

# Brannsikring av fleretasjes trebygg ved bruk av aktive tiltak

*Fokus på vanntåkesystemer*

**Anders Brandser Ressheim**

Bygg- og miljøteknikk

Innlevert: juni 2015

Hovedveileder: Harald Landrø, BAT

Medveileder: Jon Ivar Belghaug Knarud, BAT

Dag Denstad, Rambøll

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet

Institutt for bygg, anlegg og transport





NORGES TEKNISK-  
NATURVITENSKAPELIGE UNIVERSITET  
INSTITUTT FOR BYGG, ANLEGG OG TRANSPORT

|                                                                                                              |                                       |   |                 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|---|-----------------|
| Oppgavens tittel:<br><br>Brannsikring i fleretasjes trebygg ved bruk av aktive tiltak – Med fokus å vanntåke | Dato: 6.6.2015                        |   |                 |
|                                                                                                              | Antall sider (inkl. bilag): 168 (225) |   |                 |
|                                                                                                              | Masteroppgave                         | X | Prosjektoppgave |
| Navn: Anders Brandser Ressheim                                                                               |                                       |   |                 |
| Faglærer/veileder: Harald Landrø                                                                             |                                       |   |                 |
| Eventuelle eksterne faglige kontakter/veiledere: Jon Ivar Belghaug og Dag Denstad                            |                                       |   |                 |

Ekstrakt:

Oppgaven omhandler branndimensjonering i høye trehus med eksponerte treflater ved bruk av vanntåkesystemer. Disse slokkesystemene er relativt nylig tatt i utstrakt bruk i boliger og lignende hvor forkullende branner er dominerende. Vanntåke bekjemper brann ved flere slokkemekanismer sammenlignet med sprinkler, men disse går delvis på bekostning av andre mekanismer og trenger ikke nødvendigvis å være en fordel. Komparativ feiltreanalyse kan benyttes for å estimere påliteligheten i vanntåkesystemer ved bruk av komponentdata fra lignende systemer. Resultatene kan benyttes videre for å vekte pålitelighetsstatistikk for sprinklersystemer, som inngår i beregningen av sannsynligheten for global strukturell kollaps. Oppgaven har forsøkt å estimere sannsynlighet for feil ved brann i et høyt trebygg ved å ta hensyn til brannspredning, antennelsesfare, overtenning, pålitelighet i branndører med mer. Kvantitativ beregning av sannsynlighet for global strukturell kollaps kan benyttes for å finne forholdet mellom aktiv- og passiv brannskring.

Stikkord:

|                                                |
|------------------------------------------------|
| 1. Brann i høye massivtrehus                   |
| 2. Pålitelighet i vanntåkesystemer             |
| 3. Strukturell brannsikkerhet                  |
| 4. Forhold mellom aktiv- og passiv brannskring |

---

Anders Brandser Ressheim



## Forord

Denne masteroppgaven er et obligatorisk og avsluttende arbeid ved det femårige sivilingeniørprogrammet Bygg- og miljøteknikk ved NTNU. Masteroppgaven er skrevet ved Institutt for bygg, anlegg og transport innenfor faggruppe for Bygnings- og materialteknikk.

Oppgaven er utformet i samarbeid med:

- Faglig hovedveileder Harald Landrø, professor II ved NTNU
- Sekundær veileder Jon Ivar Belghaug Knarud, PhD student og vit.ass ved NTNU
- Sekundær veileder Dag Denstad, sivilingeniør ved Rambøll i Trondheim

Bakrunnen for oppgaven har vært en forespørsel fra Rambøll AS i Trondheim om å skrive en oppgave i forbindelse med en fullskala branntest av en representativ hybelenhet for SiTs nye studentboliger i massivtre på Moholt. Tema for oppgaven ble til via samtaler med Rambøll AS og faglig veileder Harald Landrø. Enkelte fokusområder har blitt endret eller omprioritert underveis i prosessen. Dette har årsak i litteratur som ble oppdaget underveis og begrensede forhåndskunnskaper om temaet.

For hjelp og veiledning i forbindelse med framstilling av min oppgave vil jeg spesielt takke:

- Harald Landrø (NTNU/Tresenteret)
- Jon Ivar Belghaug Knarud (NTNU)
- Dag Denstad (Rambøll)
- Björn Magnusson (Rambøll)
- Arnstein Fedøy (Sprinkler- & Vanntåkesystemer AS)

Trondheim 6. juni 2015

---

Anders Brandser Ressenheim

## Sammendrag

Krav om bæreevne og stabilitet gjennom et fullstendig brannforløp i høye trehus med eksponerte treflater gjør det nødvendig å slokke en potensiell brann. Ved bruk av ubrennbare overflater som er preakseptert løsning er det tilstrekkelig å dimensjonere med en bæreevne på 90 min og derfor antas det at et brannforløp maksimalt kan vare i 90 min. Vanntåkesystemer bekjemper brann ved å angripe alle sider i branntrekanten, med oksygenfordriving, fortykning av brennbare gasser og varmestråleblokkering som ekstra slokkemekanismer sammenlignet med tradisjonelle sprinkler. Redusert stråling kan gi forbedrede rømnings- og slokkeforhold og redusere forkullingsraten. Fortykning av pyroliserende gasser kan redusere brannspredning og å redusere oksygenkonsentrasjonen har begrenset effekt i forkullende branner. Små vandråper har grunnet mindre kinetisk energi og større overflatespenning ekstra utfordringer med å penetrere og væte forkullingssonen direkte, som er den viktigste mekanismen for bekjempelse av forkullende branner. For å kunne bekjempe en brann effektivt må aktiveringen skje tidlig og som tilsiktet, før forkullingen blir relativt dyp og før eksponerte treflater bidrar til økt brannspredning. Pålitelighet for oppstart kan estimeres ved komparativ feiltreanalyse ved bruk av komponentdata fra lignende systemer. Resultatet fra beregningene kan brukes for å vekte statistikk for sprinklersystemer. Det har vist seg at kontrollpanel og pumpesystem inneholder kritiske komponenter som har mye å si for påliteligheten i hele systemet. Påliteligheten kan økes ved å endre oppbygningen i systemet, for eksempel ved å innføre aggregat som ekstra strømtilførsel. Påliteligheten for effektiv operasjon verifiseres gjennom fullskala branntester hvor parametrene i testen er begrensede for bruksområdet.

For å bestemme forholdet mellom aktiv- og passiv brannsikring kan det gjøres en risikovurdering av opprinnelig branndesign. Sannsynlighet for brannspredning og slokking analyseres for ulike dimensjonerende branncenarioer for å sikre at forholdene ligger til rette for at brannen kan slokkes. Sannsynlighet for global strukturell kollaps kan estimeres og settes opp mot en maksimal grenseverdi ved å kombinere sannsynligheten for alvorlig brann og feil ved brann i analysebyggverket. Førstnevnte kan beregnes ved å analysere bruksområdet, årsaker, konsekvenser, barrierer og sannsynlighetene for disse. Oppgaven har gjort et forsøk på å estimere sannsynligheten for feil ved brann i et høyt trebygg ved å ta hensyn til antennelsesfare, variabel brannlast, areal, sannsynlighet for overtenning, brannstartssted og pålitelighet i branndører.

Det ble funnet at pålitelighet i vanntåkesystemet, brannvesenets utrykningstid og sannsynlighet for overtenning har spesielt mye å si for strukturell sikkerhet i høye trehus. Det bør også tilstrebes å holde antennelsesfaren og den variable brannlasten som tilsiktet. Dersom risikovurderingen viser at brannsikkerheten ikke er tilstrekkelig kan det tilføyes ytterligere aktive- eller passive tiltak og effekten av disse kan estimeres kvalitativt eller kvantitativt. Det ble kvantitativt funnet at bruk av selvlukkende branndører kan øke strukturell sikkerhet betraktelig selv om påliteligheten i en enkelt dør ikke nødvendigvis er veldig høy. Bruk av brannimpregnering kan forhindre produksjon av pyroliserende gasser i eksponerte treoverflater og dermed redusere sannsynligheten for voldsom flammespredning ut av åpninger. Ved bruk av pigmentfri impregnering kan eksponert treverk få tilnærmet ubrennbare egenskaper, selv om forkulling ikke vil forhindres.

## Summary

The requirement of load carrying capacity and stability through an entire fire development in tall timber buildings with combustible surfaces makes it necessary to extinguish a potential fire. While using incombustible surfaces it is pre accepted to dimension the support structure with a 90 min fire resistance. Therefore it is assumed that the maximum acceptable duration of an entire fire development also is 90 min. Water mist systems fight fire while attacking all three sides of the fire triangle. These systems have extra fire-fighting mechanisms compared to traditional sprinklers in form of displacement of oxygen, dilution of flammable gases and blocking of radiation. Reduced radiation may result in better escape- and extinguishing conditions and dilution of flammable gases can reduce the spread of fire. Reduced oxygen concentration has limited effect on charring fires.

The use of relatively small water droplets results in less kinetic energy and larger surface tension and therefore bigger challenge reaching and wetting the fuel bed, which is the most efficient way to fight these kinds of fires. To ensure efficient fire-fighting the water mist system must activate early and as intended, before the charred layer get relatively deep and the combustible linings contributes to increased fire spread. The reliability of activation in these systems can be estimated using comparative fault tree analysis of a water mist system and a reference sprinkler system, while using component data from similar systems. The results in this thesis have shown that the control panel and pump system contains components that have a large effect on the total system reliability. The reliability can be improved by changing the structure in the system, for example by using an extra power- or water supply. The reliability considering efficient operation is verified through full scale fire tests where the application is limited to the parameters in the tests.

A risk assessment can be done to decide the relationship between active- and passive fire measures. The probability of insufficient fire spread and extinguishing must be analyzed in several reasonable worst case fire scenarios to ensure that the fire design is sufficient. The probability of global structural collapse can be estimated and compared with a maximum limit value. This probability is estimated by combining the probability of a severe fire with the probability of global structural collapse in a current building as a result of a severe fire. The former can be calculated by analyzing the application, causes, consequences, barriers and the probabilities of these. In this thesis it has been made an attempt to estimate the probability of global structural collapse in a specific tall timber building as a result of fire while taking account to ignition hazards, place of ignition, variable fire load, area, probability of flashover and reliability of self-closing fire doors.

It has been found that the reliability of the water mist system, response time of the fire service and probability of flashover is the major factors affecting structural fire safety in tall timber buildings. To ensure sufficient structural fire safety it is also important to keep the probability of ignition and the variable fire load as intended. If the risk assessment shows that the fire safety is insufficient there can be added active- or passive measures and the effects of these can be estimated qualitatively or quantitatively. In a risk assessment of a tall timber building in this thesis it has been found quantitatively that the use of self-closing fire doors can reduce the probability for global structural collapse significantly, even if the reliability in one self-closing door is not relatively high. Fire proofing of exposed

timber surfaces can prevent production of flammable gases and therefore reduce the probability of severe fire spread out of a room in fire. While using fire proofing with no pigments exposed timber can get noncombustible like properties, but charring can't be prevented.

## Innhold

|                                           |      |
|-------------------------------------------|------|
| Forord.....                               | III  |
| Sammendrag.....                           | IV   |
| Summary .....                             | V    |
| Figurliste.....                           | XIV  |
| Tabelliste.....                           | XVII |
| 1. Introduksjon.....                      | 1    |
| 1.1. Introduksjon til kapitlet.....       | 1    |
| 1.2. Bakgrunn .....                       | 1    |
| 1.3. Problemstilling .....                | 2    |
| 1.4. Målsetting .....                     | 2    |
| 1.4.1. Resultatmål .....                  | 2    |
| 1.4.2. Effektmål .....                    | 3    |
| 1.4.3. Suksesskriterier .....             | 3    |
| 1.5. Omfang og begrensninger .....        | 3    |
| 1.5.1. Bygningstype og bruksområder ..... | 3    |
| 1.5.2. Brann.....                         | 3    |
| 1.5.3. Brannsikringstiltak.....           | 4    |
| 1.6. Leserveiledning .....                | 4    |
| 1.6.1. Målgruppe.....                     | 4    |
| 1.6.2. Rapportens oppbygning.....         | 4    |
| 1.7. Definisjoner.....                    | 5    |
| 1.7.1. Forkortelser.....                  | 5    |
| 1.7.2. Begreper.....                      | 5    |
| 2. Metode.....                            | 7    |
| 2.1. Introduksjon til kapitlet.....       | 7    |
| 2.2. Litteratursøk.....                   | 7    |
| 2.3. Risikovurdering .....                | 7    |



|                               |                                                                                     |    |
|-------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.4.                          | Programvare .....                                                                   | 8  |
| Del 1: Litteraturstudie ..... |                                                                                     | 9  |
| 3.                            | Brann i høye trehus .....                                                           | 9  |
| 3.1.                          | Introduksjon til kapitlet .....                                                     | 9  |
| 3.2.                          | Byggemateriale .....                                                                | 9  |
| 3.2.1.                        | Massivtre .....                                                                     | 9  |
| 3.2.2.                        | Limtre .....                                                                        | 11 |
| 3.3.                          | Bæresystemer .....                                                                  | 11 |
| 3.3.1.                        | Bærende veggssystem .....                                                           | 11 |
| 3.3.2.                        | Søyle- og bjelkesystem .....                                                        | 11 |
| 3.4.                          | Brann i tre .....                                                                   | 11 |
| 3.4.1.                        | Europeisk klassifiseringssystem for materialers egenskaper ved brann .....          | 11 |
| 3.4.2.                        | Degradering av tre ved pyrolyse og forkulling .....                                 | 13 |
| 3.4.3.                        | Forkullingsrate .....                                                               | 15 |
| 3.4.4.                        | Passive tiltak .....                                                                | 18 |
| 3.4.5.                        | Rombrann .....                                                                      | 23 |
| 4.                            | Branndimensjonering i høye trehus .....                                             | 30 |
| 4.1.                          | Introduksjon til kapitlet .....                                                     | 30 |
| 4.2.                          | Byggteknisk forskrift .....                                                         | 30 |
| 4.3.                          | Valg av prosjekteringsmetode .....                                                  | 30 |
| 4.4.                          | Brannsikkerhetsstrategi .....                                                       | 31 |
| 4.4.1.                        | Risikoklasse .....                                                                  | 31 |
| 4.4.2.                        | Brannklasse .....                                                                   | 32 |
| 4.5.                          | Brannenergi .....                                                                   | 34 |
| 4.5.1.                        | Konservativ veiledning .....                                                        | 34 |
| 4.5.2.                        | Beregning av spesifikk brannenergi .....                                            | 35 |
| 4.5.3.                        | Preakseptert løsning med sprinklersystem basert på brannenergi og bruttoareal ..... | 35 |
| 4.5.4.                        | Oppsummering .....                                                                  | 36 |
| 5.                            | Vanntåkesystemer .....                                                              | 37 |
| 5.1.                          | Introduksjon .....                                                                  | 37 |
| 5.2.                          | Generelt om vanntåke .....                                                          | 37 |
| 5.2.1.                        | Definisjon av vanntåke .....                                                        | 37 |

|        |                                                                                    |    |
|--------|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 5.2.2. | Status for vanntåkesystemer .....                                                  | 37 |
| 5.2.3. | Forhold som påvirker bruksområdet .....                                            | 37 |
| 5.3.   | Oppbygning av vanntåkesystemer: Komponenter .....                                  | 39 |
| 5.3.1. | Vanntåkedyser .....                                                                | 40 |
| 5.3.2. | Rørsystem .....                                                                    | 42 |
| 5.3.3. | Vannforsyning .....                                                                | 42 |
| 5.4.   | Ulike typer vanntåkesystemer .....                                                 | 42 |
| 5.4.1. | Våtsystemer .....                                                                  | 43 |
| 5.4.2. | Tørresystemer .....                                                                | 43 |
| 5.4.3. | Deluge- systemer .....                                                             | 43 |
| 5.4.4. | Pre-action systemer .....                                                          | 43 |
| 5.5.   | Klassifisering med tanke på trykk .....                                            | 43 |
| 5.5.1. | Lavtrykkvanntåkesystemer .....                                                     | 44 |
| 5.5.2. | Middelstrykkvanntåkesystemer.....                                                  | 44 |
| 5.5.3. | Høytrykkvanntåkesystemer.....                                                      | 44 |
| 5.6.   | Klassifisering av vanntåkesystemer basert på oppbygning .....                      | 44 |
| 5.7.   | Slokkemekanismer .....                                                             | 44 |
| 5.7.1. | Absorpsjon av varme .....                                                          | 46 |
| 5.7.2. | Fortrenging av oksygen .....                                                       | 46 |
| 5.7.3. | Fortynning av brennbare gasser .....                                               | 47 |
| 5.7.4. | Absorpsjon av strålevarme .....                                                    | 47 |
| 5.7.5. | Kinetiske effekt .....                                                             | 47 |
| 5.7.6. | Evaluering av slokkemekanismers viktighet for bejempelse av klasse A branner ..... | 47 |
| 5.8.   | Faktorer som påvirker effekten av vanntåke.....                                    | 48 |
| 5.8.1. | Vanntåkekarakteristikk .....                                                       | 48 |
| 5.8.2. | Ventilasjonsforhold.....                                                           | 52 |
| 5.8.3. | Romgeometri .....                                                                  | 54 |
| 5.9.   | Pålitelighet .....                                                                 | 55 |
| 5.9.1. | Generelt .....                                                                     | 55 |
| 5.9.2. | Feil og årsak.....                                                                 | 55 |
| 5.9.3. | Beregning av pålitelighet .....                                                    | 56 |
| 5.9.4. | Tiltak for økt pålitelighet.....                                                   | 59 |

|        |                                                                      |    |
|--------|----------------------------------------------------------------------|----|
| 6.     | Verifikasjonsmetoder ved bruk av vanntåkesystemer .....              | 61 |
| 6.1.   | Introduksjon til kapitlet.....                                       | 61 |
| 6.2.   | Status .....                                                         | 61 |
| 6.2.1. | Byggteknisk forskrift .....                                          | 61 |
| 6.2.2. | Framgangsmåte for verifisering.....                                  | 61 |
| 6.3.   | Standarder .....                                                     | 63 |
| 6.3.1. | NS-INSTA 900 .....                                                   | 64 |
| 6.3.2. | NS-EN 12845 og andre standarder .....                                | 64 |
| 6.4.   | Fullskala tester for ytelse ved brannbekjempelse .....               | 65 |
| 6.4.1. | NS-INSTA 900 .....                                                   | 66 |
| 6.4.2. | Alternative fullskala testprotokoller .....                          | 67 |
| 6.4.3. | Etablering av alternativ fullskala testprotokoll .....               | 73 |
|        | Del 2: Risikovurdering av brannsikringstiltak ved Moholt 50 50 ..... | 76 |
| 7.     | Innledning .....                                                     | 76 |
| 7.1.   | Introduksjon til kapitlet.....                                       | 76 |
| 7.2.   | Sammendrag .....                                                     | 76 |
| 7.3.   | Introduksjon.....                                                    | 77 |
| 8.     | Rammebetingelser .....                                               | 78 |
| 8.1.   | Introduksjon til kapitlet.....                                       | 78 |
| 8.2.   | Eksterne rammebetingelser.....                                       | 78 |
| 8.3.   | Interne rammebetingelser .....                                       | 78 |
| 8.3.1. | Strategier og mål.....                                               | 78 |
| 8.3.2. | Brukere av risikovurderingen.....                                    | 78 |
| 8.3.3. | Områder som skal beskyttes.....                                      | 78 |
| 8.3.4. | Driftsorganisasjon og forutsatt aktivitet i det ferdige bygget.....  | 78 |
| 8.4.   | Rammebetingelser ved analysebyggverket .....                         | 79 |
| 9.     | Planlegging .....                                                    | 80 |
| 9.1.   | Introduksjon til kapitlet.....                                       | 80 |
| 9.2.   | Generelt .....                                                       | 80 |
| 9.3.   | Mandat.....                                                          | 80 |
| 9.4.   | Organisering.....                                                    | 80 |
| 9.5.   | Problem- og målformulering.....                                      | 81 |

|          |                                                                  |    |
|----------|------------------------------------------------------------------|----|
| 9.6.     | Valg av analysemodell.....                                       | 81 |
| 9.7.     | Valg av analysemetoder og beslutningskriterier .....             | 81 |
| 9.7.1.   | Beslutningskriterier.....                                        | 81 |
| 9.7.2.   | Analysemetoder .....                                             | 82 |
| 9.8.     | Forenklinger .....                                               | 83 |
| 9.8.1.   | Design, installasjon og vedlikehold .....                        | 83 |
| 9.8.2.   | Pålitelighet .....                                               | 83 |
| 9.8.3.   | Redundans .....                                                  | 83 |
| 9.9.     | Datarunnlag.....                                                 | 83 |
| 9.9.1.   | Tegninger og dokumenter fra SiT.....                             | 83 |
| 9.9.2.   | Fullskala branntest.....                                         | 84 |
| 9.9.3.   | Standarder og litteratur .....                                   | 84 |
| 9.9.4.   | Statistikk.....                                                  | 84 |
| 10.      | Risikoanalyse.....                                               | 85 |
| 10.1.    | Introduksjon til kapitlet.....                                   | 85 |
| 10.2.    | Beskrivelse av analysebyggverket.....                            | 85 |
| 10.2.1.  | Bæresystem .....                                                 | 85 |
| 10.2.2.  | Arealer og virksomhet.....                                       | 86 |
| 10.2.3.  | Planløsning .....                                                | 86 |
| 10.2.4.  | Høyde .....                                                      | 88 |
| 10.2.5.  | Brannenergi.....                                                 | 89 |
| 10.2.6.  | Risikoklasse .....                                               | 91 |
| 10.2.7.  | Brannklasse .....                                                | 91 |
| 10.2.8.  | Tilrettelegging for slokking og forutsetning for beredskap ..... | 93 |
| 10.2.9.  | Vannforsyning .....                                              | 93 |
| 10.2.10. | Automatisk slokkeanlegg .....                                    | 94 |
| 10.2.11. | Brannsikringstiltak.....                                         | 95 |
| 10.2.12. | Brannalarmanlegget.....                                          | 96 |
| 10.2.13. | Ventilasjonsanlegget.....                                        | 96 |
| 10.2.14. | Innvendige overflater/kledninger .....                           | 96 |
| 10.2.15. | Brannceller .....                                                | 97 |
| 10.3.    | Valg av analysemetoder.....                                      | 97 |

|          |                                                                                    |     |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 10.4.    | Fastsetting av risikoakseptkriterier .....                                         | 97  |
| 10.5.    | Fareidentifikasjon.....                                                            | 97  |
| 10.6.    | Analyse av årsaker og sannsynlighet .....                                          | 99  |
| 10.6.1.  | Generelt om brannårsak .....                                                       | 99  |
| 10.6.2.  | Brannstart i hybelenhet .....                                                      | 100 |
| 10.6.3.  | Brannstart i fellesareal.....                                                      | 100 |
| 10.6.4.  | Trapperom .....                                                                    | 101 |
| 10.7.    | Brannscenarioer .....                                                              | 102 |
| 10.7.1.  | Brannscenario 1 .....                                                              | 102 |
| 10.7.2.  | Brannscenario 2 .....                                                              | 103 |
| 10.7.3.  | Brannscenario 3 .....                                                              | 103 |
| 10.7.4.  | Brannscenario 4 .....                                                              | 103 |
| 10.8.    | Analyse av konsekvenser .....                                                      | 103 |
| 10.8.1.  | Generelt .....                                                                     | 103 |
| 10.8.2.  | Brannscenario 1 .....                                                              | 104 |
| 10.8.3.  | Brannscenario 2 .....                                                              | 108 |
| 10.8.4.  | Brannscenario 3 .....                                                              | 108 |
| 10.8.5.  | Brannscenario 4 .....                                                              | 109 |
| 10.9.    | Usikkerhetsanalyse .....                                                           | 109 |
| 10.9.1.  | Kvalitativ analyse .....                                                           | 109 |
| 10.9.2.  | Kvantitativ analyse .....                                                          | 112 |
| 10.10.   | Sensitivitetsanalyse.....                                                          | 124 |
| 10.10.1. | Sensitivitet med tanke på komponentoppbygging i vanntåkesystem.....                | 124 |
| 10.10.2. | Sensitivitet med tanke på endring av variabel brannenergi og antennelsesfare ..... | 125 |
| 10.10.3. | Sensitivitet med tanke på endring i bannspredningshastighet .....                  | 126 |
| 10.10.4. | Nødvendig tid før brannvesen starter slokking .....                                | 127 |
| 10.11.   | Beskrivelse av risiko .....                                                        | 128 |
| 10.11.1. | Brannscenario 1 .....                                                              | 128 |
| 10.11.2. | Brannscenario 2 .....                                                              | 129 |
| 10.11.3. | Brannscenario 3 .....                                                              | 129 |
| 10.11.4. | Brannscenario 4 .....                                                              | 129 |
| 11.      | Risikoevaluering .....                                                             | 130 |

|         |                                                                                    |     |
|---------|------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 11.1.   | Introduksjon til kapitlet.....                                                     | 130 |
| 11.2.   | Generelt .....                                                                     | 130 |
| 11.2.1. | Brannspredning.....                                                                | 130 |
| 11.2.2. | Brannslukking.....                                                                 | 130 |
| 11.2.3. | Strukturell kollaps .....                                                          | 131 |
| 11.3.   | Sammenligning av risiko og risikoakseptkriterier .....                             | 131 |
| 11.3.1. | Brannspredning.....                                                                | 131 |
| 11.3.2. | Brannslukking.....                                                                 | 132 |
| 11.3.3. | Sannsynlighet for global strukturell kollaps.....                                  | 132 |
| 11.4.   | Evaluering av eventuelle ytterligere tiltak og deres risikoreducerende effekt..... | 132 |
| 11.5.   | Identifisering av mulige tiltak.....                                               | 133 |
| 11.6.   | Vurdering av effekten av tiltak.....                                               | 133 |
| 11.6.1. | Selvlukkende branndører.....                                                       | 133 |
| 11.6.2. | Brannbehandling av eksponerte massivtreflater.....                                 | 135 |
| 11.6.3. | Kledning med gips.....                                                             | 135 |
| 11.7.   | Konklusjoner og dokumentasjon .....                                                | 136 |
| 11.7.1. | Brannspredning og brannslukking .....                                              | 136 |
| 11.7.2. | Sannsynlighet for global strukturell kollaps.....                                  | 137 |
| Del 3:  | Diskusjonskapittel.....                                                            | 138 |
| 12.     | Diskusjon.....                                                                     | 138 |
| 12.1.   | Introduksjon til kapitlet.....                                                     | 138 |
| 12.2.   | Diskusjon vedrørende bæresystemer .....                                            | 138 |
| 12.3.   | Diskusjon vedrørende brannutvikling i høye trehus .....                            | 138 |
| 12.4.   | Diskusjon vedrørende vanntåkesystemers brannbekjempelsesegenskaper.....            | 139 |
| 12.5.   | Diskusjon vedrørende når vanntåkesystemer kan benyttes .....                       | 140 |
| 12.5.1. | Krav om automatisk slokkeanlegg .....                                              | 140 |
| 12.5.2. | Preakseptert løsning med automatisk slokkeanlegg .....                             | 140 |
| 12.5.3. | Behov for automatisk slokkesystem .....                                            | 140 |
| 12.5.4. | Bruksområde.....                                                                   | 141 |
| 12.6.   | Diskusjon vedrørende pålitelighet i vanntåkesystemer.....                          | 142 |
| 12.6.1. | Pålitelighet for effektiv operasjon .....                                          | 142 |
| 12.6.2. | Pålitelighet for aktivering.....                                                   | 142 |

|           |                                                                                                                                                                |     |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 12.7.     | Diskusjon vedrørende bestemmelse av brannsikringsnivå ved bruk av aktiv- og passiv brannsikring .....                                                          | 143 |
| 12.8.     | Konklusjon.....                                                                                                                                                | 144 |
| 12.8.1.   | Hvordan påvirkes brannutviklingen av eksponerte treflater i høye trehus? .....                                                                                 | 144 |
| 12.8.2.   | Når er det krav om, preakseptert eller behov for automatisk slokkeanlegg og når kan vanntåkesystemer kan benyttes? .....                                       | 144 |
| 12.8.3.   | Hvordan påvirkes vanntåkesystemers egenskaper for brannbekjempelse av brannfaren i høye trehus? .....                                                          | 145 |
| 12.8.4.   | Hvordan finne pålitelighet i vanntåkesystemer og hvilke dominerende faktorer påvirker denne? .....                                                             | 146 |
| 12.8.5.   | Hvordan evaluere strukturell brannsikkerhet ved bruk av vanntåkesystemer, for så å eventuelt gjøre ytterligere aktive- eller passive brannsikringstiltak?..... | 146 |
| 12.9.     | Anbefalinger.....                                                                                                                                              | 147 |
| 12.9.1.   | Pålitelighet i vanntåkesystemer.....                                                                                                                           | 147 |
| 12.9.2.   | Sannsynlighet for global strukturell kollaps.....                                                                                                              | 147 |
| 12.10.    | Videre arbeid.....                                                                                                                                             | 147 |
| 12.10.1.  | Statistikk.....                                                                                                                                                | 147 |
| 12.10.2.  | Redundans .....                                                                                                                                                | 147 |
| 12.10.3.  | Feil ved brann som fører til global strukturell kollaps .....                                                                                                  | 148 |
| 12.10.4.  | Interpolering av testresultater.....                                                                                                                           | 148 |
| Vedlegg   | .....                                                                                                                                                          | 149 |
| Vedlegg 1 | – Beregning av forkullingshastighet etter metoden i Annex A i Eurokode 5 – del 1-2 .....                                                                       | 150 |
| Vedlegg 2 | – Beregning av spesifikk brannenergi .....                                                                                                                     | 152 |
|           | Metode for beregning av brannenergi .....                                                                                                                      | 152 |
|           | Faktor for reduksjon i brannenergi som følge av automatisk slokkeanlegg.....                                                                                   | 153 |
| Vedlegg 3 | – Ulike fareklassesystemer.....                                                                                                                                | 157 |
|           | Bruksområde for fareklassesystemene.....                                                                                                                       | 160 |
| Vedlegg 4 | – Sammenheng mellom risikoklasse og valg av standard for dimensjonering av sprinkler .....                                                                     | 161 |
| Vedlegg 5 | – Relevante testprotokoller for dimensjonering av kommersielle vanntåkesystemer.....                                                                           | 163 |
| Vedlegg 6 | – Mail.....                                                                                                                                                    | 169 |
|           | Arnstein Fedøy, Sprinkler- & Vanntåkesystemer AS.....                                                                                                          | 169 |
|           | Erling Mengshoel, Prevent Systems AS.....                                                                                                                      | 173 |
|           | Ragnar Wighus, SP Fire Research AS.....                                                                                                                        | 174 |

|                                                                 |     |
|-----------------------------------------------------------------|-----|
| Max Lakkonen, Fogtec Fire Protection .....                      | 176 |
| Roger Fiksdal, XL-bygg.....                                     | 177 |
| Björn Magnusson, Rambøll AS .....                               | 178 |
| Vedlegg 7 – Pålitelighet i komponenter.....                     | 180 |
| Vedlegg 8 – Beregning av brannspredning i fellesareal.....      | 181 |
| Vedlegg 9 – Beregninger gjort i den kvantitative analysen ..... | 182 |
| Vedlegg 10 – Feiltre brukt i sensitivitetsanalysen .....        | 184 |
| Feiltre ved bruk av én pumpe i vanntåkesystemet.....            | 184 |
| Feiltre ved liten pålitelighet i dobbelt pumpesystem .....      | 186 |
| Feiltre ved lite pålitelighet i kontrollpanel.....              | 188 |
| Vedlegg 11 – Beregninger gjort i sensitivitetsanalysen .....    | 190 |
| Vedlegg 12 – Beregning av effekten av ytterligere tiltak.....   | 196 |
| Kilder .....                                                    | 199 |

