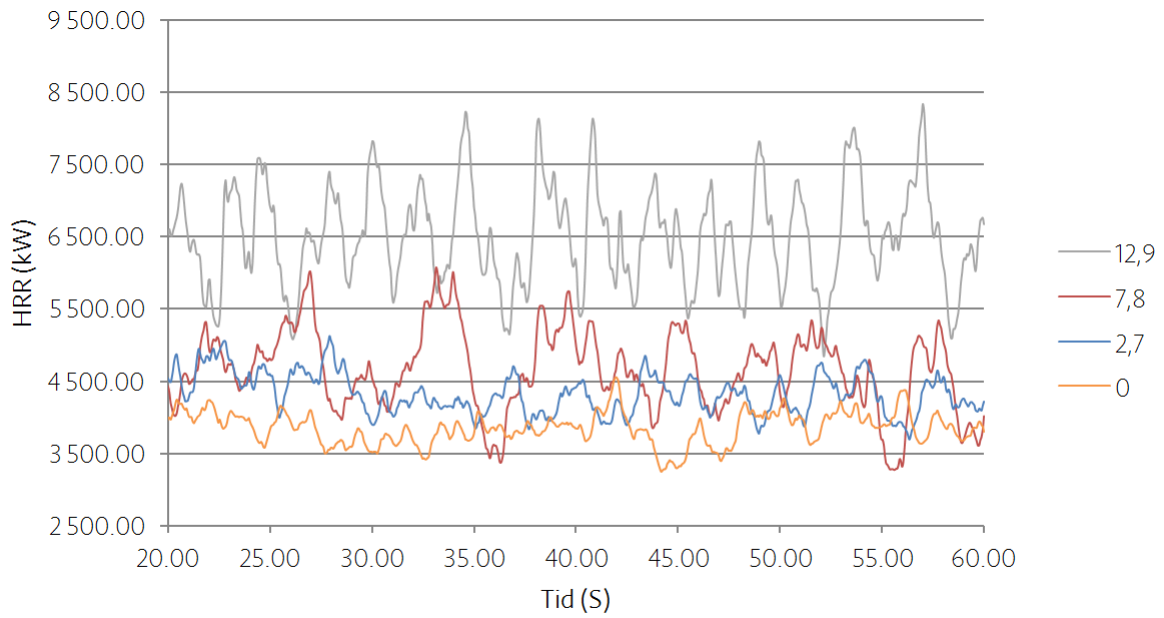
5.2 Flere fasadeåpninger

Scenariet med flere fasadeåpninger tar for seg to vinduer og en dør, og det er til sammen kjørt åtte simuleringer; fire uten sprinkling og fire med. På samme måte som i kapittel 5.1, *Én fasadeåpning*, vil forhold som er like i begge scenariene presenteres først. Dette gjelder varmeavgivelsesrate, luftstrøm, varmeutvikling og temperaturer utenfor fasadeåpningen (døren).

Varmeavgivelsesrate

I motsetning til scenariet med kun én fasadeåpning så stiger varmeavgivelsesraten i takt med vindhastigheten, hvilket bekreftes av figur 30 som viser denne utviklingen fra 20 - 60 sekunder. Også her videreføres tendensen med distinkte topper ved økt vindstyrke. Det kommer tydeligst frem i scenariet med vindhastighet på 12,9 m/s, der den høyeste og laveste verdien er henholdsvis 8330 og 4840 kW (figur 30).

Tabell 12 viser tydeligere forskjellen på de ulike hastighetene der gjennomsnittsverdien av varmeavgivelsesraten er regnet ut for de 4 ulike scenariene. Tabellen viser at det er en differanse på 2640 kW mellom den høyeste og laveste vindhastigheten. Samtidig viser tabellen at differansen mellom 0, 2,7 og 7,8 m/s ikke overskrider 550 kW, men forskjellen fra 7,8 til 12,9 m/s er på 1850 kW som er over en tredobling.



Figur 30: Varmeavgivelsesrate inne i brannrom ved ulike vindhastigheter med flere fasadeåpninger.

Tabell 12: Gjennomsnittlig HRR i brannrom ved ulike hastigheter.

Vind (m/s)	HRR (kW)
0	3860
2,7	4100
7,8	4650
12,9	6500

Luftstrøm

Luftinnstrømning gjennom døren er også målt i dette scenariet, og resultatene viser at verdiene øker ved økt vindhastighet. Tabell 13 viser en oversikt over gjennomsnittsverdiene for innstrømning av luft gjennom døren for de ulike vindhastighetene, og det er tydelig at vindhastigheten på 12,9 m/s er tilfellet med høyest luftinnstrømning på 4,3 kg/s.

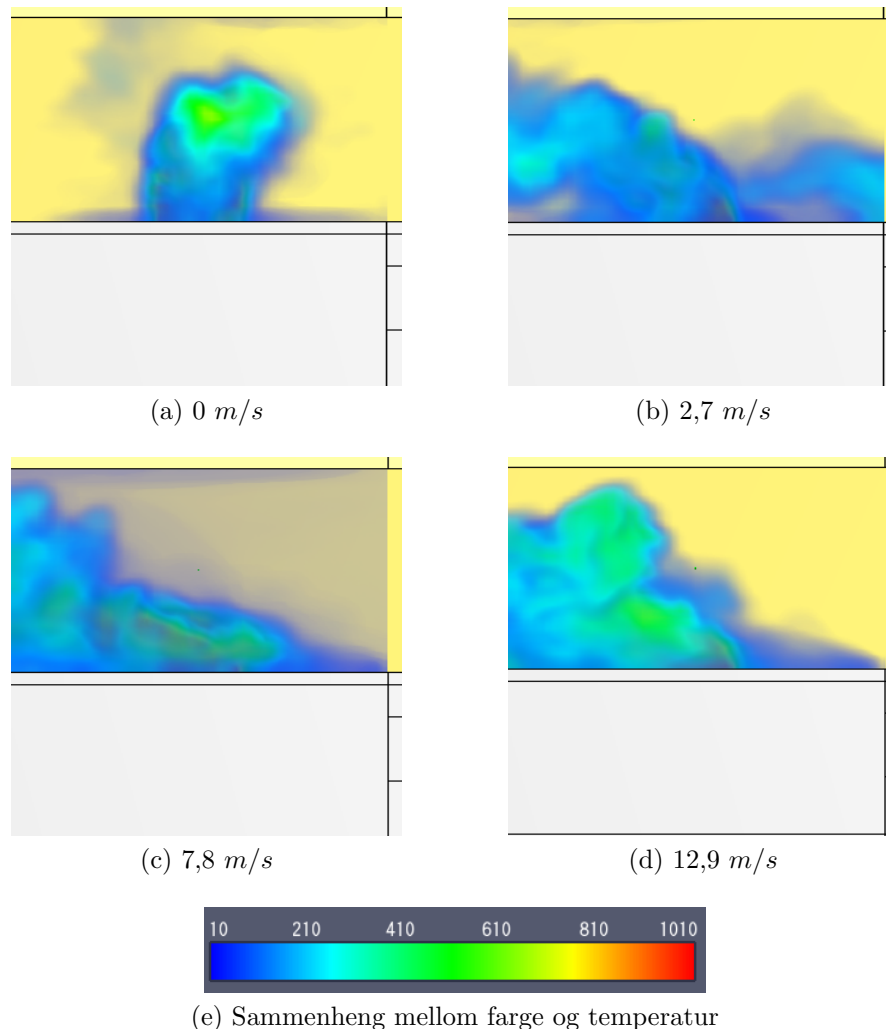
Tabell 13: Gjennomsnittlig massestrøm av luft inn til brannrom ved ulike hastigheter.

Hastighet (m/s)	Luftstrøm (kg/s)
0	1,78
2,7	1,76
7,8	1,95
12,9	4,3

Eksterne temperaturer og flammer

I likhet med scenariet med én fasadeåpning viser figur 31 at temperaturenes rekkevidde øker medvinds etter hvert som hastigheten øker, men temperaturen er generelt lavere. Samtidig ser det ut til at temperaturene har en litt mer voldsom utstrekning sammenlignet med figur 24, spesielt i scenariet med 7,8 m/s. I scenariet uten vind kan det virke som at temperaturene er mer konsentrerte. Samtidig kan det se ut som at omgivende temperatur er høyere ved scenariet på 7,8 m/s sammenlignet med de andre vindhastighetene i figur 31.

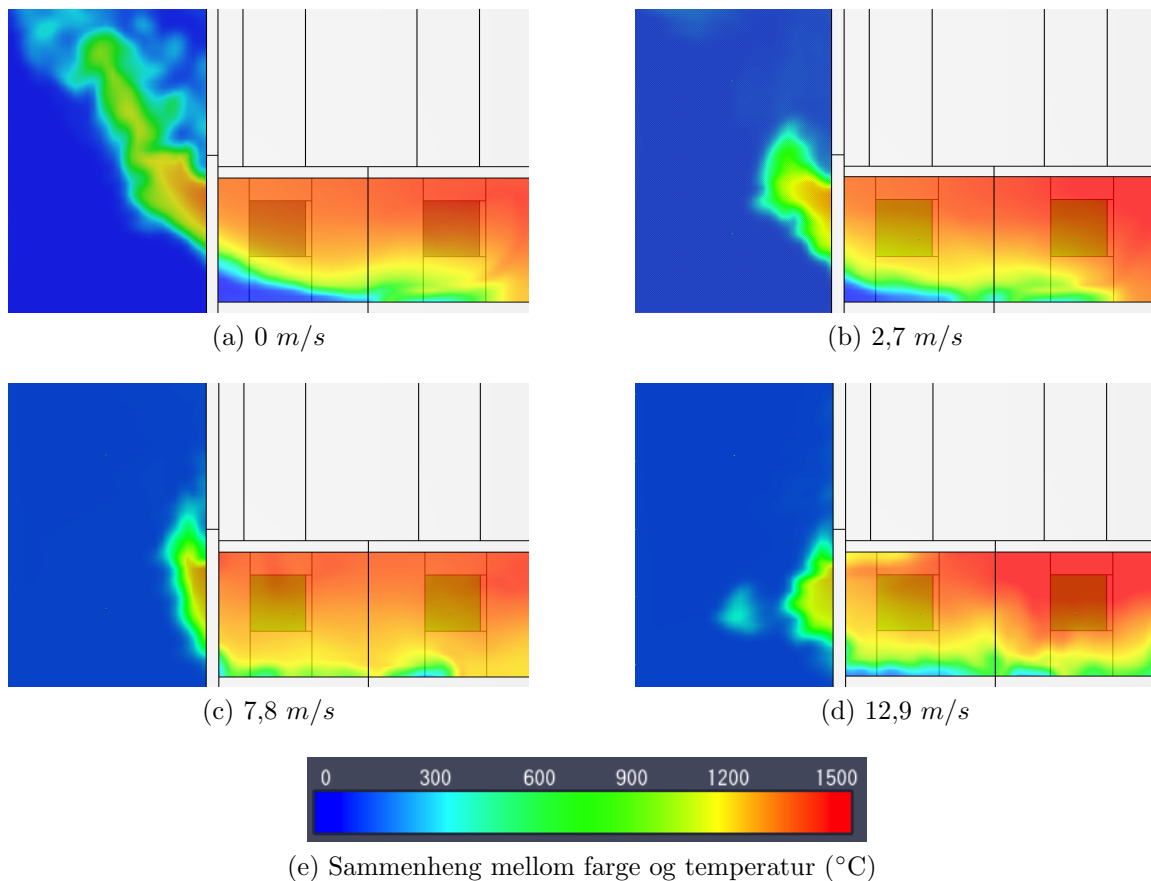
Smokeview viser også at den eksterne flammen befinner seg på ulike steder ved ulike hastigheter. Ved fravær av vind står det flammer ut døren og det ene vinduet. Ved 2,7 m/s står flammene ut alle tre fasadeåpningene, men ved 7,8 m/s står den kun ut døren. I scenariet med 12,9 m/s befinner flammen seg sjeldent på utsiden og det kan se ut til at det meste av forbrenningen foregår inne i brannrommet.



Figur 31: Eksterne temperaturer sett ovenfra ved ulike vindhastigheter.

Varmeutvikling

I scenariet med flere fasadeåpninger skjer varmeutviklingen raskere sammenlignet med scenariet med kun én fasadeåpning, noe som er forventet som følge av økt luftgjennomstrømning. Resultatene fra Smokeview viser en distinkt økning i temperatur fra scenariet med kun én fasadeåpning (figur 25) på samme tidspunkt (30 sekunder), som vist i figur 32. Figuren viser at i dette tilfellet har scenariet med 12,9 m/s den mest kritiske utviklingen i tillegg til mest ujevn temperaturfordeling, etterfulgt av 2,7 m/s. Tregest utvikling er vindhastighet på 7,8 m/s, etterfulgt av scenariet med fravær av vind. Til gjengjeld har de to sistnevnte tilfellene jevnere temperaturfordeling.



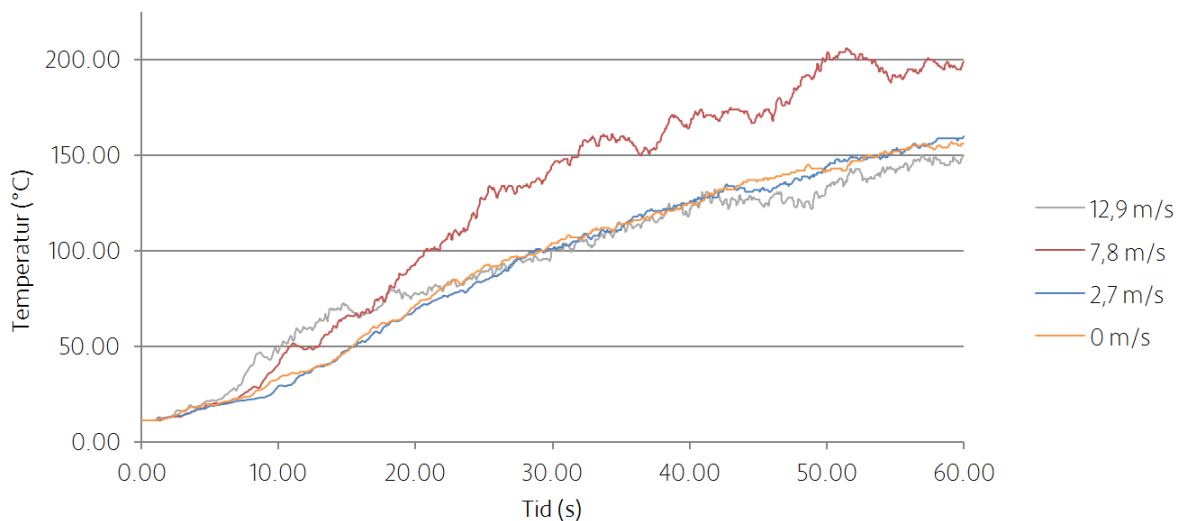
Figur 32: Varmeutvikling ved ulike vindhastigheter med flere fasadeåpninger.

5.2.1 Uten sprinkling

Det er kjørt til sammen fire simuleringer uten sprinkling i scenariet med flere fasadeåpninger, og simuleringslengden i alle scenariene er 60 sekunder.

Temperatur

Temperaturutviklingen for de fire hastighetene representeres i figur 33, og det er sensorene med den mest kritiske temperaturutviklingen som er fremstilt. Figuren viser at hastighetene på 0, 2,7 og 12,9 m/s stort sett utvikler seg likt, men scenariet med 7,8 m/s skiller seg merkbart ut med en maksimaltemperatur på 206 °C og en generelt høyere temperatur gjennom hele tidslinjen. Vindhastigheten med den minst kritiske utviklingen er scenariet med 12,9 m/s. Tabell 14 viser en oversikt over høyeste målte temperaturer med tilhørende sensor.



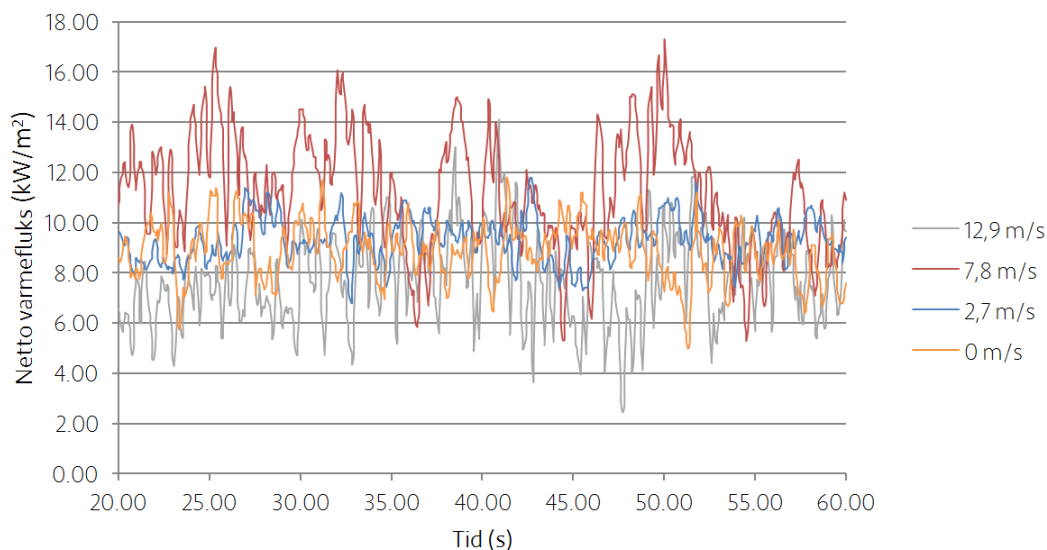
Figur 33: Oversikt over temperaturutviklingen ved ulike vindhastigheter med flere fasadeåpninger uten sprinkling.

Tabell 14: Vindhastighet samt tilhørende maksimumstemperatur og sensor.

Vind (m/s)	Makstemp. (°C)	Sensor
0	156	14
2,7	160	14
7,8	206	14
12,9	150	14

Varmefluks

Figur 34 representerer netto varmekraft ved ulike vindhastigheter med flere fasadeåpninger uten sprinkling, og det er tydelig at vindhastigheten på 7,8 m/s skiller seg ut. Tabell 15 viser verdier for akkumulert varmekraft for ulike vindhastigheter med flere fasadeåpninger uten sprinkling.



Figur 34: Oversikt over varmeffluksintensitet ved ulike vindhastigheter med flere fasadeåpninger uten sprinkling.

Tabell 15: Akkumulert varmeffluks med flere fasadeåpninger uten sprinkling.

Vindhastighet (m/s)	Stråling (kW/m ²)	Konvektiv (kW/m ²)	Netto (kW/m ²)	Sensor
0	380,5	-8,4	372,1	10
2,7	398,2	-25,7	372,5	15
7,8	495,9	-46,8	449,1	15
12,9	358,1	-50	308,1	15

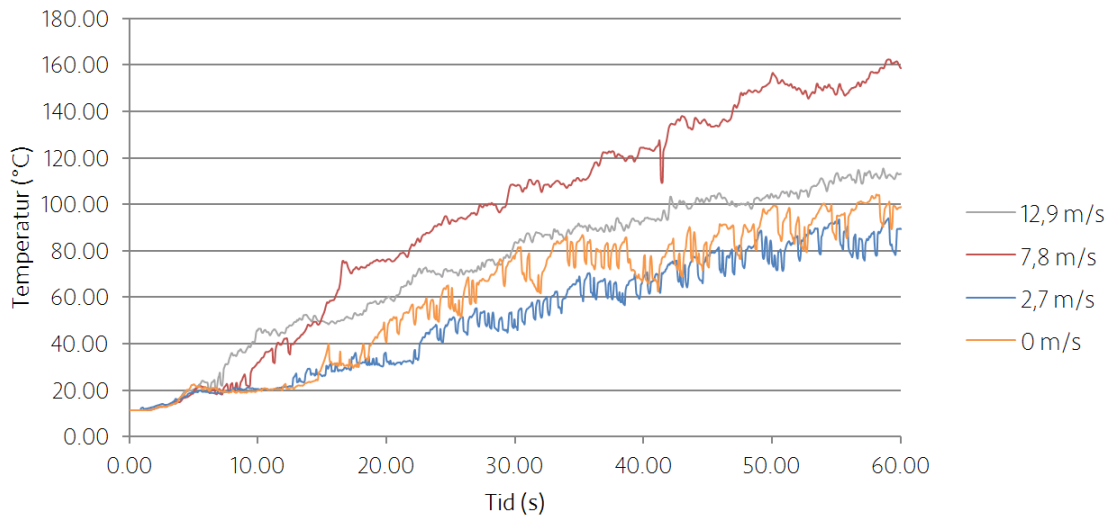
Tabellen viser at vindhastigheten på 7,8 m/s skiller seg tydelig ut med en differanse på 137,7 kW/m² fra den laveste verdien (12,9 m/s). Generelt ligger den ca. 100 kW/m² over de andre verdiene i strålingsfluks, med en noe lavere netto varmeffluks.

5.2.2 Med sprinkling

Det er kjørt fire simuleringer med sprinkling i scenariet med flere fasadeåpninger der sprinkler-systemet har en vannstrøm på 60 L/min. Også her er sprinkleranlegget modellert slik at det skal simulere en vannstrøm som treffer ytterveggen for å heve brannmotstanden, og alle scenariene har en simuleringslengde på 60 sekunder.

Temperatur

Figur 35 viser en oversikt over temperaturutviklingen med sprinkleranlegg ved de ulike vindhastighetene. Også her er det tydelig at scenariet med vindhastighet på 7,8 m/s utmerker seg med den mest kritiske utviklingen. De andre scenariene har en lavere makstempertur, og av disse viser scenariet med hastighet på 12,9 m/s den mest kritiske utviklingen. I motsetning til scenariet med kun én fasadeåpning viser figuren at en hastighet på 2,7 m/s har mindre kritisk utvikling enn ved fravær av vind.



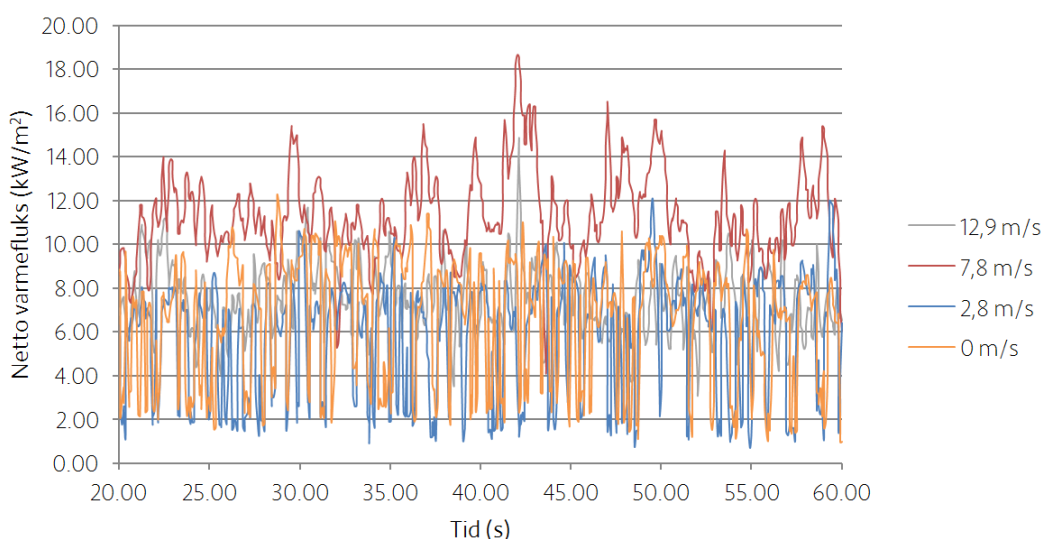
Figur 35: Oversikt over temperaturutvikling ved ulike vindhastigheter med flere fasadeåpninger med sprinkling.

Tabell 16: Vindhastighet samt tilhørende makstempertur og sensor.

Vind (m/s)	Makstemp. (°C)	Sensor
0	98,9	11
2,7	89,2	14
7,8	159	11
12,9	113	11

Varmefluks

Figur 36 representerer verdiene for varmekraft i scenariet med flere fasadeåpninger og sprinkling. Det er tydelig at hastigheten på 7,8 m/s viser de høyeste verdiene, noe som er gjennomgående i resultatene. Samtidig viser figuren at scenariet med sprinkling og flere fasadeåpninger generelt representerer de desidert laveste verdiene for målinger av varmekraft. Tabell 17 viser en oversikt over målt varmekraft ved flere fasadeåpninger med sprinkling ved ulike vindhastigheter, og det er tydelig at scenariet med vindhastighet på 7,8 m/s har den mest kritiske utviklingen.



Figur 36: Oversikt over varmekraftintensitet ved ulike vindhastigheter med flere fasadeåpninger med sprinkling.

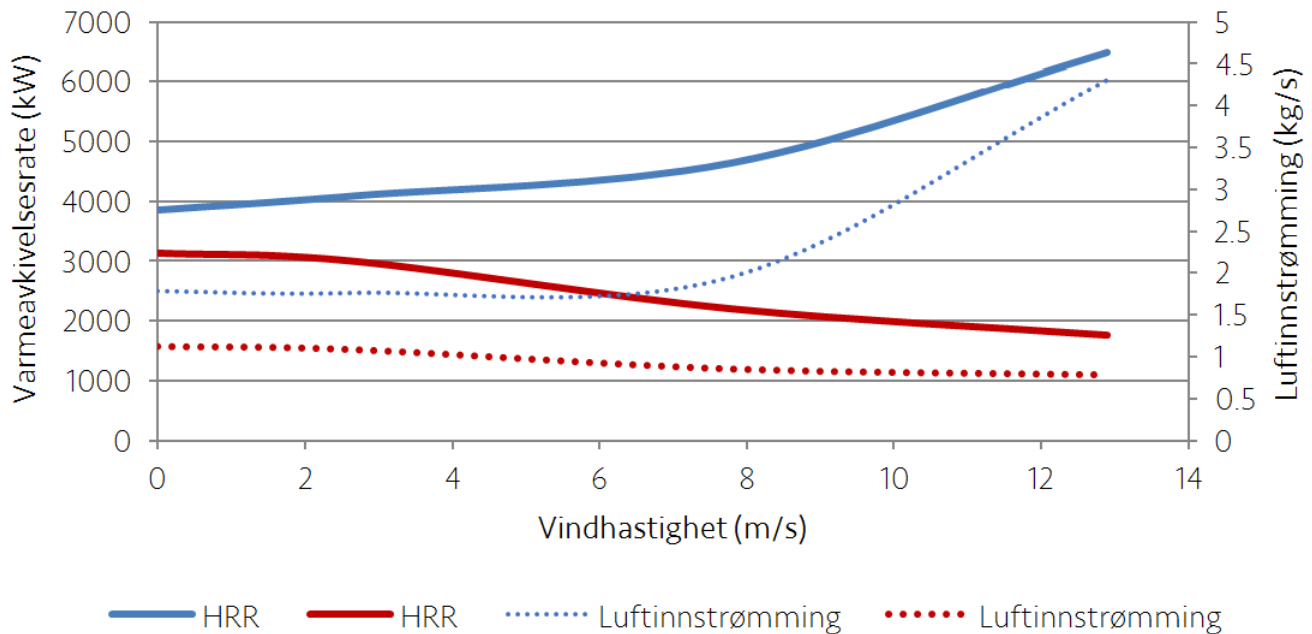
Tabell 17: Akkumulert varmekraft ved flere fasadeåpninger med sprinkling ved ulike vindhastigheter.

Vindhastighet (m/s)	Stråling (kW/m ²)	Konvektiv (kW/m ²)	Netto (kW/m ²)	Sensor
0	286,3	-24,8	261,5	10
2,7	252,8	-20,1	232,7	10
7,8	497	-45,4	451,6	15
12,9	351	-49,3	301,7	15

5.3 Oppsummering

Varmeavgivelsesrate

Resultatene viser at varmeavgivelsesraten går opp ved økt vindhastighet og flere fasadeåpninger, og ned ved økt vindhastighet og kun én fasadeåpning. Dette gjelder også for luftinnstrømmingen. Figur 37 illustrerer denne sammenhengen, der rød og blå kurve representerer henholdsvis én og flere fasadeåpninger. Heltrukket og stiplet linje viser henholdsvis varmeavgivelsesrate og luftinnstrømning. Ved å trekke disse kurvene er det mulig å se en kontinuerlig teoretisk sammenheng mellom vindhastighet, varmeavgivelsesrate og luftinnstrømning, og figuren viser at trenden tydelig endrer seg mellom ca. 7,5 og 8 m/s der kurven med flere fasadeåpninger får en brattere stigning både for varmeavgivelsesrate og luftinnstrømning. Kurven som illustrerer én fasadeåpning har en noe jevnere og mer forutsigbar kurve, som ser ut til å få en tilnærmet konstant innstrømning av luft etter hvert som hastigheten nærmer seg 14 m/s.



Figur 37: Sammenheng mellom økt vindhastighet, HRR og luftinnstrømning. Rød og blå kurve representerer henholdsvis én og flere fasadeåpninger.

Temperatur utenfor fasadeåpning

Temperaturene utenfor fasadeåpningen (døren) viser tydelig at scenariet med én fasadeåpning gir en temperatur som jevnt over er høyere enn ved flere fasadeåpninger. De to scenariene holder en temperatur på henholdsvis rundt 600 °C og 200 - 500 °C. Begge tilfellene viser forøvrig at påvirkning av vind vil føre temperaturene til steder som ellers ville vært uberørte, og at høy vindhastighet kan føre til lavere temperatur.

Temperaturutvikling i brannrom

Ved én fasadeåpning er temperaturutviklingen relativt uniform i alle scenariene etter 30 sekunder, men det kan tydes en høyere temperatur i scenariet med 2,7 m/s. Temperaturen ser ut til å ligge mellom 1100 - 1300 °C.

Ved flere fasadeåpninger er temperaturutviklingen noe uforutsigbar, men den holder jevnt over høyere temperatur enn ved én fasadeåpning. Temperaturen ser ut til å ligge mellom 1350 - 1500 °C. Tabell 18 viser en oversikt over temperatur ved de ulike hastighetene som er estimert ut fra figur 25 og 32.

Tabell 18: Høyeste temperatur i brannrom etter 30 sekunder.

Vindhastighet (m/s)	Temperatur (°C)	
	Én fasadeåpning	Flere fasadeåpninger
0	1200	1350
2,7	1300	1400
7,8	1250	1300
12,9	1100	1500

Veggtemperaturer

Resultatene viser stort sprik i temperatur for de ulike scenariene med og uten vind, sprinkling og ulikt antall fasadeåpninger. Den høyeste temperaturen på 227 °C ble målt ved én fasadeåpning uten sprinkling med en hastighet på 2,7 m/s, og den laveste temperaturen på 89,2 °C ble målt ved flere fasadeåpninger med sprinkling og 2,7 m/s. Tabell 19 viser en oversikt over makstemperaturer for alle scenariene.

Tabell 19: Høyeste registrerte temperatur ved de ulike vindhastighetene, ulikt antall fasadeåpninger og med eller uten sprinkling.

Vindhastighet (m/s)	Temperatur (°C)			
	Én fasadeåpning		Flere fasadeåpninger	
	Uten sprinkling	Med sprinkling	Uten sprinkling	Med sprinkling
0	199	96,9	156	98,9
2,7	227	118	160	89,2
7,8	217	175	199	159
12,9	202	163	150	113

Akkumulert varmekufluks

Resultatene viser at scenariet med 7,8 m/s generelt skiller seg ut med høye verdier for varmekufluks i alle tilfeller. I tilfellet med én fasadeåpning uten sprinkling ligger generelt alle verdiene høyt. Tabell 20 viser en oversikt over alle scenarier med akkumulert varmekufluks.

Tabell 20: Akkumulert netto varmekufluks ved ulike vindhastigheter med én eller flere fasadeåpninger og med eller uten sprinkling.

Vindhastighet (m/s)	Netto varmekufluks (kW/m ²)			
	Én fasadeåpning		Flere fasadeåpninger	
	Uten sprinkling	Med sprinkling	Uten sprinkling	Med sprinkling
0	499,4	318,8	372,1	261,5
2,7	487,4	392,7	372,5	232,7
7,8	477,5	466,5	449,1	451,6
12,9	447,4	430	308,1	301,7

6 Diskusjon

I dette kapittelet vil de ulike forskningsspørsmålene drøftes i lys av det teoretiske litteraturstudiet og empirien fra simuleringene. Geir Jensen, brannrådgiver i COWI, har også vært behjelpelig med å svare på spørsmål i forbindelse med tett trehusbebyggelse og utfordringer med fasadesprinkler som har gitt grunnlag for diskusjon. Alle steder det refereres kun til Jensen gjelder personlig kommunikasjon via mail den 11. mai 2018. I samtalen med Jensen kommer det også frem at COWI nettopp har utført en testserie for å finne ut om sprinkler, vanntåke eller robotdyser på norske fasader i tre faktisk kan brukes. Målet med deres prosjekt har blant annet vært å se på hvor mye vann som trengs og om det overhodet vil fungere. Dette ville vært verdifull informasjon å benytte i denne rapporten men deres resultater offentliggjøres ikke før etter studiens slutt. Likevel tyder dette på at tematikken er interessant for flere og at det bør prioriteres å undersøke hvilken effekt systemet faktisk har eller potensielt kan ha med optimalisert utførelse.

Gjennom hele prosjektperioden har det vært en utfordring å finne relevant litteratur knyttet til fasadesprinkleranlegg, og det har blitt forsøkt å opprette kontakt med både offentlige myndigheter og ulike bedrifter fra næringslivet stort sett uten hell. Samtidig er det observert at når fasadesprinkler først nevnes i offentlige dokumenter — typisk i en bybrannsikringsplan, artikkel fra en avis eller et møtereferat — er det stort sett raskt henvist til som et anlegg som kan beskytte mot utvendig spredning mellom bygninger uten å utdype nærmere. Ofte hevdes det at systemet er effektivt. Samtidig angis det også at det nedprioriteres som tiltak på grunn av manglende dokumentasjon og regelverk. Dersom et tiltak omtales som effektivt men nedprioriteres på grunn av manglende regelverk og dokumentasjon kan det tyde på at det er lurt å etablere nettopp dette.