## Figurliste

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figur 1: Illustrasjon av ulike typer massivtreelementer. a) Bordstabelement, b) Flersjiktselement, c) Hulromselement (Byggforsk, 2001) .....                                                                                                                                                                      | 10 |
| Figur 2: Kriterier for klassifisering av materialers bidrag til brann i FIGRA <sub>RC</sub> (Sundström, 2007) .....                                                                                                                                                                                               | 12 |
| Figur 3: Temperatursoner i et tverrsnitt av tre utsatt for brann (Friquin, 2010).....                                                                                                                                                                                                                             | 14 |
| Figur 4: Sammenhengen mellom temperatur og densitet i softwood (standardorganisasjonen, 2010a).<br>Figuren viser hvordan den relative densiteten i et prøvestykke av softwood med et initialvanninnhold på 12 % reduseres ved økt temperatur. Her er vanninnholdet 0 % når den relative densiteten er lik 1 ..... | 15 |
| Figur 5: Sammenhengen mellom temperatur og spesifikk varmekapasitet i tre (standardorganisasjonen, 2010a) .....                                                                                                                                                                                                   | 15 |
| Figur 6: Sammenhengen mellom temperatur og termisk konduktivitet i softwood (standardorganisasjonen, 2010a) .....                                                                                                                                                                                                 | 15 |
| Figur 7: Nominell forkulling, som tar hensyn til forkulling rundt hjørner (standardorganisasjonen, 2010a) .....                                                                                                                                                                                                   | 16 |
| Figur 8: Endimensjonal forkulling (standardorganisasjonen, 2010a) .....                                                                                                                                                                                                                                           | 16 |
| Figur 9: Varmeavgivelsesrateutvikling ved brann i rom med ubeskyttede flater i massivtre (McGregor, 2013) .....                                                                                                                                                                                                   | 18 |
| Figur 10: Sammenhengen mellom feiling i innkledning og økt forkullingsrate. Symbolet $t_f$ er tiden før kledningen faller av. Symbolet $t_a$ er tiden før det forkullede laget er 25 mm tykt og forkullingsraten er like stor som i en situasjon uten bruk av kledning (standardorganisasjonen, 2010a) .....      | 19 |



|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figur 11: Sammenhengen mellom endring i forkullingsrate og forkulling før innkledningen faller av, samt økt forkulling etter at innkledningen faller av (standardorganisasjonen, 2010a) .....                                                                                                                                       | 20 |
| Figur 12: Forsøk hvor brannimpregnert tre til høyre var selvslukkende mens brannen fortsatte i den ubehandlede kledningen til venstre etter at den eksterne flammen var fjernet (Evans, 2003) .....                                                                                                                                 | 21 |
| Figur 13: Terningen arena, brannimpregnert furu (AS, 2014) .....                                                                                                                                                                                                                                                                    | 22 |
| Figur 14: Brannimpregnert furu med pigmentert overflatebehandling i Mathallen i Bergen (AS, 2014) ..                                                                                                                                                                                                                                | 22 |
| Figur 15: Brannimpregnert panel i gran i Lindåshallen i Bergen (AS, 2014) .....                                                                                                                                                                                                                                                     | 22 |
| Figur 16: Grafisk eksempel på brannforløp og de ulike fasene i brannforløpet (Grant et al., 2000) .....                                                                                                                                                                                                                             | 25 |
| Figur 17: Masseutveksling i rombrann (Liu et al., 2001).....                                                                                                                                                                                                                                                                        | 26 |
| Figur 18: Brannvekstrater for «t-squared» branner (Drysdale, 2011).....                                                                                                                                                                                                                                                             | 28 |
| Figur 19: Eksempel på tverrsnitt av rør i ulike dimensjoner (HI-FOG, 2015).....                                                                                                                                                                                                                                                     | 38 |
| Figur 20: Eksempel på vanntåkesystem, henholdsvis vårrørssystem og tørrrørssystem (EconAqua, 2015)<br>.....                                                                                                                                                                                                                         | 40 |
| Figur 21: Eksempel på en åpen vanntåkedyse (Protection, 2011).....                                                                                                                                                                                                                                                                  | 41 |
| Figur 22: Eksempel på en automatisk varmesensitiv vanntåkedyse (Protection, 2011) .....                                                                                                                                                                                                                                             | 41 |
| Figur 23: Eksempel på dataark for en åpen vanntåkedyse beregnet for å bekjempe klasse K branner (Products, 2014).....                                                                                                                                                                                                               | 42 |
| Figur 24: Akkumulatortanker hvor den grå tanken er trykksatt og de røde tankene er fylt med vann (HI-FOG, 2015) .....                                                                                                                                                                                                               | 43 |
| Figur 25: Branntrekant (ndla, 2015).....                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 45 |
| Figur 26: Varmefluksens påvirkning på forkullingsraten i ulike treslag (Friquin, 2010) .....                                                                                                                                                                                                                                        | 46 |
| Figur 27: Sammenhengen mellom åpningsfaktor og temperatur ved rombrann (Drysdale, 2011) .....                                                                                                                                                                                                                                       | 53 |
| Figur 28: Feiltre for vanntåkesystemer .....                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 56 |
| Figur 29: 90 % konfidensintervall (vist som vertikale svarte streker) og gjennomsnittverdier (visst som svarte firkanter på midten av de svarte strekene) for ulike vanntåkesystemer beskrevet i NFPA 750 (Xu and Fuller, Association, 2015e).....                                                                                  | 59 |
| Figur 30: Testrom for vanntåkedyser, med brannlast av simulerte møbler plassert midt i rommet (Norge, 2014) .....                                                                                                                                                                                                                   | 66 |
| Figur 31: Eksempel på brannscenario med skrivebord (Schadenverhütung, 2010) .....                                                                                                                                                                                                                                                   | 69 |
| Figur 32: Brannscenario med esker med kopper (Schadenverhütung, 2011a) .....                                                                                                                                                                                                                                                        | 69 |
| Figur 33: Eksempel spesifikasjon av dimensjoner i brannscenario med 4 sofaer (Global, 2012).....                                                                                                                                                                                                                                    | 70 |
| Figur 34: Eksempel på en trekrybbe (Arvidson, 2003).....                                                                                                                                                                                                                                                                            | 71 |
| Figur 35: Fiberbord dynket i n-heptan i en plastpose (Schadenverhütung, 2011b) .....                                                                                                                                                                                                                                                | 72 |
| Figur 36: Bildet er tatt fra testen for hotelrom i VdS og her er antennelseskilden «Fiberbord dynket i n-heptan i en plastpose» plassert i en av de fire sofaene i brannscenarioet. Denne er omkranset av en rød sirkel i figuren, hvor henholdsvis «Zündquerelle» betyr «antennelseskilde» på tysk (Schadenverhütung, 2011b) ..... | 72 |
| Figur 37: Flytskjema for etablering av testprotokoll samt utførelse, tolkning og dokumentasjon av testresultater i henhold til Annex B i CEN/TS 14972 (standardorganisasjonen, 2011) .....                                                                                                                                          | 75 |
| Figur 38: Studentbygg med 9 etasjer ved Moholt 50 50 (Hox, 2015).....                                                                                                                                                                                                                                                               | 85 |
| Figur 39: Illustrasjon av korridor mot utvendig trapp (Denstad, 2015).....                                                                                                                                                                                                                                                          | 86 |
| Figur 40: Planløsning for 9. etasje (Magnusson, 2015).....                                                                                                                                                                                                                                                                          | 87 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figur 41: Typisk vertikalsnitt av bygg A-E. Betongkonstruksjonen er markert med hvitt fyll og små grå trekantfigurer (Magnusson, 2015).....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 88  |
| Figur 42: Oversikt over plassering av variabel brannenergi i hybelenhet i branntesten utført av SP Fire Research (Hox, 2015).....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 89  |
| Figur 43: Oversikt over temperaturer i hybelenheten i Test 2, hvor tallene i parentes markerer termometerens høyde over gulv i cm. Grafen viser at termometerene i hybelen måler nokså like målinger. Temperaturen på badet stiger saktere men når samme temperatur som de to termometerene i hybelen ved rundt 30 min (Hox, 2015).....                                                                                                                                                                                                                                                                           | 89  |
| Figur 44: Bow-tie diagram med oversikt over mulige årsaker til antennelse og de negative konsekvensene som følger av dette. I denne risikoanalysen er det kun fokusert på årsakene og konsekvensene som er bundet til boksen "antennelse" med rette streker i figuren. Grunnen til at enkelte årsaker er sett bort fra utypes i 10-6 – Analyse av årsaker og sannsynligheter. Når det gjelder konsekvens er det er sett bort fra brannspredning til andre bygninger på grunn av begrensninger i oppgaven.....                                                                                                     | 98  |
| Figur 45: Oversikt over antall rapporterte boligbranner i Norge i perioden 2009-2013 sortert etter brannårsak (Beredskap, 2015).....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 99  |
| Figur 46: Antennelse under skrivebord i hybelenhet i branntest utført av SP Fire Research (Hox, 2015).....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 102 |
| Figur 47: Hendelsestre for aktuelle scenarioer for slokking av brann og konsekvenser av suksess og feiling i disse med tanke på om videre brannutvikling forhindres eller ikke, ved eksponerte flater i massivtre.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 104 |
| Figur 48: Konsekvenser med tanke på stukturell bæreevne, stabilitet og sløkkeforhold.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 108 |
| Figur 49: Feiltre for valgt vanntåkesystem. Verdiene i figuren beskriver høyeste verdi, forventet verdi og laveste verdi for sannsynligheten for feil i en triangulærfordeling. Verdiene som er benyttet finnes i Vedlegg 7.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 114 |
| Figur 50: Feiltre for referansesprinklersystem. Verdiene i figuren beskriver høyeste verdi, forventet verdi og laveste verdi for sannsynligheten for feil i en triangulærfordeling. Verdiene som er benyttet finnes i Vedlegg 7.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 115 |
| Figur 51: Oversikt over kjørestrekning og antatt kjøretid (Maps, 2015).....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 118 |
| Figur 52: Ulike tiltak utført av brukere for å holde selvlukkende dører åpne (Compliance, 2008).....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 133 |
| Figur 53: Forhold som påvirker krav, preaksepterte ytelser og behov for automatisk slokkeanlegg. Forholdene gjelder for trehus beregnet for ikke-sporadisk personopphold, hvor personene kjenner rømningsveier.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 141 |
| Figur 54: Beregning av areal hvor brannen kan spre seg fra fellesareal til hybelenheter og trapperom i løpet av 15 min. De blå skraverte arealene symboliserer der flammespredningen kan skje til én dør. De rosa skraverte arealene symboliserer der brannspredningen kan skje til to dører. Flammespredningen, altså radien i sirklene er satt til 1,1 m. Plantegningen er hentet fra SiTs prosjekteringsmateriale. Det meste av detaljer i figuren kan ikke leses og den er hovedsaklig lagt som vedlegg for å gi innsikt i hvordan brannspredningsarealene ble beregnet (Magnusson, 2015, Denstad, 2015)..... | 181 |
| Figur 55: Feiltre av vanntåkesystem med ett pumpesystem.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 184 |
| Figur 56: Feiltre av vanntåkesystem med liten pålitelighet i pumpesystem. De parametrene som er endret i forhold til de opprinnelige parametrene i usikkerhetsanalysen er markert med røde tall. Det er valgt høyeste verdier for feil i komponentene, henholdsvis aggregater og mekanisk feil i pumper..                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 186 |

Figur 57: Feiltre av vanntåkesystem med lite pålitelig kontrollpanel. De parametrene som er endret i forhold til de opprinnelig parametrene i usikkerhetsanalysen er markert med røde tall. Det er valgt høyeste verdier for feil i komponentene, henholdsvis hardware i kontrollpanel, software i kontrollpanel og backup-batteri ..... 188

## Tabelliste

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabell 1: Oversikt over ulike euroklasser av materialer og eksempler på disse (Halvorsen, 2014) .....                                                                                                                                                                                                                                                      | 13 |
| Tabell 2: Oversikt over endimensjonale og nominelle forkullingsrater for ulike bygningsmaterialer i tre (standardorganisasjonen, 2010a) .....                                                                                                                                                                                                              | 16 |
| Tabell 3: Oversikt over tabulerte verdier for tid før forkulling, $t_{ch}$ og tid før nedfall, $t_f$ ved bruk av ulike typer gipskledning (Forskningsinstitutt, 2012).....                                                                                                                                                                                 | 21 |
| Tabell 4: Oversikt euroklasser for gran og furu ved bruk av brannbehandling fra Moelven As (AS, 2014)                                                                                                                                                                                                                                                      | 23 |
| Tabell 5: Oversikt over ulike klassifiseringssystemer for brann.....                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 23 |
| Tabell 6: Nominelle temperatur-tid kurver. Kurvene er navngitt rangert etter hvilke som gir høyest temperatur og tabellen kan derfor leses dersom oppgaven skrives ut i svarthvitt. (standardorganisasjonen, 2008) .....                                                                                                                                   | 24 |
| Tabell 7: Anbefalte euroklasser av Fire Code Reform Center for ulike anvendelsesområder (Centre, 1998) .....                                                                                                                                                                                                                                               | 28 |
| Tabell 8: Oversikt over typiske scenarier for ulike brannvekstrater (Drysdale, 2011) .....                                                                                                                                                                                                                                                                 | 29 |
| Tabell 9: Risikoklasser (Byggkvalitet, 2015) .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 31 |
| Tabell 10: Brannklasser i byggverk (Byggkvalitet, 2015).....                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 33 |
| Tabell 11: Brannklasse betydning for krav på bæreevne og materialegenskaper (Byggkvalitet, 2015)                                                                                                                                                                                                                                                           | 33 |
| Tabell 12: Oversikt over reduksjonsfaktorer for dimensjonerende spesifikk brannenergi ved bruk av automatiske vannslokkeanlegg med og uten selvstendig vanntilføsel. $\delta_{n1}$ er en faktor som tar hensyn til om det er installert automatisk vannslokkesystem. $\delta_{n2}$ er en faktor som tar hensyn til antall uavhengige vannforsyninger. .... | 35 |
| Tabell 13: Oversikt over preaksepterte størrrelser på brannseksjoner med og uten implementering av brannalarmanlegg, sprinklersystem og røykventilasjon (Byggkvalitet, 2015).....                                                                                                                                                                          | 36 |
| Tabell 14: Klassifisering av vanntåkesystemer basert på trykk (BSI, 2010) .....                                                                                                                                                                                                                                                                            | 43 |
| Tabell 15: Oversikt over vanntåkesystemer i ulike kategorier beskrevet i NFPA 750 (Association, 2015e) .....                                                                                                                                                                                                                                               | 44 |
| Tabell 16: Grafisk framstilling av energimengde for oppvarming og faseendringer av 1L H <sub>2</sub> O (Grant et al., 2000) .....                                                                                                                                                                                                                          | 45 |
| Tabell 17: Sammenhengen mellom vanndråpediameter og overflateareal for vanntåke dannet av 1 L vann.....                                                                                                                                                                                                                                                    | 49 |
| Tabell 18: Oversikt over årsaker til feiling i aktivering og ineffektivitet etter aktivering i "wet pipe" sprinklersystemer (Hall, 2013 ) .....                                                                                                                                                                                                            | 55 |
| Tabell 19: Pålitelighet I sprinkler- og vanntåkesystemer som funksjon av vedlikehold (Arvidson, 2015)..                                                                                                                                                                                                                                                    | 60 |
| Tabell 20: Oversikt over standarder fra ulike etater som nevnes i NFPA 750 (Association, 2015e) .....                                                                                                                                                                                                                                                      | 65 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabell 21: Oversikt over standarder anbefalt av FG for dimensjonering av vanntåkesystemer og som tilsvarer NS-EN 12845 (Fedøy, 2015) .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 65  |
| Tabell 22: Beskrivelse av nøkkelpunkter i (Norge, 2014).....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 66  |
| Tabell 23: Oversikt over typiske brannscenario for ulike bruksområder (Rothe, 2014).....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 69  |
| Tabell 24: Oversikt over antenneskilder som typisk er brukt for ulike brannscenarioer (Rothe, 2014)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 71  |
| Tabell 25: Eksempel på ulik definisjon av trekrybbe (Global, 2012), (BSI, 2010) .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 72  |
| Tabell 26: Risikomatrise, grønt område (verdier mellom 2-5) er akseptabelt område hvor det kun er nødvendig å bruke ALARP-tiltak videre. Gult område (verdier mellom 6-7) er akseptabelt område, men ved bruk av ALARP-prinsippet og vurdering av videre undersøkelser. Rødt område (Verdier mellom 8-10) er ikke-akseptabelt område, her må det gjøres risikovurderende tiltak (Rausand and Utne, 2009).....                                                                                                                                             | 92  |
| Tabell 27: Oversikt over rom i 2.-9. etasje .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 94  |
| Tabell 28: Oversikt over brannforløp i branntest av hybelenhet, Test 2 (Hox, 2015) .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 105 |
| Tabell 29: Temperatur fra branntest av hybelenhet, Test 2 (Hox, 2015) sammenlignet med standard temperatur-tid kurve (standardorganisasjonen, 2008) .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 106 |
| Tabell 30: Tabellen viser en oversikt over positive og negative effekter i forhold til barrieregrupper i et preakseptert og et alternativt design. «+» og «-» betyr at egenskapen i henhold brann sikkerheten er økt eller redusert. Der disse vises i parentes er effekten avhengig av flere forhold som er beskrevet ovenfor. Tabellen er inspirert av en kvalitativ analyse av brann sikkerhet ved bruk av sprinkler ved brennbare overflater i «Case Studies on the Verification of Fire Safety Design in Sprinklered Buildings (Nystedt, 2012) ..... | 111 |
| Tabell 31: Evaluering av vanntåkesystemets egenskaper .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 112 |
| Tabell 32: Resultater fra komperativ feiltreanalyse .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 116 |
| Tabell 33: Oversikt over sannsynlighet for brannstart ved en bygningslevetid på 55 år, avhengig av virksomhet og areal (Project, 2005).....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 117 |
| Tabell 34: Sannsynlighet for feiling ved slokking utført av brannvesen (Project, 2005) .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 118 |
| Tabell 35: Statistikk over sannsynlighet for feil i våtrørssprinklersystemer fra en amerikansk undersøkelse for boliger utført mellom 2007-2011 (John R. Hall, 2013) .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 119 |
| Tabell 36: Utregning av samlet sannsynlighet for brannspredning ut av rommet brannen startet i, vektet etter sannsynlighet for brannstart i de ulike rommene. A: Sannsynlighet for brannspredning gjennom dør. B: Areal av brannspredningsområde (m <sup>2</sup> ). C: Sannsynlighet for antennelse per areal. D: Sannsynlighet for antennelse. E: Andel tilfeller hvor brannspredningen skjer på følgende måte.....                                                                                                                                      | 123 |
| Tabell 37: Oppsummering av beregninger for sannsynlighet for global strukturell kollaps ved bruk av parametre fra usikkerhetsanalysen .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 123 |
| Tabell 38: Oversikt over hvordan pålitelighet i ulike komponenter og oppbygning av vanntåkesystemet påvirker sannsynligheten for global strukturell kollaps i analysebyggverket.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 124 |
| Tabell 39: Sannsynlighet for global strukturell kollaps ved normal antennelsesfare i alle arealer i analysebyggverket .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 126 |
| Tabell 40: Sammenligning av sannsynlighet for global strukturell kollaps ved økt brannspredningshastighet og ved opprinnelige parametre fra usikkerhetsanalysen.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 127 |
| Tabell 41: Oversikt over nødvendig tid før slokking utført av brannvesen starter i ulike scenarioer. Det antas at Trondheim brannvesen tidligst vil kunne starte slokking innen 15 min .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 128 |

|                                                                                                                                                                                                                                                              |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabell 42: Selvlukkende dørers effekt på global strukturell kollaps når brannvesenet starter slokking etter 15 min og nødvendig tid før brannvesen starter slokking for å holde sannsynligheten for global strukturell kollaps tilstrekkelig lav. ....       | 134 |
| Tabell 43: Gumbel-fordeling av spesifikk brannenergi (MJ/m <sup>2</sup> ) for ulike bruksområder (standardorganisasjonen, 2008) .....                                                                                                                        | 152 |
| Tabell 44: Sannsynlighet for feiling av aktive brannsikringstiltak.....                                                                                                                                                                                      | 155 |
| Tabell 45: Fareklassesystemet beskrevet i NS-EN 12845 (standardorganisasjonen, 2009a) .....                                                                                                                                                                  | 157 |
| Tabell 46: Fareklassesystem beskrevet i NFPA 13 (Association, 2013b) .....                                                                                                                                                                                   | 158 |
| Tabell 47: Fareklassesystem skrevet i FM Approvals dataark 3-26 (Global, 2012).....                                                                                                                                                                          | 159 |
| Tabell 48: Oversikt over preaksepterte type sprinklersystemer for risikoklasse 4 (Byggkvalitet, 2015)..                                                                                                                                                      | 161 |
| Tabell 49: Oversikt over preaksepterte type sprinklersystemer for risikoklasse 6 (Byggkvalitet, 2015)..                                                                                                                                                      | 162 |
| Tabell 50: Oversikt over testprotokoller fra VdS (Schadenverhütung, 2010) (Schadenverhütung, 2011b) (Schadenverhütung, 2011a) (Schadenverhütung, 2011c) (Rothe, 2014) .....                                                                                  | 164 |
| Tabell 51: Oversikt over testprotokoller i CEN/TS-14972 (standardorganisasjonen, 2011).....                                                                                                                                                                  | 165 |
| Tabell 52: Oversikt over testprotokoller i DD 8458-1 (BSI, 2010) og DD 8489-7 (Rothe, 2014).....                                                                                                                                                             | 166 |
| Tabell 53: Oversikt over testprotokoller i FM 5560 (Global, 2012) .....                                                                                                                                                                                      | 167 |
| Tabell 54: Oversikt over testprotokoller i UL 2167 (Rothe, 2014) .....                                                                                                                                                                                       | 168 |
| Tabell 55: Sannsynlighet for feiling av komponenter gitt ved en triangulærfordeling (Commission, 2008) .....                                                                                                                                                 | 180 |
| Tabell 56: Beregning av sannsynlighet for feil ved brann i analysebyggverket. Resultatet i beregningen er markert med oransje skrift og grå bakgrunn .....                                                                                                   | 182 |
| Tabell 57: Beregninger av sannsynligheten for global strukturell kollaps i analysebyggverket, henholdsvis med vanntåkesystem og sprinklersystem. Beregningene med vanntåkesystemet representerer parametrene som ble valgt i usikkerhetsanalysen .....       | 183 |
| Tabell 58: Beregninger av sannsynligheten for global strukturell kollaps ved ulike scenarioer. Parametre som er endret fra usikkerhetsanalysen og resultatene i beregningene er markert med oransje skrift og grå bakgrunn .....                             | 190 |
| Tabell 59: Beregninger av sannsynligheten for global strukturell kollaps ved dobbelt brannspredningsareal i fellesareal. Parametre som er endret fra usikkerhetsanalysen og resultatene i beregningene er markert med oransje skrift og grå bakgrunn .....   | 191 |
| Tabell 60: Beregninger av sannsynligheten for global strukturell kollaps ved normal antennelsesfare i hele etasjen. Parametre som er endret fra usikkerhetsanalysen og resultatene i beregningene er markert med oransje skrift og grå bakgrunn .....        | 192 |
| Tabell 61: Beregninger av sannsynligheten for global strukturell kollaps ved firedoblet brannspredningsareal i fellesareal. Parametre som er endret fra usikkerhetsanalysen og resultatene i beregningene er markert med oransje skrift og grå bakgrunn..... | 193 |
| Tabell 62: Beregning av nødvendig tid før brannvesenet starter slokking for de ulike scenarioene i usikkerhetsanalysen. Parametre som er endret fra usikkerhetsanalysen og resultatene i beregningene er markert med oransje skrift og grå bakgrunn .....    | 194 |
| Tabell 63: Beregning av sannsynlighet for global strukturell kollaps i analysebyggverket i de ulike scenarioene i sensitivitetsanalysen når brannvesen starter slokking innen 15 min. Parametre som er                                                       |     |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| endret fra usikkerhetsanalysen og resultatene i beregningene er markert med oransje skrift og grå bakgrunn .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 195 |
| Tabell 64: Beregning av sannsynlighet for feil ved brann ved bruk av selvlukkende dører i hybelenhetene med doblett og firedoblet brannspredningsareal i fellesareal. Parametre som er endret fra usikkerhetsanalysen og resultatene i beregningene er markert med oransje skrift og grå bakgrunn.....                                                                                                                                         | 196 |
| Tabell 65: Beregning av sannsynlighet for feil ved brann ved bruk av selvlukkende dører i hybelenhetene med de valgte parametrene fra usikkerhetsanalysen og ved normal antennesfare i hele etasjen. Parametre som er endret fra usikkerhetsanalysen og resultatene i beregningene er markert med oransje skrift og grå bakgrunn .....                                                                                                         | 197 |
| Tabell 66: Beregning av sannsynlighet for global strukturell kollaps i analysebyggverket når brannslukking utført av brannvesenet starter innen 15 min og ved bruk av selvlukkende dører i hybelenetene for ulike scenarioer når brannvesenet starter slukking etter 15 min. Parametre som er endret fra usikkerhetsanalysen og resultatene er markert med oransje skrift og grå bakgrunn.....                                                 | 198 |
| Tabell 67: Beregning av nødvendig tid før slukkingen starter ved bruk av selvlukkende dører i hybelenetene for ulike scenarioer når brannvesenet starter slukking etter 15 min. Parametre som er endret fra usikkerhetsanalysen og resultatene i beregningene er markert med oransje skrift og grå bakgrunn. Parametre som er endret fra usikkerhetsanalysen og resultatene i beregningene er markert med oransje skrift og grå bakgrunn ..... | 199 |

## 1. Introduksjon

### 1.1. Introduksjon til kapitlet

Dette kapitlet presenterer bagrunnen for oppgaven og dens problemstilling. Det vil også bli gjennomgått hvilke mål som er satt for arbeidet, som innebærer resultatmål, effektmål og suksesskriterier. Oppgavens omfang og begrensninger blir også lagt fram.

### 1.2. Bakgrunn

I de siste årene har det i større grad blitt fokusert på å bygge i tre, noe som kan ha sammenheng med økt miljøfokus. Når et tre vokser produserer det oksygen og lagrer karbondioksid, derfor vil bruk av trematerialer i bygninger være en form for CO<sub>2</sub>-lagring. Redusert skogbruk her i landet de siste årene gjør at det produseres mer treverk enn det som tas ut av skogen. Stort sett alt tømmer fra Norske Skoger er sertifisert i henhold til internasjonale standarder for bærekraftig skogbruk (Treindustrien, 2013). Treverk er et kortreist og tilgjengelig materiale og produksjonen gir dessuten god materialutnyttelse og krever relativt lite energi.

Det stilles stadig høyere miljøkrav til bygninger via energimerking og endring i regelverk. Det har også dukket opp fenomener som passivhus og nullutslippshus, hvor det i sistnevnte tilstrebes å få CO<sub>2</sub> – regnskapet i bygningens levetid til å gå i null ved å produsere fornybar energi (binde CO<sub>2</sub>). Framstillingen av treverk er en prosess som krever langt mindre CO<sub>2</sub> enn tilsvarende for stål og betong (Alfredsen et al., 2008) og vil gjøre det lettere å oppnå nullutslipp.

Bygging av høye trehus har vært forbudt i Norge fram til 1997, da byggt teknisk forskrift ikke lenger ble materialspesifikk (Glasø and Landrø, 2011). Et lengre forbud mot å bygge høyt i tre, og dessuten forbud mot å bygge i tre i byer har gjort at mye kunnskap har gått tapt. Opphevelse av forbud, økt urbansering og etterfølgende økt behov for arealutnyttelse har skapt et behov for høye trehus. Det spesifiseres at med høye trehus menes det hus med fem eller flere etasjer, som i følge veiledningen til byggt teknisk forskrift (Byggkvalitet, 2015) havner i brannklasse 3 (Byggkvalitet, 2015). Det vil si ikke nødvendigvis bygninger med over 16 etasjer som plasseres i brannklasse 4 (Byggkvalitet, 2015) og som kanskje mange heller forbinder med «høye hus».

Treverk er et lett og sterkt materiale som kan resultere i mindre tverrsnittsdimensjoner og et lettere bygg. Mindre vekt kan være en fordel ved fundamentering i områder med kvikkleire, for eksempel i Trondheimsområdet. Mindre tverrsnittsdimensjoner kan føre til mer plassutnyttelse i alle romretninger og dessuten større arkitekturmessig frihet. Treverk har gode fuktregulerende egenskaper (Treindustrien, 2013) og bidrar derfor til et godt innemiljø. Dessuten er det også enkelt å kombinere med andre materialer.

Bygging av høye hus i tre skaper fordeler, men også utfordringer. For å gjøre folk bevisste på bruken av materialet og for å vise fram dets egenskaper oppstår et naturlig ønske om å kunne benytte eksponerte flater i tre. Dette skaper utfordringer med tanke på brann på grunn av at treverk er et brennbart

materiale, i motsetning til for eksempel stål, betong og gips. For å begrense en brannutvikling i brennbare overflater kan det benyttes automatiske slokkesystemer.

Vanntåkesystemer bekjemper brann på en annen måte enn tradisjonelle sprinkler ved at det innehar flere slokkemekanismer (Grant and Drysdale, 1997). Systemene er relativt nylig blitt tatt i bruk i bygninger (Brinson, 2014) og som følge av dette finnes det lite relevant erfaringsdata (Xu and Fuller, 2013). Byggteknisk forskrift (Byggkvalitet, 2015) stiller krav om at alle trehus over 5 etasjer må bære evne og stabilitet i et fullstendig brannforløp, noe som kan oppnås ved bruk av automatiske slokkesystemer. På grunnlag av dette er det interessant å undersøke om vanntåkesystemers egenskaper ved brann i høye trehus med eksponerte treflater er tilstrekkelig med tanke på strukturell sikkerhet, eller om det eventuelt må kompenseres med ytterligere passive tiltak.

### 1.3. Problemstilling

1.2 - Bakgrunn gir grunnlag for følgende problemstilling:

«Forholdet mellom aktiv- og passiv brannsikring ved dimensjonering av fleretasjes trehus»

For å finne svaret på problemstillingen deles den inn i flere delproblemstillinger. Før forholdet mellom aktiv- og passiv brannsikring bestemmes må brannfaren estimeres for å kunne si noe om nødvendigheten av tiltak. Deretter må det undersøkes når det er krav, preakseptert eller behov for automatiske slokkeanlegg og når det kan benyttes vanntåkesystemer. Vanntåkesystemers egenskaper og pålitelighet må kartlegges før brannsikkerheten estimeres og det eventuelt kompenseres med ytterligere passive tiltak. Oppsummert skal oppgaven svare på følgende problemer:

- Hvordan påvirkes brannutviklingen av eksponerte treflater i høye trehus?
- Når er det krav om, preakseptert eller behov for automatisk slokkeanlegg og når kan vanntåkesystemer benyttes?
- Hvordan påvirkes vanntåkesystemers egenskaper for brannbekjempelse av brannfaren i høye trehus?
- Hvordan finne pålitelighet i vanntåkesystemer og hvilke dominerende faktorer påvirker denne?
- Hvordan evaluere strukturell brannsikkerhet ved bruk av vanntåkesystemer, for så å eventuelt gjøre ytterligere aktive- eller passive brannsikringstiltak?

### 1.4. Målsetting

#### 1.4.1. Resultatmål

Innen 10. juni skal litteraturstudiet kartlegge brannutviklingen i høye trehus og hvordan denne kan stoppes ved bruk av vanntåkesystemer. Dette innebærer å undersøke når det er behov for automatiske slokkesystemer, når det kan benyttes vanntåkesystemer, hvordan disse bekjemper brann og deres pålitelighet.

Det skal utføres en risikovurdering av SiTs nye studentboliger på Moholt for å undersøke hvilke metoder som kan benyttes for å verifisere strukturell brannsikkerhet ved bruk av vanntåkesystemer.



Ut fra litteraturstudiet og risikovurderingen skal det kartlegges hva som er de dominerende dimensjonerende faktorene med tanke på tilstrekkelig høy pålitelighet når det gjelder strukturell bæreevne og stabilitet.

I diskusjonskapitlet skal kunnskapen om vanntåkesystemers egenskaper med tanke på brannbekjempelse, pålitelighet og faktorer som påvirker disse kombineres med metodene for estimering av sannsynligheten for global strukturell kollaps. Dette skal gi svar på hvordan et brannsikkert forhold mellom aktiv- og passiv brannsikring kan oppnås ved bruk av vanntåkesystemer i høye trebygg.

#### 1.4.2. Effektmål

Masteroppgaven skal bidra til økt kunnskapsnivå om brann i trekonstruksjoner, vanntåkesystemer og om hvordan etablere et tilstrekkelig brannsikkerhetsnivå i høye trehus.

#### 1.4.3. Suksesskriterier

- Litteraturstudiet skal gi leseren kunnskap om hvordan vanntåkesystemer bekjemper brann i høye trehus og om hvordan og når disse systemene kan tas i bruk.
- Risikovurderingen skal kartlegge hvilke metoder som kan benyttes for å verifisere at sannsynligheten for global strukturell kollaps ved brann er tilstrekkelig lav ved bruk av vanntåkesystemer og eventuelt kompenserende brannsikringstiltak.
- Diskusjonskapitlet skal kartlegge hvilke faktorer som er dominerende med tanke på pålitelighet i branndesignet og hvordan denne kunnskapen kan kombineres med metoder for å beregne brannsikkerhetsnivå. Dette skal sammen benyttes for å kunne etablere et brannsikkert forhold mellom aktiv- og passiv brannsikring ved bruk av vanntåkesystemer.

### 1.5. Omfang og begrensninger

#### 1.5.1. Bygningstype og bruksområder

Oppgaven omfatter trehus mellom 5 og 16 etasjer og med hovedbæresystem av tyngre trekonstruksjoner. Oppgaven vil først og fremst vektlegge krysslågt massivtre. Bygningene skal brukes til boliger eller kommersiell bruk som ikke fører til relativt stor risiko for brann. Eksempel på relevante bygninger er alt fra flerbruksbygg, kontorer, leiligheter, bibliotek, kino, kjøpesenter, treningssenter, sykehus og hotel. Det forutsettes at byggene er beregnet for permanent personopphold og at brukerne kjenner rømningsforhold.

#### 1.5.2. Brann

Det fokuseres kun på innvendige rombranner i klasse A (standardorganisasjonen, 2014a, Association, 2013a), det vil si brann i forkullende materialer som er den vanligste formen for brann i de relevante bygningene. Derfor er brannutvikling, brannspredning og forkulling faktorer som framheves. Det vil fokuseres på ventilasjonskontrollerte rombranner.

Oppgaven omfatter kun brannsikkerhet med tanke på strukturell sikkerhet i forhold til bæreevne og stabilitet. Det vil si at brannsikkerhet med tanke på rømning og redning utelukkes.

### **1.5.3. Brannsikringstiltak**

Av aktive brannsikringstiltak fokuseres det på vanntåkesystemer. Oppgaven beskriver kun virkemåte, oppbygging, pålitelighet og verifisering av disse. Verifiseringen gjelder kun for hele systemet og ikke enkeltkomponenter. Oppgaven omhandler ikke installering og vedlikehold av vanntåkesystemer. Det skal ikke benyttes tilsetningsstoffer i vanntåken.

Når det gjelder passive brannsikringstiltak for å redusere brannutvikling og brannspredning vil det fokuseres på innkledning med gips og brannbehandling av treverk.

## **1.6. Leserveiledning**

### **1.6.1. Målgruppe**

Studenter, ingeniører og andre med interesse for trekonstruksjoner og verifisering av vanntåkesystemer.

### **1.6.2. Rapportens oppbygging**

Rapporten er satt sammen i tre deler:

- Del 1: Litteraturstudium
- Del 2: Risikovurdering
- Del 3: Diskusjon og konklusjon

#### ***Litteraturstudium***

Del 1 i rapporten omfatter litteraturstudiet som har som hensikt å gi leseren innsyn i når det er krav, preakseptert eller behov for automatiske slokkesystemer. Vanntåkesystemers virkemåte, oppbygging, pålitelighet i klasse A branner (standardorganisasjonen, 2014a, Association, 2013a) og samtidig hva som skal til for å verifisere systemene.

All litteratur er hentet fra ulike kilder som er funnet underveis i prosessen. Når det refereres til en kilde gjelder denne helt til det refereres på nytt til en annen kilde. Dersom det flere ganger nevnes en kilde som det må refereres til, for eksempel en bok, vil det kun refereres én gang per paragraf dersom den er nevnt flere ganger innen samme paragraf. Der kilden er nevnt i andre paragrafer vil den bli referert til på nytt.

I litteraturstudiet er det så langt det er mulig gjort et forsøk på å framstille litteraturen på samme måte som i kildene de er hentet fra. Dette kan i noen tilfeller være utfordrende på grunn av språk, setningsoppbygging, misforståelser og lignende.

#### ***Risikovurdering***

Basert på litteraturstudiet skal det gjøres en risikovurdering for å undersøke brannsikkerheten ved bruk av et vanntåkesystem. Risikovurderingen omfatter analyse av brannsikkerhet i SiTs nye studentboliger i massivtre på Moholt, ved bruk av et vanntåkesystem som aktivt slokkemiddel. SiT har gitt godkjennelse for å bruke prosjektmateriale (Denstad, 2015, Magnusson, 2015) som gir beskrivelse av analysebyggverket.

Vurderingen består av en risikoanalyse som inneholder både kvalitativ- og kvantitativ analyse, samt en sensitivitetsanalyse.

### **Diskusjon og konklusjon**

Den siste delen av rapporten diskuterer hva det er kommet fram til i løpet av del 1 og del 2 og prøver å sette dette i sammenheng med hverandre. Til slutt konkluderes et svar på problemstillingen og det gis anbefalinger og forslag til videre arbeid med temaet.

## **1.7. Definisjoner**

### **1.7.1. Forkortelser**

FIGRA - Fire Growth Rate Index (varmeavgivelsens vekstrate)

HRR – Heat Release Rate (Varmeavgivelsesrate)

CFD-program – Computational Fluid Dynamics-Program (beregningsprogrammer for fluiddynamikk)

### **1.7.2. Begreper**

Atomisering – Forstøvning

Bevegelsesmengde = Produktet av masse og hastighet,  $(Kg \times \frac{m}{s})$

Brannbekjempelse – Dempe, kontrollere eller slokke en brann

Brannforløp – En branns typiske oppførsel som deles inn i ulike faser, vekstfase, fullt utviklet fase og avtakelsesfase

Brannvolum – Rom og inneområder av ulike størrelser

Brennpunkt – Nedre temperaturgrense for levedyktig brann

Brenselskontrollert – Når brannenergien er den dimensjonerende faktoren som gjør at en brann ikke vokser seg større

Delaminering – Når hele sjikt av lameller i limtre eller massivtre faller av som følge av forkulling

Emissivitet – Strålingsevne, forhold mellom energien som sendes ut fra et legeme i form av varme- og lysstråling og den energien et svart legeme ville ha sendt ut ved samme temperatur (Leksikon, 2015)

Fravik – Differansen i brannsikkerhetsnivå mellom valgt løsning og preakseptert ytelse i veiledningen til byggt teknisk forskrift (Byggkvalitet, 2015) når preakseptert ytelse gir størst brannsikkerhet

Feil ved brann – Sannsynligheten for global strukturell kollaps i et bygg ved en alvorlig brann

Fullstendig brannforløp – Brannforløp som inkluderer vekstfase, fullt utviklet fase og avtakelsesfasen i en brann. Det antas at et fullstendig brannforløp sammenfaller med et «naturlig brannforløp» beskrevet i Eurokode 1 del 1-2 (standardorganisasjonen, 2008)

Global strukturell kollaps – Når en hel konstruksjon kollapse

Hardwood - harde treslag som eik, lønn, ask osv

Hygroskopisk – Et stoff som kan ta opp fuktighet fra en gass, for eksempel luft (Leksikon, 2015)

Kinetisk energi – Bevegelsesenergi, (J) det vil si energien et legeme har på grunn av sin fart (Leksikon, 2015)

Latent fordampningsvarme – Damp fra en kokende løsning som inneholder det meste av varmen som ble tilført løsningen (Leksikon, 2015)

Lokal strukturell kollaps – Når en lokal bygningskomponent kollapse, men hele konstruksjonen fremdeles innehar strukturell bæreevne og stabilitet

Operativt trykk – Vanntrykket i vanntåkesystemet, gitt i pascal eller bar

Overtenning – Overgangen fra en lokal brann i et rom til alle brannbare flater deltar i brannen (Drysdale, 2011)

Redundans – Når noe har redundans er det en viss robusthet i dimensjoneringen som gjør at en egenskap eller lignende kan ta over funksjonen til en annen dersom denne svikter. Dette kan forklares med prinsippet «rør i rør» som benyttes i byggebransjen og hvor et rør legges inni et annet. Det innerste røret er normalt i bruk, men dersom det skulle bli lekkasje i denne, vil det omkransende røret forhindre vannskade i konstruksjonen

Slokkemekanisme – Mekanisme som bidrar til å dempe, kontrollere eller slokke en brann

Softwood – Myke treslag som gran, furu og bjørk

Spesifik varmekapasitet – Varmekapasitet per masseenheter av et stoff  $\left(\frac{J}{kg \times K}\right)$  (Leksikon, 2015)

Systemvarighetstid – Den totale tid som er designet for forsyning av brannbekjempelsesmediet

Uniform – Ensartet, homogen

Varmefluks – Varmestrøm,  $\left(\frac{kW}{m^2}\right)$  (Drysdale, 2011)

Ventilasjonskontrollert – Når ventilasjonene er den dimensjonerende faktoren som gjør at en brann ikke vokser seg større

## 2. Metode

### 2.1. Introduksjon til kapitlet

Metodekapitlet beskriver hvilke metoder som er brukt i framstillingen av oppgaven, samt hvordan arbeidet er utført. Dette innebærer metode for å finne litteratur, benyttet programvare, analysemetoder med mer.