Eldre trehus er ikke bygget etter dagens forskriftsmessige krav, og det kan derfor tenkes at disse bygningsmessige tiltakene ikke er utført på slike bygninger. Det er et krav at brannsikkerhet i eldre bygninger skal oppgraderes slik at de dekker dagens krav (Forskrift mot brannforebygging, 2002, § 2-1), og på en side er det mulig å oppgradere en bygning slik at den dekker dagens krav til brannsikkerhet. På en annen side er det viktig å være bevisst på at et større inngrep i bygningsmassen på en eldre verneverdig bygning kan svekke dens antikvariske og kulturelle verdi og dermed trosse kulturminneloven som regulerer vern av slike bygninger. Lovgivningen kan derfor synes å være motstridende på noen punkter og kan i lys av nevnte problemer således være med og bidra til utfordringene som ligger til grunn for vern av eldre verneverdig bebyggelse. Det kan derfor tenkes at noen av utfordringene rundt brannsikring av tett trehusbebyggelse synes å stamme fra et noe upresist lovverk. Det har ikke vært et mål i denne studien å undersøke

regelverket som ligger til grunn for tette trehusmiljø men det er likevel fanget opp at slik bebyggelse faller under flere ulike lover. Dette kan føre til tvetydigheter og motstridelser, men også dårlig oppfølging og manglende systematisk sikkerhetsarbeid som følge av at reguleringen ikke tydelig peker på hvem som har det overordnede ansvaret.

6.1 Spredningsmekanismer i tett trehusbebyggelse

Som et grunnlag for å vurdere om fasadesprinkler kan være et effektivt tiltak mot brannspredning i tett trehusbebyggelse må de ulike spredningsmekanismene som ligger til grunn for brannspredning mellom bygninger undersøkes, og det må drøftes hvorfor disse utgjør en trussel for spredning i tett trehusbebyggelse. Dette delkapittelet skal derfor forsøke å svare på forskningsspørsmål 1: *Hvilke mekanismer ligger til grunn for brannspredning i tett trehusbebyggelse, og hvorfor er disse en utfordring?*

Kapittelet vil ta for seg de ulike mekanismene som er identifisert gjennom litteratursøket og knytte disse til spredningsfaren i tett trehusbebyggelse. Kapittelet vil til slutt presentere en kort oppsummering som skal forsøke å gi et overblikk over mekanismenes utfordringer.

De ulike mekanismene som er identifisert er

- Flammespredning
- Flyvebrann
- Konveksjon
- Varmestråling

Flammespredning

Enhver luftbevegelse vil bøye en flamme, og hvor mye flammen bøyes henger sammen med brannens varmeavgivelsesrate og vindhastighet (Drysdale, 2011). Dette kan føre til økt varmeeksponering, enten i form av direkte flammepåvirkning eller økt strålingsintensitet på steder som ellers ville vært uberørte. Dette viser også resultatene fra simuleringene. Som påpekt i teorien kan vind enten forsterke eller redusere en branns intensitet, og risikoen for flammespredning kan derfor henge sammen med hastigheten, der for høy hastighet har vist seg å føre til lavere temperaturer. Dette kan være en konsekvens av at vinden fortynner branngassene og tilfører en mengde oksygen som gjør brannen svakere.

I en fullt utviklet rombrann kan eksterne flammer som står ut fasadeåpningene være en trussel i forbindelse med direkte flammepåvirkning og flammespredning. Spredningsmekanismen forutsetter relativt liten avstand mellom bygningene, noe som stort sett er tilfelle i tett trehusbebyggelse. Ved avstander over 2 meter trenger ikke spredning via flammekontakt være en like stor trussel, men dette henger sammen med brannens utvikling. Dette kan også eliminere

noen bygninger i slik bebyggelse men som bildet fra bebyggelsen på Øvre Møllenberg viser (figur 1) kan tett trehusbebyggelse også karakteriseres av sammenhengende hus og således vil flammespredning kunne være en direkte trussel. Samtidig kan påvirkning av vind gjøre flammebanen uforutsigbar og forlenge flammens rekkevidde. På denne måten kan avstander over 2 meter likevel være en trussel. På en annen side vil slik sammenhengende bebyggelse dele vegg og tilfellet med parallellstående yttervegger med vinduer vil ikke være tilfelle, noe som kan minimere sannsynligheten for spredning. Samtidig vil påvirkning av vind skyve flammene en viss lengde medvinds, og man ender derfor igjen opp med større risiko ved vind til stede selv om det ikke nødvendigvis er snakk om parallelle yttervegger.

Flyvebrann

Flyvebrann og gnistregn er en farlig brannspredningsmekanisme for bygninger, og spesielt med brennbar kledning. I trehus er lufting i konstruksjonen godt tilrettelagt for å unngå råte (SINTEF Byggforsk, 2007), og viser seg i praksis ofte som hulrom bak fasaden, luftespalter i raftekassen eller inn til loftet på andre måter. Tilgang til slokking i hulrom fra utsiden er ofte begrenset og hvis gnister akkumuleres og får utvikle seg på slike steder kan brannen bli svært vanskelig å kontrollere. I tillegg kan spredning til loft under vindfulle forhold føre til at større mengder oksygen får tilgang via luftingen, som igjen vil gi brannen ekstra effekt. På denne måten kan det bli større sannsynlighet for at brannen bryter ut gjennom taket. Brannforsker Anne Steen-Hansen oppgir til SINTEF Byggforsk at det er viktig å prøve å hindre at brannen bryter ut gjennom taket for å unngå gnistregn (Ramstad, 2015) som ifølge Jensen er en stor trussel for spredning i tett trehusbebyggelse. En mulig løsning på å unngå at brannen bryter ut gjennom taket kan være å installere loftssprinkling, som har vist seg å være effektivt for å dempe brann. Dette kan også være et alternativ til isolering eller andre store bygningsmessige inngrep som kan kompromittere byggets verdi. Ved å installere vanntåke heller enn tradisjonelt sprinklersystem kan en også unngå fuktskader. Samtidig kan en mulig løsning være å forsterke takkonstruksjonen, men det kan bli et problem å utføre et så stort bygningsmessig inngrep på en verneverdig bygning.

I tillegg til spredning til hulrom kan glør fly inn åpne vinduer og suges inn av ventiler, som øker problemets omfang. Her illustreres godt poenget med at organisatoriske tiltak ofte er enklest og billigst å utføre; bare ved å lukke vinduet under en brann kan denne risikoen reduseres betraktelig. Det er derimot ikke i alle tilfeller en har tid til å utføre slike tiltak. Samtidig kan tilfeller med vind føre til at gnister og glør spres enda lenger enn ved fravær av vind samtidig som det blir tilført mer oksygen. Brannen i Lærdal viste hvor kritisk vindens påvirkning kan bli i et slikt tilfelle, der den største avstanden mellom to hus som ble antent var lengden av en idrettsbane (190 m) (Steen-Hansen *et al.*, 2014). Samtidig kan vindtrykket presse glør mot hindringer (som for eksempel vegger), og i så måte føre til antenner på områder som små partikler ellers ikke ville festet seg i. Rapporten fra brannen i Lærdal viste for eksempel at glør hadde festet seg til et gjerde og blitt holdt fast av vinden, og på denne måten brent seg gjennom trevirket. I dette tilfellet så det ikke ut til at denne mekanismen tilførte en nevneverdig risiko for spredning til den allerede fullt utviklede brannen, men i andre tilfeller kan det tenkes at slik gjennombrenning for eksempel kan tilføre ekstra mengder oksygen, som kan føre til en mer

intens brann. Samtidig forteller Jensen at vindpåvirkning kan føre til at glør som har landet på bakken akkumuleres i hauger. Han sier at en ringvirkning av dette kan være antennelse av vegetasjon rundt hus, som igjen kan føre til flammebrann som klatrer på innside eller utside av trekledning. Kanskje kan dette være en potensiell fare som fasadesprinkler kan kontrollere med optimalt design. Samtidig kan det nevnes at spredning via vegetasjon er en større utfordring i spredt bebyggelse, men det forekommer også i tettbygde strøk da det ofte kan være vegetasjon nært huset i form av for eksempel en liten plen eller busker og blomster som kan vokse langs vegger.

Konveksjon

Konveksjon kan være en truende spredningsmekanisme i tett trehusbebyggelse ved korte avstander, og litteratursøket viser at temperaturer som forårsaker antennelse kan eksistere nært flammene. Ved vindpåvirkning kan derimot konveksjon bli en større trussel for spredning da vinden kan føre varme luftstrømmer til områder som ellers ville vært uberørte. Samtidig kan vind forsterke konveksjon som spredningsmekanisme til allerede eksponerte områder ved å føre med seg varme branngasser og oppvarmet luft. Dette trenger ikke nødvendigvis å føre til direkte antennelse men kan bidra til temperaturøkning eller å tørke trevirket. Resultatene fra simuleringene viser at det skjer en endring i temperaturutviklingen ved ulike vindhastigheter, men om denne endringen gir høyere eller lavere temperatur varierer med vindstyrken. Figur 26 viser at vindhastigheten på 7,8 m/s generelt har en mer intens temperaturutvikling sammenlignet med de tre andre scenariene, men mot slutten øker scenariet med 2,7 m/s mest og når den høyeste temperaturen i simuleringen. Scenariet med 0 og 12 m/s er relativt like. Samtidig er det også sannsynlig at det konvektive varmetapet øker ved økt vindhastighet, noe simuleringene stort sett bekrefter. Resultatene fra simuleringene vil forøvrig diskuteres nærmere i kapittel 6.3 og 6.4.

Varmestråling

Varmestråling er en farlig mekanisme for spredning og kan skje ved avstander opp til 20 meter (Steen-Hansen *et al.*, 2014) — det vil derfor være en kritisk spredningsmekanisme i tett trehusbebyggelse. Nødvendig avstand mellom bygninger bestemmes i dag på grunnlag av antatt varmemestråling fra en bygningsbrann, og preakseptert løsning for lave bygg (gesims eller mønehøyde under 9,0 meter) er 8 meter (Byggteknisk forskrift, § 11-6). Dette forekommer derimot sjeldent i tettbygde områder med eldre trehus som ble bygd lenge før dagens krav til brannsikkerhet, og avstanden er derfor ofte mindre enn 8 meter uten at sikkerhetsnivået er økt tilsvarende.

Vind vil ikke nødvendigvis ha direkte innvirkning på varmemestråling men den kan øke brannens intensitet som kan føre til økt strålingsintensitet, som i sin tur kan føre til økt spredningsfare. Vann fungerer godt til å absorbere varmemestrålingens energi, og derfor kan fasadesprinkler her beskytte på to måter: ved å væte veggen for å øke dens brannmotstand samt å absorbere varme fra brannen. Vinden kan derimot blåse vannet vekk slik at det kan miste noe av sin funksjon, i tillegg til at den kan føre til hyppigere fordamping og uttørring av trevirket.

6.1.1 Oppsummering forskningsspørsmål 1

Litteratursøk, empiri fra tidligere hendelser og informasjon fra fagpersoner viser at de ulike spredningsmekanismene bidrar med ulike farer for spredning i tett trehusbebyggelse, men hver for seg er ikke alle like kritisk for spredning. De kan derimot forsterke hverandre dersom de opptrer samtidig, noe som er sannsynlig. Vind vil også påvirke spredningsmekanismene ved å blant annet øke flammens rekkevidde, forsterke varmespredning via konveksjon, øke forbrenningen i flammefronten ved å tilføre en mer optimal miksing med oksygen eller øke rekkevidden for gnister og glør. Samtidig vil det forekomme et konvektivt varmetap fra veggen til luften som vil øke med økt vindhastighet, og på denne måten vil konveksjon og varmestråling motvirke hverandre. Vinden kan også begrense brannens intensitet ved å tilføre for mye oksygen.

6.2 utfordringer med fasadesprinkler

Videre i vurderingen av om fasadesprinkler er et effektivt tiltak mot brannspredning i tett trehusbebyggelse må identifiserte utfordringer rundt slike sprinklersystem drøftes. Dette kapittelet skal derfor forsøke å svare på forskningsspørsmål 2: *Hvilke utfordringer kan knyttes til bruk av fasadesprinkler i tett trehusbebyggelse?*

Søk på internett avslører at det foreligger lite offentlig og etablert informasjon om fasadesprinkleranlegg, noe som ikke er overraskende med tanke på manglende testgrunnlag, dokumentasjon og regulering. Søket tyder på at slike sprinkleranlegg som oftest er raskt omtalt, og i noen avisartikler er det beskrevet at et visst antall fasadesprinkleranlegg skal monteres etter offentlig bevilgning for å sikre eldre bebyggelse. Samtidig angis det i flere bybrannsikringsplaner at fasadesprinkler velges bort som følge av mangel på dokumentasjon. I den sammenheng kan det derfor stilles spørsmål ved hvorvidt denne bevilgningen går til å sikre slik bebyggelse på best mulig måte dersom tiltaket som skal implementeres ikke har blitt grundig testet og undersøkt. Samtidig oppgir Jensen at fasadesprinkler tidligere var nevnt i veiledningen til teknisk forskrift, men at det nå er fjernet fordi det ikke finnes regler for det.

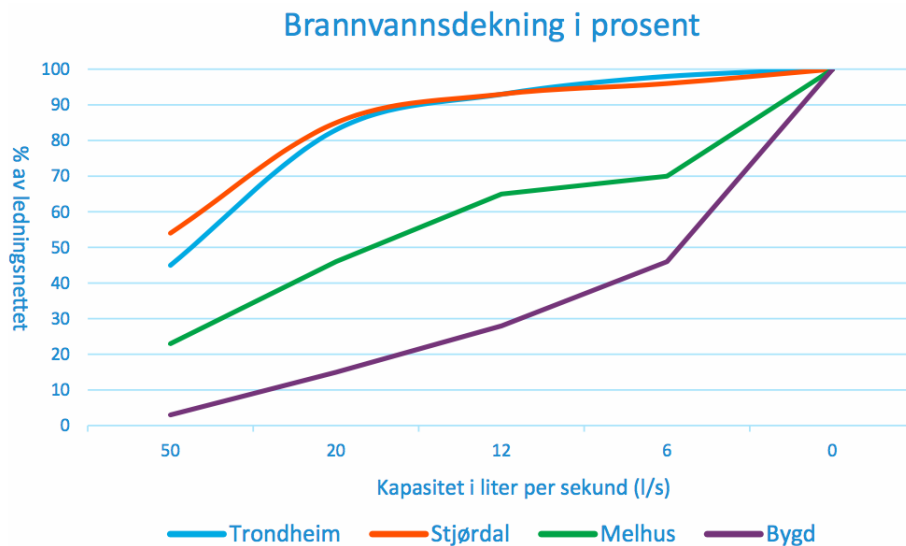
På bakgrunn av dette har det vært utfordrende å samle ønsket informasjon rundt slike anlegg. Likevel har litteratursøket gitt noe kunnskap om utfordringer rundt fasadesprinkler og andre typer sprinklersystem, samt at det har blitt samlet inn verdifulle innspill fra fagfolk i brannmiljøet.

Følgende utfordringer er identifisert og vil drøftes:

- Vannforsyning
- Frost
- Deteksjon
- Brannens oppdriftskrefter

Vannforsyning

Sprinkleranlegg krever mye slokkevann som i mange tilfeller kan være en utfordring, og det er derfor viktig at kommunene kartlegger slokkevannskapasiteten for å sikre at denne er tilstrekkelig. Det preaksepterte kravet for slokkevann i byggt teknisk forskrift (TEK17) er 1200 liter per minutt for småhusbebyggelse (Veiledning til byggt teknisk forskrift, § 11-17), men undersøkelser utført av DHI Norway viser at store deler av kommunene i Norge ikke tilfredsstillende dette kravet (Thelin & Wighus, 2016). Rapporten beskriver en trend som viser at dette hovedsakelig gjelder mindre områder, og at større kommuner som Trondheim og Oslo stort sett tilfredsstillende kravet. Rapporten viser et eksempel med Trondheim, Stjørdal, Melhus og generaliseringen "Bygd" der Trondheim og Stjørdal har relativt tilfredsstillende brannvannforsyning i motsetning til Melhus og Bygd (se figur 38). Figuren indikerer at jo mindre kommune desto mindre tilfredsstillende tilgang på slokkevann.



Figur 38: Vannforsyning i ulike kommuner (Thelin & Wighus, 2016).

Samtidig forklarer Jensen at ved aktivisering av flere enn to eller tre fasadesprinkleranlegg på samme tid vil det sannsynligvis bli for lite vann igjen til brannvesenets slokkearbeid. Dersom det

er en gjengående trend i Norge at de mindre kommunene sliter med å møte preaksepterte krav om slokkevann kan det tenkes at fasadeslokkeanlegg ikke vil fungere optimalt i slike områder, spesielt hvis vannforsyningen i større kommuner heller ikke vil strekke til ved aktivering av flere anlegg på samme tid. Samtidig kan kommunen velge å fravike det preaksepterte kravet i boligstrøk med liten spredningsfare så lenge de kan erstatte kravet med tankbil (Byggteknisk forskrift, 2017, § 11-17). Likevel bør vannforsyningen være tilstrekkelig så sprinkleranlegget kan fungere optimalt slik at brannen kan holdes under kontroll frem til brannvesenet ankommer. Et alternativ kan være å benytte vanntåkesystem som har lavere krav til vannforsyning. En ringvirkning av dette vil også være mindre dimensjoner på rør og utstyr, som både er kostnadsbesparende samt at det ikke påvirker en bygnings fremtoning i like stor grad. Spørsmålet er likevel hvorvidt vanntåkeanlegg er like effektivt som sprinkleranlegg til å slokke en brann eller holde en brann under kontroll, som er første og største prioritet.