### 2.2. Litteratursøk

I litteratursøket er det hentet inn litteratur ved bruk av følgende metoder:

- Søk i Google Scholar
- Søk i Google Search
- Søk i NTNU Bibsys
- Søk i bibliotek
- Gjennomgang av tidligere masteroppgaver
- Gjennomgang av prosjektmateriale og testresultater fra SiT
- Ved å følge referanser funnet i kildene ovenfor

Påliteligheten i kildene er vurdert med tanke på alder, relevanse, nøyaktighet, språk, tilpasninger, underrapportering, representativitet i datagrunnlag og sporbarhet. Det vil imidlertid alltid være en sannsynlighet for feil i kildene, for eksempel på grunn av setningsoppbygging, oversettelse eller ny forskning. Det er gjort et forsøk på å benytte anerkjente kilder fra kjente forfattere, institusjoner, universiteter og lignende. Det er forsøkt å benytte flere kilder for hvert tema, både for å skape litterær dybde og å undersøke om det finnes flere vinklinger. Enkelte temaer er imidlertid skrevet lite om og har derfor begrenset tilgjengelig litteratur.

### 2.3. Risikovurdering

Risikovurderingen er en systematisk gjennomgang av hva som kan gå galt ved brann. Branndesignet i analysebyggverket testes opp mot ulike brannscenarier for å undersøke robusthet og pålitelighet i systemet. Her er det utført en risikoanalyse, det vil si at risikoen i analysebyggverket settes opp mot forhåndssatte risikoakseptkriterier. Dersom risikoen ikke er tilstrekkelig lav må det identifiseres ytterligere tiltak og effekten av disse må evalueres.

Risikoen estimeres ved bruk av både kvalitative og kvantitative metoder. Den kvalitative analysen er gjort ved metoder beskrevet i rapporten «Verifying Fire Safety Design in Sprinklered Buildings» (Nystedt, 2011) utgitt ved Universitetet i Lund.

Den kvantitative analysen er utført ved feiltreanalyse for å estimere vanntåkesystemets relative pålitelighet ved oppstart i forhold til et relevant sprinklersystem, altså en komparativ feiltreanalyse. Denne metoden er beskrevet i artikkelen «Water Mist Fire Protection Reliability Analysis» (Xu and Fuller, 2013).

Forholdstallet mellom pålitelighet i systemene er videre brukt for å vekte verdier i en metode for å anslå sannsynligheten for global strukturell kollaps ved bruk av automatiske slokkesystemer i

stålkonstruksjoner, beskrevet i «Implementation of Eurocodes, Handbook 5» (Project, 2005). Det er benyttet oppdatert pålitelighetsstatistikk og gjort et forsøk på å tilpasse parametrene slik at metoden gjelder for trekonstruksjoner. Det er i løpet av oppgaven ikke funnet at metodene tidligere er kombinert og forsøkt tilpasset trekonstruksjoner og vanntåkesystemer. Forfatter har begrenset kunnskap om komponentoppbygning i vanntåke- og sprinklersystemer fra før av, så konstruksjonen av feiltreene er i stor grad basert på feiltre og figurer fra relevante kilder.

Det er gjort en sensitivitetsanalyse ved å benytte de værst tenkelige dimensjonerende verdiene for pålitelighet i utsatte komponenter i vanntåkesystemet. Samt ved å benytte ulike parametre basert på de ulike brannscenarioene i risikoanalysen.

## 2.4. Programvare

I forbindelse med oppgaven er følgende programvare benyttet:

- Microsoft Word
- Microsoft Excel
- Endnote
- Edraw Max
- Clue digital ordbok

Programet er skrevet i Microsoft Word hvor det også er blitt framstilt figurer og tabeller.

Beregninger i forbindelse med oppgaven er gjort i Microsoft Excel. Programmet er også benyttet for å framstille grafer.

For sortering av kilder og referering er det brukt referanseverktøyet Endnote.

Feiltre, bow-tie diagram og andre figurer er laget i Edraw Max, et program for konstruksjon av todimensjonale figurer. Programmet kan lastes ned og benyttes gratis i 30 dager på deres hjemmesider.

For oversettelse fra engelsk og tysk til norsk er Clue digital ordbok benyttet.

## Del 1: Litteraturstudie

### 3. Brann i høye trehus

#### 3.1. Introduksjon til kapitlet

I dette kapitlet beskrives relevante konstruksjonsmaterialer, bæresystemer og samtidig hvordan disse påvirker og påvirkes av et brannforløp i høye trebygg. Her fokuseres det på hvordan bygninger deles inn i ulike klasser etter brannfare og hvilke brannklasser som er relevante for oppgaven. Det vil også beskrives hvordan treverk brenner for å gi forståelse av måten eksponerte overflater i massivtre kan påvirke en brann. Hensikten med dette kapitlet er å gi leseren en forståelse for hvilke brannscenarioer som vanntåkesystemer kan måtte bekjempe i høye trebygg med eksponerte flater i tre. Som oppgaven etterhvert skal komme inn på benyttes aktive slokkesystemer blant annet for å sikre global strukturell bæreevne og stabilitet i et bygg gjennom et brannforløp. Derfor beskriver kapitlet ulike bæresystemer som benyttes i tryngre trekonstruksjoner og hvordan global bæreevne og stabilitet påvirkes av lokal strukturell kollaps.

#### 3.2. Byggemateriale

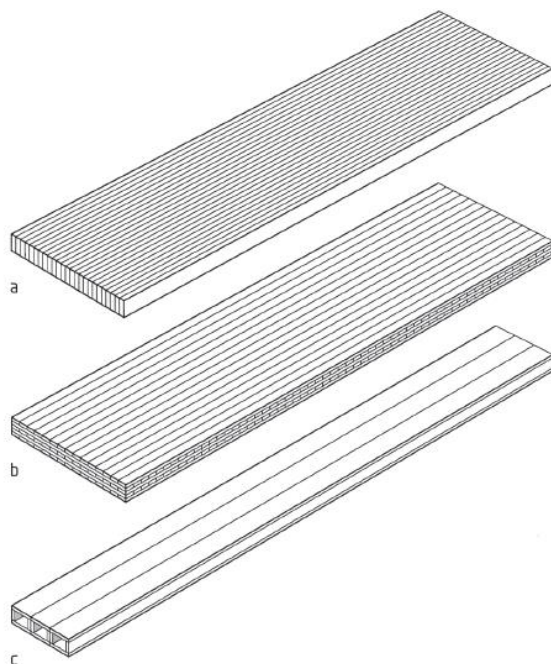
Som bærende konstruksjon i høye trehus benyttes tunge trekonstruksjoner, det vil si konstruksjonselementer av tre med tverrsnittsdimensjoner over 80 mm (Treteknisk, 2006). Disse er kjent for å ha gode egenskaper når det gjelder brannmotstand og bæreevne under brann. I motsetning til stål og betong er tre et forkullende materiale, noe som påvirker brannforløp og dimensjonering i høye trehus (Byggkvalitet, 2015). Massivtre og limtre er byggematerialer som ved valg av store nok dimensjoner kan kategoriseres som tunge trekonstruksjoner.

##### 3.2.1. Massivtre

###### *Oppbygning*

Massivtre er plane bygningselementer av tre satt sammen av lameller. Lameller kan være bord eller planker og føyes sammen lagvis med dybler, lim, skruer, spikre eller strekkstag. Det skilles mellom ulike massivtreelementer basert på oppbygning og festemidler, noen av dem kan ses i Figur 1.

Massivtreelementene kan ha lagvis oppbygning av lameller som er parallelle med hverandre eller krysslagte. Elementer av massivtre kan benyttes som bærende konstruksjonsdel i tak, vegger, etasjeskillere og andre konstruksjoner. Elementene kan danne hele bæresystemer eller kombineres med andre materialer og konstruksjonstyper, for eksempel betong og limtre (Byggforsk, 2001).



Figur 1: Illustrasjon av ulike typer massivtrelementer. a) Bordstabelement, b) Flersjiktselement, c) Hulromselement (Byggforsk, 2001)

### *Styrke og stivhet*

Krysslågte massivtrelementer oppfører seg bæremessig enten som brede bjelker med enveis bæring eller toveis plater med ulik stivhet og styrke i de to hovedretningene, avhengig av lastepåkjønning og dimensjonering.

Sjiktene er krysslågte og på grunn av at treverk har ulik E-modul langs med- og vinkelrett på fiberretningen vil sjiktene som ligger vinkelrett på lasteretningen ha minimalt bidrag til elementets styrke og stivhet. Ved bruk av samme fasthetsklasse i alle sjikt er forholdet mellom  $E_{0-}$  modul og  $E_{90-}$  modul ca 1:30. Dersom det er benyttet fasthetsklasse C24 i yttersjikt og C14 i innersjikt er det samme forholdet rundt 1:40 (Treteknisk, 2006).

Når elementene utsettes for bøyemoment dannes strekk- eller trykkspenninger som er størst i de ytterste sjiktene av elementet. I en vanlig situasjon uten ulykkeslast vil fastheten i de ytterste sjiktene ha mest å si for elementenes momentkapasitet. Dette gjelder spesielt i elementer med 3-5 sjikt, hvor økning av fasthet i innersjiktene vil ha så å si ingen effekt. I elementer med 7 sjikt vil en økning i fasthetsklasse fra C14 til C24 kun øke bøyestivheten i et element med inntil 10 % (Treteknisk, 2006). Ved brann øker betydningen av fasthet i de innerste sjiktene på grunn av tverrsnittsreduksjon som følge av forkulling, slik at spenningene øker innover i elementet.

Når massivtrelementene er fastholdte i hverandre kan laster på et massivtrelement som har mistet bæreevnen, for eksempel som følge av forkulling ved brann omlagres til tilstøtende elementer. En konstruksjon bestående av kun massivtrelementer, et såkalt «bærende veggssystem» er dermed gunstig



med tanke på lastefordeling ved lokal kollaps sammenlignet med et søylesystem (Denstad, 2015). De ulike konstruksjonssystemene beskrives i nærmere detalj i 3.3 - Bæresystemer. De positive effektene av redundans kan estimeres ved strukturell analyse, noe som kan være en vanskelig og tidskrevende prosess (Falk, 2013).

### 3.2.2. Limtre

Limtre er konstruksjonsdeler som er produsert ved å lime sammen trelameller i hovedsaklig parallell fiberretning. I motsetning til massivtre kan limtre kun limes sammen og de behøver heller ikke være plane bygningselementer. Limtre kan benyttes som hovedbjelker, åser, sperrer, søyler, bjelkelag, delstaver i fagverkskonstruksjoner og hoved- eller sekundær konstruksjon i store bygg eller trebuer (Sulli and Glasø, 2011).

## 3.3. Bæresystemer

I tyngre trekonstruksjoner skilles det mellom bæresystem av bærende vegger og søyle- og bjelkesystemer. Et bæresystem kan også bestå av en kombinasjon mellom disse.

### 3.3.1. Bærende veggssystem

I bærende veggssystemer bæres lasten av vertikale massivtreelementer, som enten er etasjehøye eller gjennomgående i konstruksjonen. Den vertikale konstruksjonen avstives av horisontale fritt opplagte dekker i massivtre.

På grunn av at lastebæringen skjer i veggene skapes et potensiale for relativt store innvendige arealer og dermed stor arkitekturmessig frihet. Ved behov kan det også etableres innvendige bærende vegger. For å øke spennvidden i de horisontale massivtreelementene kan disse eventuelt kombineres med bruk av understøttende bjelker, for eksempel av limtre. Den samme teknikken kan også benyttes for å redusere nødvendig tverrsnitt i de horisontale elementene (Treteknisk, 2006).

### 3.3.2. Søyle- og bjelkesystem

Søyle- og bjelkesystemer av tre kan bestå av limtresøyler, eventuelt kombinert med vegger og dekker i massivtre. Systemene krever som regel innvendige søyler og har derfor begrenset arkitekturmessig frihet sammenlignet med bærende veggssystemer (Treteknisk, 2006).

## 3.4. Brann i tre

I følge boka «Structural Design For Fire Safety» (Buchanan, 2002) har testresultater vist at tverrsnitt av laminert treverk har svært like egenskaper som et tilsvarende tverrsnitt av heltre når de er utsatt for samme brannpåkjenning. Eurokode 5 del 1-2 (standardorganisasjonen, 2010a) skiller ikke mellom forkullingshastighet i heltre og laminert tre, derfor beskrives det her generelt hvordan tre brenner og det antas at massivtre og limtre brenner på samme måte. For å bidra til brannsikker bruk av ubeskyttede flater i tre er det viktig å kartlegge treets egenskaper ved brann. Dette kan gjøres ved å benytte et europeisk klassifiseringssystem for materialer.

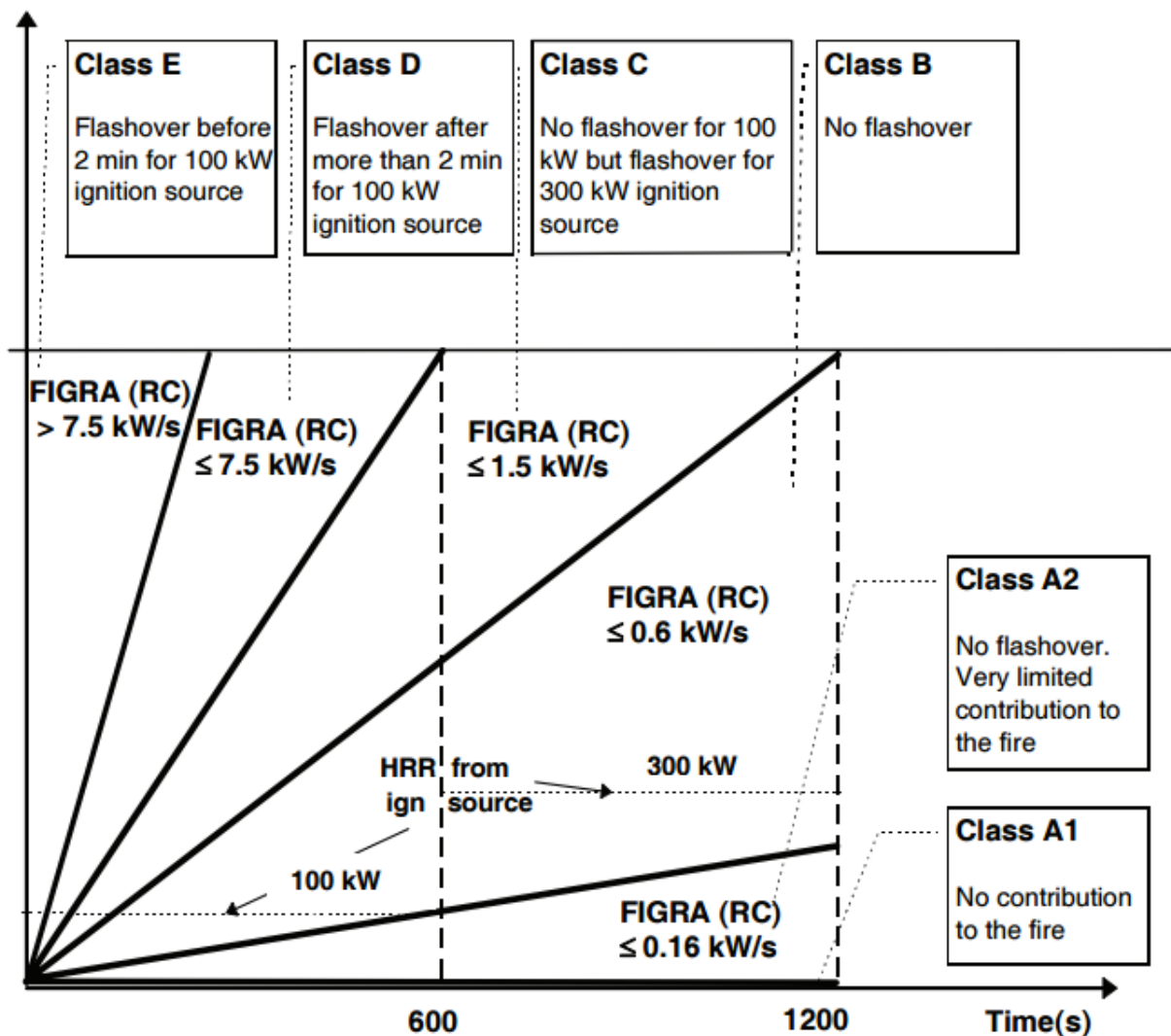
### 3.4.1. Europeisk klassifiseringssystem for materialers egenskaper ved brann

Det europeiske klassifiseringssystemet for materialers egenskaper ved brann sier noe om et materiales bidrag i brann og samtidig produksjon av røyk og dråper. Materialene deles inn i klassene A1, A2, B, C, D

og E etter hvor stor bidrag de gir til en brann i en standardisert test, henholdsvis en room corner test, se Figur 2.

Her er FIGRA (Fire Growth Rate Index) varmeavgivelsens vekstrate fra brannen starter til den når sin maksimale temperatur. I realiteten er ikke denne stigningsraten lineær, men framstilles som en forenkling i FIGRA. Kriteriene for at materialer skal havne innenfor de ulike klassene A1-E er om de overtennes eller ikke, tid før overtenning og hvor stor bidrag de har til brannen. En nærmere beskrivelse finnes i Figur 2. I tillegg til de klassene som vises i Figur 2 finnes det en klasse F, som beskriver materialer som ikke er testet eller klassifisert enda (Sundström, 2007).

## Fire contribution



Figur 2: Kriterier for klassifisering av materialers bidrag til brann i  $\text{FIGRA}_{\text{RC}}$  (Sundström, 2007)

Eksempel på materialer i de ulike klassene og beskrivelse av deres bidrag finnes i Tabell 1.

| Klassifisering | Beskrivelse                        | Eksempler på materiale        |
|----------------|------------------------------------|-------------------------------|
| <b>A1</b>      | Ingen bidrag til brannen           | Betong, mur, stål             |
| <b>A2</b>      | Ingen bidrag til brannen           | Gips, glassull, steinull      |
| <b>B</b>       | Svært begrenset bidrag til brannen | Brannbehandlet treverk        |
| <b>C</b>       | Begrenset bidrag til brannen       | Fenolskum                     |
| <b>D</b>       | Akseptabelt bidrag til brannen     | Ubehandlet treverk            |
| <b>E</b>       | Akseptabelt bidrag til brannen     | Plast                         |
| <b>F</b>       | Oppfyller ingen klasse             | Ikke testet/ikke klassifisert |

Tabell 1: Oversikt over ulike euroklasser av materialer og eksempler på disse (Halvorsen, 2014)

Materialene deles også inn etter røykproduksjon i klassene s1, s2 og s3. I klasse s1 vil det være liten produksjon av røyk, i s2 vil det være noe røykproduksjon mens det i klasse s3 ikke er noen begrensning i røykproduksjon (standardorganisasjonen, 2009b).

Når det gjelder brennende dråper deles materialene inn i klassene d0, d1 og d2. I d0 vil det ikke oppstå noen brennende dråper i løpet av prøving i samsvar med NS-EN 13823 (standardorganisasjonen, 2014b). I d1 vil det ikke oppstå brennende dråper som varer lengre enn 10 sek under samme forhold som sistnevnte klasse. I klasse d2 er ingen ytelse deklart (standardorganisasjonen, 2009b).

### *Klassifisering av tre*

I følge det europeiske klassifiseringssystemet for materialeegenskaper ved brann har ubehandlet konstruksjonstre og laminert tre følgende klasse (Sweden, 2010):

*D-s2, d0*

Klassifiseringen beskriver at ubehandlet tre gir et akseptabelt bidrag til brannen (D), noe røykproduksjon (s2) og ingen brennende dråper (d0).

Testmaterialene i room corner testen utsettes for 10 min med en oppvarmingskilde på 100 W, og deretter 10 min med 300 W. Det ses i Figur 2 at ubehandlet treverk i euroklasse D vil overtenne etter mer enn 2 min, men før 10 min.

### **3.4.2. Degradering av tre ved pyrolyse og forkulling**

Tre er et porøst materiale hvor varmetransporten skjer gjennom konduksjon, konveksjon og stråling. Materialet brenner ikke direkte, men ved oppvarming produseres brennbare gasser som kan antennes (Friquin, 2010). I et miljø med tilstrekkelig høy varme og oksygen dannes et forkullet lag som trenger inn i treverket. Forbrenningen kan skje på to måter, ved flammende forbrenning og ulmende forbrenning hvor treverket dekomponeres på ulike måter (Aseeva et al., 2013).

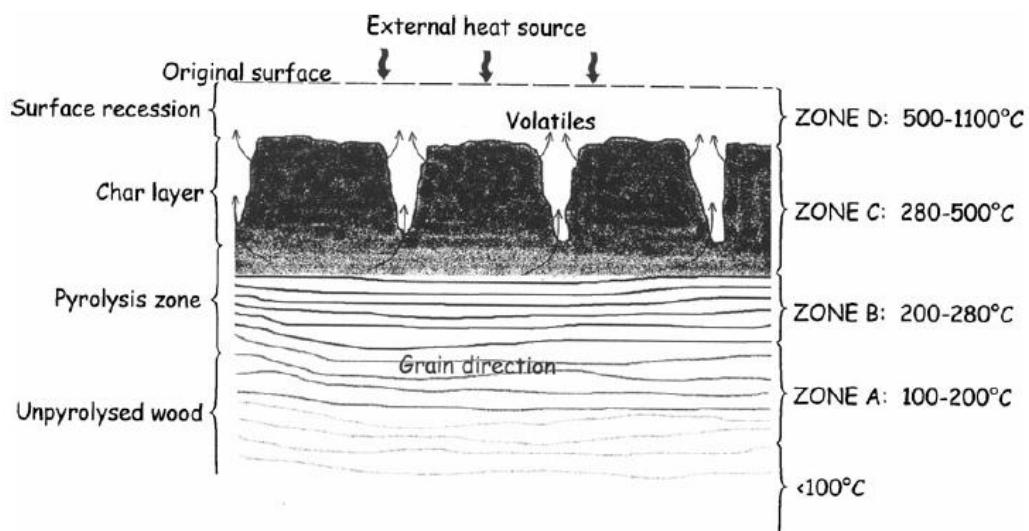
### *Flammende forbrenning*

I flammende forbrenning fører varme fra forbrenningen til produksjon av brennbare gasser i treverket. Disse fraktes ut til overflaten hvor de blandes med oksygen, antennes og skaper flammende

forbrenning. Strømmen av brennbare gasser fra materialet hindrer diffusjon av oksygen til området i overflaten av treverket. Dette fører til at forbrenningen under flammesonen skjer ved ren termisk degradering, det vil si pyrolyse (Friquin, 2010).

### Ulmende forbrenning

Der det er dannet et forkullet lag i overflaten av treverket og hvor det ikke eksisterer flammeforbrenning, vil ikke de brennbare gassene som tidligere strømmet ut fra treverket lenger fortrenge oksygen fra overflaten. Dermed kan det forkullede laget reagere direkte med oksygen og det kan oppstå en selvgående forbrenningsprosess kalt ulmende forbrenning. Glødende forbrenning er en tilsvarende prosess som fungerer på samme måte, men som ikke er selvgående og er avhengig av ekstern oppvarming for å vedvare (Friquin, 2010).



Figur 3: Temperatursoner i et tverrsnitt av tre utsatt for brann (Friquin, 2010)

### Forbrenning av tre

Figur 3 viser et tverrsnitt av tre som er utsatt for brann med ulike temperaturer i de forskjellige dybdene i tverrsnittet. Reaksjonene i lagene ved ulike temperaturer kan også si noe om hva som skjer i treverket før det oppstår flammende forbrenning.

I "ZONE A" i Figur 3 er temperaturen mellom 100-200 °C. Ved 100 °C begynner vannet i treverket å fordampe. Figur 4 viser hvordan den relative densiteten i et prøvestykke av softwood med et initialvanninnhold på 12 % reduseres ved økt temperatur. Her er vanninnholdet 0 % når den relative densiteten er lik 1. Figuren viser at ved rundt 100 °C vil alt vanninnhold være borte. På grunn av at vann har høy spesifikk varmekapasitet, kreves det relativt mye energi for å fordampe det, se Figur 5.

Ved temperaturstigning opp mot 200 °C vil treverket sakte begynne å dekomponere ved at det produseres ubrennbare gasser (Friquin, 2010).

I "ZONE B" er temperaturen mellom 200-280 °C. Her skjer dekomponeringen svært langsomt og det produseres gasser hvor de fleste er ubrennbare. Ved temperaturer mellom 225-275 °C kan imidlertid gassene antennes av en ekstern kilde, for eksempel en gnist (Friquin, 2010).

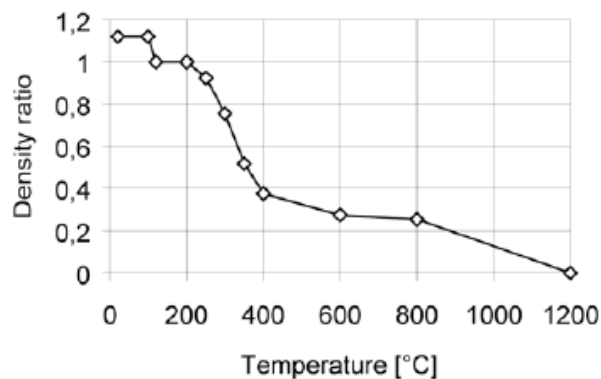
I "ZONE C" er temperaturen mellom 280-500 °C. Ved alle temperaturer over 300 °C vil treverket raskt brytes ned og forkulles hvor forbrenningen skjer ved pyrolyse. Temperaturstigningen i de indre lagene forsinkes på grunn av det forkullede lagets lave varmeledningsevne (Friquin, 2010).

Figur 6 viser sammenhengen mellom temperatur og termisk konduktivitet i tre. Her vises det at konduktiviteten er lavest ved rundt 300 °C, noe som forklarer den gode isolasjonsevnen i det forkullede laget som holder denne temperaturen under pyrolysen. Verdiene i Figur 6 tar hensyn til effekten av sammentrekning og dannelse av sprekker i treverket ved rundt 500 °C, samt konsumeringen av forkullet materiale ved rundt 1000 °C. Disse effektene fører til større varmeledning via økt stråling og konveksjon (standardorganisasjonen, 2010a).

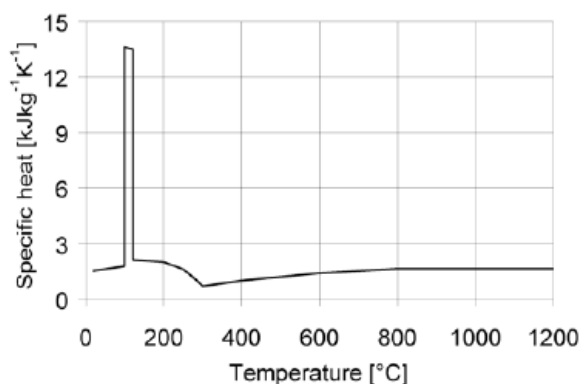
I "ZONE D" er temperaturen over 450-500 °C. Her vil det ikke lenger produseres brennbare gasser og ulmende forbrenning tar over og opprettholder en tilsvarende forkullingsrate som ved pyrolyse (Friquin, 2010).

### 3.4.3. Forkullingsrate

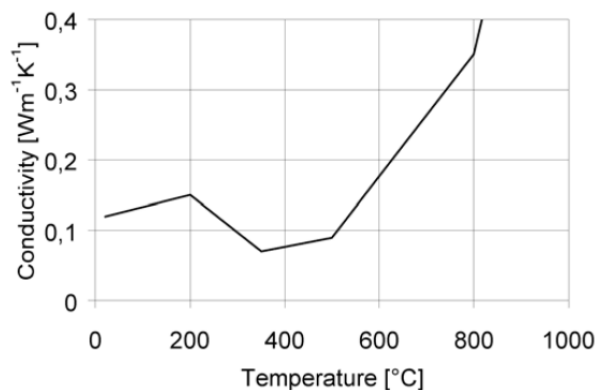
Forkullingsraten er hastigheten forkullingen skjer med innover i treverket ved forbrenning. Det er viktig å ha kunnskap om denne fordi den sier noe om brannmotstanden i trekonstruksjoner og hvor stor spesifikk brannenergi som blir tilført en brann innenfor det relevante tidsintervallet, det vil si tiden forkullingen skjer. Spesifikk brannenergi inngår i branndimensjonering av høye trehus (Byggkvalitet, 2015) og kan være utslagsgivende for behovet for



Figur 4: Sammenhengen mellom temperatur og densitet i softwood (standardorganisasjonen, 2010a). Figuren viser hvordan den relative densiteten i et prøvestykke av softwood med et initialvanninnhold på 12 % reduseres ved økt temperatur. Her er vanninnholdet 0 % når den relative densiteten er lik 1



Figur 5: Sammenhengen mellom temperatur og spesifikk varmekapasitet i tre (standardorganisasjonen, 2010a)



Figur 6: Sammenhengen mellom temperatur og termisk konduktivitet i softwood (standardorganisasjonen, 2010a)

automatiske slokkesystemer. Dette diskuteres seinere i oppgaven i 4 - Branndimensjonering.

| Byggemateriale       |                                                                                            | $\beta_0 \left( \frac{mm}{min} \right)$ | $\beta_n \left( \frac{mm}{min} \right)$ |
|----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|
| Softwood<br>og bjørk | Lamintert tre med karakteristisk densitet $\geq 290 \text{ kg/m}^3$                        | 0,65                                    | 0,7                                     |
|                      | Konstruksjonstre med karakteristisk densitet $\geq 290 \text{ kg/m}^3$                     | 0,65                                    | 0,8                                     |
| Hardwood             | Konstruksjonstre eller lamintert tre med karakteristisk densitet $\geq 290 \text{ kg/m}^3$ | 0,65                                    | 0,7                                     |
|                      | Konstruksjonstre eller lamintert tre med karakteristisk densitet $\geq 450 \text{ kg/m}^3$ | 0,50                                    | 0,55                                    |
| LVL                  | LVL med karakteristisk densitet $\geq 450 \text{ kg/m}^3$                                  | 0,65                                    | 0,7                                     |
| Paneler              | Trepanel                                                                                   | 0,9 <sup>a</sup>                        | -                                       |
|                      | Kryssfinér                                                                                 | 1,0 <sup>a</sup>                        | -                                       |
|                      | Trebaserte plater utenom kryssfinér                                                        | 0,9 <sup>a</sup>                        | -                                       |

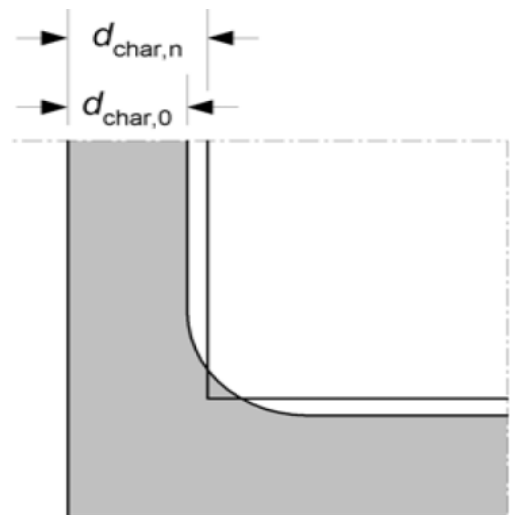
<sup>a</sup> Indikerer at verdiene er for paneler med karakteristisk densitet på  $450 \text{ kg/m}^3$  og paneltykkelse på 20 mm.

Tabell 2: Oversikt over endimensjonale og nominelle forkullingsrater for ulike bygningsmaterialer i tre (standardorganisasjonen, 2010a)

Eurokode 5 del 1-2 (standardorganisasjonen, 2010a) gir en oversikt over forkullingsrater for ulike byggematerialer i tre, disse finnes i Tabell 2. Her finnes verdier for endimensjonale forkullingsrater,  $\beta_0$  og en for nominelle forkullingsrater,  $\beta_n$ . Som tabellen viser er den nominelle forkullingsraten mer konservativ enn den endimensjonale forkullingsraten, dette er fordi den tar hensyn til forkullingen rundt hjørner, se Figur 8 og Figur 7.



Figur 8: Endimensjonal forkulling (standardorganisasjonen, 2010a)



Figur 7: Nominell forkulling, som tar hensyn til forkulling rundt hjørner (standardorganisasjonen, 2010a)

## *Beregning av forkullingshastighet*

### Metode for redusert tverrsnitt

Eurokode 5 del 1-2 (standardorganisasjonen, 2010a) beskriver to metoder for beregning av dybde av forkullet tre basert på forkullingsratene i Tabell 2. Disse er henholdsvis “metoden for redusert tverrsnitt” og “metoden for reduserte egenskaper”. Av disse er det kun metoden for redusert tverrsnitt som kan benyttes i Norge (standardorganisasjonen, 2010a). Metoden tar hensyn til reduksjon i forkullingsrate som følge av økt tykkelse av det forkullede laget.

### Delaminering

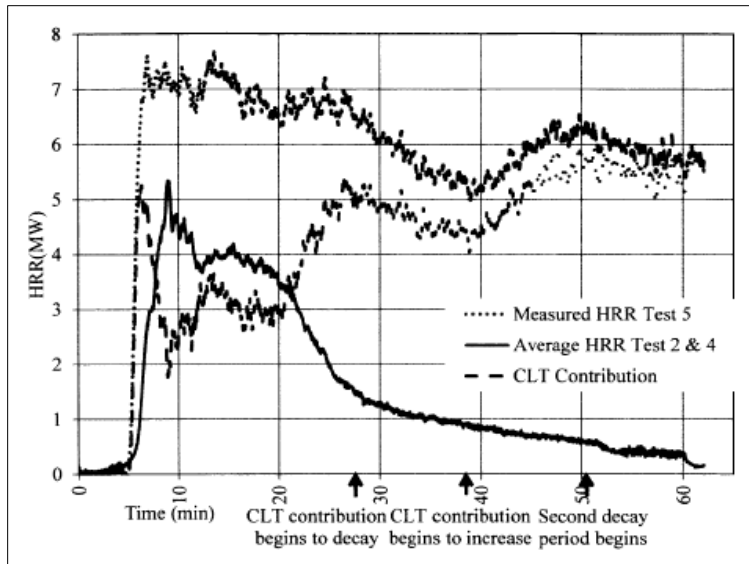
I tillegg til at « redusert tverrsnitt » metoden tar hensyn til at forkullingsraten avtar tas det i forkullingsratene i Tabell 2 hensyn til densitet, treslag, treprodukt og eventuelt effekten av avrundning rundt hjørner. I virkeligheten er det langt flere forhold som påvirker forkullingsraten, blant annet (Friquin, 2010):

- Kjemisk sammensetning
- Tykkelse av konstruksjonsdelen
- Fuktinnhold i treverket
- Geometriske faktorer
- Tilgang på oksygen
- Termisk påkjenning
- Type lim i massivtre eller limtre

Alle disse faktorene vil ikke bli beskrevet i detalj her, men det vil bli nevnt eksempler i kapittel 5.7 - Slokkemekanismer der det er naturlig. Hensikten med dette er å forsøke å utdype vanntåkens effekt på brann i tre.