Det kan også nevnes at bevaring av stavkirker i Norge ofte beskyttes med utvendig sprinkling (Jensen, 2015). En stor del av stavkirkene befinner seg i mindre kommuner, og det vil være kritisk dersom sprinkleranlegget ikke blir forsynt med tilstrekkelige vannmengder til å fungere optimalt dersom en kirke skulle begynne å brenne. Denne studien tar imidlertid ikke for seg vern av stavkirker og vil ikke gå i dybden på tematikken, men kan likevel være verdt å belyse.

Frost

Ved utvendig sprinkling vil frost kunne være et problem. Sprinkleranlegget må derfor prosjekteres med en løsning for dette, og som nevnt i teorien kan tørrørssprinkling være en løsning. En bør derimot være klar over at et slikt system har en nevneverdig lavere pålitelighet enn et vanlig våtrørssystem (Sorthe *et al.*, 2015) der den laveste påliteligheten for tørrørssystem er blitt målt til 55 % i lagerbygninger. Til sammenligning har våtrørssystem en pålitelighet på 83 % i tilsvarende bygg. For boliger har våtrør og tørrør en pålitelighet på henholdsvis 91 og 85 %. Tørrør har i tillegg et noe større krav til vannmengde (Trøan, 2008), og sett i lys av at slike sprinkleranlegg allerede er utfordret som følge av mangel på vannforsyning kan dette skape problemer. Samtidig er en løsning med tørrør også mer kostbar.

Som et alternativ til tørrør går det an å tilsette frostvæske i våtrørssprinkler som skal forhindre at vannet fryser. Som nevnt ovenfor er våtrør et mer pålitelig system enn tørrør, men det kommer også utfordringer med å tilsette frostvæske. For eksempel kan det være nødvendig med større rørdimensjoner, noe som kan forringe bygningens estetiske verdi. I tillegg kan frostvæsken være brannfarlig, men det kommer an på væskens konsentrasjon. Hvorvidt konsentrasjonen av frostvæske er brannfarlig kommer an på fordampningsraten, som igjen er avhengig av brannens varmeavgivelsesrate og løsningens overflateareal (EFSN, 2013). Det kan derfor tyde på at en må ha kunnskap om hvor stor en brann eventuelt kan bli for å vurdere væskens konsentrasjon. Lekkasje grunnet lavere overflatespenning enn vann kan også forekomme, i tillegg til korrosjonsproblemer i rørene (Arvidson, 2011).

En løsning på alle disse problemene kan være å installere et manuelt slokkeanlegg som brannvesenet kobler seg på. Den store baksiden med et slik manuelt system er derimot at situasjonen gjør seg avhengig av brannvesenets innsatstid. Dette kan derfor virke mot sin hensikt når

et sprinklersystems formål er nettopp å holde en brann under kontroll frem til brannvesenet ankommer og kan begynne slokkearbeidet. Det kan også være en mulighet at beboere skrur på sprinklersystemet før de evakuerer bygningen, men på samme måte gjør man seg da avhengig av at situasjonen tillater dette.

Deteksjon

For at en brann i det hele tatt skal kunne bekjempes må den oppdages, og helst på et tidlig tidspunkt. En utfordring med fasadesprinkler kan være at brannen ikke detekteres før den er godt etablert. Jensen angir at en brann må klatre 50 - 70 % av vegghøyden før den utløser sprinkler eller varmedetektor i raft, noe som kan føre til at brannen har fått godt feste eller har spredt seg til andre steder før sprinklersystemet kan utføre sin funksjon. Samtidig kan hulrom bak fasaden føre til at brannen ikke er like lett å oppdage og kan spres både raskt og uhindret. Oppdriftskreftene til brannen gjør at hvis den får tilgang på innsiden av kledningen kan det dannes et undertrykk som fører kald luft inn nederst og varmt luft ut øverst. Dette vil videre føre til at brannen får god tilgang på oksygen, kan spre seg ubemerket på innsiden og etter hvert bryte ut på helt andre steder, noe som kan sette sprinklersystemets funksjon ut av spill dersom utviklingen ikke detekteres. I tillegg vil det ofte være svært trangt i slike spalter, som kan føre til rask temperaturøkning som sprinkleranlegget kanskje ikke kan kontrollere, samtidig som at brannen kan klatre raskere på innsiden som følge av mangel på oksygen (Giraldo *et al.*, 2013). Jensen opplyser også om at en brann kan leve godt i luftespalter i for eksempel raft og der bli fullstendig upåvirket av sprinklersystemet. Dette er en utfordring som også kan forringe hele sprinklersystemets funksjon. En mulig løsning kan være flammedeteksjon ved ultrafiolett stråling som også kan være direkte koblet til brannvesenets alarmsentral. Sprinkler som utløses ved flammedeteksjon kan være et effektivt alternativ til å detektere brann i forhold til standard aktivering ved varmeeksponering. Ved hjelp av ultrafiolett stråling vil også detektorsystemet fange opp flammer uten mye bevegelse (Schneider Electric, n.d.).

Brannens oppdriftskrefter

Brannens oppdriftskrefter kan være et hinder for vanndråpene som skal nå brenselet dersom ikke dråpene har høy nok hastighet. Som likning 7 viser henger brannens oppdriftskrefter tett sammen med varmeavgivelsesraten; jo større brann desto høyere hastighetene må vanndråpene ha for å penetrere flammene. Dette kan være en utfordring ved prosjektering av fasadesprinkler, spesielt med tanke på at det ikke eksisterer standarder og veiledning for dette.

En brann i tett trehusbebyggelse har sannsynligvis vokst seg relativt stor før sprinklersystemet i et nabobygg utløses, og det kan derfor tenkes at oppdriftshastigheten også er høy. Sprinkleranlegget vil derfor kanskje svekkes av disse termiske kreftene. Samtidig kan sprinklersystemets funksjon til nærliggende bygning også være å væte veggen for å gjøre brannmotstanden høyere, og ikke nødvendigvis kun å penetrere flammer for å slukke gjeldende brann. Oppdriftskreftene vil derfor kanskje ikke være avgjørende for at sprinklersystemet skal fungere som tiltenkt. Vanndråpene vil absorbere stråling og i tillegg vil det kreves mer energi for å

fordampe vannet på ytterveggen. Således kan tiden brannen trenger for å utvikle seg øke, og sprinklersystemet har fungert som tiltenkt. Samtidig vil det beste være om anlegget beskytter både mot brannsmitte til nabobygninger i tillegg til at det kan slukke eller holde en brann som har fått utvikle seg under kontroll, og da er det nødvendig at dråpene blant annet har høy nok hastighet. Jensen forklarer at i en situasjon med høye oppdriftskrefter kan det være mer hensiktsmessig å kaste vann oppover langs fasaden heller enn nedover, og slik kan det også bli enklere å nå tørre steder som for eksempel raft. På denne måten kan brannens oppdriftskrefter faktisk utnyttes til sprinklersystemets fordel.

6.2.1 Oppsummering forskningsspørsmål 2

Informasjon fra Jensen og litteratursøk på internett tyder på at fasadesprinkler kommer med flere utfordringer og at det er mangel på både kunnskap rundt slike system samt gode løsninger. Jensen uttaler at de løsningene som hittil er brukt i Norge kun er basert på faglig synsing, og på bakgrunn av dette samt mangel på dokumentasjon og testgrunnlag er det derfor vanskelig å identifisere konkrete utfordringer med systemet. Likevel er visse punkter som kan ha betydning for fasadesprinklers funksjon identifisert og drøftet. Funnene kan tyde på at det er nødvendig å tenke nytt rundt konseptet med utvendig sprinkling da vær og vind, deteksjon, vannforsyning og brannens termiske krefter gjør effekten av dagens løsninger svært usikre. Samtidig er det ingen tvil om at det fungerer å bekjempe brann med vann.

6.3 Rombrann under vindpåvirkning

For å kunne avgjøre om fasadesprinkler vil fungere som et godt tiltak mot spredning under vindfulle forhold er det nødvendig å vite hvilke utfordringer som ligger til grunn dersom en rombrann blir påvirket av vind. En del av resultatene fra simuleringene vil derfor drøftes i lys av forskningsspørsmål 3: *Hvordan påvirkes en rombrann av ytre vindpåkjennning i ulike hastigheter, og på hvilken måte kan dette påvirke et fasadeslokkeanlegg?*

For å vurdere hvordan vind vil påvirke en rombranns utvikling er det valgt å undersøke hvordan vind påvirker varmeavgivelsesrate, varmeutvikling inne i brannrommet samt eksterne flammer.

Varmeavgivelsesrate

Resultatene viser at varmeavgivelsesraten i de to scenariene med én og flere fasadeåpninger er motsetninger; ved én fasadeåpning synker varmeavgivelsesraten i brannrommet med økt vindhastighet (figur 23), og ved flere fasadeåpninger øker varmeavgivelsesraten med økt vindhastighet (figur 30). Dette henger sannsynligvis sammen med massestrøm av luft, da varmeavgivelsesraten inne i brannrommet er produktet av massestrøm av luft inn i rommet og luftens forbrenningsvarme. Ved flere fasadeåpninger vil økt vindhastighet gi økt innstrømming av luft

(som vist i figur 37), som igjen gir økt varmeavgivelsesrate. Dette forklarer likevel ikke hvorfor varmeavgivelsesraten synker når vindhastigheten øker i tilfeller med kun én fasadeåpning. Hu *et al.* (2016) undersøkte effekten av vind i ulike hastigheter i en småskala rombrann med én fasadeåpning og hvilken påvirkning dette ville ha på blant annet temperaturutvikling, brannevekst og varmeavgivelsesrate. De fant at varmeavgivelsesraten sank med økt vindhastighet. De forklarer dette med at luften som strømmer inn fortynnes av akkumulert røyk før den når frem til flammen, samt at vindens kjøleeffekt reduserer temperaturen inne i rommet med økende vindhastighet, som vil føre til lavere varmeavgivelsesrate. I tillegg øker vindhastigheten trykkdifferansen mellom utsiden og innsiden (Huang *et al.*, 2009), som kan være en årsak til mindre innstrømning av luft i brannrommet ved økt vindhastighet. Samtidig viser figur 25 og 32 at ved fravær av vind etableres et nøytralplan slik at frisk luft kan strømme inn i brannrommet, men etter hvert som vindhastigheten øker blir dette nøytralplanet til slutt ikkeeksisterende som følge av at varme temperaturer stenger for inngangen. Dette kan også være medvirkende årsak til mindre luftinnstrømning. I tillegg kan økt turbulens inne i brannrommet bidra til en trykkøkning (Drysdale, 2011), som kan føre til lavere innstrømning av luft. Dette skyldes at økt turbulens kan øke brannens intensitet som igjen kan gi en temperaturøkning, som fører til økt trykk.

Temperaturutvikling inne

Simuleringene viser variasjon i temperaturutviklingen til de ulike scenariene. Det er tydelig at tilfellet med flere fasadeåpninger har raskest temperaturutvikling, noe som også var forventet da dette tilfellet har bedre tilgang på oksygen. Scenariet med 7,8 m/s har i tilfellet med flere fasadeåpninger den laveste temperaturutviklingen etter 30 sekunder (se figur 32) sammenlignet med de tre andre hastighetene. Samtidig viser dette tilfellet den mest kritiske temperaturutviklingen på utsiden. Dette kan tyde på at en større del av forbrenningen skjer ute, hvilket bekreftes av resultatene i Smokeview. De tre andre vindhastighetene har også sjeldnere forekomst av flammen på utsiden, noe som tyder på at en større del av forbrenningen skjer inne. Dette er også logisk med tanke på økt luftgjennomstrømning. Samtidig er det flere åpninger, som også vil si at varmetap til utsiden kan skje på flere steder. I tillegg har scenariet på 7,8 m/s mest uniform temperaturdistribusjon i brannrommet (figur 32). Dette kan tyde på at denne vindhastigheten harmonerer bedre under gitte forhold sammenlignet med de andre vindhastighetene. En mulig forklaring kan også være at 7,8 m/s er en mer optimal vindhastighet til å skyve branngasser og varme strømmer ut av rommet gjennom døren, som fører til at en større del av forbrenningen skjer på utsiden.

Med kun én fasadeåpning viser resultatene fra Smokeview at temperaturutviklingen ved 0 m/s er lavere enn ved 2,7 m/s etter 30 sekunder. Resultatene viser også at fra og med en vindhastighet på 7,8 m/s fører økt hastighet til lavere temperatur. Huang *et al.* (2009) observerte samme tendens da de undersøkte utviklingen av en småskala rombrann med vindpåvirkning i en vindtunnel. Varigheten av en brann uten vindpåvirkning var lengre enn i tilfellene med, noe som tyder på en tregere utvikling og forbrenning. Samtidig observerte de at høyere vindhastighet (i deres tilfelle 1,5 og 3 m/s) førte til raskere temperaturutvikling, noe som tyder på at høyere vindhastighet øker miksing av oksygen i brannplumen og akselererer forbrenningen, som i sin

tur skaper høyere temperaturer. På den andre siden påpeker de at det kan antas at brennbare gasser kan blåses ut av brannrommet som en konsekvens av høyere vindhastighet, og at rommet kan kjøles ned av vinden. Dette påpekte også Hu *et al.* (2016). Resultatene fra Smokeview samsvarer med disse antakelsene og figur 25 viser som nevnt at temperaturen synker med økt vindhastighet etter scenariet med 2,7 m/s. På denne måten bekreftes deres funn og antakelser med numerisk simulering og kan være med å styrke FDS' validitet i tilfeller med vind.

Samtidig observeres scenariet med 12,9 m/s som tilfellet med høyest grad av homogen temperaturdistribusjon i tilfellene med én fasadeåpning, noe som kan tyde på at den kalde luften som strømmer inn i brannrommet akselererer miksingene med branngasser og flammer i høyere grad sammenlignet med de andre tilfellene. Hu *et al.* (2016) antok også at slik akselerering kan finne sted. De skriver videre at vindens effekt i et slikt scenario kan antas å være proporsjonal med hastigheten, noe resultatene fra simuleringene i denne studien også tyder på. Samtidig bør det påpekes at simuleringer med vind fortsatt har en relativt enkel tilnærming i FDS, og det kan være risikabelt å anta at disse resultatene er pålitelige.

Det må også påpekes at temperaturene som registreres inne i brannrommet er noe høye. Drysdale (2011) beskriver at 900 - 1100 °C er forventet temperatur i en rombrann men simuleringene viser temperaturer på 1300 - 1500 °C. Det kan tenkes at dette har en sammenheng med at rommet er modellert med adiabatisk flater, noe som også ble belyst i forkant av simuleringene i kapittel 4.3, *Kvantitative valg*. Dette ble likevel valgt som løsning fordi det var ønskelig å utfordre sprinklersystemet så mye som mulig, i tillegg til å unngå at brannen ble nedkjølt ved å bruke inert overflate. I tillegg er det påpekt i kapittel 3.5.1, *Mesh*, at grov cellestørrelse kan føre til for høy temperatur i brannplumen, noe som kan være tilfellet her. Figur 11 viser at FDS ikke klarer å kalkulere en realistisk plumetemperatur før cellestørrelsen er nede på 5 cm, som er halvparten av størrelsen som ble benyttet i denne studien. Dette var derimot en kjent risiko i forkant av simuleringene, men sensitivitetsanalysen viste at prosesseringstiden ville bli urimelig høy ved å stille inn et så fint grid (81 timer kontra 6,5 time ved simuleringens lengde på 100 sekunder). Det ble derfor valgt å gå videre med gridstørrelse på 10 cm.

Eksterne flammer og temperaturer

Resultatene fra Smokeview viser at påvirkning av vind vil bøye den eksterne flammen, samt føre varme temperaturer medvinds. Det varierer hvor voldsom temperaturskyen er, men det ser ut til at scenariet med 7,8 m/s har mest kritisk utvikling både ved én og flere fasadeåpninger. Samtidig kan det se ut til at scenariet med 12,9 m/s har en mer kritisk utvikling ved flere fasadeåpninger sammenlignet med én. Dette kan henge sammen med at varmeavgivelsesraten ved flere fasadeåpninger er en god del høyere enn ved én fasadeåpning (6500 kW kontra 1770 kW).