På grunn av at oppgaven omhandler bygninger i massivtre og limtre vil det her beskrives et eksempel for å vise hvilket utslag delaminering kan ha på et brannforløp. Det vil si når det ytterste laget av lameller faller av ved brann. Det er utført en test ved Carleton University Fire Research Laboratory (McGregor, 2013) hvor brannforløpet i ubeskyttet krysslaminert massivtre ble kartlagt.

Resultatet i testen viser at varmeavgivelsesraten i brannrommet øker etter hver delaminering, noe som vises tydelig ved rundt 35 min og 55 min i Figur 9. Ut fra teorien som tidligere er gjennomgått i oppgaven er dette en naturlig konsekvens av at det isolerende kullet faller av og det mer eller mindre upåvirkede treverket under utsettes for brann. I tillegg vil økt eksponibel overflate i lamellene som faller av føre til ytterligere økt varmeavgivelsesrate (Drysdale, 2011).



Figur 9: Varmedeponeringsrateutvikling ved brann i rom med ubeskyttede flater i massivtre (McGregor, 2013)

### Beregning av forkullingsdybde ved bruk av parametrisk brannkurve

For mer nøyaktige beregninger av forkullingsdybde kan Annex A i Eurokode 5 – del 1-2 (standardorganisasjonen, 2010a) benyttes. Her beskrives en metode for beregning av forkullingsrate i softwood ved et naturlig brannforløp, det vil si ved bruk av den parametriske brannkurven beskrevet i Annex A i Eurokode 1 – Del 1-2 (standardorganisasjonen, 2008) og i 3.4.5 - Rombrann. Metoden tar hensyn til flere forhold enn metoden for redusert tverrsnitt, blant annet ventilasjon og termiske egenskaper i skillekonstruksjonen. Den sistnevnte faktoren vil vær svært forskjellig i ulike skillekonstruksjoner, for eksempel tre og betong. En nærmere beskrivelse av metoden finnes i Vedlegg 1.

#### 3.4.4. Passive tiltak

Til nå i dette kapitlet er det beskrevet hvordan eksponerte flater i tre forkuller ved brann. Videre beskriver oppgaven hvordan forkullingen kan hindres eller reduseres med passive tiltak, henholdsvis ved bruk av gipskledning og brannbehandling av treverk.

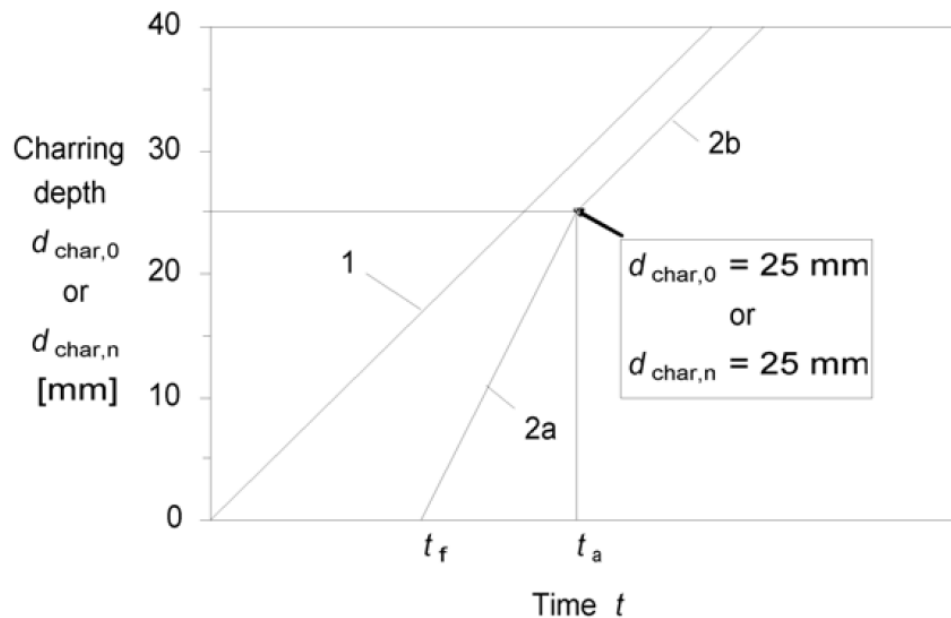
#### Gipskledning

Bruk av kledning er et alternativ for økt brannsikkerhet dersom et vanntåkesystem ikke skulle være tilstrekkelig alene i et høyt trehus med eksponerte flater i tre. Ved å kle inn overflater med gipsplater kan materialegenskapene i overflatene i et bygg forandres og forkullingen stoppes eller utsettes. I det europeiske klassifiseringssystemet for materialegenskaper har gipsplater følgende klasse (Norsk Treteknisk institutt, 2012):

*A2-s1 ,d0*



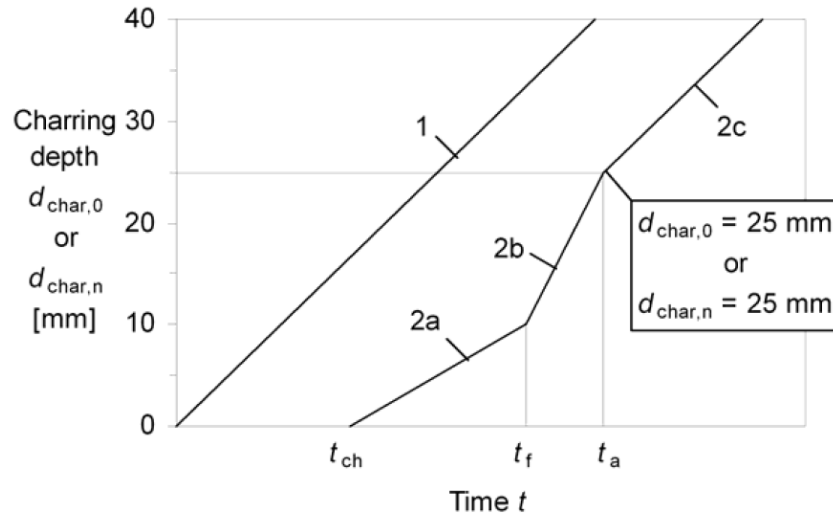
Det vil si at gipsplater ikke har bidrag til brannen (A2), svært liten produksjon av røyk (s1) og ingen brennende dråper (d0).



Figur 10: Sammenhengen mellom feiling i innkledning og økt forkullingsrate. Symbolet  $t_f$  er tiden før kledningen faller av. Symbolet  $t_a$  er tiden før det forkullede laget er 25 mm tykt og forkullingsraten er like stor som i en situasjon uten bruk av kledning (standardorganisasjonen, 2010a)

Oppgaven skal nå se på to ulike tilnærminger til å estimere effekten av gipskledning. Figur 10 viser to situasjoner med forkulling hvor det antas at forkulling starter i det gipskledningen faller av. Figuren forklares punktvis videre (standardorganisasjonen, 2010a):

- Punkt 1 i Figur 10 viser forkulling per tid i en bygningsdel av tre som er ubeskyttet under hele forkulling.
- Punkt 2a viser forkulling ved bruk av innkledning med gips. Forkulling starter ikke før innkledningen faller av,  $t_f$  men når den starter skjer den med økt hastighet på grunn av oppvarming og dekomponering under innkledningen før feiling.
- Punkt 2b viser at når det forkullede laget har nådd 25 mm ved  $t_a$ , etter at innkledningen har feilet vil forkullingsraten reduseres og bli av samme størrelse som uten bruk av innkledning. Av dette forstås det at hvis tiden før innkledningen faller av,  $t_f$  er relativt liten vil den økte forkullingsraten etter feiling føre til at forkullingsdybden ikke reduseres av innkledningen. Ved forhøyet forkullingsrate vil forkullingsdybden imidlertid ikke overgå den som ville vært i en tilsvarende ubeskyttet bygningsdel utsatt for den samme brannpåkjenning. Sagt med andre ord vil streken i 2a bøye av og gå parallelt med streken i 1 i Figur 10 i det de eventuelt krysser hverandre.



Figur 11: Sammenhengen mellom endring i forkullingsrate og forkulling før innkledningen faller av, samt økt forkulling etter at innkledningen faller av (standardorganisasjonen, 2010a).

Figur 11 over viser et tilfelle ved bruk av innkledning hvor forkullingen starter før innkledningen faller av (standardorganisasjonen, 2010a):

- Punkt 1 viser forkullingen per tid i en bygningsdel som er ubeskyttet under hele forkullingen.
- Punkt 2a viser at tiden forkullingen starter,  $t_{ch}$  er før innkledningen faller av,  $t_f$ . Her vil imidlertid forkullingen skje med redusert hastighet.
- Punkt 2b viser forkullingsraten etter at innkledningen er falt av,  $t_f$ . Her skjer forkullingen med økt hastighet inntil det forkullede laget har nådd 25 mm.
- Punkt 2c viser forkullingsraten etter at det forkullede laget har nådd en tykkelse på 25 mm. Her vil forkullingsraten være den samme som ved ubeskyttet treverk.

Tiden før forkullingen starter ved bruk av ulike innkledninger kan regnes ut via metoder i Eurokode 5 del 1-2 (standardorganisasjonen, 2010a). Det kan også benyttes erfaringsdata fra anerkjent litteratur som for eksempel bøkene “Fire safety in timber buildings” (Sweden, 2010) eller “Brandsäkra Trähus” (Forskningsinstitut, 2012). Tabell 3 er hentet fra “Brandsäkra Trähus” og viser tid før forkullingen starter,  $t_{ch}$  og tid før kledningen faller av,  $t_f$ , ved bruk av ulike typer gipsplater med varierende dybde.

Tabell 3 viser to ulike typer gipskledninger som kan benyttes enkeltvis eller kombinert med hverandre i vegger og bjelkelag. Type A kledninger er 12,5 mm tykke plater som kan benyttes til innvendig kledning på vegger og i himlinger. Disse betegnes som regel med “standard” eller “normal”. Type F er 12,5 mm eller 15,0 mm tykke plater for bruk i ulike brannklassifiserte konstruksjoner (Byggforsk, 2005).

| Gipskledning     | Tykkelse (mm) | Vegger            |                | Bjelkelag         |                |
|------------------|---------------|-------------------|----------------|-------------------|----------------|
|                  |               | $t_{ch}$ (mm/min) | $t_f$ (mm/min) | $t_{ch}$ (mm/min) | $t_f$ (mm/min) |
| Type A           | 12,5          | 15,5              | 16,8           | 15,5              | 15,5           |
| Type F           | 12,5          | 15,5              | 32,3           | 15,5              | 22,5           |
| Type F           | 15,0          | 20,0              | 43,5           | 24,5              | 25,0           |
| 2 x Type A       | 25,0          | 33,0              | 38,5           | 31,0              | -              |
| Type F og Type A | 25,0          | 45,5              | 50,8           | 36,0              | 36,0           |
| Type F og type A | 27,5          | 50,8              | 81,0           | 36,0              | 50,0           |
| 2 x Type F       | 25,0          | 45,5              | 60,0           | 36,0              | 47,0           |
| 2 x Type F       | 30,0          | 56,0              | 80,0           | 46,0              | 57,0           |

Tabell 3: Oversikt over tabulerte verdier for tid før forkulling,  $t_{ch}$  og tid før nedfall,  $t_f$  ved bruk av ulike typer gipskledning (Forskningsinstitutt, 2012)

### Brannbehandling av treverk

Brannimpregnert treverk kan maksimalt oppfylle klasse:  
(Norsk Treteknisk institutt, 2012):

*B-s1,d0*

Klassifiseringen beskriver at behandlet tre gir et svært begrenset bidrag til brannen (B), lite røykproduksjon (s1) og ingen brennende dråper (d0).

I forhold til ubehandlet treverk vil behandlet treverk i euroklasse B utsettes for en oppvarming med både 100 W og 300 W i løpet av totalt 20 min uten å overtenne. Det vil altså være mulig å forbedre brannegenskapene i tre betydelig ved brannbehandling. Effekten av brannimpregnering av kledning vises i Figur 12. Det bør imidlertid spesifiseres at brannbehandling av treverk som regel ikke påvirker forkullingshastigheten der treverket allerede brenner (Trä, 2015). Reduksjon i flammer kan derimot forhindre brannspredning og utbredelse av forkulling.

Brannbehandlingen av treverk kan skje ved bruk av kjemikalier som fungerer på ulike måter (Evans, 2003):

1. Ikke brennbare gasser fra det beskyttende laget frigjøres fra det påførte kjemiske laget og tynner ut de brennbare pyrolysegassene fra treet slik at antenning forhindres.
2. Kjemikaliene danner et flytende glassaktig lag som stopper transporten av pyrolysegasser på vei ut av treverket.
3. Kjemikaliene framprovoserer dannelsen av trekull, karbondioksid og vann i stedet for pyrolyseprodukter.



Figur 12: Forsøk hvor brannimpregnert tre til høyre var selvslukkende mens brannen fortsatte i den ubehandlede kledningen til venstre etter at den eksterne flammen var fjernet (Evans, 2003)

De kjemiske midlene kan påføres direkte på overflaten, for eksempel i maling eller lakk. De kan også eventuelt benyttes ved å impregnere kjemikaliene inn i treverket.

Kjemikaliene påføres løst i vann og er derav vannløselige. Dersom de blir utsatt for store mengder vann fra for eksempel regn kan de brannhemmende kjemikaliene vaskes ut av treverket. Flere av de aktive stoffene er hygroskopiske og egner seg ikke nødvendigvis i fuktige miljøer. Brannimpregneringsmiddel som utsettes for fuktighet kan vandre i treverket og gi saltutslag i overflater. Stoffene kan i tillegg føre til økt korrosjon ved reaksjon med metaller, for eksempel festemidler i konstruksjonen (Evans, 2003).



Figur 13: Terningen arena, brannimpregnert furu (AS, 2014)



Figur 14: Brannimpregnert furu med pigmentert overflatebehandling i Mathallen i Bergen (AS, 2014)



Figur 15: Brannimpregnert panel i gran i Lindåshallen i Bergen (AS, 2014)

Moelven AS er en kjent norsk aktør som produserer bygningselementer i tre og markedsfører brannbehandling av tre ved både impregnering og overflatebehandling (AS, 2014). I følge selskapet kan brannbehandling trygt erstatte kledning i vegger, tak og himlinger når det er krav om brannklasse i bygg. Brannbehandling av tre er benyttet i flere store prosjekter som illustreres i Figur 15, Figur 14 og Figur 13. Som bildene viser kan brannbehandling inneholde fargepigmenter eller være gjennomsiktig slik at strukturen i treverket vises i overflaten (Trä, 2015).

Et eksempel på en type brannimpregnering er «FireGuard» brannhemmende væske. Når det behandlede treverket utsettes for høye temperaturer omdannes pyrolysegassene til ubrennbare gasser som karbondioksid, ammoniakk og vann. I overflaten vil det kun skje forkulling uten flammer og brannen vil ikke spre seg (AS, 2014).

Et eksempel på en brannhemmende maling er «Teknos FR Facade» som påføres i to omganger, først industrielt og deretter på byggeplass. Ved brann vil malingen svulle og danne et kullag som varmeisolerer og hindrer at pyrolysegasser produseres i treverket. Treverket vil derfor kun gradvis omdannes til kull og ikke antenne. For å forhindre problemer med misfarging anbefales det å benytte varmgalvaniserte festemidler med en lengde som gjør at de går 35-50 mm inn i treverket. Produktet inneholder ingen helsefarlige eller miljøfarlige stoffer (AS, 2015b).

En oversikt over euroklassene som oppnås ved bruk av brannbehandlinger i bygningselementer av gran og furu finnes i Tabell 4.

| Løsning                             | Gran    | Furu    |
|-------------------------------------|---------|---------|
| <b>Brannimpregnerte løsninger</b>   | B-s1,d0 | B-s2,d0 |
| <b>Brannmalte interiørløsninger</b> | B-s1,d0 | -       |

Tabell 4: Oversikt euroklasser for gran og furu ved bruk av brannbehandling fra Moelven As (AS, 2014)

### 3.4.5. Rombrann

Til nå er det fokusert på hvordan materialet treverket brenner og forkalles og hvordan dette kan forhindres eller utsettes. Videre beskrives hvilke typer branner som er relevante for de aktuelle virksomhetene og hvordan eksponerte flater i tre påvirker brannutviklingen i en rombrann.

#### *Klasse A branner*

Det finnes flere klassifiseringssystemer som beskriver ulike typer branner med forskjellige egenskaper.

Brannstype har påvirkning på automatiske slokkesystemers effektivitet og pålitelighet.

Brannklassifiseringen påvirker samtidig valg eller etablering av fullskala branntestprotokoller for verifisering av vanntåkesystemer som vil bli beskrevet seinere i 6.4 - Fullskala tester for ytelse ved brannbekjempelse. Ulike standarder for vanntåke opererer med forskjellige klassifiseringssystemer, noe som kan være forvirrende ved valg av testprotokoll. I denne oppgaven er det beskrevet testprotokoller fra forskjellige land i Europa og fra USA, derfor beskrives klassifiseringssystemene som benyttes i europeiske NS-EN 2 og amerikanske NFPA 10 i Tabell 5.

| Klasse     | Definisjon i NS-EN2 (standardorganisasjonen, 2014a)                                                                              | Definisjon i NFPA 10 (Association, 2013a)                                                         |
|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>A</b>   | Brann i faste materialer som som regel er organiske, for eksempel kull, papir og papp. Disse gir normalt en forbrenning med glør | Ordinære forbrenningsmaterialer som for eksempel tre, klær, papir, gummi og mange typer plastikk. |
| <b>B</b>   | Brann i væsker eller faste materialer som kan anta væskeform, for eksempel petroleumsprodukter                                   | Brennbare væsker, oljer, tjære, oljebaserte malinger og brennbare gasser                          |
| <b>C</b>   | Brann i gasser                                                                                                                   | Branner i elektrisk utstyr der det er viktig at slokkemediet ikke er elektrisk ledende            |
| <b>D</b>   | Brann i metaller                                                                                                                 | Brann i metaller                                                                                  |
| <b>F/K</b> | Brann i matoljer og matfett i kokekar                                                                                            | Brann i matoljer og matfett i kokekar                                                             |

Tabell 5: Oversikt over ulike klassifiseringssystemer for brann

Denne oppgaven fokuserer på brann i rom med ordinære forbrenningsmaterialer og vegger i ubeskyttet tre, som faller inn under klasse A i begge klassifiseringssystemene. I klasse A branner danner forbrenningen varme som framprovoserer produksjon av brennbare gasser i materialet. Forbrenningen vil føre til økt temperatur som øker produksjon av brennbare gasser, som igjen fører til økt forbrenning. Denne rundansen begrenser imidlertid seg selv på grunn av at emmisiviteten i flammen ikke kan

overstige 1, og at absorpsjonen av varmestråling skjer i gassonen over brennstoffoverflaten (Grant et al., 2000).

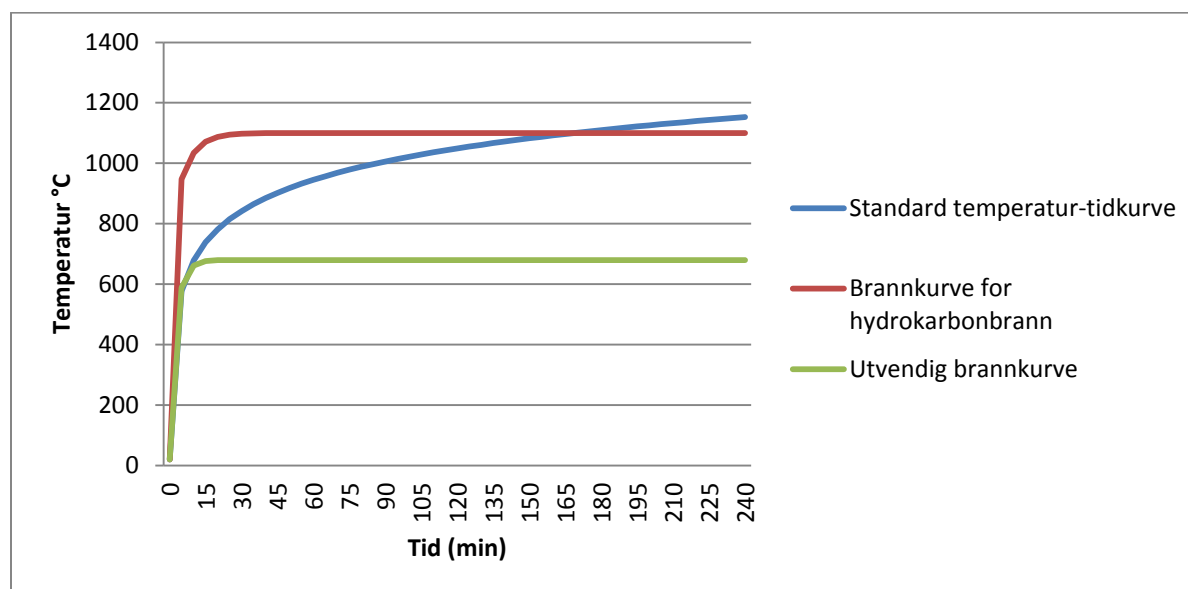
I forhold til væskebranner er overflatetemperaturen og fordampningsvarmen,  $L_v$  vesentlig høyere i klasse A branner. Den relativt høye overflatetemperaturen på mellom 400-500 °C fører til større varmetap gjennom stråling. Den høye fordampningsvarmen indikerer at det kreves relativt mye termisk energi for kjemisk dekomponering, det vil si pyrolyse av materialet. Dannelsen av et forkullet lag i både tre og andre materialer innenfor klasse A branner vil derfor føre til at forkullingsraten og varmeavgivelsesraten stabiliseres, akkurat som beskrevet for treverk tidligere i dette kapitlet. En vesentlig forskjell mellom klasse A branner og andre branner er at brannspredningen vil kunne skje i alle materialets retninger (Grant et al., 2000).

### *Estimering av standard- og naturlig brannforløp*

For å beskrive et brannscenario eller estimere en brannlast for design av en bygning kan det benyttes forenklete modeller. Disse modellene deles inn i nominelle temperatur-tid kurver og parametriske kurver.

De nominelle temperatur-tid kurvene er basert på en rekke “worst-case” tilfeller fra rombranner med omhyllingsflater i betong og danner periferien av temperaturene i disse testene og er derfor relativt konservative. Sammenhengen mellom temperatur og tid er gitt i formler i Eurokode 1 del 1-2 (standardorganisasjonen, 2008). Disse tar ikke hensyn til avkjølningsfasen i en brann, som sammen med de andre ulike fasene vil bli beskrevet seinere i dette kapitlet.

Det finnes som nevnt flere typer nominelle kurver, men for design av trekonstruksjoner er det til nå mest benyttet standard temperatur-tid kurven (Sweden, 2010). De ulike nominelle kurvene er gjengitt i Tabell 6.



Tabell 6: Nominelle temperatur-tid kurver. Kurvene er navngitt rangert etter hvilke som gir høyest temperatur og tabellen kan derfor leses dersom oppgaven skrives ut i svarthvitt. (standardorganisasjonen, 2008)

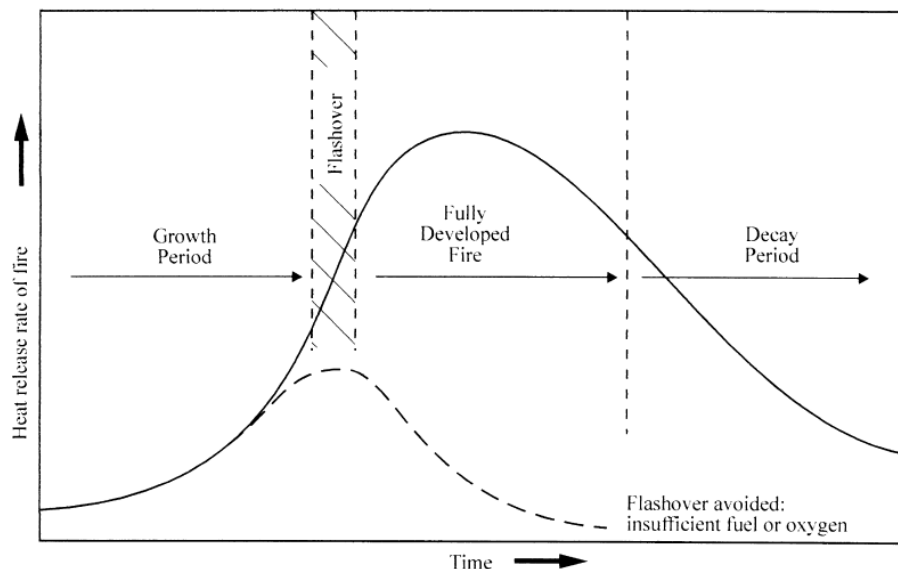
Tabellen viser at etter ca 165 min er standardkurven den dimensjonerende nominelle temperatur-tid kurven av de kurvene som er nevnt i Eurokode 1 del 1-2 (standardorganisasjonen, 2008). Det vil altså si at standardkurven som benyttes for rombrann og trekonstruksjoner etter 165 min overgår brannkurven for hydrokarbonbrann (Sweden, 2010) i samme figur.

I tillegg til beskrivelse av “standard brannforløp” gir Eurokode 1 del 1-2 (standardorganisasjonen, 2008) metoder for å beregne et “naturlig brannforløp”, hvor det tas hensyn til avkjølingsfasen og parametre som påvirker brannforløpet. Brannmodellene for naturlige brannforløp, såkalte parametriske kurver tar hensyn til parametre som:

- Brannlast (mengde, type, plassering)
- Ventilasjonsforhold
- Termiske egenskaper i skillekonstruksjonen
- Brannbekjempelse

Under det sistnevnte punktet kommer automatiske slokkemidler inn i bildet. Disse inngår i metoden for beregning av dimensjonerende brannlast som finnes i Tillegg E i Eurokode 1 del 1-2 (standardorganisasjonen, 2008), dette vil bli diskutert nærmere 4.5 - Brannenergi.

De parametriske kurvene er utviklet for bestemte scenarier og har derfor et begrenset bruksområde. Den parametriske temperatur-tid kurven som er gitt i Eurokode 1 del 1-2 (standardorganisasjonen, 2008) i Tillegg A gjelder bare for brannceller med gulvareal opp til 500 m<sup>2</sup>, uten åpninger i taket og med største branncellehøyde på 4 m. Parametriske temperatur-tid kurver er typisk blitt brukt som alternativ til standardkurven i konstruksjoner av stål og betong (Sweden, 2010).



Figur 16: Grafisk eksempel på brannforløp og de ulike fasene i brannforløpet (Grant et al., 2000)



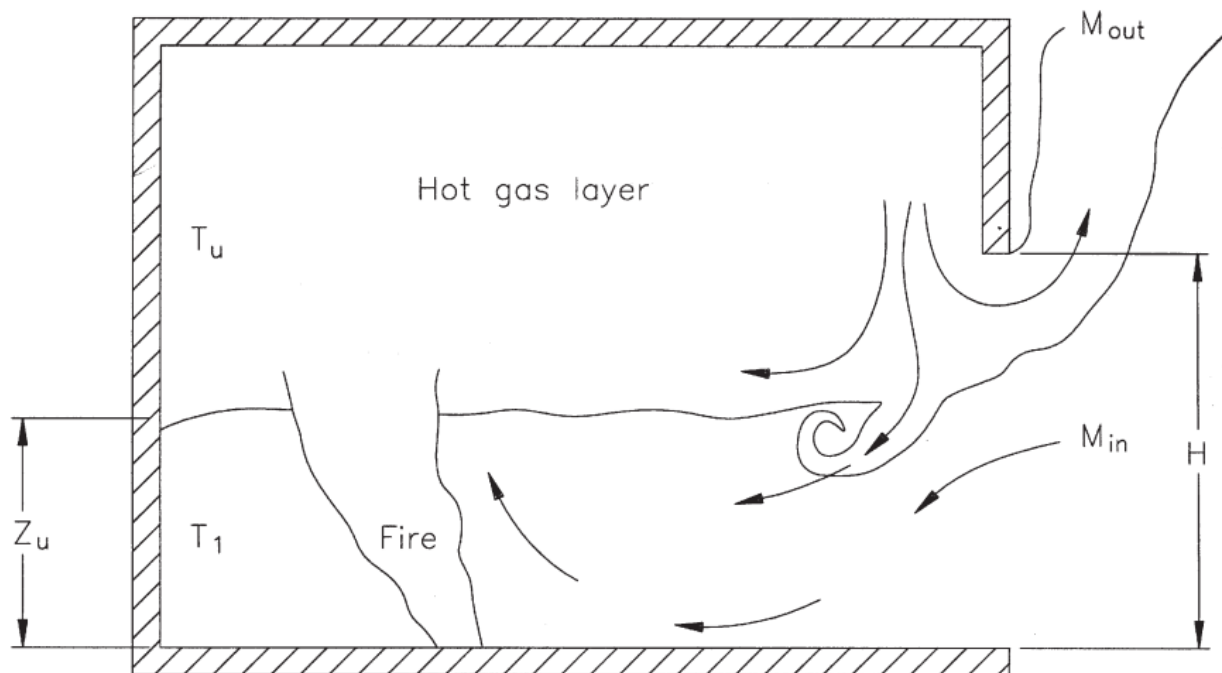
## Brannforløp

Rombrann i boliger og kommersielle bygninger er den mest vanlige typen brann (Grant et al., 2000). En slik brann har ulike faser som er beskrevet i Figur 16, legg merke til at det her er sett bort fra antennelse og at brannen hele tiden er brenselkontrollert.

Ved brannslukking er det viktig å skille mellom tiden før og etter overtenning. Før overtenning er brannens vekstperiode, som kan resultere i flere utfall (Drysdale, 2011):

- Brannen kan dø ut av seg selv på grunn av begrensede muligheter til å spres
- Brannen kan dø ut eller brenne svært sakte som følge av at den er sterkt ventilasjonskontrollert
- Det er tilstrekkelig oksygen og brannlast slik at brannen kan spres og utvikle seg

Før overtenning er brannen relativt liten og derfor nokså enkel å slokke (Drysdale, 2011). I en situasjon der det er lite oksygen til stede kan det for eksempel utvikle seg en ulmebrann som produserer store mengder brennbare gasser (Friquin, 2010). Ved plutselig tilgang på oksygen for eksempel via feiling i integritet, åpnede dører eller knuste vindu (Standardization, 2006) kan det oppstå en voldsom økning i varmeavgivelse og eventuelt en eksplosjonslignende effekt (Weng and Fan, 2003). I hule konstruksjoner, for eksempel i hule massivtreelementer kan temperaturene overstige standard temperatur-tid kurve (Forskningsinstitutt, 2012).



Figur 17: Masseutveksling i rombrann (Liu et al., 2001)

Der forholdene er slik at en brann har mulighet til å utvikle seg vil det etterhvert etableres et røyklag med høy emissivitet oppunder taket i brannrommet. Dette resulterer i økt tilbakestråling av varme fra



brannen og dermed økt temperatur (Drysdale, 2011). Røyklaget i toppen av rommet, samt masseutvekslingen hvor varm gass byttes ut med frisk luft i en ventilert rombrann vises i Figur 17.

Når temperaturen i taket når rundt 600 °C vil det skje en overtenning og alle brennbare materialer i rommet vil delta i brannen, dette er en av flere definisjoner på overtenning. Slokking av brann vil være mer utfordrende etter overtenning (Drysdale, 2011). Som Figur 16 viser skjer overtenningen, markert med «flashover» over relativt kort tid i forhold til de andre fasene i brannen, noe som indikerer at det er vanskelig å ha kontroll på akkurat når den vil skje.

Etter overtenning vil brannen være fullt utviklet og som regel ventilasjonskontrollert (Buchanan, 2002). Den stiplede linja i Figur 16 viser et tilfelle hvor det ikke har oppstått overtenning på grunn av begrenset mengde brannlast eller oksygen (Drysdale, 2011). Dette kan for eksempel skyldes isolert brannlast, lite ventilasjon eller bruk av automatiske slokkesystemer i form av vanntåkesystemer.

I avkjølingsfasen begynner brannen å reduseres og temperaturen synker. Det finnes flere definisjoner på avkjølingsfasen og en av dem er at temperaturen er redusert til 80 % av høyeste temperatur som er oppnådd i brannrommet (Drysdale, 2011).

### Brannforløp ved eksponerte flater i tre

I de fleste tilfeller har innholdet i en bygning større påvirkning på hastighetsrate og vekst i en brann enn materialer i vegger og himling. Dette gjelder spesielt i små rom hvor de brennbare gjenstandene står nært hverandre og de brennbare overflatene i rommet utgjør en liten del av den generelle sikkerheten i bygningen. Grunnen til dette er at forholdene i rommet som regel er uholdbare med tanke på personsikkerhet før de brennbare overflatene antennes (Nystedt, 2011). Antennelsen vil som regel skje i det brennbare innholdet i brannrommet og spres videre til kledningene utover i brannforløpet (Nystedt, 2012).

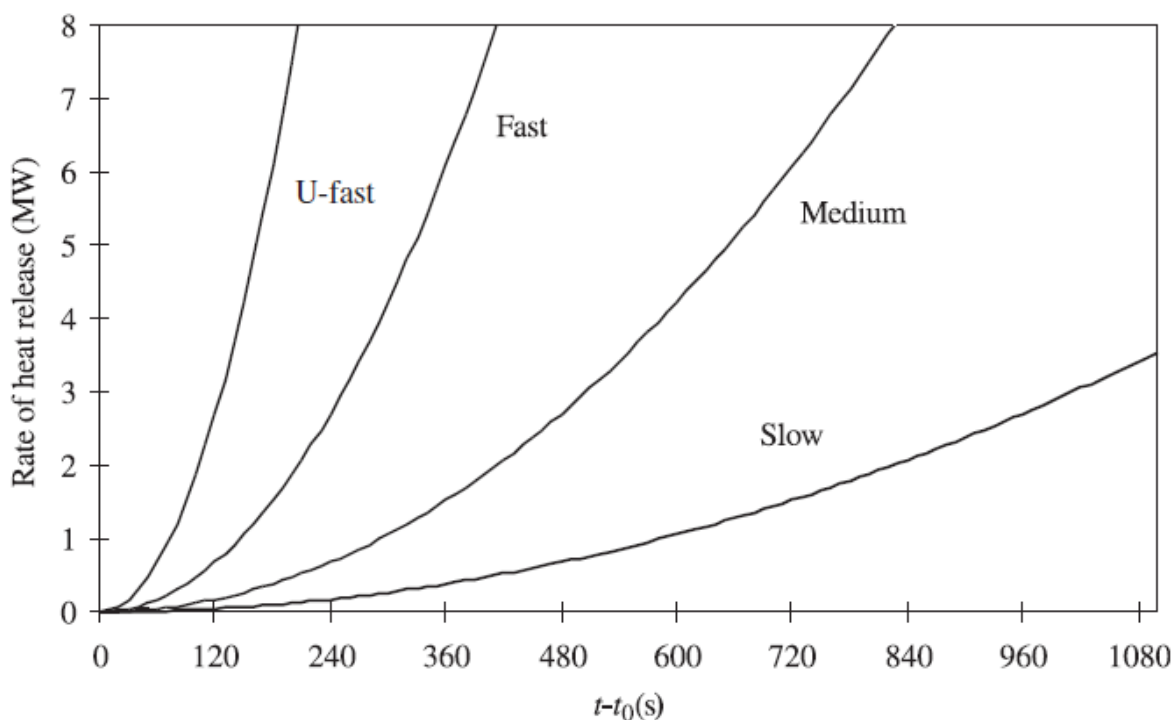
Selv om bidraget fra brennbare overflater er lite kan det ikke ses bort fra i startfasen av en brann, spesielt ikke i små rom hvor det brennbare innholdet med større sannsynlighet ligger nært kledningene (Nystedt, 2012). Brannspredningen vil gå raskere dersom de omsluttende flatene er av ubeskyttet tre (Buchanan, 2002). Økt temperatur i brannrommet øker pyrolyse og dannelsen av brennbare gasser (Friquin, 2010). Store mengder eksponert tre, som for eksempel ved bruk av ubeskyttet massivtre i vegger vil øke produksjonen av brennbare gasser. Dermed kan det antas at bruk av ubeskyttet tre i overflater øker sannsynligheten for overtenning og samtidig forkorter vekstperioden. Eksponert treverk i overflater vil derimot ikke ha betydelig innvirkning på brannforløpet før overtenning (Lakkonen, 2015).

For å unngå hurtig brannspredning er det viktig å unngå overflatematerialer som raskt sprer flammer og dermed øker sannsynligheten for tidlig overtenning. Brennbare overflater i tre som befinner seg i euroklasse D vil ikke gi et slikt bidrag, men det bør ikke benyttes materialer som har lavere klasse (Nystedt, 2012). For å redusere brannbidrag fra kledninger anbefaler Fire Code Reform Center (Centre, 1998) overflateklasser for ulike anvendelsesområder i Tabell 7.

| Anvendelsesområde                                                    | Materialklasse | Kommentar                                                |
|----------------------------------------------------------------------|----------------|----------------------------------------------------------|
| Rømningsvei                                                          | B eller bedre  | Bør ha strenge krav til kledninger i vegger og tak       |
| Offentlige korridorer                                                | D              | leilighetsbygg, hoteller, kontorer, butikker, skoler etc |
| Offentlige korridorer i helsebygninger og offentlige forsamlingsbygg | C              | Teater, saler etc                                        |
| Spesifikke områder i alle bygninger                                  | D              | Bør ha strenge krav til kledninger i vegger og tak       |

Tabell 7: Anbefalte euroklasser av Fire Code Reform Center for ulike anvendelsesområder (Centre, 1998)

Et materiale i euroklasse D vil gi et «akseptabelt bidrag» til en brann. I situasjoner hvor brannveksten fortsetter og brannen spres til kledningene i rommet vil brennbare kledninger i euroklasse C eller D føre til en mer alvorlig brannutvikling. Designeren må derfor ta hensyn til kapasiteten i brannslukkesystemet dersom noe skulle føre til sein aktivering (Nystedt, 2011). Mesteparten av innholdet i en branncelle vil ha egenskaper som tilsvarer materialegenskapene i euroklasse D. Brannveksten i kledninger er sterkt avhengig av størrelsen på antennelseskilden. For små antennelseskilder opp til 100 kW vil brannvekstraten i kledninger være «slow» til «medium» (0,009 til 0,012 kW/s<sup>2</sup>). Dersom antennelseskilden er over 160 kW vil brannvekstraten i kledningene være «ultra fast» (0,19 kW/s<sup>2</sup>) (Nystedt, 2012).



Figur 18: Brannvekstrater for «t-squared» branner (Drysdale, 2011)

Figur 18 er hentet fra Dougal Drysdales bok «An Introduction to Fire Dynamics» (Drysdale, 2011) og viser forskjellen mellom varmeavgivelsesraten per tid for ulike typer branner i en t-squared brann. Her er:

- $t_0$  = Inkubasjonstiden (s), den tiden det tar etter antenning før brannen tar skikkelig fatt
- $t$  = tid forsøket har vart etter at brannen har tatt skikkelig fatt (s)

Figur 18 viser at det er relativt stor forskjell mellom varmeavgivelsesratene i de ulike branntypene «slow», «medium», «fast» og «ultra fast». Tabell 8 viser en oversikt over typiske scenarioer for de ulike brannvekstratene.

| Beskrivelse       | Type scenario                           |
|-------------------|-----------------------------------------|
| <b>Slow</b>       | Tettpakkede papirprodukter              |
| <b>Medium</b>     | Tradisjonelle madrasser, lenestoler o.l |
| <b>Fast</b>       | PE paller, PU madrasser o.l             |
| <b>Ultra-Fast</b> | PE Skumplast                            |

Tabell 8: Oversikt over typiske scenarioer for ulike brannvekstrater (Drysdale, 2011)

### *Hvilke effekt har høyden av hus på brann i et brannrom?*

I høye hus kan trykkforskjell mellom inneluft og uteluft danne luftstrømmer oppover i en bygning. For eksempel vil et åpent vindu i høye etasjer kunne dra med seg luft og danne luftstrømmer fra nedre etasjer og oppover i bygningen via en trappesjakt. Dette fenomenet kalles skorsteinseffekten og påvirker ventilasjonsforholdene i en bygning.

Resutatet av dette kan være økt brannspredning via spredning av glødende rester eller via at flammer dras i horisontal retning ut av åpninger i brannrommet (Shi et al., 2012). Som det blir beskrevet i 5.8 - Faktorer som påvirker effekten av vanntåke påvirker ventilasjonsforholdet også effekten og påliteligheten i vanntåkesystemer.

## 4. Branndimensjonering i høye trehus

### 4.1. Introduksjon til kapitlet

I dette kapitlet beskrives det når det i følge byggt teknisk forskrift eller dens veiledning (Byggkvalitet, 2015) er krav om- eller preakseptert med automatiske slokkesystemer i høye trebygg. For å avgjøre dette må bygningene blant annet kategoriseres i ulike risiko- og brannklasser, som gir videre grunnlag for valg av prosjekteringsmetode. Ved bruk av eksponert massivtre i bygninger med 5 etasjer eller mer oppstår det fravik fra veiledningen til byggt teknisk forskrift (Byggkvalitet, 2015). I dette kapitlet er det forsøkt å gi leseren innsikt i hvilke fravik som oppstår fra veiledningen og samtidig hvordan automatiske slokkesystemer kan benyttes for å kompensere for disse fravikene. I tillegg til krav og preaksepterte ytelser skal det også undersøkes når det er behov for automatiske slokkesystemer.

### 4.2. Byggt teknisk forskrift

Byggt teknisk forskrift (Byggkvalitet, 2015) setter minimumskrav til verdier for egenskaper i bygg som oppføres i Norge. Denne delen av forskriften setter funksjonskrav, men også noen ytelseskrav. I tillegg finnes det en veiledning til byggt teknisk forskrift (Byggkvalitet, 2015) som forklarer forskriftens krav mer i dybden og gir forslag til hvordan disse kan løses i praksis via ytelseskrav. Her finnes også eksempler på løsninger som kan bli bedre enn minimumskravene.

Funksjonskrav er en overordnet målsetning eller et formål som settes for et byggverk. Vanligvis er funksjonskravene kvalitative, det vil si beskrevet med ord. Eksempel på funksjonskrav hentet fra byggt teknisk forskrift (Byggkvalitet, 2015) er:

*«Byggverk skal deles opp i brannceller på en hensiktsmessig måte. Områder med ulik risiko for liv og helse og/eller ulik fare for at brann oppstår, skal være egne brannceller med mindre andre tiltak gir likeverdig sikkerhet»*

Ytelseskrav er en kvalitet, kapasitet eller egenskap i et byggverk. Ytelseskrav er som regel kvantitative, det vil si beskrevet med tall og et eksempel fra veiledningen til byggt teknisk forskrift (Byggkvalitet, 2015) er:

*«Branncellebegrensende bygningsdeler i brannklasse 3 skal ha overflateegenskaper på minimum euroklasse A2-s1,d0»*

### 4.3. Valg av prosjekteringsmetode

Der byggt teknisk forskrift (Byggkvalitet, 2015) setter ytelseskrav skal disse oppfylles. Der forskriften kun gir funksjonskrav kan disse oppfylles via verifisering gjennom forenklet eller analytisk brannteknisk prosjektering. I forenklet brannteknisk prosjektering benyttes de preaksepterte løsningene som er angitt i veiledningen til byggt teknisk forskrift (Byggkvalitet, 2015) uten fravik. Dersom det oppstår fravik fra de preaksepterte ytelsene i veiledningen må brannsikkerheten verifiseres gjennom analyse. Omfanget av en slik analyse er avhengig av størrelsen på fravikene. Dersom disse er relativt små kan det utføres en kvalitativ analyse. Dersom fravikene er mer omfattende kan det i tillegg måtte gjøres en kvantitativ analyse ved bruk av for eksempel deterministisk analyse, probalstisk analyse med flere (Byggkvalitet, 2015).

I de fleste bygninger er brannsikkerhetstiltakene designet ved en kombinasjon mellom preaksepterte løsninger og analytiske løsninger. Det mest vanlige er å først velge preaksepterte løsninger og deretter utføre modifikasjoner hvis for eksempel disse er i konflikt med mål i designet eller hvis kostnadene blir for store (Nystedt, 2012). Her vil typisk en preakseptert løsning byttes ut med en alternativ løsning som skal sørge for at sikkerhetsnivået er minst like høyt. Tilpasning er et viktig nøkkelord her, både når det gjelder regelverk, ønsket sikkerhetsnivå ut over regelverk samt arkitekturmessige mål og kostnadseffektivitet. Senere i dette kapitlet vil det bli diskutert hvilke fravik som oppstår ved bruk av tre som byggemateriale i høye trehus.

#### 4.4. Brannsikkerhetsstrategi

Valg av prosjekteringsmetode, det vil si om forenklet eller analytisk brannteknisk prosjektering er i tillegg til størrelse på fravik også avhengig av brannsikkerhetsstrategi (Byggkvalitet, 2015). For at byggverket skal være tilstrekkelig brannsikkert i bruksfasen må eier blant annet ha informasjon om forutsetning og begrensning for bruksområdet i bygningen, som fastsettes i brannsikkerhetsstrategien. Denne oppgaven vil gjennomgå forutsetninger og begrensninger i brannsikkerhetsstrategien som har betydning for dimensjonering av automatiske slokkeanlegg.

Slokkeanlegg er en fellesbetegnelse på brannslokkesystemer som for eksempel sprinklersystemer, vanntåkesystemer og gassbaserte slokkesystemer. På den måten skiller ikke byggt teknisk forskrift (Byggkvalitet, 2015) mellom for eksempel sprinkler og vanntåke.

##### 4.4.1. Risikoklasse

Byggt teknisk forskrift (Byggkvalitet, 2015) deler inn bygninger i risikoklasser etter hvor stor skade en brann kan utføre på liv og helse, som er avhengig av bruksområdet. Risikoklasser danner grunnlag for prosjektering, krav og ytelser i slokkeanlegg. En oversikt over de ulike risikoklassene finnes i Tabell 9.

| Risikoklasser | Byggverk kun beregnet for sporadisk personopphold | Personer i byggverk kjenner rømningsforhold herunder rømningsveier, og kan bringe seg selv i sikkerhet | Byggverk beregnet for overnatting | Forutsatt bruk av byggverk medfører liten brannfare |
|---------------|---------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------------------------|
| 1             | Ja                                                | Ja                                                                                                     | Nei                               | Ja                                                  |
| 2             | Ja/Nei                                            | Ja                                                                                                     | Nei                               | Nei                                                 |
| 3             | Nei                                               | Ja                                                                                                     | Nei                               | Ja                                                  |
| 4             | Nei                                               | Ja                                                                                                     | Ja                                | Ja                                                  |
| 5             | Nei                                               | Nei                                                                                                    | Nei                               | Ja                                                  |
| 6             | Nei                                               | Nei                                                                                                    | Ja                                | Ja                                                  |

Tabell 9: Risikoklasser (Byggkvalitet, 2015)

Denne oppgaven tar for seg "flerbrukshus" med ikke-sporadisk personopphold og derfor er risikoklasse 2-6 relevant. Eksempler på ulike bygninger eller rom innenfor de forskjellige risikoklassene finnes i «§ 11-2 Tabell 1: Ulike virksomheter og tilhørende risikoklasse» i veiledningen til byggt teknisk forskrift (Byggkvalitet, 2015).

Byggteknisk forskrift (Byggkvalitet, 2015) setter noen steder krav om slokkeanlegg basert kun på risikoklasse, for eksempel i «§ 11-12. Tiltak for å påvirke rømnings- og redningstider»:

*“Byggverk, eller del av byggverk, i risikoklasse 4 hvor det kreves heis, skal ha automatisk brannslukkeanlegg. Deler av et byggverk med og uten automatisk slokkeanlegg skal være ulike brannseksjoner”*

Og:

*“Byggverk i risikoklasse 6 skal ha automatisk brannslukkeanlegg.”*

I «§ 11-8. Brannceller» (Byggkvalitet, 2015) står det følgende:

*“Brannceller skal være slik utført slik at de forhindrer spredning av brann og branngasser til andre brannceller i den tid som er nødvendig for rømning og redning.”*

Veiledningen (Byggkvalitet, 2015) utdyper § 11-8 ved å angi at slokkeanlegg er en preakseptert løsning basert på risikoklasse og bruttoareal for å forhindre brannspredning mellom brannceller:

*“Brannceller med åpen forbindelse over flere plan i byggverk i risikoklasse 1, 2, 4 og 5, hvor samlet bruttoareal er større enn 800 m<sup>2</sup> for de plan som har åpen forbindelse, må ha automatisk slokkeanlegg, jf. § 11-8 annet ledd.”*

Kort oppsummert kan risikoklasse alene være avgjørende for om det er krav om automatisk slokkeanlegg eller ikke. Kravet kan i tillegg være avhengig av om bygget har heis. Bruttoareal i branncellen ved åpen forbindelse mellom etasjer og risikoklasse kan være med på å avgjøre om det er preakseptert med bruk av automatiske slokkesystemer. I tillegg til å si noe om bruksområdet i bygningen benyttes risikoklassen til å bestemme gjeldende brannklasse.

#### **4.4.2. Brannklasse**

Byggteknisk forskrift (Byggkvalitet, 2015) deler inn byggverk eller deler av byggverk inn i fire brannklasser etter hvilke skadekonsekvenser en brann vil ha på liv, helse, samfunnsmessige interesser og miljø. Konsekvensen for brann i brannklasse 1-4 er henholdsvis: Liten, middels, stor og særlig stor. Brannklassen i et bygg eller deler av et bygg er avgjørende for dimensjoneringen av byggets bæreevne og overflatematerialer. Videre er brannklasse avhengig av risikoklasse, størrelse på brannceller, planløsning, spesifikk brannenergi med mer. I veiledningen til byggteknisk forskrift (Byggkvalitet, 2015) er det publisert en forenklet tabell som er gjengitt i Tabell 10 og viser sammenhengen mellom brannklasse basert på risikoklasse og etasjehøyde.

Oppgaven fokuserer på hus med 5 etasjer eller flere i risikoklasse 2-6 og ut fra Tabell 10 vises det at det kun er brannklasse 3 som er relevant for oppgaven. I veiledningen til byggteknisk forskrift (Byggkvalitet, 2015) står det at en etasje må ha samme brannklasse som overliggende etasje, dermed vil den dimensjonerende brannklassen i øverste etasje gjelde for et helt bygg.

| Risikoklasse | Etasje |      |        |               |
|--------------|--------|------|--------|---------------|
|              | 1      | 2    | 3 og 4 | 5 eller flere |
| <b>1</b>     | -      | BKL1 | BKL2   | BKL2          |
| <b>2</b>     | BKL1   | BKL1 | BKL2   | BKL3          |
| <b>3</b>     | BKL1   | BKL1 | BKL2   | BKL3          |
| <b>4</b>     | BKL1   | BKL1 | BKL2   | BKL3          |
| <b>5</b>     | BKL1   | BKL2 | BKL3   | BKL3          |
| <b>6</b>     | BKL1   | BKL2 | BKL2   | BKL3          |

Tabell 10: Brannklasser i byggverk (Byggkvalitet, 2015)

Tabell 11 fra veiledningen til byggt teknisk forskrift (Byggkvalitet, 2015) nevner ikke brannklasse 4, hvor konsekvensen for liv, helse, samfunnsmessige interesser og miljø er særlig stor. Her dekkes vanligvis ikke sikkerhet ved brann tilstrekkelig av preaksepterte løsninger og derfor må brannsikkerheten verifiseres gjennom analyse.

Eksempler på bygg i brannklasse 4 er flyplasser, jernbanestasjoner, sykehus med flere. Byggverk høyere enn 16 etasjer eller med en spesifikk brannenergi over 400 MJ/m<sup>2</sup>. Dersom den spesifikke brannenergien overstrider denne terskelen vil altså brannklasse 4 også være relevant for oppgaven. Det samme gjelder for trehus mellom 5-16 etasjer som er av spesiell samfunnsmessig nytte, for eksempel et sykehus.

| Bygningsdel                                                                                                                         | Brannklasse      |                        |                   |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|------------------------|-------------------|
|                                                                                                                                     | 1                | 2                      | 3                 |
| <b>Bærende hovedsystem</b>                                                                                                          | R 30             | R 60                   | R 90<br>A2-s1,d0  |
| <b>Sekundære bærende bygningsdeler, etasjeskillere og takkonstruksjoner som ikke er del av hovedbæresystem eller stabiliserende</b> | R 30             | R 60                   | R 60<br>A2-s1,d0  |
| <b>Tappeløp</b>                                                                                                                     | -                | R 30                   | R 30<br>A2-s1,d0  |
| <b>Bærende bygningsdeler under øverste kjeller</b>                                                                                  | R 60<br>A2-s1,d0 | R 90<br>A2-s1,d0       | R 120<br>A2-s1,d0 |
| <b>Utvendig trappeløp, beskyttet mot flammepåvirkning og strplevarme</b>                                                            | -                | R 30 eller<br>A2-s1,d0 | A2-s1,d0          |

Tabell 11: Brannklasse betydning for krav på bæreevne og materialegenskaper (Byggkvalitet, 2015)

Byggt teknisk forskrift (Byggkvalitet, 2015) er i utgangspunktet materialnøytral og legger kun begrensning på at det ikke må gis et uakseptabelt bidrag til en brann. Veiledningen (Byggkvalitet, 2015) gir imidlertid preaksepterte løsninger til materialegenskaper og bæreevne og Tabell 11 viser at treverk som har euroklasse D-s2,d0 ikke oppfyller noen av de preaksepterte kravene til materialegenskaper i brannklasse

3. Ved behandling av treverket slik at det oppnår klasse B-s1,d0 vil det heller ikke oppfylle de preaksepterte kravene og på den måten er veiledningen (Byggkvalitet, 2015) materialspesifikk.

Uansett om det benyttes behandlet- eller ubehandlet treverk vil det oppstå fravik fra de preaksepterte ytelsene i henholdsvis bærende hovedsystem, sekundære konstruksjoner og trappeløp. Her må brannsikkerheten verifiseres gjennom analyse. Det antas at bærende bygningsdeler under øverste kjeller er av ubrennbart materiale og det velges å se bort fra utvendig trappeløp. Når det gjelder kravene om bæreevne i Tabell 11, for eksempel er R 90, kan dette oppnås ved å velge tilstrekkelig dimensjon i tverrsnitt hvor det tas hensyn til forkullingen i den gitte perioden.

## 4.5. Brannenergi

I følge veiledningen til byggt teknisk forskrift (Byggkvalitet, 2015) gir beregningen av brannenergi grunnlag for å bestemme maksimalt preakseptert areal uten seksjonering, bæreevne og dimensjonering av slokkeanlegg. Spesifikk brannenergi er som oppgaven allerede har sett på bestemmende for hvilken brannklasse en bygning faller inn under.

### 4.5.1. Konservativ veiledning

Veiledningen setter krav om bruk av en konservativ tilleggsfaktor for beregning av dimensjonerende brannenergi basert på brannmotstand (Byggkvalitet, 2015):

*“For konstruksjonsdeler som etter Tabell 11 skal ha brannmotstand R 90 eller høyere, må det brukes en dimensjonerende brannenergi som er karakteristisk brannenergi multiplisert med faktoren 1,5. Faktoren på 1,5 samsvarer med overgangen fra brannmotstand R 60 til R 90 ved bruk av preaksepterte ytelser.”*

Veiledningen gir ingen utdyping og forklaring på hva faktoren på 1,5 tar høyde for. Det er også uklart om faktoren gjelder for enkeltelementer med R 90 krav, eller om den må benyttes for hele byggverket der en enkelt bygningsdel har krav om R 90.

Byggt teknisk forskrift (Byggkvalitet, 2015) stiller i «§ 11-4. Bæreevne og stabilitet» følgende krav:

*“Bærende hovedsystem i byggverk i brannklasse 3 og 4 skal dimensjoneres for å kunne opprettholde tilfredsstillende bæreevne og stabilitet gjennom et fullstendig brannforløp, slik dette kan modelleres.”*

Det antas at “fullstendig brannforløp” samsvarer med “naturlig brannforløp” i Eurokode 1 del 1-2 (standardorganisasjonen, 2008). Ved å benytte tilleggsfaktoren på 1,5 og samtidig dimensjonere med et fullstendig brannforløp som inkluderer avkjølingsfasen vil resultatet bli mer konservative beregninger. Det er blant annet større sannsynlighet for at dimensjonerende brannenergi overstiger  $400 \text{ MJ/m}^2$  og at en bygning dermed havner i brannklasse 4. Dette kan gjøre dimensjoneringen mer utfordrende, øke kostnadsnivået i prosjekter og på den måten øke sannsynligheten for å ekskludere løsninger ved bruk av tre i bærende konstruksjon.

Videre i veiledningen (Byggkvalitet, 2015) står det at “for industribygg og lignende med høy brannenergi” kan det gjøres unntak fra krav om fullstendig brannforløp dersom nødvendig tid for rømning og sikkerhet for brannmannskaper er ivarettatt (Byggkvalitet, 2015). Hvilke bygninger som faller inn under “industribygg og lignende med høy brannenergi” er ikke godt å vite, men dette kan muliggjøre en mindre konservativ dimensjonering av høye trehus.



#### 4.5.2. Beregning av spesifikk brannenergi

Spesifikk brannenergi er brannenergi per arealenhet, men det er viktig å legge merke til at det benyttes ulike definisjoner av arealenhet. I veiledningen til byggt teknisk forskrift (Byggkvalitet, 2015) benyttes brannenergi per omhyllingsflate, det vil si brannenergi per areal av alle overflatene i rommet. I Eurokode 1 del 1-2 (standardorganisasjonen, 2008) benyttes brannenergi per gulvareal.

For beregning av brannenergi henviser veiledningen til byggt teknisk forskrift (Byggkvalitet, 2015) til relevant anerkjent statistikk i samsvar med Eurokode 1 del 1-2 (standardorganisasjonen, 2008). I Annex E i Eurokode 1 del 1-2 finnes det en metode for beregning av spesifikk brannenergi og denne er gjennomgått i Vedlegg 2. For utregning av dimensjonerende spesifikk brannenergi inngår beregning av karakteristisk spesifikk brannenergi. Denne brannenergien vektlegges av faktorer som påvirker brannforløpet, blant annet automatiske slukkemidler.

#### Reduksjon i brannenergi som følge av aktivt vannslokkeanlegg

Vedlegg 2 gir i tillegg til beskrivelse av metode for beregning av spesifikk brannenergi også en utdyping av hvordan faktoren for reduksjon i spesifikk brannenergi som følge av automatisk slukkeanlegg beregnes. Resultatene fra denne utdypingen finnes i Tabell 12, som viser hvor mye den dimensjonerende spesifikke brannenergien kan reduseres som følge av etableringen av et automatisk slukkeanlegg.

| Antall selvstendige vanntilførsler | $\delta_{n1}$ | $\delta_{n2}$ | $\delta_{n1} \times \delta_{n2}$ | Reduksjon dimensjonerende spesifikk brannenergi |
|------------------------------------|---------------|---------------|----------------------------------|-------------------------------------------------|
| 0                                  | 0,61          | 1             | 0,61                             | 39 %                                            |
| 1                                  | 0,61          | 0,87          | 0,53                             | 47 %                                            |
| 2                                  | 0,61          | 0,70          | 0,43                             | 57 %                                            |

Tabell 12: Oversikt over reduksjonsfaktorer for dimensjonerende spesifikk brannenergi ved bruk av automatiske vannslokkeanlegg med og uten selvstendig vanntilførsel.  $\delta_{n1}$  er en faktor som tar hensyn til om det er installert automatisk vannslokkesystem.  $\delta_{n2}$  er en faktor som tar hensyn til antall uavhengige vannforsyninger.

I følge Tabell 12 kan et automatisk slukkeanlegg gi betydelig reduksjon av dimensjonerende spesifikk brannenergi. Denne effekten blir imidlertid mindre når karakteristisk brannenergi uansett må multipliseres med faktoren 1,5 (Byggkvalitet, 2015).

#### 4.5.3. Preakseptert løsning med sprinklersystem basert på brannenergi og bruttoareal

I «§ 11-7 Tabell 1: Størrelse på brannseksjon» i veiledningen til byggt teknisk forskrift (Byggkvalitet, 2015) finnes en tabell med oversikt over preaksepterte størrelser på brannseksjoner med og uten brannalarmanlegg, sprinklersystem og røykventilasjon som er gjengitt i Tabell 13. Legg merke til at den spesifikke brannenergien som oppgis her er brannenergi per omhyllingsflate.

Veiledningen (Byggkvalitet, 2015) gir også en oversikt over hvilke typer sprinklersystem som er egnet for bygninger med ulike bruksområder. Sprinkler- og vanntåkesystemer er ikke direkte sammenlignbare, men via å veilede om hvilke type sprinklersystem som kan benyttes refereres det også til hvilke standarder som skal benyttes for de enkelte sprinklertypene.

| Spesifikk<br>brannenergi per<br>omhyllingsflate<br>(MJ/m <sup>2</sup> ) | Største bruttoareal i m <sup>2</sup> per etasje uten seksjonering |                         |                        |                        |
|-------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|
|                                                                         | Normalt                                                           | Med<br>brannalarmanlegg | Med<br>sprinklersystem | Med<br>røykventilasjon |
| < 50                                                                    | 1800                                                              | 2700                    | Ubegrenset             | 10000                  |
| 50-400                                                                  | 1200                                                              | 1800                    | 10000                  | 4000                   |
| >400                                                                    | 800                                                               | 1200                    | 5000                   | Uegnet                 |

Tabell 13: Oversikt over preaksepterte størrelser på brannseksjoner med og uten implementering av brannalarmanlegg, sprinklersystem og røykventilasjon (Byggkvalitet, 2015)

For design av sprinklersystemer gir veiledningen til byggt teknisk forskrift (Byggkvalitet, 2015) to alternativer når det gjelder valg av standard:

- NS-INSTA 900 serien (Norge, 2013, Norge, 2010) for design av boligsprinkler
- NS-EN 12845 (standardorganisasjonen, 2009a) for design av kommersielle sprinkler

NS-INSTA 900 serien (Norge, 2013, Norge, 2014) gjelder også for vanntåkesystemer og skal benyttes så langt den er gjeldende (Byggkvalitet, 2015).

Der hvor NS-INSTA 900 serien (Norge, 2013, Norge, 2014) ikke kan benyttes skal NS-EN 12845 (standardorganisasjonen, 2009a) benyttes. Denne standarden er ikke direkte rettet mot vanntåkesystemer men enkelte deler av den skal allikevel brukes, for eksempel reglene angående vannforsyning. Der NS-EN 12845 (standardorganisasjonen, 2009a) ikke er gjeldende må det benyttes alternative standarder. Dette beskrives videre i 6.3 - Standarder.

#### 4.5.4. Oppsummering

Dette kapitlet har vist at bygningens utforming påvirker krav, preaksepterte løsninger og behov for automatisk slokkeanlegg. Der byggt teknisk forskrift (Byggkvalitet, 2015) stiller krav om automatisk slokkeanlegg er det ingen vei utenom. Der veiledningen til byggt teknisk forskrift (Byggkvalitet, 2015) gir preaksepterte løsninger for sprinklersystemer kan disse benyttes som veiledning for dimensjonering av vanntåkesystemer siden det også indirekte veiledes om hvilke standarder som skal benyttes.

I tillegg til krav og preaksepterte løsninger vil bruk av brennbare overflater resultere i et behov for å begrense brennbarhet i flater og dessuten sikre bæreevne og stabilitet i et fullstendig brannforløp (Byggkvalitet, 2015). Behovet for å begrense et brannforløp kan dekkes ved bruk av vanntåkesystemer.

Veiledningen (Byggkvalitet, 2015) gir at dimensjonering etter et fullstendig brannforløp kan utelukkes for «industribygg og lignende med høy brannenergi» dersom nødvendig tid for rømning og sikkerhet for brannmannskaper er ivaretatt. Dette kan oppnås for eksempel ved bruk av et vanntåkesystem. Å unngå å dimensjonere etter et fullstendig brannforløp kan ha store betydninger for kostnader ved dimensjonering. Et vanntåkesystem kan også benyttes for å redusere brannklasse fra 4 til 3 ved å redusere mengde spesifikk brannenergi.

## 5. Vanntåkesystemer

### 5.1. Introduksjon

Dette kapitlet beskriver vanntåkesystemer og hvordan de er bygd opp og fungerer. Det diskuteres også hvilken status systemene har i dagens marked og hvilke forhold som påvirker bruksområdet. Det finnes forskjellige systemer som egner seg best for ulike brannscenarier. Påliteligheten i vanntåkesystemer er viktig for brannsikkerheten og kan estimeres ved bruk av feiltreanalyse. Hensikten med dette kapitlet er å gi leseren kunnskap om vanntåkesystemer og egenskaper i disse for å kunne evaluere evne til brannbekjempelse, bruksområder og å utføre et pålitelig design.

### 5.2. Generelt om vanntåke

#### 5.2.1. Definisjon av vanntåke

Vanntåke er en spray av små vannpartikler som brukes for å slokke brann og defineres på ulike måter. Amerikanske vanntåkestandarder (Approvals, 2012, Association, 2015e) definerer vanntåke på følgende vis:

*«Vanntåke er en vannspray hvor 99 % eller mer av vannvolumet innenfor rekkevidden hvor vanntåkedysa opprettholder operativt trykk består av vandrdåper mindre enn 1000  $\mu\text{m}$ »*

I europeiske standarder (standardorganisasjonen, 2011, BSI, 2010, BSI, 2011) har vanntåke en veldig lik, men litt annen definisjon:

*«Vanntåke er en vannspray hvor 90 % eller mer av vannvolumet målt 1 m i planet fra vanntåkedysa ved operativt trykk består av vandrdåper med diameter mindre enn 1000  $\mu\text{m}$ »*

#### 5.2.2. Status for vanntåkesystemer

Mellom 2004 og 2013 har byggeaktiviteten i Europa gått ned 25 %, mens det totale sprinklermarkedet, inkludert vanntåke kun har gått ned 6 %. (Brinson, 2014) Dette vitner om en økning i bruk av sprinklersystemer. Vanntåke har rundt 3 % andel av sprinklermarkedet og har stort potensiale til å ta over markedsandel i kommersielle sprinklersystemer, som er den største gruppen av sprinkler (Brinson, 2014). Boligsprinklermarkedet er også i betydelig vekst, men fra et lite grunnlag.

Vanntåke markedet preges av få installatører og for å øke markedsandelen og bruken av vanntåkesystemer er det nødvendig å øke kunnskapsnivået og sørge for at flere sertifiseres for å installere og dimensjonere vanntåkesystemer. Spredning av kunnskap er også viktig for å unngå at vanntåkesystemer må forklares og «selges» i hvert enkelt prosjekt. Noen forsikringsselskaper godtar ikke bruk av vanntåke og dette kan redusere tiltroen til systemene og gjøre de mer utfordrende å ta i bruk (Brinson, 2014).

#### 5.2.3. Forhold som påvirker bruksområdet

##### *Ømfintlighet for- og reaksjoner med vann*

Vanntåkesystemer kan benyttes i anvendelsesområder som er ømfintlige for vann, for eksempel i verneverdige bygninger, museer og arkiver. Vanntåken kan ha en vanddensitet som er rundt 1/5 av

verdiene for tradisjonelle sprinkler (Pesaola, 2014). Dette kan redusere risikoen for vannskader betraktelig. På grunn av relativt beskjedent vannforbruk kan systemene være fordelaktig der det er mangel på vann (Slokkeanlegg, 2015).

Vanntåkesystemer bør ikke benyttes der materialer eller substanser kan skape fare ved kontakt med vann. Materialer kan reagere kjemisk og skape voldsomme reaksjoner eller store mengder giftige produkter. Systemene bør ikke benyttes der det befinner seg strømførende elektrisk utstyr med høy spenning, med mindre risikoen ved dette er evaluert og ansett som tilstrekkelig lav (BSI, 2010).

### *Giftighet*

I forhold gassbaserte automatiske slokkeanlegg har vanntåkesystemer en fordel ved at luftlekkasje mellom rom ikke sprer giftig gass (Brinson, 2014). Ved å ikke benytte tilsetningsstoffer i vanntåken, eller eventuelt benytte ugiftige tilsetningsstoffer vil ikke vanntåken være skadelig for mennesker og miljø.

### *Plass og vekt*

Vanntåkesystemer har relativt lik oppbygning som sprinklersystemer, men rørdimensjonene er mindre på grunn av redusert vannforbruk noe som resulterer i mindre vekt (LIU and KIM, 2011). Rørdimensjoner kan reduseres med inntill en femtedel (Pesaola, 2014) og kan løse problematikk knyttet til plassmangel og resultere i økt arkitekturmessig frihet. Eksempler på rør i ulike dimensjoner finnes i Figur 19.



Figur 19: Eksempel på tverrsnitt av rør i ulike dimensjoner (HI-FOG, 2015)

### *Nye og gamle bygg*

Vanntåkesystemer kan installeres i både nye og gamle bygg. I gamle bygninger hvor designet ikke opprinnelig var beregnet for etterinstallering av et automatisk slokkesystem kan det tenkes at et vanntåkesystem har en fordel sammenlignet med et sprinklersystem på grunn av mindre rørdimensjoner. Vanntåkesystemer kan imidlertid gi behov for pumpe-systemer og dermed større plassbehov for teknisk utstyr. Hvilket type automatisk slokkeanlegg som er mest ideelt med tanke på utnyttelse av arealer og volum er med andre ord avhengig av det eksisterende byggverket.

### *Sikkerhet ved rømning*

For å si noe om effekten i vanntåkesystemer er det naturlig at de sammenlignes med sprinklersystemer. Som oppgaven skal se nærmere på senere har vanntåkesystemer flere slokkemekanismer enn sprinklersystemer, noe som kan ha positive og negative utslag på evnen til brannbekjempelse avhengig av brannscenario. Generelt sett har vanntåkesystemer relativt stor reduserende effekt på temperatur i tidlig fase av slokkingen (Brinson, 2014). Små vanndråper har større evne til å blokkere strålevarme, noe som kan redusere faren for brannspredning og skade på mennesker (Grant and Drysdale, 1997). Dette er forhold som gir bedre forutsetning for rømning, redning og brannslukking.

### *Lokale- og romdekkende systemer*

Vanntåkesystemer kan benyttes som lokale systemer for å beskytte spesifikt utstyr som utgjør en brannfare, ved å frigi vanntåke direkte på den gjeldende brannkilden. Dette kan for eksempel være en

dieselmotorgenerator eller en frityrkoker (Ltd, 2012). Systemene kan være romdekkende, for eksempel i et maskin- eller hotelrom. Her frigis vanntåke i hele volumet, enten ved at hver individuelle dyse aktiveres når de har oppnådd en bestemt temperatur, eller ved at alle aktiveres samtidig (Ltd, 2012).