Resultatene viser også at i scenariet med kun én fasadeåpning befinner flammen seg på utsiden mot nabobygg oftere enn i scenariet med flere fasadeåpninger, noe som gjelder for alle vindhastighetene bortsett fra 7,8 m/s. I scenariet med flere fasadeåpninger befinner flammen seg på utsiden stort sett gjennom hele simuleringen ved denne hastigheten etter brannen har

stabilisert seg. Dette kan være en mulig forklaring på at scenariet med 7,8 m/s har mest kritisk temperaturutvikling til motstående vegg i scenariet med flere fasadeåpninger (vil diskuteres nærmere i forskningsspørsmål 4). Samtidig viser resultatene at i scenariene med 0 og 2,7 m/s vil flammene også stå ut vinduene i tillegg til døren, i motsetning til 7,8 og 12,9 m/s. Dette kan henge sammen med at vinden ikke er sterk nok til å fortrenge flammens termiske krefter ved lavere hastigheter, og fører til et større varmetap til utsiden. Dette kan bety at hus som eventuelt vil stå nært vinduene blir utsatt for ekstra varmeeeksponering, men samtidig bør det tas høyde for at vindforholdene vil være annerledes ved flere omkringliggende bygninger. Samtidig viser resultatene fra simuleringene som forventet at temperaturskyen som etableres utenfor døren blir påvirket av vinden og vil drive medvinds. Høyere vindhastighet fører også til en mer voldsom temperatursky som fører høye temperaturer lenger enn ved fravær av vind. Ellers er temperaturen mellom ytterveggene generelt lavere i scenariet med flere fasadeåpninger, og henger sannsynligvis sammen med at den eksterne flammen er oftere til stede ved én fasadeåpning i forhold til tre, altså at forbrenningen i større grad foregår ute ved én fasadeåpning sammenlignet med tre.

6.3.1 Oppsummering forskningsspørsmål 3

Resultatene og drøftingen viser at en rombrann kan påvirkes på flere måter av vind og at dette er avhengig av vindhastighet og antall fasadeåpninger. Vinden kan føre til økt eller begrenset intensitet i temperatur og varmeavgivelsesrate, samt at eksterne temperaturer og flammer også vil påvirkes. Dette kan utfordre fasadesprinkleranlegget på ulike måter. Temperaturen og strålingen mot eksponert vegg øker ved visse vindhastigheter, noe som fører til at vannet må absorbere mer energi for å gi tilsvarende effekt som ved for eksempel vindstille forhold. Dette kan i sin tur svekke effekten dersom sprinkleranlegget ikke har kapasitet til å absorbere denne energien. Samtidig kan vinden føre vannet i en annen bane enn tiltenkt, som også kan svekke effekten systemet er designet til å ha. I tillegg vil brannens oppdriftskrefter variere i sammenheng med brannens størrelse, som vil påvirkes av vinden. Sprinkleranlegget kan derfor på denne måten også påvirkes av vindens effekt på en rombrann.

6.4 Fasadesprinklers effekt mot brannspredning

For å prøve å vurdere hvilken effekt fasadesprinkler faktisk har mot spredning er det blitt målt temperaturer og varmefluks til et mottakende objekt med og uten sprinkling. Resultatene fra dette vil drøftes i dette delkapittelet som skal legge grunnlag for å forsøke å svare på forskningsspørsmål 4: *Hvilken effekt har fasadesprinkler på brannspredning med og uten vind?* Kapittelet er delt inn i temperaturutvikling og varmefluks, og tar for seg tilfellene med og uten sprinkling separat. Til slutt vil funnene oppsummeres og det er forsøkt å løfte blikket og plassere funnene i perspektiv.

Temperaturutvikling ute

Uten sprinkling

Resultatene viser at scenariet uten sprinkling med én fasadeåpning målte de høyeste temperaturene på motstående yttervegg, og at scenariet med 7,8 m/s hadde den mest kritiske utviklingen i de største delene av simuleringen. Scenariet med 2,7 m/s viste derimot høyest målte temperatur etter 60 sekunder. Alle vindhastighetene ligger ca. 50 °C over tilsvarende scenario med flere fasadeåpninger bortsett fra 7,8 m/s som har en relativt lik utvikling i begge tilfellene. Dette tyder på at denne vindhastigheten gir en mer optimal varmeoverføring sammenlignet med de andre hastighetene. En mulig forklaring kan være at denne vindhastigheten øker brannens strålingsintensitet som følge av at flammer befinner seg på utsiden. I tilfellet med flere fasadeåpninger viste også resultatene fra Smokeview at ekstern flamme var synlig gjennom hele scenariet ved 7,8 m/s i motsetning til de tre andre. Dette betyr at en større del av forbrenningen skjer på utsiden og derfor blir det generert mer varme i det området som kan påvirke veggens temperaturøkning. Likevel er varmeavgivelsesraten inne ved 7,8 m/s høyere enn ved 0 og 2,7 m/s. Dette kan kanskje forklares med at vinden i tillegg øker forbrenningen inne i brannrommet ved å optimalisere miksingen med oksygen. Dette kan også virke sannsynlig da massestrømmen av luft inn til brannrommet er 0,19 - 0,21 kg/s høyere enn scenariene med 2,7 og 0 m/s. Samtidig er massestrømmen ved 12,9 m/s 4,3 kg/s, noe som forklarer den høye varmeavgivelsesraten. Dette kan også være en mulig forklaring på den lave temperaturen ved 12,9 m/s, altså at innstrømning av luft sinker forbrenningsprosessen ved at forholdet mellom luft og brensel er mindre optimalt enn ved tilfellet med 7,8 m/s. Det kan tyde på at brannen får for mye oksygen ved 12,9 m/s.

Med sprinkling

Simuleringene viser at scenariene med sprinkling har en markant lavere temperaturutvikling enn tilfellene uten. I tilfellet med én fasadeåpning var det scenariet med 0 m/s som viste lavest utvikling men i tilfellet med flere fasadeåpninger var det 2,7 m/s som viste lavest økning. Dette var ikke forventet, men kan kanskje forklares med at i tilfellet med 2,7 m/s og flere fasadeåpninger sto flammene ut alle tre fasadeåpningene samtidig, noe som kan ha ført til et større varmetap til omgivelsene og mindre varmeeeksponering gjennom døren. Ved 0 m/s sto flammene ut kun gjennom ett vindu. Samtidig kan det nevnes at utviklingen ved 0 og 2,7 m/s ikke er langt fra hverandre i begge scenariene. Videre viser også begge situasjonene her at en vindhastighet på 7,8 m/s har den mest kritiske utviklingen. Dette kan tyde på at netto varmefluks er sterkest ved denne vindhastigheten, noe tabell 11 og 17 bekrefter. Samtidig er det også mulig at vinden frakter disse varme strømmene med seg på en mer effektiv måte.

Resultatene viser at fasadesprinkler effektivt forhindrer kraftig temperaturutvikling, der den største temperaturforskjellen mellom sprinkling og fravær av sprinkling er på 100°C. Det er derimot sannsynlig at det er store usikkerheter i resultatene, spesielt når sensitivitetsanalysen viste at temperaturene ville øke med et finere grid. Dette vil derimot diskuteres nærmere i neste delkapittel som omhandler usikkerheter i resultatene.

Varmefluks

Uten sprinkling

I scenariet med én fasadeåpning viser resultatene at varmekraften er gjennomgående høy. Tabell 9 viser en oversikt over strålingsfluks, konvektiv varmekraft og netto varmekraft vegg blir utsatt for, og det er tydelig at netto varmekraft er generelt høy i tilfellet med én fasadeåpning. Likevel viser tabellen at netto varmekraft blir lavere ved økt vindhastighet, selv om scenariet med 2,7 og 7,8 m/s viser den mest kritiske temperaturøkningen. Dette kan ha en sammenheng med usikkerhet i resultatene som følge av for grov celleinndeling da varmekraften i dette scenariet er relativt jevn. Samtidig viser de andre scenariene at tilfeller med høyest temperaturutvikling også har høyest verdier av akkumulert varmekraft. Tabellen viser også at det konvekktive varmetapet øker ved økt vindhastighet, noe som er forventet. Samtidig varierer strålingsfluksen med vindhastigheten, noe som kan tyde på at brannens intensitet varierer med denne parameteren. Ellers viser vindhastigheten med 7,8 m/s generelt høye verdier for varmekraft i alle scenarier.

Scenariet med flere fasadeåpninger viser at vindhastigheten på 7,8 m/s utpeker seg som den mest kritiske utviklingen med $449,1 \text{ kW/m}^2$ akkumulert varmekraft. Selv om det konvekktive varmetapet er over 5 ganger så høyt som ved fravær av vind øker strålingsfluksen såpass mye at netto varmekraft blir høyere. Strålingsfluksen ligger stort sett $> 100 \text{ kW/m}^2$ over de andre hastighetene bortsett fra 2,7 m/s der den ligger $97,7 \text{ kW/m}^2$ over. Vindhastigheten på 12,9 m/s viser den desidert minst kritiske utviklingen med lavest netto akkumulert varmekraft og høyest verdi av konvektivt varmetap. Det kan tenkes at denne hastigheten er såpass høy at den får dobbel negativ virkning ved at det konvekktive varmetapet blir høyt samtidig som at vinden får tilført for mye oksygen.

Med sprinkling

Scenariet med én fasadeåpning viser en markant nedgang i høye verdier for varmekraft ved sprinkling. Tabell 11 viser at ved fravær av vind blir vegg utsatt for en netto varmekraft på $318,8 \text{ kW/m}^2$, kontra $449,1 \text{ kW/m}^2$ uten sprinkling. Samtidig viser tabellen at netto varmekraft øker ved ulike vindhastigheter, der vindhastigheten på 7,8 m/s har høyest verdi etterfulgt av 12,9 m/s. Det konvekktive varmetapet blir også lavere med sprinkling kontra uten, som kan tenkes å være en konsekvens av at vannet væter vegg slik at temperaturdifferansen mellom vegg og fluidet blir mindre, som vil føre til et lavere varmetap.

Ved flere fasadeåpninger skiller vindhastigheten på 7,8 m/s seg også ut, med akkumulert netto varmekraft på $451,6 \text{ kW/m}^2$, etterfulgt av 12,9 m/s med $301,7 \text{ kW/m}^2$. I motsetning til scenariet uten sprinkling viser dette scenariet en tanke mer kritisk utvikling ved 7,8 m/s, noe som kan komme av at vannråpene blir blåst vekk som følge av den sterke vindhastigheten. Her viser også tabellen et uventet resultat ved at det konvekktive varmetapet er lavere ved 2,7 m/s sammenlignet med fravær av vind. Det bør derimot påpekes at forskjellen på $4,7 \text{ kW/m}^2$ ikke er veldig stor, og kan være en konsekvens av for grov cellediscretisering. Det kan også tenkes at FDS har problemer med å kalkulere varmeoverføringskoeffisienten i et scenario der overflaten påvirkes av flammer, røyk, vann og vind.

6.4.1 Oppsummering forskningsspørsmål 4

Resultatene viser at fasadesprinkleranlegg har god effekt for å forhindre brannspredning, og den høyeste reduksjonen observert i netto varmeffluks er 266,7 kW/m². Samtidig kommer det tydelig frem at vinden kompromitterer fasadesprinklerens effekt, men det henger ofte sammen med hvor høy vindhastigheten er. Dette er også logisk da vinden til en viss grad vil blåse vannråpene ut av sin opprinnelige bane. Resultatene viser også at de høyeste verdiene hovedsakelig er målt av sensor 10, 11, 14 og 15. Dette er i fasadeåpningen og det er dermed logisk at disse sensorene vil fange opp de høyeste verdiene. Sensor 7 og 9 skiller seg også ut i noen tilfeller med en distinkt temperaturøkning, som kan henge sammen med at luft med høyere temperatur vil stige og strømme medvinds til områder som ellers ville vært uberørte. Sensorene i ytterkantene (4, 5, 12, 13 og 20) vil også fange opp relativt høye temperaturer, noe som kan forklares med at vinden vil føre vannet lettere bort fra disse områdene. Det kan tenkes at dette skjer på grunn av at veggen er utstyrt med ett sprinklerhode og de ytterste dråpene blir da enklere å skyve vekk.

6.5 Usikkerhet i simuleringsmodell og -resultater

Som en grov forenkling av virkeligheten vil en simuleringsmodell alltid være tilknyttet usikkerheter. I denne studien studeres to parametere som er lite undersøkt i simulering, nemlig vind og fasadesprinkler. Det er derfor sannsynlig at resultatene fra simuleringene vil inneholde store usikkerheter. Drøftingen rundt usikkerhet i resultatene tar for seg modellens forenklinger, valg av scenario og modelleringen av fasadesprinkleranlegget.

Forenkling av virkeligheten

Som nevnt i kapittel 2, *Metode*, vil en simulering alltid være en betydelig forenkling av virkeligheten, noe det er viktig å være bevisst på ved bruk. I denne undersøkelsen er også vind som parameter inkludert, noe som forsterker usikkerhetene ytterligere. Vind som parameter i FDS er foreløpig en svært enkel tilnærming; i modellen vil vinden for eksempel komme kontinuerlig mens den i virkeligheten vil komme i kast. Dette vil gjøre reell vind mer uforutsigbar og det kan muligens ha stor påvirkning på brann og spredning. Det kan også tenkes at slike kast vil føre til høyere topper for målt varmeffluks, som igjen vil føre til økt temperatur og akkumulert varmeffluks. Vindhastighet er også spesielt avgjørende for flammebanen til eksterne flammer. I tillegg vil vind kunne skape turbulente forhold i fasadeåpninger og langs vegger som kan være vanskelig å etterligne. Dette gjelder også langs bakken og henger sammen med topografiske forhold, noe som ikke er hensyntatt i modellen.

Brannens varmeavgivelsesrate er en svært viktig parameter for resultatene og ble i denne studien bestemt av etablerte uttrykk, noe som kan være en usikkerhet. Samtidig er det ikke usannsynlig at en slik varmeavgivelsesrate kunne forekomme i en reell brann. Likevel er det viktig å være bevisst på at brannen kunne vært både større og mindre, med tilhørende ulike utfall. Samtidig kan brennerens areal også være større eller mindre, noe som vil påvirke resultatene. Det

er sannsynlig at arealet i virkeligheten ville vært større når det gjelder brann etter overtenning i og med at det er et kvalitativt kriterium for overtenning at alle flatene i rommet brenner.

Varmetapet vil sannsynligvis også være større i virkeligheten, da modellen er utstyrt med adiabatisk flater som ikke taper varme til omgivelsene. Resultatene viser at temperaturen oppunder taket kan nå en verdi på opp til 1500 °C, noe som er urealistisk høyt. En mer sannsynlig temperatur i en rombrann ligger på mellom 900 - 1100 °C (Drysdale, 2011). På en annen side var dette en kalkulert modifisering av virkeligheten for å oppnå konservative verdier da simuleringens hensikt er å utfordre sprinklersystemet og oppnå høye temperaturer. Det kan også tenkes at temperaturen i brannplumen er noe høy som følge av for grov cellestørrelse.

Valgt scenario

Som påpekt i kapittel 2 eksisterer det svært mange tenkelige scenarier og alle kvalitative valg i analysen vil således ha innvirkning på resultatene. Dette gjelder for eksempel antall fasadeåpninger, fasadeåpningens dimensjoner, hvor i rommet brenneren er plassert, hvilken retning vinden kommer fra, hva som brenner, materialeegenskaper osv. Endringer i disse valgene kunne ført til helt andre resultater enn det som ble generert i denne studien. På grunn av dette kan det også være utfordrende å generalisere funn. Samtidig er det viktig å huske på at scenariet bør bestemmes ut fra det analysen ønsker å undersøke og at gjeldende systemer bør utfordres. Det er også et krav i NS3901 (*Risikovurdering av brann i byggverk*) at en risikoanalyse skal inneholde et troverdig *worst case scenario*, og det er ikke usannsynlig at det kan begynne å brenne foran en fasadeåpning som er vendt mot en annen bygning. Det kan derimot være en utfordring å sette opp et slikt scenario og vite at ingen andre scenario ville utfordret systemet mer.

Fasadesprinkler

Måten fasadesprinklersystemet er modellert på inneholder store usikkerheter. Systemet er forsøkt modellert slik at det vil strømme vann nedover fasaden i en tilsvarende vannmengde som er brukt i dyser i innvendig sprinklersystem. Samtidig er det sannsynlig at vannmengden i et utvendig sprinklersystem har andre dimensjoner enn det som er brukt for innvendig system. Jensen oppgir at NFPA (National Fire Protection Association) har noen anbefalinger for brennbare fasader men at de krever enorme vannmengder for å få konservative verdier på grunn av manglende testgrunnlag, over 40 L/min per løpemeter fasade. Han påpeker at det derimot ikke er kjent at disse reglene brukes noen steder i verden.

7 Konklusjon

Denne studien skulle forsøke å svare på om fasadesprinkleranlegg er et godt tiltak mot brannspredning i tett trehusbebyggelse, og ble i lys av denne problemstillingen brutt ned i fire forskningsspørsmål:

1. Hvilke mekanismer ligger til grunn for brannspredning mellom byggverk og hvorfor er disse en utfordring for tett trehusbebyggelse under vindfulle forhold?
2. Hvilke utfordringer kan knyttes til bruk av fasadesprinkler i tett trehusbebyggelse?
3. Hvordan påvirkes en rombrann av ytre vindpåkjenning i ulike hastigheter, og på hvilken måte kan dette påvirke et fasadeslokkeanlegg?
4. Hvilken effekt har fasadesprinkler på brannspredning med og uten vind?