### *Erstatning for andre automatiske slokkesystemer*

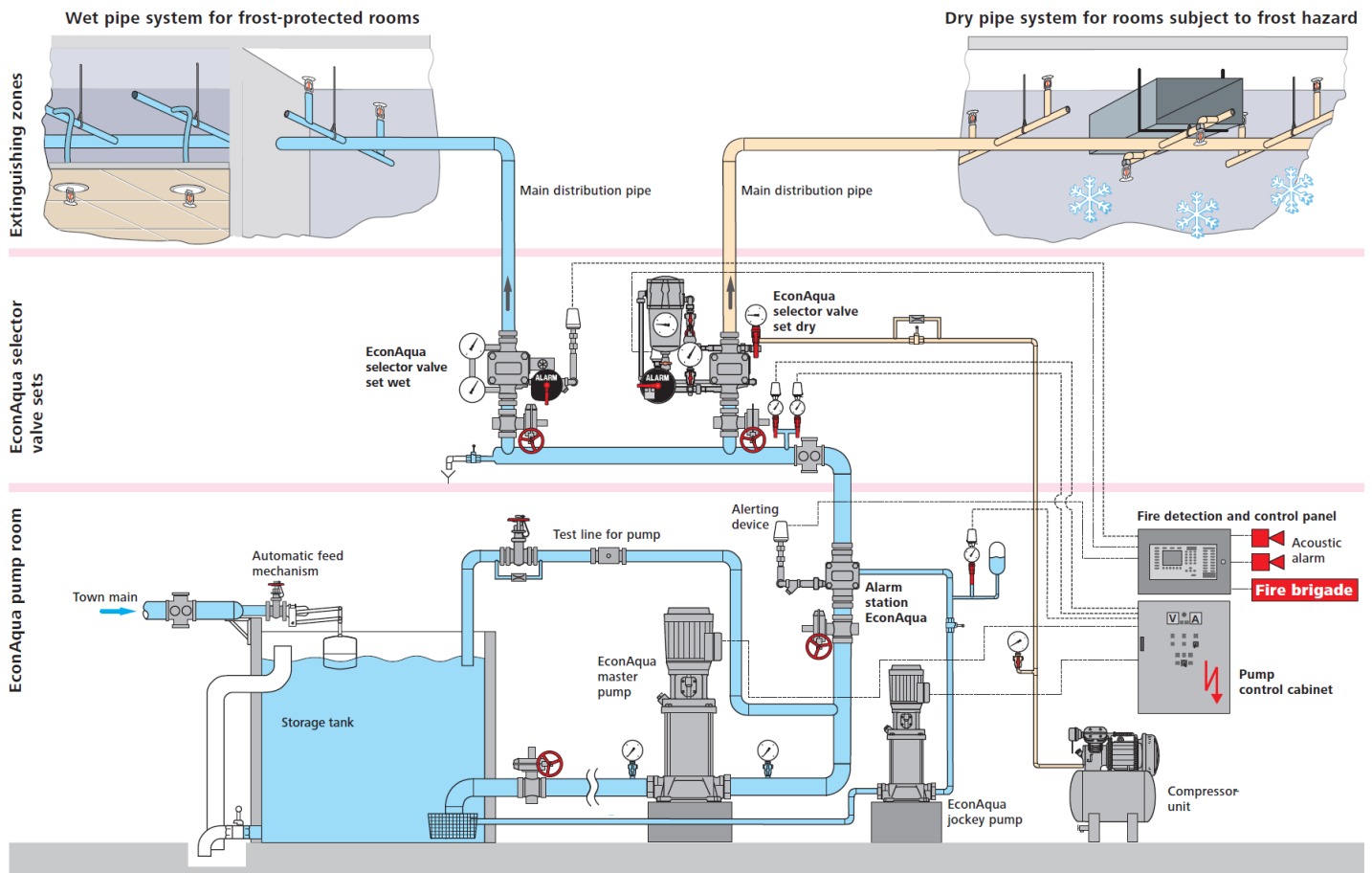
Vanntåkesystemer kan erstatte andre typer automatiske slokkesystemer. Halon-anlegg som før ble brukt i skip og industri er nå forbudt på grunn av miljøhensyn og disse systemene har i stor grad blitt erstattet med vanntåkesystemer. Vanntåkesystemer er et tryggere og billigere alternativ til CO<sub>2</sub>-systemer (Brinson, 2014). Systemene har et bruksområde om er nokså likt konvensjonelle sprinkler og kan derfor være et godt alternativ til disse.

### *Kostnader*

På grunn av høyere operativt trykk i vanntåkesystem er det krav om mer solide rør, ventiler og liknende komponenter. I tillegg er det nødvendig med egne pumpesystem og- eller lagringstanker for å produsere tilstrekkelig høyt trykk. Disse forholdene gjør at vanntåkesystemer i utgangspunktet har høyere kostnader enn sprinklersystemer. På den andre siden kan plassbesparing i bygninger som følge av mindre rørdimensjoner føre til økonomiske besparinger ved valg av vanntåkesystemer (Systems, 2015). Kostnader er ofte en avgjørende faktor ved valg av automatisk slokkeanlegg.

## **5.3. Oppbygning av vanntåkesystemer: Komponenter**

Et vanntåkesystem er bygd opp av en rekke komponenter og oppbygningen varierer i de ulike systemtypene. Eksempler på komponenter er blant annet pumpesystemer, gasstanker, ventiler, rørsystemer, deteksjons- og varslingssystem og dyser. Påliteligheten i vanntåkesystemer er avhengig av oppbygningen av systemet og derfor er det viktig å ha innsikt i disse. Et eksempel på oppbygningen av to typer vanntåkesystemer finnes i Figur 20. Ulike vanntåkesystemer og noen utvalgte komponenter beskrives videre i dette kapitlet.



Figur 20: Eksempel på vanntåkesystem, henholdsvis våtrørssystem og tørrørssystem (EconAqua, 2015)

### 5.3.1. Vanntåkedyser

Det finnes ulike typer vanntåkedyser som er tilpasset forskjellige bruksområder. Faktorer som avgjør designet på dysene er (Ltd, 2012):

- Vanntrykk
- Type drivmiddel i vanntåkesystemet
- Vanntåkeatomiseringsteknikk som er avhengig av åpningsstørrelse, eksterne deflektorplater, interne virvelplater og gass injeksjon
- Slokkeformål, det vil si om vanntåkesystemet skal benyttes til demping, kontrollering eller slokking av en brann

Oppaven vil fokusere på dysene som benyttes i de ulike vanntåkesystemene som beskrives i 5.4 - Ulike typer vanntåkesystemer. Det vil si dyser som aktiveres via varmesensor i dysa eller via et eksternt deteksjon- og varslingssystem.

### Åpne og lukkede dyser

Dyser i vanntåkesystemer kan være både automatiske varmesensitive dyser og åpne dyser. Åpne dyser krever ingen reaksjon i dysa for å frislippe vanntåke, det vil si at dersom det er trykksatt vann bak dysa vil det dannes vanntåke. Aktiveringingen må derfor skje via et varslingsystem. Åpne dyser brukes mest for å bekjempe brann i brennbare væsker, for eksempel i gassturbiner (Ltd, 2012). Et eksempel på en åpen vanntåkedyse finnes i Figur 21.



Figur 21: Eksempel på en åpen vanntåkedyse (Protection, 2011)

Automatiske varmesensitive dyser benyttes som regel i såkalte deluge systemer (oversvømmelsessystemer) som beskrives nærmere senere i oppgaven. Designet på disse dysene er relativt likt som i tradisjonelle sprinklerhoder og åpnes ved at en glasspære sprekker ved tilstrekkelig høy temperatur. Deretter kan trykksatt vann strømme gjennom dysa og vanntåke vil bli produsert. Eksempel på en automatisk varmesensitiv dyse finnes i Figur 22.



Figur 22: Eksempel på en automatisk varmesensitiv vanntåkedyse (Protection, 2011)

Det finnes også sideveggsdyser (sidewall nozzles) som kan beskytte rom eller danne vanngardiner (water curtains) og dempe stråling fra brann mot et utsatt område. For eksempel en rømningsvei, bygningselementer eller variabel brannlast. De ulike dysene kan også være designet for å frigi et spesielt spredningsmønstre for å beskytte én spesifikk brannfarlig installasjon (Ltd, 2012).

### K-faktor

K-faktoren er en verdi som sier noe om forholdet mellom trykk og vannstrømningsrate i en vanntåkedyse eller et sprinklerhode. Ved bruk av denne faktoren kan det beregnes hvor mye vann en dyse slipper ut ved ulike trykkverdier innenfor de operative trykkgrenseverdiene. Formellen for k-faktoren er gitt ved (standardorganisasjonen, 2011):

$$K = \frac{q}{\sqrt{p}}$$

Hvor:

$$K = \text{K-faktoren} \left( \frac{l}{min} \times \sqrt{bar} \right)$$

$$q = \text{Vannstrømningsrate} \left( \frac{l}{min} \right)$$

$$p = \text{Trykk (bar)}$$



Figur 23 viser utdrag fra et dataark (Products, 2014) for en åpen vanntåkedyse beregnet for å bekjempe klasse K branner (Association, 2013a). Følgende data er oppgitt:

- K-faktor =  $4,3 \left( \frac{l}{min} \times \sqrt{bar} \right)$
- Maksimalt operativt trykk = 250 psi = 17,2 bar

Dette gir grunnlag for å beregne vannstrømningsraten ved maksimalt operativt trykk, for eksempel:

$$q = K \times \sqrt{p} = 4,3 \times \sqrt{17,2} = 17,9 \left( \frac{l}{min} \right)$$

### 5.3.2. Rørsystem

For å levere vann til dysene benyttes rørfordelingssystemer som enten er enkeltsystemer eller dobbeltsystemer. I et enkeltsystem genereres vanntåke ved å trykksatte vann og føre det gjennom dysene. I et dobbeltsystem blandes en inert gass fra et separat rørsystem med trykksatt vann i et annet rørsystemet. Den trykksatte blandingen føres deretter videre mot dysene og det produseres vanntåke (Ltd, 2012).

### 5.3.3. Vannforsyning

For å skape tilstrekkelig trykk i vanntåkesystemer kan det brukes pumper, trykksatte tanker eller begge deler. Pumpene kan være drevet av strøm, diesel eller gass og får vann fra lagringstank, hovedvannledning eller begge deler (HI-FOG, 2015). Den sistnevnte løsningen gir god redundans i systemet og et eksempel på et slikt system finnes i Figur 20.

Trykksatte tanker benyttes i mindre rom eller kombinert med pumpe-systemer for å øke påliteligheten. Slike systemer har to typer tanker hvor noen er trykksatt med komprimert luft eller nitrogen og andre er fylt med vann. Vannet ledes til vanntåkedysene ved at de trykksatte tankene frigir trykk gjennom tankene med vann. Eksempel på et slikt oppsett finnes i Figur 24.

## 5.4. Ulike typer vanntåkesystemer

Vanntåkesystemer opererer i ulike miljø og derfor må det gjøres visse tilpasninger avhengig av minste antatte omgivelsestemperatur, omgivelsenes sensitivitet for vann og hvor kritisk det er å få dempet, kontrollert eller slokket en brann raskt. De ulike vanntåkesystemene deles inn i våtsystemer, tørrsystemer, deluge-systemer og pre-action systemer (Ltd, 2012) som beskrives videre i oppgaven.



## General Description

The TYCO Type AM31 AQUAMIST Nozzle is a stainless steel, open (non-automatic) pendent nozzle intended for use with engineered, watermist deluge systems. It is an intermediate pressure nozzle which utilizes a single fluid jet impinging on a diffuser to produce a spray having a range of water droplet sizes suitable for the extinguishment of Class K fires within industrial frying equipment.

## Technical Data

### Minimum Working Pressure

See specific application data sheet

### Maximum Working Pressure

250 psi (17,2 bar)

### Discharge Coefficient

$K = 0,30 \text{ GPM}/\text{psi}^{1/2}$   
( $K = 4,3 \text{ LPM}/\text{bar}^{1/2}$ )

Figur 23: Eksempel på dataark for en åpen vanntåkedyse beregnet for å bekjempe klasse K branner (Products, 2014)



### 5.4.1. Våtssystemer

Våtssystem benyttes i rom hvor temperaturen er over 4 °C og det er usannsynlig at den faller under frysepunktet. Her er rørfordelingssystemet alltid fylt med vann og det benyttes derfor kun automatiske varmesensitive dyser (Ltd, 2012). De lukkede dysene aktiveres én etter én når de blir utsatt for tilstrekkelig høy temperatur. På den måten vil mengden frisluppet vanntåke tilpasses brannens utbredelse og omfang.

### 5.4.2. Tørrsystemer

I tørrsystemer er rørsystemet fylt med luft, nitrogen eller en annen trykksatt gass når vanntåkesystemet ikke er i bruk. Her benyttes automatiske varmesensitive dyser og når disse aktiveres og åpnes sanser kontrollsystemet trykkendringer i rørsystemet og aktiverer vannføringen (Ltd, 2012). I likhet med våtssystemer aktiveres én og én dyse om gangen.

### 5.4.3. Deluge-systemer

I et deluge-system (oversvømmelsessystem) vil en brann i første omgang oppdages av et sansesystem som deretter aktiverer den trykksatte vannføringen. Her benyttes åpne dyser, det vil si at alle dysene aktiveres samtidig og «oversvømmer» et rom. Hensikten er å raskt kontrollere og slukke en brann (Ltd, 2012).

### 5.4.4. Pre-action systemer

Pre-action systemer benyttes for å beskytte områder som inneholder gjenstander av høy verdi eller hvor det er viktig at funksjonen opprettholdes. Eksempler på slike områder er arkiv, kommunikasjonscenter og lager. Systemene gir advarende varsling i forkant av aktivering for å forhindre unødvendige vannskader som følge av falske alarmer. Varsling i forkant oppnås ved å opprette et uavhengig varslesystem i tillegg til vanntåkesystemet med automatiske varmesensitive dyser som aktiveres én etter én. Ved sansing av brann i to eller flere detektorer vil vanntåkesystemet aktiveres (Ltd, 2012).

## 5.5. Klassifisering med tanke på trykk

Vanntåkesystemer klassifiseres etter hvilket trykk de opererer med, det vil si lavtrykk-, middelstrykk- og høytrykkvanntåkesystemer. De ulike trykkverdiene vises i Tabell 14.

| <i>Klassifisering med tanke på trykk</i> | <i>Trykk, p</i>       |
|------------------------------------------|-----------------------|
| <b>Lavtrykk</b>                          | <12,5 bar             |
| <b>Middelstrykk</b>                      | 12,5 bar < p < 35 bar |
| <b>Høytrykk</b>                          | >35 bar               |

Tabell 14: Klassifisering av vanntåkesystemer basert på trykk (BSI, 2010)



Figur 24: Akkumulatortanker hvor den grå tanken er trykksatt og de røde tankene er fylt med vann (HI-FOG, 2015)

### 5.5.1. Lavtrykkvanntåkesystemer

Lavtrykkvanntåkesystemer er utformet slik at de har samme ytelse og pålitelighet som vanlige sprinklersystemer, men samtidig også inkluderer små vanntåkepartikler og effekten av disse. Lavtrykkvanntåkesystemer er ideelle for rom og korridorer med liten eller moderat brannlast av ordinære brennbare materialer (Ltd, 2012).

### 5.5.2. Middelstrykkvanntåkesystemer

Middelstrykkvanntåkesystemer brukes hovedsaklig som et lavkostnadsalternativ til høytrykkvanntåkesystemer i lokale systemer. Dette kan for eksempel være dieselmotorgeneratorer, kokeapparat eller oljeseparatorer. Bruken av slike systemer har etterhvert avtatt til fordel for enten lav- eller høytrykkvanntåkesystemer (Ltd, 2012).

### 5.5.3. Høytrykkvanntåkesystemer

Generelt sett resulterer økt trykk til mindre vannpartikler og produksjon av mer vanntåke (Ltd, 2012). Høytrykkvanntåkesystemer benyttes for å kontrollere og dempe klasse A branner (Protection, 2011), altså ikke hovedsaklig for å slokke. Damping og kontrollering innebærer en betydelig reduksjon i temperatur i området rundt brannen og begrenning av flammespredning til brannvesenet er på plass og kan slokke de resterende glørene.

## 5.6. Klassifisering av vanntåkesystemer basert på oppbygning

Som tidligere beskrevet i oppgaven finnes det flere måter å sette sammen vanntåkesystemer på, med variasjon i aktiveringsmetode, strømforsyning, trykknivå, komponenter, vannkilde med mer. For å lettere kunne skille mellom de ulike systemene er de klassifisert i ulike grupper i International Water Mist Associations standard NFPA 750 (Association, 2015e). De ulike systemklassene er gjengitt i Tabell 15.

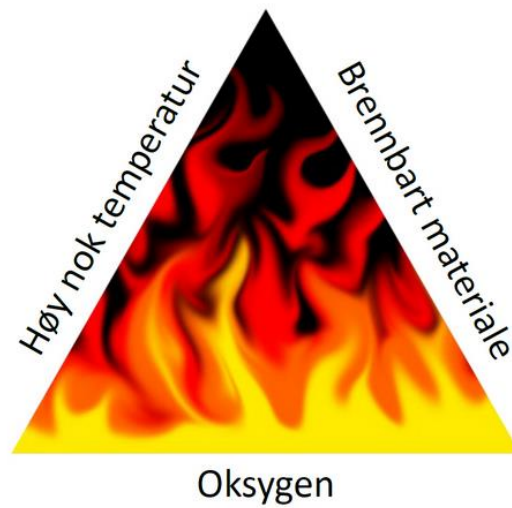
| Kategori        | Beskrivelse                                                                                   |
|-----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>System A</b> | Høytrykk, gassdrevet, lagret vannforsyning                                                    |
| <b>System B</b> | Høytrykk, gassdrevet, flere akkumulatorenheter                                                |
| <b>System C</b> | Lavtrykkvanntåkesystem med to drivmiddel                                                      |
| <b>System E</b> | Vanntåkesystem med ett drivmiddel                                                             |
| <b>System F</b> | Pumpedrevet vanntåkesystem                                                                    |
| <b>System G</b> | Fortrengningspumpe med tømmeventil på hver pumpe og trykkavlastningsventil i utløpsmanifolden |
| <b>System H</b> | Gasspumpe, system for «light hazards»                                                         |

Tabell 15: Oversikt over vanntåkesystemer i ulike kategorier beskrevet i NFPA 750 (Association, 2015e)

## 5.7. Slokkemekanismer

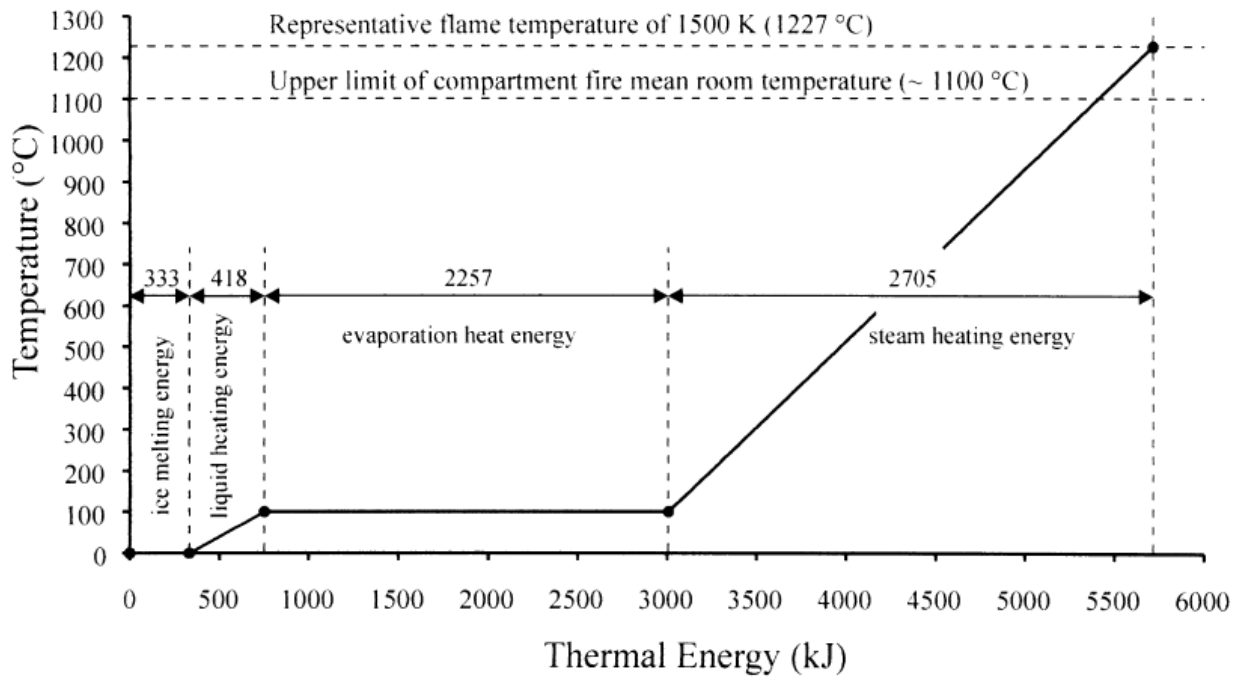
I dette kapitlet beskrives hvilke mekanismer som bidrar til brannbekjempelse ved bruk av vanntåke og deres individuelle betydning i klasse A branner (standardorganisasjonen, 2014a, Association, 2013a). For at det skal kunne utvikles en brann må et bestemt forhold av brennbart materiale, energi for å antenne

og opprettholde brannen og oksygen være til stede. Disse tre komponentene er også kjent som "branntrekanten" og vises i Figur 25.



Figur 25: Branntrekant (ndla, 2015)

For å slokke, dempe eller kontrollere en brann må én eller flere av komponentene i branntrekanten fjernes eller reduseres. Tradisjonelle sprinkler vil kun redusere energimengde og temperatur mens vanntåke vil «angripe» alle branntrekantes tre sider (Ltd, 2012).

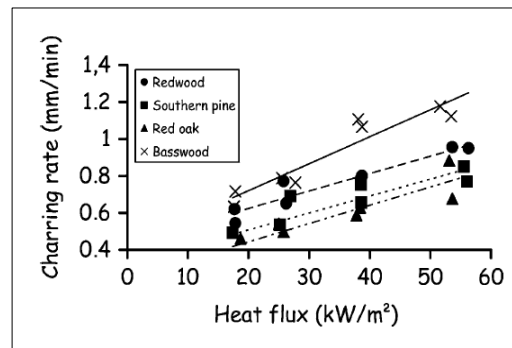


Tabell 16: Grafisk framstilling av energimengde for oppvarming og faseendringer av 1L H<sub>2</sub>O (Grant et al., 2000)

### 5.7.1. Absorpsjon av varme

Vann har gode egenskaper når det gjelder brannslukking på grunn av sine fysiske egenskaper. Det har relativt høy varmekapasitet,  $C_p$  på  $4,2 \frac{J}{gK}$  og relativt høy latent fordampningsvarme,  $L_v$  på  $2442 \frac{J}{g}$  (Liu and K.Kim, 1999). Dette fører til at det kreves nokså store mengder energi for å varme opp vann, men enda mer for å fordampe det. Energibehovet for å varme opp 1 L vann fra 20-100 °C er 335 kJ, men for å fordampe samme mengde er energibehovet hele 2257 kJ (Ltd, 2012) Tabell 16 viser denne sammenhengen grafisk.

Hvis tilstrekkelig energi fjernes fra en brann kan gass-fase temperaturen reduseres til under kritisk nivå for hva som vil opprettholde forbrenningsreaksjonen (Mawhinne et al., 1994). For å si noe om hvordan absorbering av varme påvirker brannutviklingen i klasse A branner (standardorganisasjonen, 2014a, Association, 2013a) med eksponerte flater i massivtre kan det fokuseres på hva som skjer med forkullingsraten i treverk. Absorpsjon av varme fra brannen vil føre til redusert varmefluks (Drysdale, 2011) og kan redusere forkullingsraten betydelig, se Figur 26. Endring i varmefluks er en av de faktorene som påvirker forkullingsraten mest (Friquin, 2010).



Figur 26: Varmefluksens påvirkning på forkullingsraten i ulike treslag (Friquin, 2010)

### 5.7.2. Fortrenging av oksygen

Ved fordamping utvides volumet av vann seg med rundt 1700 ganger (Ltd, 2012), på den måten kan vanntåke fortrenge og uttynne brennbare gasser og oksygen. Der oksygenivået er redusert til under kritisk nivå vil brannen kunne forbrenne ueffektivt og dermed lettere slokkes ved nedkjølingseffekten. Hva som er det kritiske nivået er avhengig av hvilket materiale som brenner. Forkullende materialer kan brenne med oksygenkonsentrasjoner nede i 7 %, mens brann i væsker og gasser av hydrokarboner generelt opphører ved oksygenkonsentrasjoner under 13 % (Drysdale, 2011).

En “stor brann”, defineres som en brann som påvirker temperatur og oksygenivå i et brannvolum. på grunn av at oksygenivået allerede er redusert før aktivering av vanntåke kan kritisk oksygenivå for en brann lettere oppnås her (Mawhinne et al., 1994). For å si noe om hvordan fortrennging av oksygen påvirker brannutviklingen i klasse A branner (standardorganisasjonen, 2014a, Association, 2013a) kan det fokuseres på endringer i forkullingsrate også her. I artikkelen “Material Properties and External Factors Influencing the Charring Rate of Solid Wood and Glue-laminated Timber” (Friquin, 2010) beskrives hvordan forkulling i tre reduseres med rundt 20 % når oksygenivået reduseres fra 20 % til 10 %. Ved ytterligere reduksjon i oksygenkonsentrasjon fram til forbenningen stopper vil reduksjonen i forkullingsrate kun være rundt 10 %.

Effekten av brannbekjempelse med vanntåke kan være begrenset ved gløde- og ulmebranner siden treverk inneholder oksygen og derfor ikke trenger oksygentilførsel fra luft for å brenne (Wighus, 2015).

Uttynning av oksygen er en fordel der geometrien i et materiale ikke tillater slokking ved direkte påføring av vanndråper (Mawhinne et al., 1994). Tidligere i oppgaven ble det nevnt at trykkforskjell i en høy bygning kan føre til ekstra utfordringer når det gjelder brannspredning. Ved bruk av vanntåkesystemer er ikke hydrostatisk trykkforskjeller noe problem (Lakkonen, 2015).

### 5.7.3. Fortynning av brennbare gasser

Vanntåken kan tynne ut brennbare gasser fra pyrolyseprosessen slik at konsentrasjonen havner under eksplosjonsgrensenivå. På grunn av at de brennbare gassene produseres i det pyrolyserende materialet og slippes løs fra overflaten vil det være vanskelig å oppnå en uniform gasskonsentrasjon i hele brannvolumet. Ofte vil enkelte områder ha større konsentrasjoner av brennbare gasser enn andre og kan dermed være innenfor eksplosjonsgrensenivået (Mawhinne et al., 1994).

### 5.7.4. Absorpsjon av strålevarme

Vanntåke absorberer deler av strålevarmen som bidrar til økt temperatur og emissivitet i en brann. Denne «blokkeringen» kan beskytte overflaten av brannlast mot oppvarming og antenning og dermed redusere brannspredningen (Grant and Drysdale, 1997). Der materialet allerede er antent kan nedkjølingen redusere hastighet i pyrolyse og dannelse av brennbare gasser. Redusert varmekraft vil kunne beskytte mennesker som oppholder seg i nærheten av en brann.

### 5.7.5. Kinetiske effekt

I brennbare væsker kan en brann blusse opp i en viss tid etter påføring av vanntåke. Den midlertidige økte intensiteten av en brann kan skyldes vanndråper som treffer brennstoffoverflaten og forårsaker sprut som øker overflaten mellom brennstoff og oksidant. Dette fører igjen til økt produksjon av brennbare gasser, større brannintensitet og kalles kinetisk effekt (Liu and K.Kim, 1999). Denne effekten gjelder for brennbare væsker og er derfor ikke direkte relevant for klasse A branner (standardorganisasjonen, 2014a, Association, 2013a). Det velges allikevel å nevne dette fenomenet for å gi leseren økt forståelse av vanntåkesystemers slokkemekanismer og effekter av disse.

### 5.7.6. Evaluering av slokkemekanismers viktighet for bejempelse av klasse A branner

For bejempelse av klasse A branner (standardorganisasjonen, 2014a, Association, 2013a) er «kjøling» den viktigste slokkemekanismen (Lakkonen, 2015). Andre viktige mekanismer er fordriving av oksygen og blokkering av stråling (Grant and Drysdale, 1997).

For å bekjempe klasse A branner (standardorganisasjonen, 2014a, Association, 2013a) er det essensielt å kjøle ned brannlasten, enten ved å redusere overflatetemperatur eller varmekraft til under kritisk nivå. Hvis ikke dette gjøres tilstrekkelig vil det være høy sannsynlighet for at en brann antennes på nytt (Grant and Drysdale, 1997). I forkullende materialer skjer mesteparten av forbrenningen under overflaten i det karbonrike porøse laget. Derfor vil ikke nødvendigvis nedkjøling av den diffunderende flammen være nok for å bekjempe en brann. Effektiviteten av vanntåke er derfor avhengig av dybden av det forkullede laget, det vil si hvor lenge materialet har brent. For å bekjempe en forkullende brann må vanntåken aktiveres relativt tidlig.

Vanntåken må penetrere det forkullede laget slik at det når fram til grensesnittet mellom forkullet og upåvirket materiale. Nedkjøling av en brann påvirker både pyrolyse- og oksidasjonsprosessen ved at

produksjonen av brennbare gasser svekkes og oksidasjonsprosessen får redusert reaksjonshastighet (Mawhinne et al., 1994). Ved glødende forbrenning hvor forbrenningen skjer relativt dypt i materialet er høyden og hastigheten i flammene relativt lav. Dette kan gjøre det lettere for vandrdåper å nå brannlasten, men den relativt dype forbrenningen gjør brannbekjempelsen mer utfordrende (Mawhinne et al., 1994). En annen viktig parameter er geometri. Der vandrdåper ikke har mulighet til å penetrere det forkullede laget vil slokking av brann bortimot være umulig å oppnå ved nedkjøling alene (Mawhinne et al., 1994).

## 5.8. Faktorer som påvirker effekten av vanntåke

Her beskrives hvilke faktorer som påvirker effekten av de ulike slokkemekanismene i vanntåke. Hensikten med denne informasjonen er å gi leseren kunnskap og bedre forståelsen rundt sensitiviteten og viktigheten av faktorer som påvirker dimensjoneringen av vanntåkesystemer i klasse A branner (standardorganisasjonen, 2014a, Association, 2013a). Vanntåke har flere mekanismer som i ulik grad er involvert i bekjempelse av brann. Hvilke av disse som er mest dominerende er avhengig av forhold som vanntåkekarakteristikk, brannscenario, romgeometri og ventilasjonsforhold.

### 5.8.1. Vanntåkekarakteristikk

Opgaven vil her beskrive hvordan dråpediameterfordeling, fluksdensitet, penetrasjonslengde og tilsetningsstoffer påvirker brannbekjempelsen.

#### *Dråpediameterfordeling*

Sammenhengen mellom dråpediameterfordeling og totalt overflateareal

Med dråpediameterfordeling menes andelen av ulike dråpestørrelser innenfor en representativ prøve, målt i en bestemt avstand fra dysa. Som beskrevet tidligere er det flere ulike grenseverdier og definisjoner av vanntåke.

På grunn av at fordampningen av vann kun kan skje i overflaten vil bruk av relativt små vandrdåper med stort overflateareal per volum gi raskere fordampning (Grant and Drysdale, 1997). Dermed vil relativt små vandrdåper øke oksygenfordriving og varmeabsorbering (Liu and K.Kim, 1999). De små dråpene skiller vanntåkesystemer fra andre vannbaserte slokkeanlegg og overflatearealet i vanntåken øker kraftig ved redusert dråpediameter.

Eksempelvis skal det dannes vanntåke av 1 L vann. En halvering av den gjennomsnittlige dråpediameteren fra for eksempel 1000  $\mu\text{m}$  til 500  $\mu\text{m}$  vil føre til en at volumet per vandrdåpe reduseres med en faktor på  $\frac{1}{8}$ , se formel for volum av sfære:

$$V = \frac{4}{3}\pi r^3 \text{ (m}^3\text{)}$$

Denne reduksjonen fører til et økning i antall dråper med en faktor på 8. En halvering av dråpediameter vil samtidig redusere overflatearealet per dråpe, men kun med en faktor på  $\frac{1}{4}$ , se formel for areal av sfære:

$$A = 4\pi r^2 \text{ (m}^2\text{)}$$

Av dette forstås det at det totale overflatearealet i volumet av vanntåke dobles når dråpediameteren halveres. Denne sammenhengen vises i Tabell 17.

| Vanndråpediameter ( $\mu\text{m}$ ) | Overflateareal ( $\text{m}^2$ ) |
|-------------------------------------|---------------------------------|
| 6000                                | 1000                            |
| 3000                                | 2000                            |
| 1000                                | 6000                            |
| 500                                 | 12000                           |
| 100                                 | 60000                           |
| 50                                  | 120000                          |
| 10                                  | 600000                          |

Tabell 17: Sammenhengen mellom vanndråpediameter og overflateareal for vanntåke dannet av 1 L vann

### Dråpediameterfordeling og bevegelse

Redusert tyngde i hver dråpe vil gjøre at de holdes lengre i luften og lettere kan fraktes videre med luftstrømmer til eksterne eller delvis blokkerte områder. Små dråper kan lettere kjøle både gass og overflater i omgivelsene (Project, 2007). At dråpene holder seg lengre i luften kan også føre til at de lettere fraktes til steder hvor de gjør mindre nytte av seg. Mindre vannpartikler vil ha en mer gasslignende oppførsel og derfor gode egenskaper når det gjelder å blande seg med andre gasser i brannvolumet. Den relativt lave bevegelsesmengden gjør det vanskeligere å penetrere flammene på grunn av den hydrodynamiske effekten og draget bort fra brannsoylen. (Liu and K.Kim, 1999).

### Dråpediameterfordeling og slokkemekanismene

I slutten av avsnittet om vanntåkens slokkemekanismer ble det oppsummert hvilke av dem som har størst betydning ved bekjempelse av klasse A branner (standardorganisasjonen, 2014a, Association, 2013a). Disse var absorpsjon av varme fra flammer og brannlast, fortregning av oksygen og absorpsjon av strålevarme.

Der nedkjøling av flammesøylen er viktigst vil små vanndråper med stort overflateareal i forhold til volum være en fordel på grunn av raskere fordampning og dermed hurtigere nedkjøling. Hvis blokkering av strålevarme er en prioritet, for eksempel for å forhindre flammespredning eller beskytte brannmanskaper vil relativt små dråper være en fordel også her. Evnen til absorpsjon er størst for små vanndråper, men på grunn av raskere fordampning kan ikke dette alltid tas for gitt (Grant and Drysdale, 1997). Absorpsjonen vil være større ved økt vanntåkedensitet (Liu and K.Kim, 1999).

Når nedkjøling av brannlasten er viktigst vil det være en fordel med større dråpediameter for å sikre vanntåken tilstrekkelig kinetisk energi slik at den kan penetrere flammesøylen og nå brannlasten som forkulles. Dette diskuteres videre i avsnittet «Penetrasjonslengde (Grant and Drysdale, 1997).

### Viskositet og evne til vætting

Viskositeten sier noe om stabilitet i vannndråpene og har innvirkning på slokkeegenskapene. I fravær av forstyrrende ytre krefter vil en vanndråpe inneha sfærisk form på grunn av at dette gir minst overflateenergi. En endring i geometrisk form, for eksempel på grunn av aerodynamiske krefter kan

forhindres ved kombinasjonen av overflatespenninger og interne viskøse krefter. Atomifiseringen av et vannvolum, for eksempel forvandlingen av en dråpe til mindre dråper skjer når størrelsen av de ytre kreftene overstiger overflatespenningen (Grant and Drysdale, 1997). Derfor er det en sammenheng mellom viskositet og dråpediameterfordeling.

Under likevekt er det interne trykket i hviket som helst punkt i overflaten på en dråpe,  $p_i$ , like stort som summen av overflatespenningstrykket,  $p_\sigma$  og de eksterne aerodynamiske kreftene  $p_a$ . Denne sammenhengen er gitt ved følgende formel (Grant and Drysdale, 1997):

$$p_i = p_\sigma + p_a = \text{Konstant}$$

Her er:

- $p_i$  = Det interne trykket i hviket som helst punkt i overflaten av en dråpe  $\left(\frac{N}{m^2}\right)$
- $p_\sigma$  = Overflatespenningstrykket  $\left(\frac{N}{m^2}\right)$
- $p_a$  = Aerodynamiske krefter  $\left(\frac{N}{m^2}\right)$

Overflatespenningen er gitt ved:

$$p_\sigma = \frac{4\sigma}{D}$$

Her er (Grant and Drysdale, 1997):

- $D$  = er vandrdråpens diameter (m)
- $\sigma$  = Overflatespenning  $\left(\frac{N}{m}\right)$

Vandrdråpen vil holdes stabil ved påføring av aerodynamiske krefter så lenge dette kan kompenseres for via endringer i overflatespenningstrykket,  $p_\sigma$  slik at det interne trykket,  $p_i$  kan holdes konstant. Hvis de aerodynamiske kreftene blir for store, vil dråpene deformeres og resultere i mindre vandrdråper med økt overflatespenning (Grant and Drysdale, 1997).

Ved liten overflatespenning økes de vætende egenskapene i slokkemediet på grunn av større evne til penetrasjon til brannlasten, samt økt konduktiv varmeabsorposjon grunnet større kontaktflate i hver vandrdråpe. Begge disse to mekanismene er viktige for bekjempelse av klasse A branner (standardorganisasjonen, 2014a, Association, 2013a) og kan oppnås ved bruk av relativt store dråper. Forståelsen rundt slokkemekanismen «kjøling» i klasse A branner er begrenset (Grant and Drysdale, 1997), spesielt når det kommer til materialer med lav termisk konduktivitet, for eksempel forkullet tre.

### Valg av dråpediameterfordeling

Forskjellen i individuelle branner gjør at hvilke slokkemekanismer og dermed dråpediameterfordeling som er ideell. I praksis er det vanskelig å vite hvilken av faktorene som har mest å si, samtidig som betydningen av disse endres i løpet av brannforløpet (Grant and Drysdale, 1997). Det er lite sannsynlig at det finnes én dråpestørrelse som er optimal for alle stadiene i en brannbekjempelsesprosess, gitt



kompleksiteten i brannodynamikk, fysikk og de kjemiske reaksjonene som skjer i en brann (Grant et al., 2000). Det har vist seg at ytelsen er større i vanntåke med blandet dråpediameterfordeling enn ved bruk av en uniform dråpestørrelse (Liu and K.Kim, 1999).

### *Fluksdensitet*

Vanntåkens fluksdensitet er et mål på hvor mange liter vann som slippes ut i form av vanntåke per tid i et areal,  $\frac{L}{s \times m^2}$  eller i et volum,  $\frac{L}{s \times m^3}$ . Økt fluksdensitet vil føre til større temperaturreduksjon i rom-skala, men vil ikke påvirke oksygenkonsentrasjonen. Uten tilstrekkelig fluksdensitet vil ikke vanntåke kunne absorbere nok varme fra brann og omgivelser til å senke temperaturen under brennpunktet.

Om vanntåken oppnår ønsket konsentrasjon i gitt plassering er avhengig av bevegelsesmengden, vinkelretningen på dysa, skjerming av brannlast, størrelse på brann, ventilasjon og geometrien i rommet. Fordelingen av dyser i et volum gjør at det ikke kan oppnås uniform vanntåkekonsentrasjon. På samme måte som det er vanskelig å oppnå én bestemt vanntåkedensitet er det også utfordrende å avgjøre hvilken densitet som bør oppnås. Hva som er den optimale densiteten er svært avhengig av bruksforhold og det er ingen densitet som er mest effektiv i alle tilfeller (Liu and K.Kim, 1999).

### *Penetrasjonslengde*

Hvor langt vanntåken kan transporteres fra dysa er avhengig av evnen til å penetrere gjennom stillestående gasser og gjennom brannsøylen.

Lengden av penetrasjonen inn i stillestående gasser er avhengig av vanntåkens kinetiske energi:

$$\frac{1}{2} m v^2$$

Hvor:

- m = Masse (Kg)
- v = Hastighet (m/s)

Penetrasjonslengden er også avhengig av aerodynamisk motstand i den omliggende gassen. Selv om starthastigheten vanligvis er høy vil den påfølgende dannelsen av mindre vanndråper etter at vanntåken har forlatt dysa øke den totale overflaten i vannvolumet og dermed også friksjonen mellom vanndråper og omliggende gasser. Dette vil føre til en gradvis reduksjon av kinetisk energi slik at bevegelsen til slutt kun bestemmes av lokale luftstrømmer fra brannen, ventilasjon, vind og gravitasjon.

Dyser som produserer relativt store dråper og er direkte rettet mot slokkeformålet vil ha lengre penetrasjonslengde enn dyser som produserer relativt små dråper og har stor spredningsvinkel, dette på grunn av mindre luftmotstand. Penetrasjonslengden til én dråpe med vilkårlig diameter vil ha mindre penetrasjonslengde enn en vanntåkesky av dråper med samme diameter. Dette er fordi de fremste dråpene i en vanntåkesky overfører bevegelsen til de omliggende gassene og skaper et momentum i samme retning som vanntåkens bevegelse og reduserer dermed luftmotstanden (Grant and Drysdale, 1997).

Vanntåkens kinetiske energi avgjør om den er i stand til å penetrere gjennom flammene, men også hvor mye luft som trenger inn i flammesøylen fra omgivelsene. Vanntåken skaper turbulens som blander små vanndråper og vanndamp inn i forbrenningssonen, fortynner oksygen og brennbare gasser og forsterker vanntåkens slokkeeffekt. Denne blandingen gjør at det må tas hensyn til massen av både vann, vanndamp og luft i beregningen av vanntåkens bevegelsesmengde.

Etterhvert som vanntåkepartiklene farer gjennom varme gasser vil dråpene gradvis fordampe og diameteren reduseres. De vil også bli utsatt for gravitasjons- og dragkrefter som reduserer hastigheten. Redusert masse og hastighet fører til redusert kinetisk energi og til slutt vil en dråpe fordampe fullstendig. Avstanden en dråpe beveger seg fra dysa til den fordamper er avhengig av dråpestørrelse, temperaturdifferansen mellom vanndråpen og omgivelsene, latent fordampningsvarme, densitet i omgivelsene og gassens termiske konduktivitet. På grunn av at vanndråper fordamper er det ved relativt store takhøyder behov for større bevegelsesmengde i vanntåken. Dette kan oppnås ved å tilstrebe relativt store verdier i dråpediameterfordelingen eller ved å øke utslippshastigheten.

Når en vanndråpe omsider kommer fram til brannsøylen er det viktig at bevegelsesmengden i vanndråpene er minst tilsvarende den motsatt rettede bevegelsesmengden i brannsøylen, hvis ikke vil vanndråpene blåses bort. Tilstrekkelig bevegelsesmengde er spesielt viktig i lokale vanntåkesystemer som frigir vanntåke direkte på brannkilden (Liu and K.Kim, 1999).

### **Tilsetningsstoffer**

Over de siste tiårene har det blitt utviklet flere tilsetningsstoffer for å gjøre vanntåken mer effektiv. Dette kan for eksempel innebære å redusere vannforbruket og samtidig øke sannsynligheten for slokking. Mange av tilsetningsstoffene brukt i kasse A branner er overflateaktive og reduserer overflatespenningene i vanndråpene som igjen reduserer viskositeten. Som nevnt tidligere har dette positiv effekt på penetrasjonsegenskaper og absorbering av varme fra brannen (Grant and Drysdale, 1997).

Tilsetningsstoffer kan redusere frysepunktet i vannet og dermed forhindre problemer knyttet til frost. Gassbaserte tilsetningsstoffer kan redusere syreinnholdet i avfallsproduktene fra brannen. Negative effekter ved å benytte tilsetningsstoffer er økte kostnader, mulig korrosjonsfare og giftighet (Liu and K.Kim, 1999).

### **5.8.2. Ventilasjonsforhold**

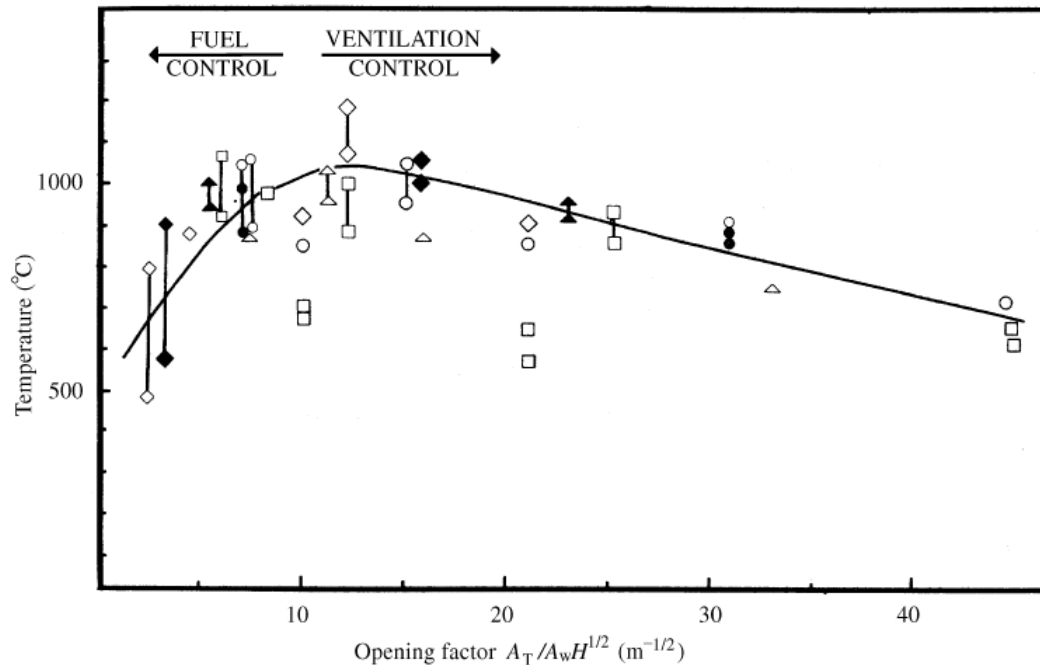
Når det er en åpning i en branncelle vil trykkforskjellen mellom innevendig og utvendig luft føre til masseutveksling gjennom åpningen. Masseutvekslingsraten er hovedsaklig avhengig av størrelse på åpning og temperaturforskjellen mellom branncelle og tilstøtende omgivelser (Liu et al., 2001)

Ventilasjonsforholdene kan beskrives ved å uttrykke åpningsfaktoren i et rom. Hvilke slokkemekanismer som er dominerende er blant annet avhengig av temperatur og som Figur 27 viser er temperaturen avhengig av åpningsfaktoren i en rombrann. Åpningsfaktoren,  $O$  er gitt ved formellen som vises langs x-aksen på figuren (Drysdale, 2011):

$$O = \frac{A_T}{A_w \sqrt{H}}$$

Hvor:

- $A_T$  = Rommets totale overflateareal
- $A_w$  = Areal av åpninger
- $H$  = Gjennomsnittlig høyde av åpninger



Figur 27: Sammenhengen mellom åpningsfaktor og temperatur ved rombrann (Drysdale, 2011)

Figuren og formellen viser at temperaturen reduseres ved store og små åpningsfaktorer. Ved en liten åpningsfaktor som symboliserer store åpningsflater vil temperaturen holdes nede på grunn av at kald luft dras inn i brannrommet (Drysdale, 2011). Oppgaven fokuserer på ventilasjonskontrollerte branner og derfor åpningsfaktorer som er større enn rundt 10 i Figur 27. Temperaturreduksjon som følge av små rom kan dermed ses bort fra. I store rom med store overflater i forhold til åpningsareal vil temperaturen være lav på grunn av at det tar lang tid å varme opp rommet.

Vanndråpenes små størrelser gjør at vanntåkesystemer lettere kan påvirkes negativt av ventilasjonsforhold enn sprinklersystemer. Ventilasjon, stor masseutveksling mellom brannrom og tilstøtende omgivelser og der brannen ligger skjult og den viktigste slukkemekanismen er fortregning og uttynning av oksygen er forholdene som har størst negativ effekt på brannbekjempelsen (Yuan and Lazzara, 2004).

### 5.8.3. Romgeometri

#### *Lukkede rom*

Ved brann i et lukket rom, det vil si et rom med liten eller ingen ventilasjon vil romtemperaturen øke og oksygenkonsentrasjonen gradvis reduseres. Varme gasser og røyk fra forbrenningen samles oppunder himlingen og når vanntåke aktiveres gjennom det varme gass- og røyklaget og nedover mot brannen vil fordampningen være svært effektiv. Dette øker fortrenging av oksygen og brennbare gasser rundt brannen. Rask produksjon av vanndamp som følge av hurtig oppvarming gjør det mulig å slukke skjermede branner i brannrom med mange hindringer ved mindre bevegelsesmengde i vanntåken. Nødvendig fluksdensitet kan være opptil 10 ganger mindre enn i rom uten avgrensede flater eller med relativt stor ventilering (Liu and K.Kim, 1999).

#### *Volum*

Når en brann er relativt stor i forhold til rommet vil den føre til stor økning i temperatur. Økt temperatur vil føre til raskere fordampning av vanntåke og dermed større fortrenging av oksygen som allerede er mengderedusert. Sannsynligheten for at en brann skal være relativt stor er størst i små rom. På grunn av de høye temperaturene vil effektene fra gassfase egenskapene i vanntåke slå inn, det vil si kjøling, uttynning av gasser og blokkering av stråling (Liu and K.Kim, 1999).

I store volum hvor en brann som oftest er relativt liten i forhold til romvolumet vil den dominerende slokkemekanismen i vanntåke være direkte væting av brennende overflate og brannlast (Wighus, 2015).

#### *Høyde*

I fullskala tester for vanntåkesystemer som oppgaven senere vil beskrive er høyden vanntåkedysene er plassert i over et gulv en dimensjonerende verdi. Brannbekjempelsesegenskapene blir svekket når takhøyden er stor. Det har derimot vist seg at vanntåkesystemer har like bra eller bedre egenskaper enn sprinkler ved stor takhøyder (Pesaola, 2014).

#### *Dynamisk miksing*

Når vanntåken aktiveres i et brannrom blandes den inn med omliggende gasser og fortrenger forbrenningsprodukter og vanndamp som samler seg oppunder himlingen. Disse presses nedover og blandes med gassene som befinner der. Denne effekten kalles dynamisk miksing og reduserer oksygenivået i nedre del av brannrommet hvor brannen befinner seg og fører til forbedret slukkeeffekt.

Gasskonsentrasjonene av for eksempel  $O_2$ ,  $CO_2$  og  $CO$ , samt temperaturen har en tendens til å vil være uniform i brannrommet etter aktivering av vanntåkesystem. Effekten vil være størst når dyser er plassert så høyt i brannrommet som mulig. Dette på grunn av større produksjon av vanndamp når vanntåken går gjennom det varme laget oppunder himlingen, og dermed større evne til å fortrenge varme gasser og vanndamp nedover i rommet.

En hurtig spredning av vanntåke er imidlertid avhengig av at det ikke befinner seg store mengder forstyrrende hindringer i det gjeldende volumet. Slike hindringer vil avbryte blandingsprosessen mellom vanntåke og andre gasser i volumet på grunn av at vanntåken avsettes på overflatene og dermed

reduserer effekten av gassavkjøling (Mawhinne et al., 1994). Om dette er en fordel eller en ulempe kommer an på hvilke slokkemekanismer som er mest effektive for bekjempelse av brann, men akkurat når det gjelder dynamisk miksing er det negativt. Dynamisk miksing forkorter vanntåkesystemers slokkesetid under både ventilerte og ikke-ventilerte forhold. Ved å vekselvis slå av og på vanntåkesystemet i sykluser og på den måten framprovosere dynamisk miksing kan slokkeegenskapene forbedres betydelig i enkelte tilfeller. Dette kan potensielt føre til mindre bruk av vann og færre vannskader. Effekten av dynamisk miksing er avhengig av vanntåkens- og dysenes egenskaper, avstand mellom dysene og deres konfigurasjon i rommet, ventilasjonsforhold og rommets størrelse. For å finne en tilnærming til optimal dynamisk miksing kan disse parametrene bestemmes ved bruk av et CFD-program (Liu and K.Kim, 1999). I bygninger som denne oppgaven omhandler vil det imidlertid være vanskelig å oppnå dynamisk miksing på grunn av generelt mange hindringer og begrensede muligheter til å redusere disse.

## 5.9. Pålitelighet

### 5.9.1. Generelt

På grunn av at vanntåkesystemer er relativt nylig tatt i bruk i boliger og lignende virksomheter hvor forkullende brann er dominerende finnes det ikke tilstrekkelig spesifikk pålitelighetsdata tilgjengelig enda (Xu and Fuller, Association, 2015e). Uansett har ingen vanntåkesystemer 100 % pålitelighet (standardorganisasjonen, 2011) og det er derfor behov for å estimere sannsynligheten for feiling.

### 5.9.2. Feil og årsak

At et vanntåkesystem ikke bekjemper en brann som tilsiktet kan ha årsak i både feil i aktivering av systemet og feil i operasjonell utførelse, det vil si ineffektivitet. Sprinklersystemer består av mange av de samme komponentene som vanntåkesystemer og i mangel på relevant statistikk er det derfor naturlig å se på hvilke årsaker som fører til feil i sprinklersystemer. Tabell 18 viser en oversikt over vanlige årsaker for feil og ineffektivitet i våtsystemssprinkler, hentet fra «U.S Experience with Sprinklers» av John R. Hall (Hall, 2013 ). I tillegg til feilårsakene i Tabell 18 kan det nevnes at feiling eller ineffektivitet i sprinkler kan skyldes at de aktiveres for en brann som er plassert utenfor sprinklerhodets rekkevidde. Tabell 18 viser at feil i systemet er den største årsaken til at sprinklersystemer ikke aktiveres.

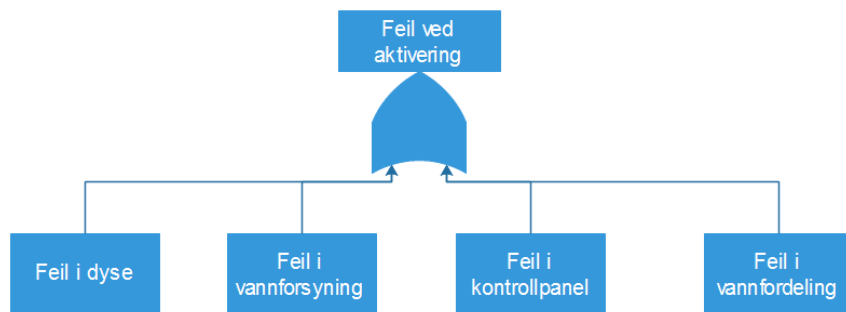
| Årsak til feiling i aktivering og inefektivitet etter aktivering i «wet pipe» sprinklersystemer |                     |                |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|----------------|-----------|
| Årsak                                                                                           | Feil ved aktivering | Ineffektivitet | Kombinert |
| <b>Feil i systemet</b>                                                                          | 42 %                | 0 %            | 42 %      |
| <b>Manuelle inngrep</b>                                                                         | 14 %                | 3 %            | 17 %      |
| <b>Vannforsyningen feiler</b>                                                                   | 0 %                 | 13 %           | 13 %      |
| <b>Vannforsyningen er ikke tilstrekkelig</b>                                                    | 0 %                 | 10 %           | 10 %      |
| <b>Mangel på vedlikehold</b>                                                                    | 5 %                 | 1 %            | 6 %       |
| <b>Skade på komponenter</b>                                                                     | 5 %                 | 2 %            | 6 %       |
| <b>Feildimensjonering</b>                                                                       | 4 %                 | 2 %            | 6 %       |
| <b>Totalt</b>                                                                                   | 70 %                | 30 %           | 100 %     |

Tabell 18: Oversikt over årsaker til feiling i aktivering og ineffektivitet etter aktivering i "wet pipe" sprinklersystemer (Hall, 2013 )

### Metoder for å finne pålitelighet

Påliteligheten for effektiv operasjon etter aktivering verifiseres gjennom ulike branntester som oppgaven vil beskrive i 6. – Verifikasjonsmetoder.

For å kunne si noe om påliteligheten for aktivering i vanntåkesystemer på tross av mangel på pålitelighetsdata kan det gjøres en komparativ feiltreanalyse (Xu and Fuller). Sannsynlighet for feil estimeres ved å kombinere sannsynligheten for feiling i de individuelle komponentene i et vanntåkesystem, for så å sette sannsynlighetene sammen i et feiltre.



Figur 28: Feiltre for vanntåkesystemer

Metoden kan brukes for å analysere årsaker for utilstrekkelig vannforsyning ved brann, som skyldes fire hovedårsaker vist i feiltreet i Figur 28. Påliteligheten i dyse, vannforsyning, kontrollpanel og vannfordeling er sterkt avhengig av hvilke komponenter disse er satt sammen av. Det er gjort en mer utdypende feiltreanalyse i Del 2: Risikovurdering av brannsikringstiltak ved Moholt 50|50.

Feiltreanalysen kan benyttes for å finne mulige årsaker for feil, konsekvenser av disse og på den måten avdekke eventuelle problemområder i designet eller sette flere alternativer opp mot hverandre. Dette kan være nyttig for å konstruere et pålitelig vanntåkesystem og for å ta strategiske grep. Den komparative feiltreanalysen (Xu and Fuller) tar hensyn til følgende typer feil:

- Operasjonelle feil i komponenter under kontinuerlig ytelse, for eksempel kontrollventilen.
- Passive komponentfeil i komponenter som ikke yter noen funksjon utenom ved aktivering av vanntåkesystemet, for eksempel dyser.
- Behovsfeil, det vil si sannsynligheten for at en komponent ikke fungerer når det er behov for den.

### 5.9.3. Beregning av pålitelighet

#### Antakelser for beregning av pålitelighet

For beregning av pålitelighet i vanntåkesystemer etter metoden for komparativ feiltreanalyse beskrevet av FM Global (Xu and Fuller) gjøres følgende antakelser:

1. Alle vanntåkesystemer er tilstrekkelig designet og installert. For eksempel er det antatt at rørene i systemet tåler vanntrykket ved aktivering.
2. Systemet som analyseres har blitt tilstrekkelig testet slik at typiske «tidligfasefeil» kan neglisjeres. Det fokuseres i stedet på slitasjefeil.
3. Det tas ikke hensyn til menneskelig innblanding etter aktivering som kan ha positivt bidrag til pålitelighet. Dette kan for eksempel være å åpne en ventil som ikke skulle vært stengt.

Det er knyttet usikkerhet til resultatene i feiltreanalysen blant annet på grunn av at pålitelighetstallene ikke nødvendigvis er hentet fra vanntåkesystemer. Der det ikke finnes pålitelighetsdata for de aktuelle komponentene benyttes data for komponenter fra lignende applikasjoner, hovedsaklig sprinklersystemer (Xu and Fuller).

Påliteligheten i en komponent er også knyttet til bruk og vedlikehold (Commission, 2008) og derfor trenger ikke pålitelighetsdata for en komponent nødvendigvis være representabel for bruken av den samme komponenten i et vanntåkesystem. Se for eksempel sannsynligheten for feil i et strømaggregat gjengitt i Vedlegg 7, som varierer mellom 1,50E-03 i laveste verdi og 0,480 i høyeste verdi. Det relativt store slingringsmonnet i pålitelighetsdata for samme komponent kan ha sammenheng med type bruk, antall brukstimer, oppbevaringsmiljø, kvalitet på drivstoff med mer.

### *Pålitelighet i komponenter*

For å estimere påliteligheten i vanntåkesystemer må først påliteligheten i komponentene undersøkes ved sannsynlighetsberegninger. For operasjonell pålitelighet benyttes følgende formel for å beregne sannsynligheten for feil (Xu and Fuller):

$$F(t_0) = 1 - e^{-\lambda_0 t_0}$$

Hvor:

- $F(t_0)$  = Sannsynligheten for feiling ved  $t_0$
- $t_0$  = Brannens varighet
- $\lambda_0$  = Komponentens feilfrekvens

Som formellen viser er påliteligheten i operasjonelle komponenter knyttet til operasjonstiden i vanntåkesystemet. For passive komponenter som ikke er i bruk før vanntåkesystemet aktiveres er påliteligheten avhengig av tid fra siste kontroll. Dette vises i formellen under (Xu and Fuller):

$$\bar{F}(t_i) = \frac{1}{t_i} \int_0^{t_i} F(t_s) dt_s = \frac{1}{t_i} \int_0^{t_i} (1 - e^{-\lambda_s t_s}) dt_s = 1 + \frac{e^{-\lambda_s t_i}}{\lambda_s t_i}$$

Hvor:

- $F(t_i)$  = Sannsynligheten for feiling ved  $t_i$
- $t_i$  = Vedlikeholdsintervall
- $t_s$  = Tid som er gått siden forrige kontroll når det er behov for systemet
- $\lambda_s$  = Komponentens feilfrekvens

For å finne påliteligheten med tanke på behovsfeil kombineres sannsynlighetene som er funnet for aktive- og passive komponenter. For beregning av pålitelighet ved strømbrydd benyttes følgende formler:

$$F = 1 - P(A)$$

$$P(A) = P(A|B)P(B)$$

$$P(B) = 1 - \lambda_s T_r$$

$$P(A|B) = e^{-\lambda_s t_0}$$

Hvor:

- $F$  = Sannsynligheten for feiling av pålitelighet når det er behov for vanntåkesystemet
- $T_r$  = Repareringsstid
- $t_0$  = Brannens varighet
- $\lambda_s$  = Komponentens feilfrekvens

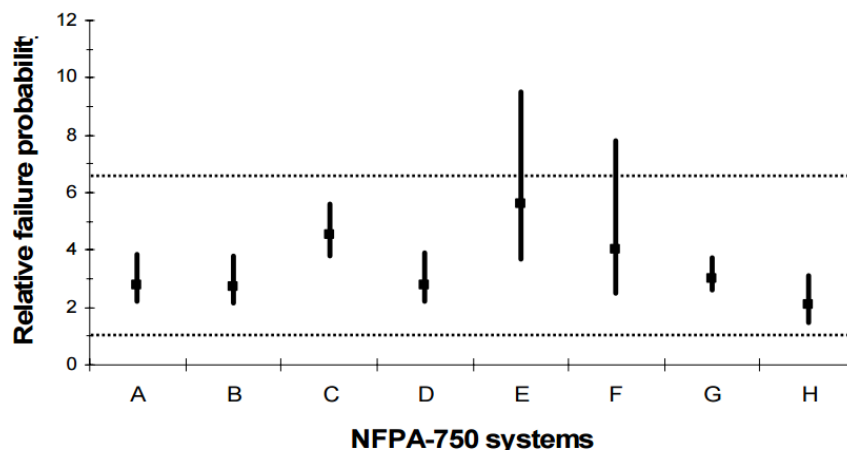
### *Pålitelighet i systemet*

Etter at sannsynlighetene for feiling i komponentene er beregnet kan disse framstilles i et feiltre for å finne påliteligheten ved aktivering i hele vanntåkesystemet. På grunn av at pålitelighetsdata for komponentene ikke nødvendigvis er hentet fra vanntåkesystemer brukes ikke resultatene for å angi påliteligheten i et vanntåkesystem direkte. I stedet angis den via et forholdstall mellom sannsynlighet for feil i et vanntåkesystem og sannsynlighet for feil i et referansesprinkersystem.

I artikkelen «Water Mist Fire Protection Analysis» (Xu and Fuller) er det gjort beregninger av forholdstall mellom vanntåkesystemer i ulike klasser beskrevet i NFPA 750 (Association, 2015e) og et referansesprinklersystem. De ulike vanntåkesystemene er beskrevet og gjengitt i Tabell 15 i 5.6 - Klassifisering av vanntåkesystemer basert på oppbygning. Resultatene fra den komparative feiltreanalysen er gitt i Figur 29.

Figur 29 viser at enkelte typer vanntåkesystemer har bedre pålitelighet enn andre og at System A,B,D,G og H kommer best ut. Det bør understrekes at det i virkeligheten brukes mange ulike komponenter innenfor de ulike vanntåkesystemene beskrevet i Tabell 15 og dessuten også i sprinklersystemer. Derfor må ikke disse resultatene ses på som en fasit, men som en indikasjon på pålitelighetsnivået i de ulike systemene.





Figur 29: 90 % konfidensintervall (vist som vertikale svarte streker) og gjennomsnittverdier (visst som svarte firkanter på midten av de svarte strekene) for ulike vanntåkesystemer beskrevet i NFPA 750 (Xu and Fuller, Association, 2015e)

#### 5.9.4. Tiltak for økt pålitelighet

Oppgaven vi her diskutere tiltak for økt pålitelighet i vanntåkesystemer. Beskrivelsen som angår komponentoppbygging er basert på den komparative feiltreanalysen utført i 10.10 - Sensitivitetsanalyse. Her vil kun sannsynligheten for feil i komponenter i de antatte problemområdene basert på feiltreanalysen diskuteres. Oppgaven vil også gå gjennom eksempler fra undersøkelser og hvordan vanntåkesystemer påvirkes av mangel på vedlikehold. Hensikten med dette er å gi leseres økt innsikt i hva som bør fokuseres på i design og drift av vanntåkesystemer.

#### Vannforsyning

Kontroll av vannkvalitet er viktigere i vanntåkesystemer enn i vanlige sprinkler (Arvidson, 2015) på grunn av at det benyttes mindre rørdimensjoner og dyseåpninger som lettere kan tettes igjen av urenheter. På den måten kan urenheter føre til feil i dyser, vannforsyning og vannfordeling i feiltreet i Figur 28. For å redusere risikoen for dette kan det etableres et filter ved vanninntaket, som vist i Figur 20 i 5.3- Oppbygning av vanntåkesystemer: Komponenter. Vanntåkesystemet bør dimensjoneres slik at det er mulig å undersøke vannkvaliteten i systemet. Det bør også etableres ventiler slik at drivmiddelet i seksjonsrørene kan tømmes uten å fjærne dysene (Arvidson, 2015).

For å oppnå bedre redunans i vannforsyningen i et vanntåkesystem kan det etableres to selvstendige vannforsyninger. For eksempel en lagringstank med pumpeystem i tillegg til trykksatte tanker. På den måten vil det ene systemet kunne ta over dersom det andre feiler. Et pumpeystem bør etableres med to selvstendige pumper med hver sin drivmotor (Arvidson, 2015).

#### Strømforsyning

Strømforsyningen påvirker komponentene i vanntåkesystemet som er avhengig av strøm, det vil si pumper, kontrollpanel, varslingssystem og alarmsystem. På den måten vil påliteligheten i strømforsyningen påvirke sannsynligheten for feil i vannforsyning og kontrollpanel i feiltreet i Figur 28.

For øke påliteligheten i strømforsyningen kan det etableres et strømaggregat som sikrer strømtilførsel ved strømbrydd. Kontrollpanel og liknende kan utstyres med ekstra batteri.

### **Kontrollpanel**

Feiltreanalysen utført i 10.10 - Sensitivitetsanalyse viste at feil i kontrollpanel er den mest sannsynlige årsaken for feiling i vanntåkesystemet som ble undersøkt. Dette skyldtes hovedsaklig sannsynligheten for feil i programvaren og derfor bør det jevnlig utføres kontroll av denne. Det bør nevnes at den benyttede statistikken som finnes i Vedlegg 7 var beregnet for feil i industrielle datamaskiner på grunn av menneskelig aktivitet og ikke nødvendigvis trenger å samsvare med påliteligheten i kontrollpaneler i vanntåkesystemer.

### **Sammenhengen mellom pålitelighet og vedlikehold**

Tabell 19 er hentet fra foredraget «Practical Experience from Actual Water Mist Installation» fra Scandinavian Water Mist Seminar i 2015 (Arvidson, 2015). Den viser at påliteligheten i vanntåkesystemer i utgangspunktet er høyere enn i sprinklersystemer, men at den reduseres betydelig mer ved langt vedlikeholdsintervall.

| Type system                            | Pålitelighet som funksjon av vedlikeholdsintervall |                |
|----------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------|
|                                        | Månedlig                                           | Årlig          |
| <b>Tradisjonelle sprinklersystemer</b> | 99,5 % ± 0,3 %                                     | 93,7 % ± 3,6 % |
| <b>Vanntåkesystem (generisk)</b>       | 99,68 % ± 1,8 %                                    | 69 % ± 16 %    |
| <b>Vanntåkesystem (forbedret)</b>      | 98,6 % ± 0,8 %                                     | 84,7 % ± 8,3 % |

Tabell 19: Pålitelighet i sprinkler- og vanntåkesystemer som funksjon av vedlikehold (Arvidson, 2015)

I foredraget (Arvidson, 2015) representeres en undersøkelse som viser at følgende problemer går igjen i etablerte vanntåkesystemer:

- Problemer med automatiske varmesensitive vanntåkedysere
- Tiltetting av dysere
- Tiltetting av systemfilter
- Oppbygging av mineralforekomster i interne komponenter
- Korrosjon av interne komponenter

Det er blitt gjort en undersøkelse (Arvidson, 2015) i 80 skip hvor det er benyttet vanntåkesystemer og hvor det på 24 av skipene ble funnet vanntåkedysere som ikke fungerte. På 12 av disse skipene måtte alle dysene i en eller flere seksjoner byttes ut. På et av skipene ble alle dysene byttet ut på grunnlag av en utvalgt testprøve i skipet. I en annen test utført av Det Norske Veritas (Arvidson, 2015) ble fire skip som var eldre enn 10 år undersøkt. Det viste seg at mellom 30 % og 67 % av de undersøkte dysene ikke aktiverte, men at problemene var assosiert med en spesiell type dyse fra en bestemt produsent. Dette indikerer av kvaliteten på komponenter varierer og at det er viktig å bruke tid og ressurser på å forsikre seg om at en produsent eller et produkt er tilstrekkelig verifisert.

## 6. Verifikasjonsmetoder ved bruk av vanntåkesystemer

### 6.1. Introduksjon til kapitlet

De foregående kapitlene har beskrevet relevante brannfarer og hvordan disse kan bekjempes ved bruk av vanntåkesystemer. I dette kapitlet skal oppgaven fokusere på hva som inngår i verifisering av disse systemene. Dette innebærer en gjennomgang av regelverk, relevante standarder og verifiseringsmetoder. Hensikten med kapitlet er å øke leserens forståelse for hva som skal til for å verifisere vanntåkesystemer og ta dem i bruk.

### 6.2. Status

Dette delekapitlet er ment for å forklare vanntåkesystemers status i norske og internasjonale regelverk og standarder, samt hva som skal til for å oppnå en godkjent verifisering.

#### 6.2.1. Byggteknisk forskrift

I følge byggteknisk forskrift (Byggkvalitet, 2015) finnes det ingen fullverdige internasjonale standarder for testing, prosjektering og utførelse av vanntåkesystemer. Fram til det er utviklet en slik standard anbefales det å benytte Forsikringsselskapenes Godkjennelsesnevnds, FGs veiledning for vanntåkesystemer (Godkjennelsesnevnd, 2009) inntil anerkjente standarder er på plass.

#### 6.2.2. Framgangsmåte for verifisering

##### *Forsikringsselskapenes Godkjenningsnevnd, FG*

Finansnæringens Hovedorganisasjon, FNH er forsikringsselskapenes interesseorgan og i 1977 ble FG opprettet av forsikringsselskapene i Norge. Formålet var å utarbeide regelverk, godkjenne sikringsprodukter og foretak for å redusere risikoen for brann- og innbruddsskader (Godkjennelsesnevnd, 2009).

Veiledningen informerer om minstekravene for at vanntåkesystemer kan aksepteres som et risikoreduserende tiltak av forsikringsselskaper. Den inneholder retningslinjer for testing, dimensjonering, installasjon, kontroll, vedlikehold og ettersyn av vanntåkesystemer. Produsenten skal ha manualer som sikrer korrekt dimensjonering og installasjon. Vanntåkesystemet må designes, installeres og kontrolleres av et foretak som er godkjent av FG (Godkjennelsesnevnd, 2009). Oversikten over disse foretakene finnes på FNHs hjemmeside (Hovedorganisasjon, 2015).