For å svare på disse forskningsspørsmålene ble det utført et litteratursøk og hentet inn informasjon fra Geir Jensen, brannrådgiver i COWI. Det ble også utført brannsimuleringer med det mål å undersøke hvilken effekt vind og fasadesprinkler har på brannspredning i tett trehusbebyggelse.

Forskningsspørsmål 1 identifiserte fire spredningsmekanismer som er utfordrende ved brann i tett trehusbebyggelse, nemlig flammespredning, flyvebrann, konveksjon og varmestråling. Spredningsmekanismene er en utfordring i tett trehusbebyggelse fordi de tar i bruk både stråling, konveksjon og konduksjon som i kombinasjon kan påvirke og forsterke hverandre dersom de opptrer samtidig i en brann (noe som er svært sannsynlig, spesielt for tett trehusbebyggelse). Mekanismenes risiko for spredning hver for seg vil derimot variere. Vindpåvirkning kan gjøre disse mekanismene ekstra farlige, samtidig som vinden kan gjøre spredningsfaren mindre dersom hastigheten blir for stor. Det kan se ut som at vindhastigheten når en topp for hvor den utgjør størst risiko for spredning, før risikoen igjen synker med økt hastighet. Økt vindhastighet vil samtidig føre til et økt konvektivt varmetap.

Videre kan dette brukes til å avgjøre hvilke tiltak som kan være effektive mot spredning i tett trehusbebyggelse generelt, og om fasadesprinkler vil være et effektivt tiltak mot slik spredning spesielt.

Forskningsspørsmål 2 identifiserte følgende utfordringer med sprinkleranlegg som kan knyttes til fasadesprinkler: vannforsyning, frost, inngrep i bygningsmassen, begrenset tilgang til brannen, oppdriftskrefter og deteksjon. I lys av litteratursøket og informasjon fra Jensen ble disse utfordringene drøftet og det kom tydelig frem at fasadesprinkler kommer med mange utfordringer som det per i dag ikke eksisterer spesielt gode løsninger på. I tillegg vil disse utfordringene stort sett komme samtidig, noe som øker problemets omfang.

Denne kunnskapen kan brukes til å undersøke hvilke løsninger som kan være aktuelle for slike utfordringer ved eventuell utarbeidelse av et regelverk, eller om utfordringene er for store til at fasadesprinkleranlegg vil være et lønnsomt og/eller effektivt tiltak.

Forskningsspørsmål 3 viste at en rombrann påvirkes på ulike måter avhengig av vindhastighet og antall fasadeåpninger. Vinden vil både øke og redusere varmeavgivelsesraten og luftinnstrømningen til brannrommet, i tillegg til å påvirke på ulike måter temperaturutviklingen i rommet. Det kom også tydelig frem at temperaturer skyves medvinds avhengig av hastighet, i tillegg til at det var stor variasjon i forbrenning på utsiden avhengig av antall fasadeåpninger. Samtidig samsvarte simuleringresultatene med nylig publisert forskning hvis fokus var å undersøke vindens påvirkning på en rombrann med én fasadeåpning. Resultatene i denne studien bidrar derfor til å drive slik forskning fremover, samt å styrke FDS' validitet som simuleringverktøy med vind som parameter.

Dette kan brukes til å forsøke å generalisere empiriske sammenhenger som kan si noe om hvordan en brann vil arte seg under ulike vindhastigheter, som kanskje en gang i fremtiden kan anvendes i et reelt scenario med vind og brann. I tillegg kan det kanskje bidra til å vurdere om fasadesprinkler vil være et effektivt tiltak ved vindpåvirkning i ulike hastigheter ut fra måten rombrannen vil utvikle seg på.

Forskningsspørsmål 4 skulle forsøke å vise hvilken effekt fasadesprinkler faktisk har under en brann som påvirkes av vind. Resultatene viser at fasadesprinklers effekt mot temperaturøkning og eksponering for varmekraft i nabobygg er god, og tiltaket vil derfor således fungere godt mot brannspredning. Samtidig er disse resultatene svært usikre og det er rimelig å anta at de vil vike fra virkeligheten i stor grad. Likevel viste analysen at det er effektivt å bekjempe utvendig brannspredning med vann, både i tilfeller med og uten vind, selv om resultatene kanskje er vel positive.

Denne kunnskapen kan brukes som et argument for at fasadesprinkler faktisk har en positiv effekt mot utvendig brannspredning i brennbare fasader, også under påvirkning av vind. Samtidig kan det tenkes at andre løsninger for utførelse og prosjektering er mer effektive. Det ville vært optimalt å finne en løsning som utnytter brannens termiske krefter og påvirkningen fra vind i ulike hastigheter. Slik forskning kan bidra til å optimalisere systemets effekt og kanskje kan det til slutt foreligge et regelverk for utførelse.

Hovedkonklusjon og anbefalinger

I lys av forskningsspørsmålene konkluderes det med at fasadesprinkler i stor grad *kan* være et godt tiltak mot spredning i tett trehusbebyggelse under vindfulle forhold, men at de løsningene som eksisterer i dag sannsynligvis kan og bør optimaliseres. Det er derfor behov for ytterligere forskning.

Studien gir følgende anbefalinger:

- Det bør etableres et regelverk rundt utførelse av fasadesprinkleranlegg dersom det skal fortsette å brukes som risikoreducerende tiltak
- For å etablere et slikt regelverk bør det utføres fullskala tester som sier noe om sprinkler-systemets effekt i ulike situasjoner, herunder vindpåvirkning i ulike hastigheter og hvilke vannstrømmer som er mest hensiktsmessige
- Lovteksten som regulerer tett trehusbebyggelse bør gjennomgås for å unngå tvetydigheter og for å fremme systematisk sikkerhetsarbeid i slik bebyggelse
- Vannforsyningen i Norges kommuner bør kartlegges for å avgjøre om vannressursene strekker til ved et slokkearbeid

8. Videre arbeid

Studien har støtt på flere tema som det kan være interessant å undersøke nærmere når det kommer til fasadesprinkler og brannsimulering med FDS. Det foreslås at følgende tema bør arbeides videre med:

- Utføre fullskala testing av fasadesprinklers effekt
- Undersøke fasadesprinklers effekt mot vertikal brannspredning
- Undersøke nærmere om og eventuelt hvordan vindens påvirkning kan generaliseres da det kan tyde på at denne påvirkningen er proporsjonal med hastigheten
- Undersøke i FDS fasadesprinklers effekt dersom vannet kastes oppover langs fasaden
- Utføre en kostnadsanalyse av om fasadesprinkler vil være et lønnsomt tiltak

Referanser

- Arvidson, M. (2011). *Flammability of antifreeze agents for automatic sprinkler system*. Journal of Fire Protection Engineering, 21 (2) 115-132.
- Babrauskas, V. (1980). *Estimating room flashover potential*. Fire Technology 16.
- Babrauskas, V., Peacock, R. D. (1992). *Heat Release Rate: The Single Most Important Variable in Fire Hazard*. Fire Safety Journal 18.
- Beyler, C. L. (2008). *Generation of Heat and Chemical Compounds in Fires*, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering (Tabell 3-4.14). National Fire Protection Association.
- Boehmer, H., Floyd, J., Gottuk, D. (2010). *Fire Dynamics and Forensic Analysis of Limited Ventilation Compartment Fires Volume 2: Modeling*. U.S. Department of Justice: USA.
- Brannteknisk Forening (2018). *Hva gjør et sprinkleranlegg?* www.branntekniskforening.no/hva-gjor-et-sprinkleranlegg
- Brohus, H., Nielsen, P. V., Petersen, A. J., Sommerlund-Larsen, K. (2007). *Sensitivity Analysis of Fire Dynamics Simulation*. In Proceedings of Roomvent 2007: Helsinki.
- BS 9251:2005 *Sprinkler systems for residential and domestic occupancies. Code of practice*.
- Byggteknisk Forskrift (TEK17). *Forskrift 1. juli 2017 om tekniske krav til byggverk*.
- Colwell, S., Barker, T. (2013). *Fire performance of external thermal insulation for walls of multistorey buildings*. BRE trust, Watford.
- Cox, G., Kumar, S. (2002). *Modeling Enclosure Fires Using CFD*. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering.
- Direktoratet for Byggekvalitet (DiBK). (1999). Melding HO-1/99, *Sprinkler - temaveiledning*.
- Direktoratet for Samfunnssikkerhet og Beredskap (2005). *Nasjonalt kartlegging av brannsikkerhet i verneverdig tett trehusbebyggelse*.
- Direktoratet for Samfunnssikkerhet og Beredskap (2014). *Brannene i Lærdal, Flatanger og på Frøya vinteren 2014*.
- Direktoratet for Samfunnssikkerhet og Beredskap (2014). *Brannsikring av områder med verneverdig tett trehusbebyggelse*.
- Drysdale, D. (2011). *An introduction to fire dynamics*. John Wiley and Sons.

- EFSN (European Fire Sprinkler Network) (2015). *Anti-Freeze in Sprinkler Systems*. London: UK.
- Eliassen, R. (2015). *Flammeskjerner og vind*. Masteroppgave. NTNU: Trondheim.
- Forskrift om brannforebygging. *Forskrift 1. juli 2002 om brannforebyggende tiltak og tilsyn*.
- Ganteaume, A., Guijarro, M., Jappiot, M. et al. (2011). *Laboratory characterization of firebrands involved in spot fires*, Annals of Forest Science.
- Giraldo, M., Lacasta, A., Avellaneda, J., Burgos, C. (2013). *Computer-simulation study on fire behaviour in the ventilated cavity of ventilated façade systems*. MATEC Web of Conferences.
- Gollner, M. (2017). *In Memoriam: Professor Margaret Law*. The International Association for Fire Safety Science.
- Heselden, A. J. M. (1968). *Parameters determining the severity of a fire*. Behaviour of structural steel in fire.
- Hinoto, K., Tsuchihashi, T., Tanaka, Y., Tanaka, T. (2009). *Modeling thermal behaviors of window flame ejected from a fire compartment*. Fire Safety Journal 44.
- Hu, L., Ren, F., Hu, K., Tang, F., Lu, K. (2017). *An experimental study on temperature evolution inside compartment with fire growth and flame ejection through an opening under external wind*. Proceedings of the Combustion Institute, Volume 36.
- Huang, H., Ooka, R., Liu, N. A., Zhang, L., Deng, Z., Kato, S. (2009). *Experimental study of fire growth in a reduced scale compartment under different approaching external wind conditions*. Fire Safety Journal 44.
- ISO 16733-1:2015 *Fire safety engineering – Selection of design fire scenarios and design fires – Part 1: Selection of design fire scenarios*.
- Jacobsen, D. (2015). *Hvordan utføre undersøkelser*. Cappelen Damm Akademisk.
- Jarnskjold, T. & Øverby, T. (2016). *Brannsikringsplan tett trehusbebyggelse Son*. COWI AS: Oslo.
- Jensen, G. (2015). *Hvorfor og hvordan anskaffe automatiske slokkeanlegg?* Kirkelig Arbeidsgiver og Interesseorganisasjon & Riksantikvaren.
- Karlsson, B., Quintiere, J. (2000). *Enclosure Dynamics*. CRC Press.
- Knarud, J. I. B. (2017). Introduction to Fire Dynamic Simulator (FDS) - by use of PyroSim. *TBA4177 Brannsikkerhet i byggverk*.
- Kollegiet for Brannfaglig Terminologi (KBT.no) (n.d.).
- Law, M. (1960). *Heat Radiation from Fires and Building Separation*. Fire Research Note 437. HMSO: London.
- Law, M. (1963). *Heat radiation from fires and building separation*. Fire Research Technical Paper No. 5.

- Law, M. (1978). *Fire Safety of External Building Elements - The Design Approach*. Engineering Journal.
- Law, M., O'Brien, T. (1981). *Fire Safety of Bare External Structural Steel*. Steel Construction Institute.
- Log, T. (2016). *Cold Climate Fire Risk; A Case Study of the Lærdalsøyri Fire, January 2014*. Fire Technology vol 52.
- McGuire, J. H. (1965). *Fire and the Spatial Separation of Buildings*. Fire Technology Vol. 1.
- McGuire, J. H. (1965). *Ignition of Materials behind Common 1/8-inch Thick Window Glass*, Division of Building Research, National Research Council of Canada, Ottawa.
- Mostue, B., Stensaas, J. P. (2002) *Effekt av boligsprinkler i omsorgsboliger*. SINTEF NBL: Trondheim.
- MRC (2002). *Wind speed profiles*. www.webmet.com/metmonitoring/625.HTML
- National Fire Protection Association (NFPA) (2017). *U.S. Experience with Sprinklers*. USA: Massachusetts.
- NIST Verification Guide (2017). fds6.it/PDF/FDSVerificationGuide.pdf
- NS-EN 12845 (2016). *Faste brannsløkkesystemer - Automatiske sprinklersystemer - Dimensjonering, installering og vedlikehold*.
- NUREG-1934 (2012). *Nuclear Power Plant Fire Modeling Analysis Guidelines Final report*, epr11023259. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington DC.
- Nystedt, F., Frantzich, H. (2011). *Kvalitetsmanual for brandtekniska analyser vid svenska kärntekniska anläggningar*. Lund Universitet: Sverige.
- Oleszkiewics, I., Richardson, J. K. (1986). *Fire Tests on Window Assemblies Protected by Automatic Sprinklers*, National Research Council, Canada.
- Oleszkiewicz, I. (1990). *Fire exposure to exterior walls and flame spread on combustible cladding*. Fire Technology vol 26.
- Opplysningskontoret for Automatiske Sløkkeanlegg (OFAS) (n.d.). www.slokkeanlegg.no/Slokkeanlegg/Sprinkler/Generelt
- Overholt, K. (2014). *Heat fluxes in FDS*. www.koverholt.com/2014/01/heat-fluxes-in-fds/
- Ramstad, T. (2015). Unngå brannspredning i rekkehus. *SINTEF Byggforsk*. www.sintef.no/byggforsk/fagblogg/poster/unnga-brannspredning-i-rekkehus/
- Riksantikvaren (n.d.). *Bygninger og anlegg - Brannsikringsstrategi*. Infoark.
- Riksantikvaren (n.d.). *Hvordan begrense brann?* www.riksantikvaren.no/Hvordan-begrense-brann
- Schneider Electric (n.d.). *Flammedeteksjon mot fasadebrann*. www.schneider-electric.no/documents/whitepapers/Flammedeteksjon.pdf

- SINTEF Byggforsk (2004). *Fiin gammel aargang - Energisparing i verneverdige hus*. Veileder.
- SINTEF Byggforsk (2005). Byggforskserien, 525.106, *Skrå tretak med kaldt loft*, Trondheim.
- SINTEF Byggforsk (2006). Byggforskserien, 520.310, *Brannspredning via fasader*, Trondheim.
- SINTEF Byggforsk (2007). Byggforskserien, 700.620, *Brannsikring av eldre, tett trehusbyggelse*, Trondheim.
- SINTEF Byggforsk (2009). Byggforskserien, 550.361, *Sprinkleranlegg*, Trondheim.
- SINTEF Byggforsk (2016). Byggforskserien, 742.111, *Eldre, utvendig bordkledning. Profiler og utførelse.*, Trondheim
- Sorthe, L., Bjelland, H., Forsén, N. (2015). *Utredning: Muligheter for reduserte branntekniske ytelser ved installasjon av automatisk slokkeanlegg*. Direktoratet for Byggkvalitet: Norge.
- Steen-Hansen, A., Bøe, A. G., Hox, K., Mikalsen, R. F., Stensaas, J. P., Storesund, K. *Hva kan vi lære av brannen i Lærdal i januar 2014? Vurdering av brannspredningen*. RISE Fire Research.
- Stensaas, J. (1997). *Klassifisering av risikoen for brannspredning mellom hus i tettbygde områder*. Trondheim: SINTEF NBL.
- St.meld. nr. 35 (2008 - 2009). Nordisk samarbeid. Oslo: Fornyings- og administrasjonsdepartementet.
- Teknisk Industrivern (2010) www.teknisk-industrivern.no/documents/57.html
- Thelin, W., Wighus, R. (2016). *Vann til brannsløkking og sprinkleranlegg*. Rapport for Norsk Vann.
- Thomas, P. H. & Heselden A. J. M. (1962). *Behaviour of fully developed fire in an enclosure*. Combustion and Flame, Volume 6.
- Thomas, P. H. (1965). *The rate of temperature rise in a compartment fire*. Fire Research Note 595.
- Thomas, P. H., Heselden, A. J. M. (1972). *Fully developed fires in single compartments. A cooperative research programme of the Conseil Internationale du Bâtiment*. Conseil Internationale du Bâtiment Report No. 20, Fire Research Note No. 923.
- Thomas, P. H. (1981) *Testing products and materials for their contribution to flashover in rooms*. Fire and Materials.
- Thomas, P. H. (1983). *Modeling of compartment fires*. Fire Research Station, Borehamwood, Hertfordshire (U.K.).
- Thunderhead Engineering (2018). *PyroSim user manual*.
- Trøan, K. (2008). *Sprinkling i praksis – Problemstillinger og utfordringer*. Innlegg, Seminar i Vannforeningen.
- Webster, C. T., Raftery, M & Smith, P. G. (1961). *The burning of well ventilated compartment fires*. Fire Research Note 474.

- Wickström, U., McGrattan, K., Duthinh, D. (2007). *Adiabatic surface temperature for calculating heat transfer to fire exposed structures*. SP, Boras, Sweden & NIST, Maryland, USA
- Wighus, R. (2016). Brannbeskyttelse i tett trehusbebyggelse. *Bygg og bevar*. 11.05.2018. www.byggogbevar.no/pusse-opp/brann/artikler/brannbeskyttelse-i-tett-trehusbebyggelse
- Zhao, G., Beji, T., & Merci, B. (2015). *Application of FDS to an under-ventilated enclosure fire with external flaming*. 2nd European Symposium on Fire Safety Science, Proceedings.
- Øverby, T., Jensen, G. (2010). *Brannsikringsplan for Risør sentrum*, COWI AS: Oslo.
- Øygarden, J. E., Røilid, R. (2016). *Brannsikring av områder med tett verneverdig trehusbebyggelse*. Østre Agder Brannvesen, Tvedestrand kommune.

Vedlegg

Vedlegg A: Utregninger

Vedlegg B: Vindhastigheter og omgivende temperatur

Vedlegg C: Sensitivitetsanalyse

Vedlegg A

Utregninger

Leilighetens overflateareal, dørens areal og høyde

Leilighet

Lengde = 5 meter
Bredde = 5 meter
Høyde = 2,4 meter

$$2(5 \times 5 + 5 \times 2,4 + 5 \times 2,4) = 98m^2$$

Dør

Høyde = 2 meter
Bredde = 1 meter

$$V = A_O \sqrt{H_O} = 2 \times \sqrt{2} = 2,82m^{5/2}$$

Brennerens areal og diameter

Lengde = 2,5 meter
Bredde = 1 meter
 $A = 2,5m \times 1m = 2,5m^2$

Beregner diameter ved hjelp av arealet og bruker likning for areal av sirkel:

$$A = \pi r^2 \Rightarrow D = 2\sqrt{\frac{A}{\pi}} \Rightarrow D = 2\sqrt{\frac{2,5}{\pi}} = 1,784m$$

Beregne HRR

Brannens forbrenningsrate ved fullt utviklet brann under ventilasjonskontrollerte forhold (likning 5):

$$\eta = \frac{96}{2 \times 2^{1/2}} = 33,94$$

$$\dot{m}_{vent} = 0,18 \frac{(1 - e^{-0,035 \times 33,94})}{(5/5)^{1/2}} \times 2,82 = 0,359 \text{ kg/s}$$

Varmeavgivelsesraten til brannen ved fullt utviklet brann under ventilasjonskontrollerte forhold blir da (likning 4):

$$0,359 \text{ kg/s} \times 18\,800 \text{ kJ/kg} = 6750,94 \text{ kW}$$

Verdien for Q rundes opp til 6800 kW.

Verdien for Q^* bør ligge mellom 0,3 og 2,5. Sjekker med likning 12:

$$Q^* = \frac{6800}{1,2 \text{ kg/m}^3 \times 1 \text{ kJ/kg} \times 284,2 \times \sqrt{9,81 \text{ m/s}^2} \times 1,784 \times 1,784^2}$$

= 1,49. Verdien ligger innenfor anbefalt verdi.

$$\text{HRRPUA} = \frac{6800 \text{ kW}}{2,5 \text{ m}^2} = 2720 \text{ kW/m}^2$$

Mesh og cellestørrelser

Sjekker om cellestørrelse 0,2 er fint nok for $\text{HRR}_{max} = 7000 \text{ kW}$, bruker likning 9

$$D^* = \left(\frac{6800}{1,2 \text{ kg/m}^3 \times 1 \text{ kJ/kgK} \times 284,2 \text{ K} \times \sqrt{9,81 \text{ m/s}^2}} \right)^{2/5} \approx 2,1$$

Bruker likning 8 til å sjekke om meshet er fint nok:

$$\frac{2,1}{0,2} = 10,5$$

$$\frac{2,1}{0,1} = 21,0$$

Vedlegg B

Vindhastigheter og omgivende temperatur

Figur B.1 er hentet fra yr.no og viser vindstatistikken for Trondheim for et år (februar 2017 - februar 2018). Fra denne tabellen er gjennomsnittshastighet regnet ut, i tillegg til at høyeste vindhastighet er inkludert. Samtidig er det valgt å inkludere en verdi mellom gjennomsnittshastigheten og den høyeste hastigheten.

Måneder	Vind	
	Gjennomsnitt	Sterkest vind
mar 2018	2,2 m/s	8,9 m/s 24. mar
feb 2018	2,4 m/s	10,9 m/s 15. feb
jan 2018	2,8 m/s	12,9 m/s 7. jan
des 2017	2,7 m/s	10,6 m/s 23. des
nov 2017	2,7 m/s	9,7 m/s 14. nov
okt 2017	2,8 m/s	11,2 m/s 16. okt
sep 2017	2,4 m/s	9,1 m/s 30. sep
aug 2017	2,1 m/s	7,8 m/s 30. aug
jul 2017	2,2 m/s	6,8 m/s 17. jul
jun 2017	2,6 m/s	7,7 m/s 20. jun
mai 2017	2,3 m/s	7,4 m/s 16. mai
apr 2017	2,8 m/s	11,5 m/s 20. apr
mar 2017	3,1 m/s	12,5 m/s 15. mar

Figur B.1: Beregningsgrunnlag for vindhastigheter.

Gjennomsnittshastigheten blir 2,7 m/s. Høyeste målte vindhastighet er januar 2018 med en verdi på 12,9 m/s. Hastigheten som ligger midt imellom disse hastighetene er 7,8 m/s.

Figur B.2 viser en oversikt over temperaturen på Møllenberg det siste året. For å bestemme omgivelsestemperatur i modellen er det tatt utgangspunkt i et gjennomsnitt fra alle månedene som har en gjennomsnittstemperatur på over 4°C, da dette er minimumstemperatur for sprinkleranlegg som ikke fungerer like godt i kulde. Gjennomsnittstemperaturen fra disse månedene (okt 2017 - mai 2017) er 11,2°C.

Måneder	Temperatur			
	Gjennomsnitt	Normal	Varmest	Kaldest
mar 2018	-2,6°	0,0°	8,3° 24. mar	-17,9° 1. mar
feb 2018	-3,5°	-2,5°	5,2° 9. feb	-17,0° 28. feb
jan 2018	-0,7°	-3,0°	5,3° 25. jan	-12,5° 23. jan
des 2017	-1,2°	-2,0°	7,5° 8. des	-10,3° 15. des
nov 2017	0,6°	0,5°	10,4° 23. nov	-11,6° 22. nov
okt 2017	6,8°	5,5°	15,1° 3. okt	-0,5° 20. okt
sep 2017	12,3°	9,0°	20,2° 3. sep	5,2° 3. sep
aug 2017	13,1°	12,5°	21,8° 6. aug	4,7° 27. aug
jul 2017	14,0°	13,0°	25,6° 21. jul	4,1° 6. jul
jun 2017	12,5°	12,0°	25,0° 30. jun	2,3° 2. jun
mai 2017	8,5°	9,0°	19,2° 20. mai	-2,4° 10. mai
apr 2017	3,3°	3,0°	9,6° 3. apr	-4,0° 24. apr
mar 2017	1,0°	0,0°	8,5° 26. mar	-8,4° 8. mar

Figur B.2: Temperaturer fra det siste året (hentet fra yr.no).

Vedlegg C

Sensitivitetsanalyser

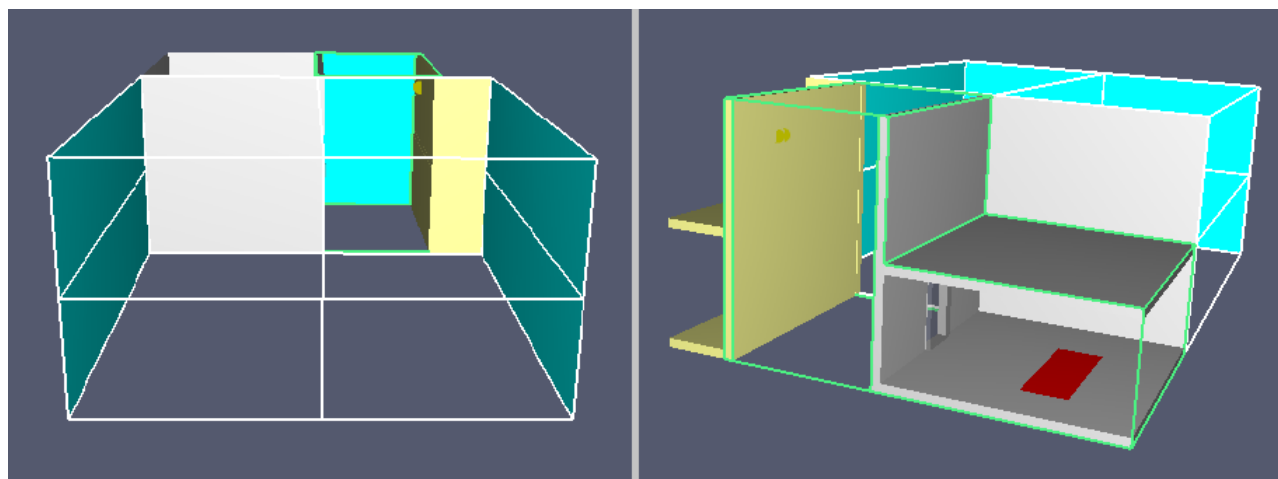
Analysene for gridstørrelse og meshoppsett ble utført med en varmeavgivelsesrate på 1910 kW/m².

C.1 Meshinndeling

3 ulike oppsett for meshinndelingen er undersøkt for å avgjøre hvilket oppsett som er mest effektivt og nøyaktig. Det etterstrebes å unngå oppdeling av mesh i kritiske soner med mye aktivitet som i brannplumen, fasadeåpningen og nært sensorene som måler temperatur og varmefluks. Maskinen som simuleringene kjøres på har 6 prosessorkjerner og alle oppsettene er derfor delt inn i minst 6 mesh. Informasjonsoverføring mellom mesh tas høyde for da dette krever ekstra datakraft.

Oppsett 1

I oppsett 1 er det fokusert på å ikke dele opp meshet med mest aktivitet i mer enn en gang, og er delt inn i totalt 6 mesh. Cellefordelingen i dette oppsettet er relativt skjev, og presenteres i tabell C.1.



Figur C.1: Meshinndeling oppsett 1.

Tabell C.1: Antall celler i meshene i oppsett 1.

Mesh	Antall celler
1	101 088
2	67 600
3	15 925
4	17 150
5	15 925
6	17 150

Figur C.1 viser meshinndelingen der grønn inndeling markerer meshene med mest aktivitet. Som det kommer frem av figurene er dette meshet splittet én gang. Samtidig viser figur C.2 tverrsnittet av plumen og ingen synlige diskontinuiteter bemerkes.



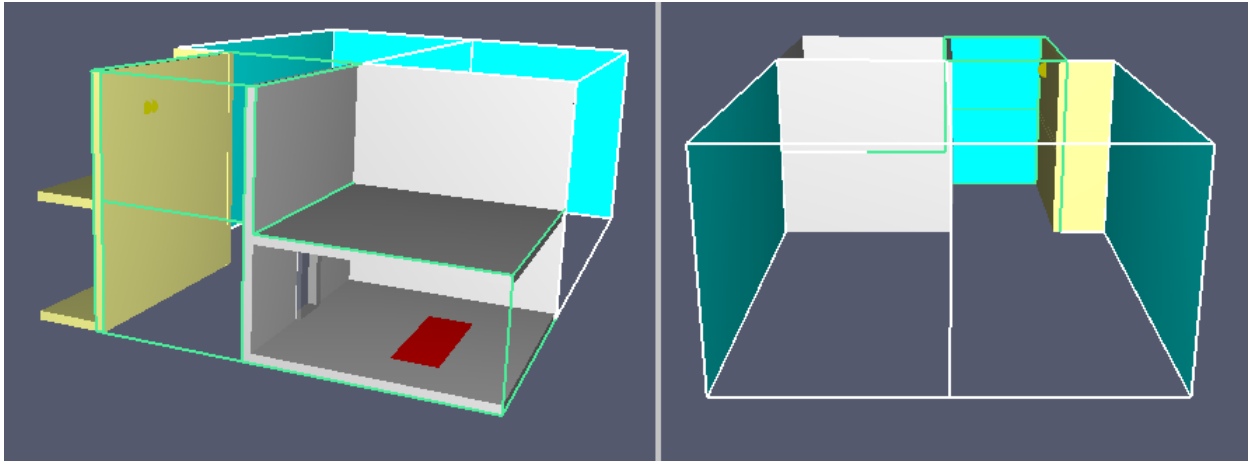
Figur C.2: Tverrsnitt av plumen i oppsett 1.

Oppsett 2

Oppsett 2 er også delt inn i 6 mesh men her er sonene med mye aktivitet splittet i 4 mesh, og områdene med lite aktivitet i 2 mesh (se figur C.3). Dette er gjort for å prøve å oppnå noenlunde likt antall celler i hvert mesh, selv om det er en overvekt av celler i noen av meshene med mest aktivitet (mesh 3 og 4). Tabell C.2 viser en oversikt over antall celler i de ulike meshene.

Tabell C.2: Antall celler i meshene i oppsett 2.

Mesh	Antall celler
1	35 152
2	32 448
3	52 416
4	48 672
5	33 075
6	33 075



Figur C.3: Meshinndeling oppsett 2.

Figur C.4 viser et tverrsnitt av plumen og en horisontal diskontinuitet grunnet meshinndelingen kommer tydelig frem.



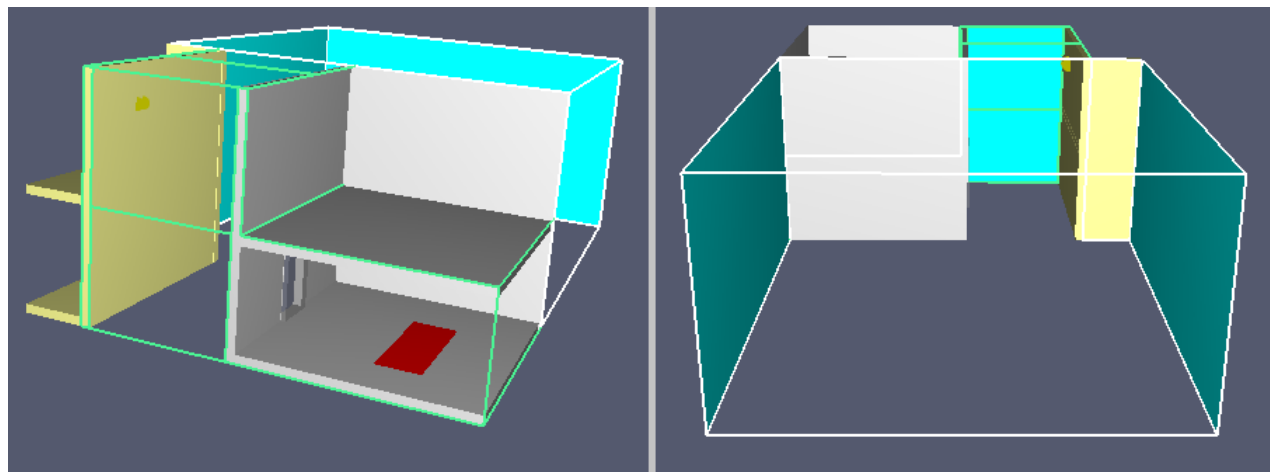
Figur C.4: Tverrsnitt av plumen i oppsett 2. Figuren viser en tydelig horisontal diskontinuitet ca. midt i plumen.

Oppsett 3

I oppsett 3 er det forsøkt å dele inn modellen i 8 mesh med ca. likt antall celler i hvert mesh. Denne inndelingen undersøker om det går raskere ved å tildele flere mesh til en prosessorkjerne. Tabell C.3 viser en oversikt over antall celler i hvert mesh.

Tabell C.3: Antall celler i meshene i oppsett 3.

Mesh	Antall celler
1	28 080
2	20 592
3	30 240
4	22 176
5	37 856
6	29 744
7	33 075
8	33 075



Figur C.5: Meshinndeling oppsett 3.



Figur C.6: Tverrsnitt av plumen i oppsett 3. Figuren viser en tydelig horisontal diskontinuitet ca. midt i plumen.

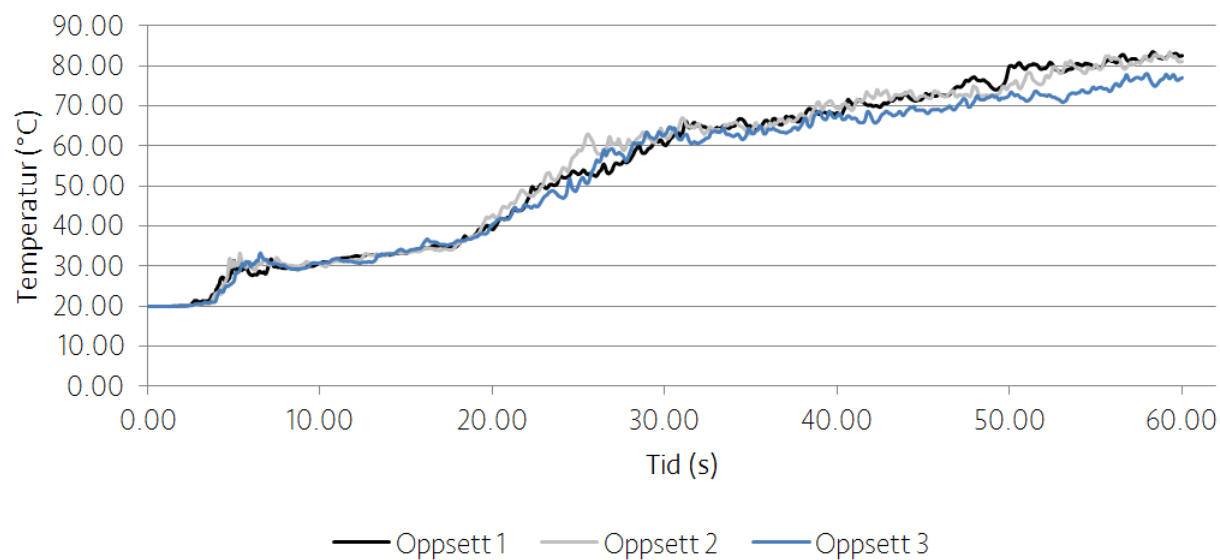
Konklusjon

Tabell C.4 viser en oversikt over de ulike verdiene til oppsett 1, 2 og 3. Figur C.7 viser en oversikt over temperaturvariasjonen i de ulike oppsettene.

Tabell C.4: Resultater fra meshinndelingen.

	Oppsett 1	Oppsett 2	Oppsett 3
Tid	2 t 17 min	1 t 27 min	3 t 53 min
Max temperatur (°C)	82,6	81	77,2

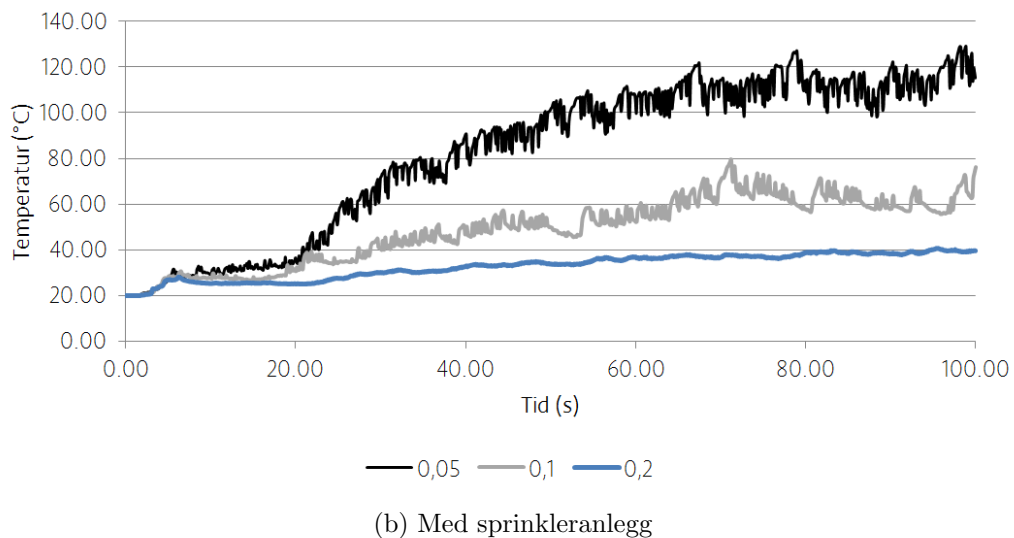
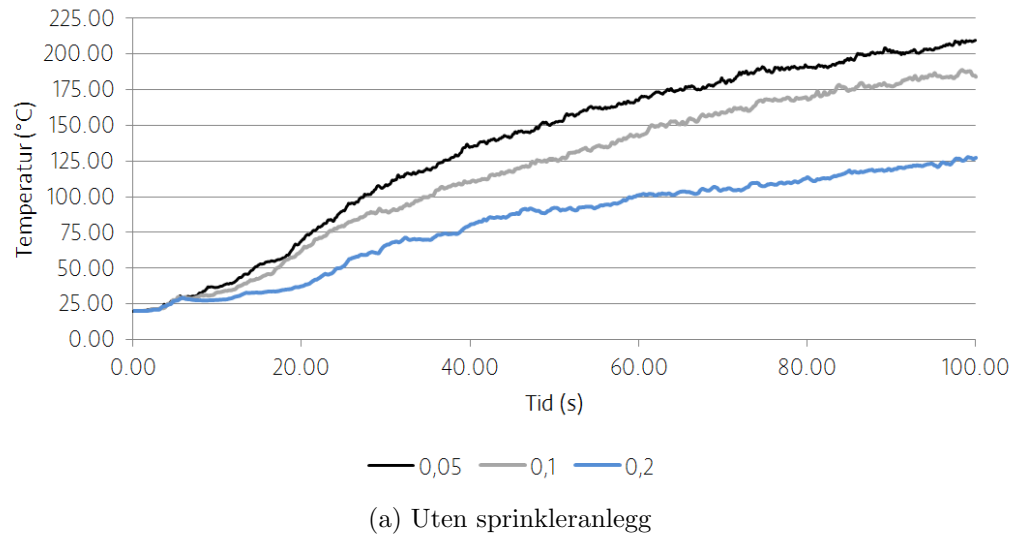
Som det kommer frem av figur C.7 er resultatene i de ulike oppsettene greit sammenfallende. Oppsett 1 vil være en pekepinn på resultatet som gir mest nøyaktige tall da dette oppsettet kun på et sted har splittet en aktiv sone i to mesh. Samtidig kommer det frem av figuren at oppsett 2 er mer nøyaktig resultatet i oppsett 1 enn oppsett 3. I tillegg hadde oppsett 2 raskere simuleringstid enn de to andre oppsettene. Oppsett 2 velges derfor som standardoppsett i analysen.



Figur C.7: Temperaturvariasjon i de ulike oppsettene.

C.2 Gridstørrelse

En sensitivitetsanalyse som undersøkte hvor fine meshene i modellen må være for å få så nøyaktige resultat som mulig ble utført. Sonene med mest aktivitet ble identifisert og testet med celledørrelser på 0,2, 0,1 og 0,05 m. Simuleringene ble kjørt med $HRR = 4770 \text{ kW}$ og en omgivelsestemperatur på $20 \text{ }^\circ\text{C}$ som er default innstilling i FDS. Figur C.8 viser variasjonene i veggtemperatur henholdsvis uten og med sprinkleranlegg.



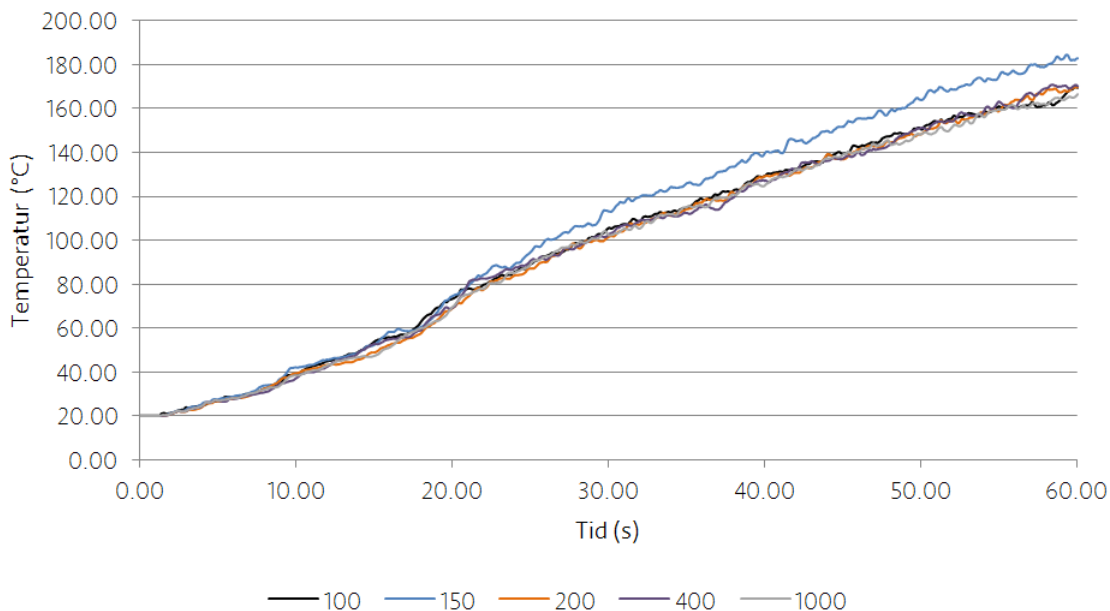
Figur C.8: Oversikt over temperaturutvikling ved ulike celledørrelser.

Resultatene fra analysen viser at temperaturen endrer seg mye ved finere cellestørrelse der den største temperaturredifferansen i scenariet med og uten sprinkling var henholdsvis ca. 75 °C og 80 °C. Cellestørrelse på 0,05 vil være å foretrekke, men man må ta hensyn til prosesseringstiden som i det tilfellet ble for høy. Simuleringstiden var satt til 100 sekunder og tiden for cellestørrelser på 0,05, 0,1 og 0,2 var henholdsvis 81, 6,5 og 2,5 time. Samtidig er hovedinteressen i analysen differansen i temperatur med og uten fasadesprinkling og ikke nødvendigvis nøyaktig hvor høye temperaturer som oppnås. Analysen viste at temperaturredifferansen i scenariet med og uten sprinkling for de ulike størrelsene var 95 °C for 0,05, 106 °C for 0,1 og 88 °C for 0,2. Dette viser at temperaturredifferansen i scenariet med cellestørrelse på 0,1 var størst. Likevel er denne temperaturen mer nøyaktig enn cellestørrelse på 0,2. Scenariet med størrelse på 0,1 m i sonene med mest aktivitet vil derfor brukes videre.

C.3 Variablenes sensitivitet

En analyse som undersøker variablenes sensitivitet ble utført der fraksjoner av brannens varmeavgivelsesrate (HRR), antall diskrete vinkler i strålingsmodellen og omgivelsestemperatur varierer. Figur C.12 viser en oversikt over de ulike verdiene som er testet i kombinasjoner.

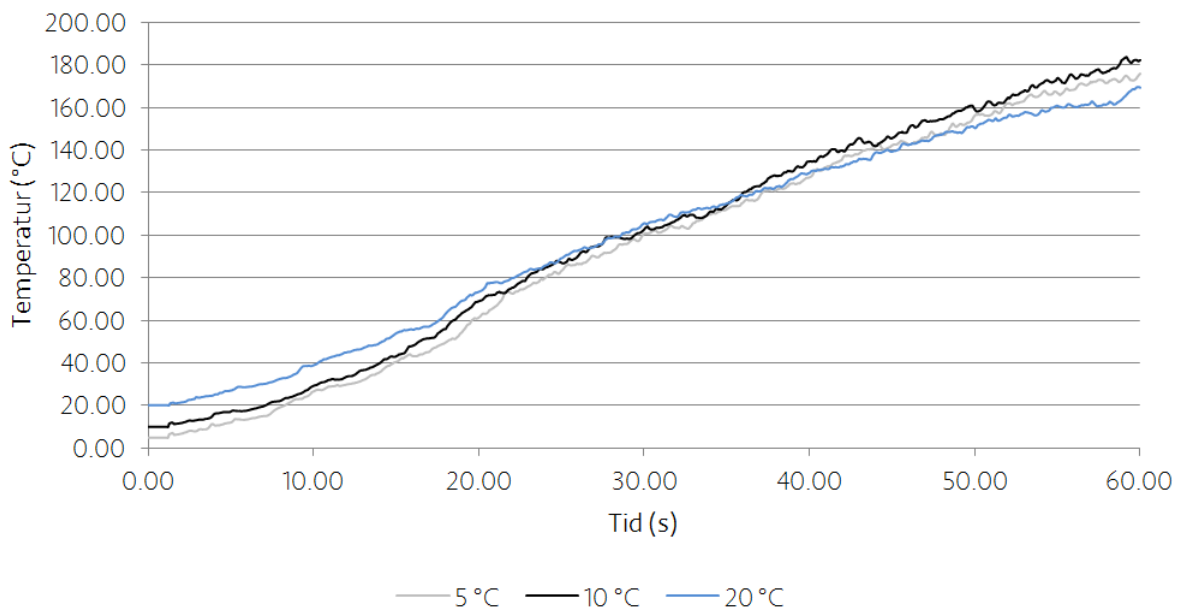
Resultatene fra analysen viser at antall vinkler i strålingsmodellen ikke gir store utslag i variasjon. Den viste også at en innstilling på 150 vinkler avvok fra scenariene med 100, 200, 400 og 1000 vinkler (se figur C.9). Defaultverdien med 100 diskrete vinkler er valgt videre i simuleringssoppsettet.



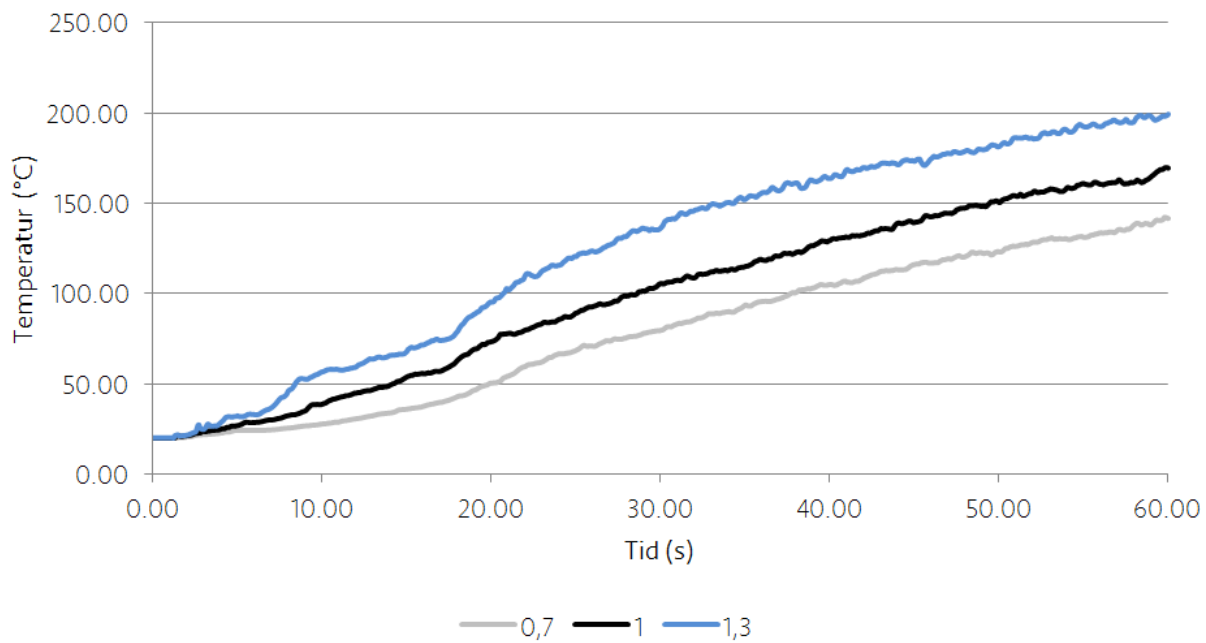
Figur C.9: Temperaturvariasjon med ulikt antall diskrete vinkler i strålingsmodellen.

Videre viser figur C.10 en oversikt over veggens temperaturutvikling ved ulik omgivelsestemperatur. Figuren viser at starttemperatur på 20, 10 og 5 °C hadde henholdsvis en maksimaltemperatur på 169,5, 182,1 og 176,0 °C. Dette viser at scenariet med 20 °C endte med lavest maksimaltemperatur etter 60 sekunder, samtidig som 10 °C endte med høyest. I analysen er det valgt en omgivelsestemperatur på 11,2 °C på grunnlag av gjennomsnittsverdier (ref. vedlegg B). Det kan derfor tyde på at denne temperaturen vil gi høyere maksimaltemperaturer enn scenarier med omgivelsestemperatur på 5 og 20 °C.

Figur C.11 viser temperaturutviklingen ved ulike varmeavgivelsesrater. Figuren er testet med 70 %, 100% og 130 % av den opprinnelige varmeavgivelsesraten på 4770 kW. Dette tilsvarer henholdsvis 3340, 4770 og 6200 kW. I figuren er dette beskrevet med fraksjoner av HRR (0,7, 1 og 1,3). Figuren viser at varmeavgivelsesraten er svært avhengig av temperaturutviklingen i scenariet, noe en bør være obs på når resultatene skal tolkes.



Figur C.10: Temperaturvariasjon med ulik omgivelsestemperatur.



Figur C.11: Temperaturutvikling ved ulike varmeavgivelsesrater.

Temperatur			Fraksjon av HRR				Antall diskrete vinkler				
5 °C	10 °C	20 °C	0,7	1	1,3	100	200	150	400	1000	
x				x		x					
	x			x		x					
		x		x		x					
		x	x			x					
		x			x	x					
		x		x			x				
		x		x				x			
		x		x					x		
		x		x						x	

Figur C.12: Kombinasjoner av testede variabler i sensitivitetsanalysen.