##### *Fullstendig systemevaluering*

Det skal utføres en fullstendig systemevaluering for godkjennelse av vanntåkesystemer. Dette inkluderer verifisering av hver enkelt komponent og annet utstyr, samt hele systemet. For verifisering av komponenter benyttes komponenttester utført i henhold til eksisterende standarder (Godkjennelsesnevnd, 2009) for eksempel NS-INSTA 900-3:2014 (Norge, 2014).

Dersom det ikke eksisterer en egnet standard må komponentene eller utstyr evalueres av et akkredisert organ. Det vil si at Norsk Akkreditering har vurdert sertifiseringsorganets kvalitetsystem og kompetanse og at det tilfredsstillende internasjonale krav (Godkjennelsesnevnd, 2009). Oversikten over godkjente

serifiseringsorganer finnes på Norsk Akkrediterings hjemmesider (Akkreditering, 2015). Eksempel på tester av komponenter og utstyr er (Jackman, 2013):

- Tester for dyser, rør, trykkventiler og lignende
- Tester for vanntåkefordeling
- Test for internt trykk
- Lekkasjetest
- Korrosjonstest
- Operasjonstest
- Test for gjentetting av dyser
- Pumpetest

Når det gjelder test av hele systemer finnes det ingen godkjente beregningsmetoder for interpolering av testresultater fra ulike anvendelsesområder. Derfor er bruksområdet til en test begrenset til de parametrene som er brukt i testen. Resultatet av dette er at det må utføres fullskala tester i hvert enkelt tilfelle for det bruksområdet vanntåkesystemet skal beskytte. Testene skal være utført av akkrediserte sertifiseringsorgan. FGs veiledning (Godkjennelsesnevnd, 2009) henviser ikke direkte til fullskala tester for vanntåke, men anbefaler den amerikanske standarden NFPA 750 (Association, 2015e), som inneholder en liste over tester som oppfyller en rekke forhåndsbestemte kriterier.

### *Uavhengig tredjepart*

Verifiseringen må godkjennes av en uavhengig tredjepart og dette foretaket må også være godkjent av FG (Godkjennelsesnevnd, 2009). Produsenten er ansvarlig for nødvendig opplæring av FG-godkjente foretak. Veiledningen inneholder også krav for brannalarmanlegg, vannforsyning, skilt, angivelser, informasjon, overtakelsesprøvinger, periodisk kontroll og vedlikehold (Godkjennelsesnevnd, 2009). Disse temaene, sammen med komponenttester er imidlertid utenfor begrensningene i denne oppgaven og vil derfor ikke bli fokusert videre på.

### *Flere forhold – International Water Mist Association, IMWA*

International Water Mist Association, IMWA er en forening som er dedikert til brannbekjempelse ved bruk av vanntåke og relatert teknologi. Medlemmer er produsenter, forhandlere, forsikringsselskaper, vitenskapelige institusjoner, godkjenningorganer, brannvesen og privatpersoner. IWMA ble dannet i kjølvannet av behovet for en internasjonal platform for vanntåke og foreningen fungerer som forum for produsenter, brukere og eksperter for å fremme forskning, utvikling og bruk av vanntåke (Association, 2015c).

IMWA skriver på sin hjemmeside at vanntåkesystemer noen ganger dimensjoneres og installeres feil og at dette kan føre til uakseptabel risiko for liv og materielle verdier som beskyttes. For å oppnå tilstrekkelig sikkerhet ved design og installasjon av vanntåkesystemer, i tillegg til å kunne skille mellom pålitelige og upålitelige systemer adresseres flere viktige punkter (Association, 2015b). Her nevnes de samme punktene som i FGs "Veiledning for vanntåkesystemer" (Godkjennelsesnevnd, 2009) i tillegg til noen flere, som beskrives under:

Det skrives at matematiske kalkulasjoner og beregninger gjort med simuleringsprogrammer ikke bør benyttes som eneste verifiseringsmiddel, men kun som supplement til å forstå hvordan vanntåkesystemer fungerer. Noen markedsaktører tilbyr vanntåkesystemer som er verifisert kun basert på simuleringer og det er derfor viktig å be om tilstrekkelig dokumentasjon for å forsikre om at disse er tilstrekkelig verifisert for bruksformålet (Association, 2015b).

Selv om verifiseringen av et vanntåkesystem er applikasjonsspesifikk, kan et ekspertpanel avgjøre om en test er gyldig for en annen applikasjon (Association, 2015b). Dette strider altså med veiledningen til FG (Godkjennelsesnevnd, 2009) som beskriver at ingen testresultater kan interpoleres.

Bruk av standarder og testprotokoller er viktige redskap for å veilede produsenter, designere og installatører til å etablere et vanntåkesystem med tilstrekkelig kvalitet og pålitelighet. Selv om ikke all risiko dekkes av disse er det en stadig økning i antall standarder og testprotokoller (Association, 2015b). I likhet med FG (Godkjennelsesnevnd, 2009) anbefaler IMWA å benytte den amerikanske standarden NFPA 750 (Association, 2015e) som designstandard for vanntåke (Association, 2015b). Dette diskuteres videre sammen med flere standarder for vanntåke senere i kapitlet.

På grunn av at vanntåkesystemer er forskjellige fra andre konvensjonelle slokkesystemer når det gjelder design, installasjon, drift og vedlikehold er det viktig at produsenter og installatører har tilstrekkelig kunnskap for å etablere vanntåkesystemer med høy kvalitet og pålitelighet. Ved valg av system bør det derfor undersøkes om en leverandør har tilstrekkelig sertifikater for opplæring. Designere og ingeniører bør vurdere om produsenten har en erfaren og profesjonell avdeling for forskning og utvikling (Association, 2015b). Det er store individuelle forskjeller mellom vanntåkesystemer, derfor er det viktig å søke råd og veiledning fra produsentene for hvert enkelt system (Association, 2015a).

### 6.3. Standarder

I følge veiledningen til byggteknisk forskrift (Byggkvalitet, 2015) finnes det som tidligere nevnt ingen fullverdige internasjonale standarder. Det finnes imidlertid en felles nordisk standard som blant annet omhandler vanntåke, NS-INSTA 900 (Norge, 2014). På grunn av at dette er en nordisk standard er det krav om at denne skal benyttes der den er dekkende (Byggkvalitet, 2015).

I veiledningen til byggteknisk forskrift (Byggkvalitet, 2015) finnes en oversikt over preakseptert bruk av sprinkler i bygninger med forskjellige bruksområder i risikoklasse 4 og 6, med henvisning til type sprinkler og relevante standarder. Denne oversikten er gjenngett i Vedlegg 4.

Hvorfor nevnes det her hvilke sprinklersystemer som kan benyttes når oppgaven omhandler vanntåkesystemer? Vedlegg 4 henviser til "Type 1, Type 2 og Type 3" som er benevelser på ulike typer boligsprinkler. Dette er ikke direkte relevant for oppgaven, men det er derimot viktig å legge merke til hvilke standarder som benyttes for de ulike sprinklertypene. Henholdsvis NS-INSTA 900 (Norge, 2013, Norge, 2010, Norge, 2014) eller NS-EN 12845 (standardorganisasjonen, 2009a). NS-INSTA 900 er en nordisk serie med tre standarder. Som Vedlegg 4 viser angår disse boligsprinkler, men også vanntåke.

### 6.3.1. NS-INSTA 900

NS-INSTA 900-1 (Norge, 2013) beskriver dimensjonering, installering og vedlikehold av boligsprinkler, det vil si sprinklersystemer som er tilpasset boliger. Dimensjoneringen innebærer hydraulisk dimensjonering, rørkonfigurasjoner, vannforsyning og pumper.

NS-INSTA 900-2 (Standard, 2010) er en standard med krav og prøvingsmetoder for sprinklere med tilhørende rosetter, denne benyttes for sprinklersystemer i henhold til NS-INSTA 900-1 (Norge, 2013).

NS-INSTA 900-3 (Norge, 2014) inneholder krav og brannprøvningsmetoder for vanntåkedyser og ytelse ved brannbekjempelse som ved verifisering kan benyttes sammen med de automatiske vannbaserte slokkesystemene beskrevet i NS-INSTA 900-1 (Norge, 2013). Intensjonen med dette er i følge standarden å vise at vanntåkedyser som er testet i testprotokollene i NS-INSTA 900-3 har minst like høyt sikkerhetsnivå som bolipsprinkler testet etter NS-INSTA 900-2 (Standard, 2010). INSTA 900-3 er ikke en komplett standard og sier ikke noe om komponenttester og tilvirkningstester. På disse feltene refereres det i stedet til kapittel 10 i INSTA 900-2 når det gjelder tester for vannstrømning og vannfordeling. På den måten blir også INSTA 900-2 relevant for vanntåkesystemer.

### 6.3.2. NS-EN 12845 og andre standarder

Vedlegg 4 viser at NS-INSTA 900 (Norge, 2013, Norge, 2010, Norge, 2014) ikke dekker alle bruksområder som er relevante for oppgaven. For sprinkling av for eksempel næringsbygg, sykehus, hoteller og andre virksomheter med brannfarer som er større enn lav fareklasse skal NS-EN 12845 (standardorganisasjonen, 2009a) benyttes. Denne standarden omhandler ikke vanntåkesystemer direkte, men beskriver flere områder som er relevante. Dette inkluderer klassifisering av virksomheter, inndeling i fareklasser, hydrauliske beregningskriterier, vannforsyning, type vannforsyning, pumper, alarmer og alarmutstyr, skilt osv.

Der NS-EN 12845 (standardorganisasjonen, 2009a) ikke er dekkende kan det i følge veiledningen til byggt teknisk forskrift (Byggkvalitet, 2015) benyttes andre godkjente standarder for vanntåke. For valg av standard refereres det til Forsikringssekskapenes Godkjenningsnevnds veiledning (Godkjennelsesnevnd, 2009).

Den nåværende veiledningen (Godkjennelsesnevnd, 2009) er nokså vag når det gjelder å anbefale standarder som kan erstatte bruken av NS-EN 12845 (standardorganisasjonen, 2009a). I følge FGs veiledning (Godkjennelsesnevnd, 2009) som veiledningen til byggt teknisk forskrift (Byggkvalitet, 2015) viser til skal den amerikanske standarden NFPA 750 (Association, 2015e) benyttes. NFPA 750 dekker ikke alle områder og inneholder blant annet ikke testprotokoller for fullskala tester for ytelse ved brannbekjempelse. I stedet refereres det til standarder som inneholder testprotokoller som oppfyller følgende krav:

- Testprotokollene er basert på en ingeniørmessig evaluering av brannfaren, romforhold og ytelsesmålene for systemet.
- Testprotokollene skal være utviklet, utført og tolket ved internasjonalt anerkjente testlaboratorier.

Det spesifiseres at standardene som er listet ikke er en anbefaling, men kun oppfyller kravene som er gitt. Standardene med testprotokoller og hvilke etater som er ansvarlig for disse finnes i Tabell 20.

| Etat                                       | Standard                                                                |
|--------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| <b>International Maritime Organization</b> | IMO MSC/Circ. 668                                                       |
|                                            | IMO Res. A.800                                                          |
| <b>FM Approvals</b>                        | FM Approvals 5560                                                       |
| <b>Underwriters Laboratories Inc</b>       | ANSI/UL 2167                                                            |
| <b>CEN, Europe</b>                         | CEN/TS 14972                                                            |
| <b>IMO</b>                                 | <i>International Code for Application of Fire Test Procedures, 2012</i> |

Tabell 20: Oversikt over standarder fra ulike etater som nevnes i NFPA 750 (Association, 2015e)

I forbindelse med oppgaven ble en av lederne i forumet som arbeider med FGs nye veiledning kontaktet (Fedøy, 2015). I løpet av våren 2015, altså muligens i løpet av produksjonen av denne oppgaven vil det bli utgitt en revidert versjon av FGs veiledning (Godkjennelsesnevnd, 2009). Den framtidige veiledningen vil gå bort fra henvisningen til standardene nevnt i NFPA 750 og få en langt tydeligere tekst hvor standardene i Tabell 21 anbefales.

| Enhet                                                                                                                                                                                              | Standard                  |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|
| <b>Verband der Schadenversichen eV (VdS, Germany)</b>                                                                                                                                              | VdS 3188                  |
|                                                                                                                                                                                                    | VdS 4001                  |
|                                                                                                                                                                                                    | VdS 2109                  |
| <b>FM Approvals</b>                                                                                                                                                                                | FM Approvals 5560         |
| <b>Underwriters Laboratories Inc</b>                                                                                                                                                               | UL 2167                   |
| <b>BRE Global Ltd</b>                                                                                                                                                                              | LPS 1283-1 <sup>1</sup>   |
| <b>CEN – The European Committee For Standardization</b>                                                                                                                                            | CEN/TS 14972 <sup>2</sup> |
| <sup>1</sup> For testprotokoller refererer denne standarden til DD8458-1 og DD8489-7. Disse er forslag til utkast under utvikling (Development draft) og er ikke godkjente standarder enda.        |                           |
| <sup>2</sup> Dette er en ikke en standard, men en teknisk spesifikasjon. FG vil likestille denne i sin nye veiledning for å oppmuntre til at denne videreutvikles til en felles europeisk standard |                           |

Tabell 21: Oversikt over standarder anbefalt av FG for dimensjonering av vanntåkesystemer og som tilsvarer NS-EN 12845 (Fedøy, 2015)

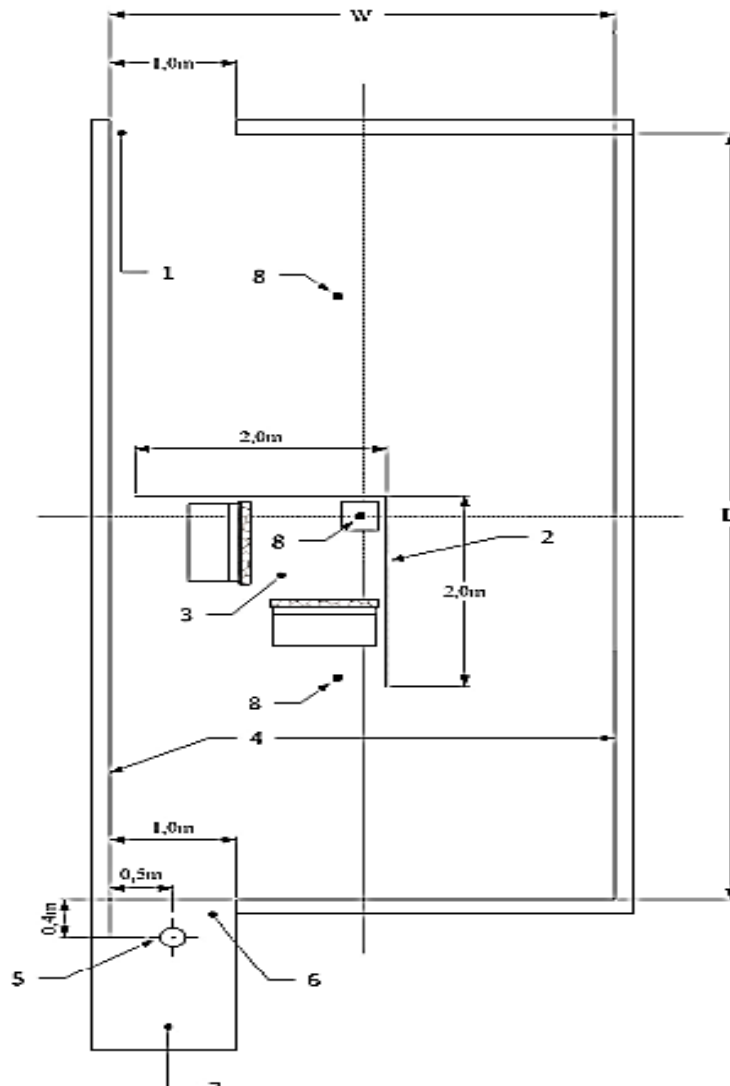
#### 6.4. Fullskala tester for ytelse ved brannbekjempelse

Vanntåkesystemer må som regel gjennom to typer verifiseringstester, fullskala tester og isolerte tester for komponentene (Association, 2015a). Oppgaven vil kun fokuseres på fullskala tester av vanntåkesystemer.

I løpet av de siste årene er det gitt ut en rekke standarder som inneholder ulike testprotokoller. Som nevnt før er det krav om at NS-INSTA 900 serien (Norge, 2013, Norge, 2010, Norge, 2014) må benyttes der den er dekkende. Dette er relevant fordi denne serien inneholder fullskala testprotokoller. I avsnittet om status for verifisering av vanntåkesystemer ble det nevnt at FGs veiledning (Godkjennelsesnevnd, 2009) ikke anerkjenner noen metoder for interpolering av testresultater fra tester i ulike bruksområder. Dette resulterer i at det må være relativt stor likhet mellom det aktuelle bruksområdet og scenarioet beskrevet i testprotokollen.

#### 6.4.1. NS-INSTA 900

Her vil oppgaven gjennomgå testprotokollene for vanntåkedyser gitt i NS-INSTA 900-3 (Norge, 2014) nokså overfladisk for i gi leseren innsikt i innholdet i standarden. Tester av andre komponenter er ikke gjennomgått her på grunn av begrensning i oppgaven, men disse kan finnes i NS-INSTA 900-1 (Norge, 2013) og NS-INSTA 900-2 (Norge, 2010).



Figur 30: Testrom for vanntåkedyser, med brannlast av simulerte møbler plassert midt i rommet (Norge, 2014)

| Nøkkelpunkt | Beskrivelse                                                              |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------|
| 1           | Døråpning nr.1                                                           |
| 2           | 1,2 m høye kryssfinérplater                                              |
| 3           | Simulerte møbler                                                         |
| 4           | Testrommets vegger                                                       |
| 5           | Dyse i døråpningen som er koblet til vannfylte forsyningsrør             |
| 6           | Døråpning nr.2                                                           |
| 7           | Forlengelse av innvendig tak utenfor døråpning                           |
| 8           | Eksempel på små svarte kvadrater som markerer plassering av termoelement |

Tabell 22: Beskrivelse av nøkkelpunkter i (Norge, 2014)



### **Beskrivelse av branntester**

Testprotokollen i NS-EN 900-3 (Norge, 2014) angir et spesifikt testrom med spesifiserte dimensjoner som vises i Figur 30. Beskrivelsene av nøkkelpunktene i Figur 30 finnes i Tabell 22. Høyden fra gulv til tak skal være 2,45 m ± 0,1 m og det innvendige taket i testrommet skal være glatt og horisontalt.

NS-INSTA 900-3 (Norge, 2014) inneholder 5 andre skisser av testrommet med ulike brannscenarier og Figur 30 ble valgt helt vilkårlig. Det presiseres at dimensjonene i testrommet er de samme i alle scenarioene. I de ulike brannscenarioene er brannlasten plassert konsentrert i et hjørne, i midten av rommet eller i en avstand som tilsvarer  $\frac{1}{4}$  av lengdeveggen fra kortveggen. Det er også to testscenarier hvor det kjøres styrt ventilasjon i rommet. Her gjøres en ventilasjonstest for hver døråpning for å kartlegge hvordan brannbekjempelsen påvirkes av trekk i rommet.

Antennelsen skal skje i en trekrybbe (wood crib) som plasseres blant de simulerte møblene med spesifiserte dimensjoner og densiteter. Branntestene skal vare i 30 min etter antennelse av trekrybben, med mindre alle brennbare materialer er slokket eller det kun er trekrybben som opprettholder forbrenning innen 10 min er gått. Vanntrykket i vanntåkedysene skal være det minste som er spesifisert installasjonsinstruksjonene.

### **Begrensninger i NS-INSTA 900**

Testprotokollene i NS-INSTA 900-3 (Norge, 2014) har sine begrensninger når det gjelder fareklasse, brannscenarier, antennelseskilde, testvarighet, testscenario, testrepertisjon og testmålinger. Vanntåkesystemer kan benyttes i flere bruksområder enn de som er representert i testene i denne standarden. Her er det blant annet begrensninger i dimensjoner i rom, hvor takhøyden er gitt og taket skal være horisontalt. Testene tar heller ikke hensyn til tilsetningsstoffer i vanntåken og det er kun én gitt brannlast med mer.

Kort oppsummert gir regelverk og variasjon i bruksområder behov for flere testprotokoller. Disse finnes i andre standarder som kan benyttes i stedet for NS-INSTA 900 serien (Norge, 2013, Norge, 2010, Norge, 2014) der denne ikke er dekkende. Testprotokoller fra ulike standarder vil bli gjennomgått videre i oppgaven.

#### **6.4.2. Alternative fullskala testprotokoller**

Veiledningen til byggteknisk forskrifts (Byggkvalitet, 2015) «§ 11-12. Tiltak for å påvirke rømnings- og redningstider» sier følgende om valg av standard ved dimensjonering av aktive brannsikringstiltak:

*«Aktive bannsikringstiltak må dimensjoneres og utføres i samsvar med relevante dimensjonerings- og produktstandarder. I den grad slike mangler eller ikke er dekkende, kan andre aksepterte dokumenter benyttes»*

Og:

*«Bruk av standarder fra andre land forutsetter at ansvarlig foretak gjør en vurdering av relevans og gyldighet i hvert enkelt tilfelle. Her må prosjekteringsgrunnlaget i standardene benyttes fullt ut»*

Testprotokollene benyttes for å undersøke om et vanntåkesystem har tilstrekkelig evne til å bekjempe brann ved ulike anvendelser, situasjoner og individuell risiko. Det eksisterer mange ulike testprotokoller, men disse er imidlertid ikke direkte sammenlignbare på grunn av ulike tilnærminger i metodene. For å velge riktig testprotokoll er det nødvendig å evaluere følgende forhold:

- Fareklasse
- Brannscenario
- Brannlast
- Antennelseskilde
- Testvarighet
- Variasjon i testprosedyre
- Målinger
- Evalueringskriterier

Testprotokollene stammer fra standarder fra forskjellige land, derfor er noen av begrepene ikke direkte oversettbare selv om de ved første øyekast kan se tilsynelatende like ut. Oppgaven vil forsøke å kommentere og forklare dette der hvor det er gjeldende. Videre i oppgaven vil de ulike kriteriene for valg av riktig testprotokoll bli diskutert. Beskrivelsen av de ulike forholdene er basert på gjennomgangen av en rekke vanntåkestandarder som det finnes en oversikt over i Vedlegg 5. I tillegg er det hentet relativt stor inspirasjon fra International Water Mist Associations undersøkelse av eksisterende testprotokoller (Rothe, 2014).

### *Fareklasser*

For å velge riktig testprotokoll må det bestemmes hvilken fareklasse anvendelsesområdet befinner seg i. Valg av fareklasse har innvirkning på design, installasjon og vannforsyning og ved valg av feil fareklasse kan sprinklersystemet bli feil dimensjonert. Ved underdimensjonering er det mindre sannsynlig at vanntåkesystemet klarer å bekjempe en brann. Dimensjonering basert på feil fareklasse er en av hovedgrunnene til svikt i vanntåkesystemer (Association, 2015d). Overdimensjonering av systemer kan føre til økte kostnader og unøvendige vannskader som følge av større strømningsrate enn nødvendig.

En oversikt over de ulike klassifiseringssystemer som benyttes i testprotokoller som er undersøkt i denne oppgaven finnes i Vedlegg 3. Det er kun beskrevet fareklasser som er relevante for bygninger som oppgaven omhandler og som er hensiktsmessig med tanke på bruksområdet for vanntåke.

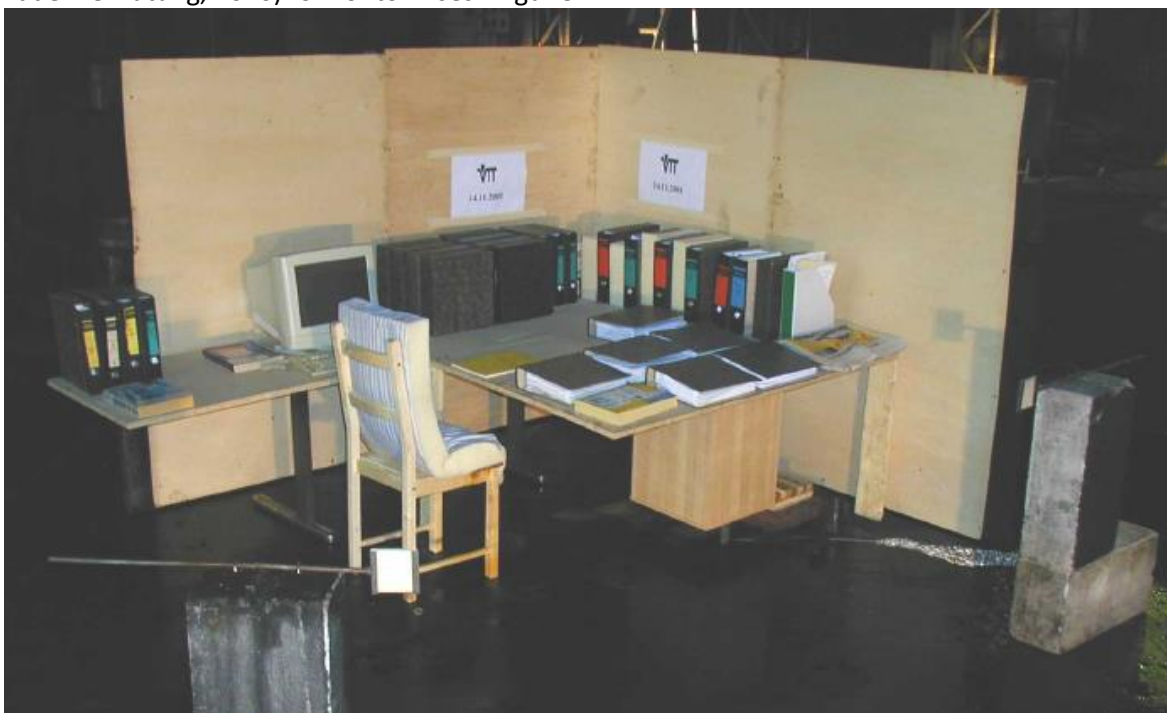
### *Brannscenario*

Typiske bruksområder i testprotokollene kan være for eksempel være et lite rom, et åpent rom eller en korridor. De ulike bruksområdene har brannscenarier som gjenspeiler bruken, typiske eksempler på brannscenarier fra de ulike bruksområdene i testprotokollene finnes i Tabell 23.

| Bruksområde       | Brannscenario             |
|-------------------|---------------------------|
| Lite rom          | 2 køyesenger              |
| Stort rom         | Simulerte møbler          |
| Åpent rom         | 4 sofaer                  |
| Kontorer/verksted | 2 skrivebord              |
| Lager             | Kartonger med kopper      |
| Spesifisert       | Spesifisert brannscenario |

Tabell 23: Oversikt over typiske brannscenario for ulike bruksområder (Rothe, 2014)

Et eksempel på brannscenarioet med skrivebord hentet fra det tyske VdS Schadenverhütung test (Schadenverhütung, 2010) for kontor vises i Figur 31.



Figur 31: Eksempel på brannscenario med skrivebord (Schadenverhütung, 2010)



Figur 32: Brannscenario med esker med kopper (Schadenverhütung, 2011a)

### Brannlast

Tabell 23 viser en rekke brannscenarier som kan si noe om mengden brennbare materialer, altså brannlasten i et testrom. Figur 32 viser et eksempel på en brannlast, henholdsvis en eske med plastkopper hentet fra en test for et lagerlokale.

To identiske brannscenarier trenger ikke nødvendigvis å ha samme brannlast. Ta for eksempel bruksområdet «åpent rom», hvor typisk brannscenario er «4 sofaer». Det finnes utallige typer sofaer i ulike størrelser og materialer. De ulike testprotokollene spesifiserer derfor dimensjoner og materialbruk i de ulike brannscenariene. Eksempel på spesifiserte dimensjoner hentet fra standarden FM 5560 (Global, 2012) fra FM Approvals finnes i Figur 33.

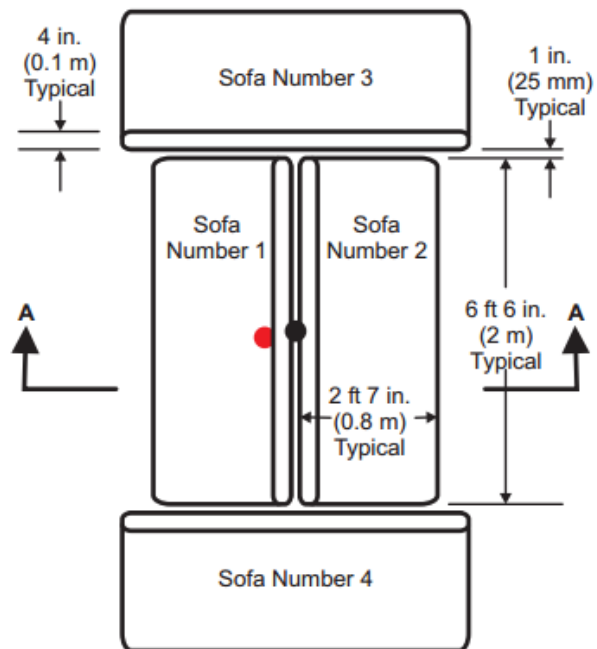
De ulike standardene har forskjellige spesifikasjoner og dermed kan for eksempel brannscenarioet «4 sofaer» få ulikt volum og forskjellig materialfordeling. Volumet avgjør mengden brennbart materiale og materialtype avgjør brennbarhet, evne til flammespredning med mer. Resultatet av dette er ulik brannlast i ett og samme brannscenario, som kan påvirke vanntåkesystemers evne til brannbekjempelse i tester som ved første øyekast ser identiske ut.

### Testvariasjon og repetisjon av test

Én og samme testprotokoll kan ha ulike testscenarier. Dette kan innebære ulik plassering av brannscenarioet, ulike brannscenario, naturlig eller styrt ventilasjon, ulikt antall dyser med mer. Etter å ha gjort endringer i testscenariet kan testen kjøres på nytt, vanntåkesystemet kan testes for en ny situasjon og på den måten sikre en mer pålitelig dimensjonering.

### Antennelseskilde

I testprotokollene benyttes forskjellige antennelseskilder avhengig av hvilket brannscenario som er gjeldende. Antennelseskildene som typisk er benyttet for de ulike brannscenariene finnes i Tabell 24.



Figur 33: Eksempel spesifisering av dimensjoner i brannscenario med 4 sofaer (Global, 2012)

| Brannscenario               | Antennelseskilde                                                                 | Beskrivelse av et eksempel på gjeldende antennelseskilde finnes i følgende standard            |
|-----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>2 køyesenger</b>         | Fiberbord dynket i n-heptan i en plastpose                                       | IMO Resolution A.800 (Organization, 1995)                                                      |
| <b>Simulerte møbler</b>     | Trekrybbe dynket i n-heptane                                                     | IMO Resolution A.800 (Organization, 1995)                                                      |
| <b>4 sofaer</b>             | Fiberbord dynket i n-heptan i en plastpose                                       | IMO Resolution A.800 (Organization, 1995)                                                      |
| <b>2 skrivebord</b>         | Brenner + trekrybbe dynket i n-heptan. Eventuelt trekrybbe dynket i white spirit | NS-EN 45545-2 (standardorganisasjonen, 2013)                                                   |
| <b>Kartonger med kopper</b> | Væskedamsbrann av n-heptan                                                       | IMO Resolution A.800 (Organization, 1995)                                                      |
| <b>Spesifisert</b>          | Brenner                                                                          | NS-EN 45545-2 (standardorganisasjonen, 2013) eller ISO 12952-2 (standardorganisasjonen, 2010b) |

Tabell 24: Oversikt over antennelseskilder som typisk er brukt for ulike brannscenarioer (Rothe, 2014)



Figur 34: Eksempel på en trekrybbe (Arvidson, 2003)

Legg merke til at Tabell 24 viser til standarder som beskriver følgende antennelseskilde. Dette betyr her ikke nødvendigvis at spesifikasjonene gitt i standardene i Tabell 24 samsvarer med spesifikasjonene i testprotokollene.

For å vise at en og samme antennelseskilde kan ha ulike definisjoner er beskrivelsene av trekrybber i standardene FM 5560 (Global, 2012) og DD 8458-1 (BSI, 2010) gjengitt i Tabell 25. En trekrybbe er en rektangulær eller kvadratisk stabel med treplanker som er lagt lagvis og vinkelrett oppå hverandre. Et eksempel på en trekrybbe finnes i Figur 34.

| Standard                                   | FM 5560 (Global, 2012) | DD 8458-1 (BSI, 2010)                    |
|--------------------------------------------|------------------------|------------------------------------------|
| <b>Dimensjoner på trekrybbe, b x h x l</b> | 0,3 x 0,3 x 0,3 m      | 0,05 x 0,34 x 0,305 m                    |
| <b>Dimensjon på lameller, b x h x l</b>    | 0,038 x 0,038 x 0,3 m  | 0,038 x 0,038 x 0,305 m                  |
| <b>Vekt</b>                                | 2,5 – 3,2 kg           | 8,25 ± 0,25 kg (inkludert stålfundament) |

Tabell 25: Eksempel på ulik definisjon av trekrybbe (Global, 2012), (BSI, 2010)

Ulikt volum og densitet av trekrybber gir variasjon i antenneshastighet, forkullingsrate, flammespredning, brannlast med mer (Drysdale, 2011) og kan derfor påvirke utfallet av test for ytelse ved brannbekjempelse. Figur 35 og Figur 36 viser antenneskilden «Fiberbord dynket i n-heptan i en plastpose» som benyttes i en test for hotellrom, henholdsvis med 4 sofaer som brannlast.



Figur 35: Fiberbord dynket i n-heptan i en plastpose (Schadenverhütung, 2011b)



Figur 36: Bildet er tatt fra testen for hotellrom i VdS og her er antenneskilden «Fiberbord dynket i n-heptan i en plastpose» plassert i en av de fire sofaene i brannscenarioet. Denne er omkranset av en rød sirkel i figuren, hvor henholdsvis «Zündquelle» betyr «antenneskilde» på tysk (Schadenverhütung, 2011b)

Kort oppsummert har forskjellige brannscenarioer ulike antenneskilder i testprotokollene. Testprotokollene har også ulike definisjoner av de ulike antenneskildene.

### *Testvarighet*

Testvarigheten i testprotokollene som ble undersøkt i oppgaven er 10 min eller 30 min. Tiden måles enten fra antennelse eller fra aktivering av vanntåkedyser.

### *Testmålinger*

Under testene måles ulike variabler og disse dokumenteres på forskjellige måter. Eksempler på variabler er temperatur, brannskader, gasskonsentrasjon, vanntrykk og vannstrømningsrate.

Videodokumentasjon kan også gi god informasjon om forholdene i testen.

### *Evaluering av resultater*

For å avgjøre om et vanntåkesystem er verifisert av testen sammenlignes resultatene med grenseverdier. Testresultatene kan også eventuelt sammenlignes med et referansesystem. Ved evaluering av resultater må det tas hensyn til hvordan disse er dokumentert. Typiske forhold som kan gi ulike målinger innenfor samme test er:

- Dimensjoner i temperaturmåler
- Måten temperaturmåleren fungerer på
- Plasseringen av temperaturmåleren som benyttes i evalueringen
- Definisjon av brannskader og hvordan disse måles
- Grenseverdier for oksygen

### *Oppsummering av testprotokoller*

Gjennomgangen av noen av variablene i testprotokoller viser at det er individuelle forskjeller som gjør at testene ikke kan sammenlignes direkte. Det må tas en rekke hensyn ved valg av testprotokoll og for å forenkle arbeidet er det i forbindelse med oppgaven laget en oversikt over ulike testprotokoller og deres variasjoner. Oversikten finnes i Vedlegg 5.

#### **6.4.3. Etablering av alternativ fullskala testprotokoll**

Hvis det ikke oppnås å finne en relevant testprotokoll kan det etableres testprotokoller i henhold til veiledningen i Annex B i CEN/TS 14972 (standardorganisasjonen, 2011). Framgangsmåten som vises til her sørger for at testprotokollene lages etter etablerte vitenskapelige- og ingeniørmessige brannbekjempelsesprinsipper og utstrakt anerkjente metoder.

Hensikten med Annex B er å sørge for at testprotokollene utvikles slik at de tar hensyn til evaluering av (standardorganisasjonen, 2011):

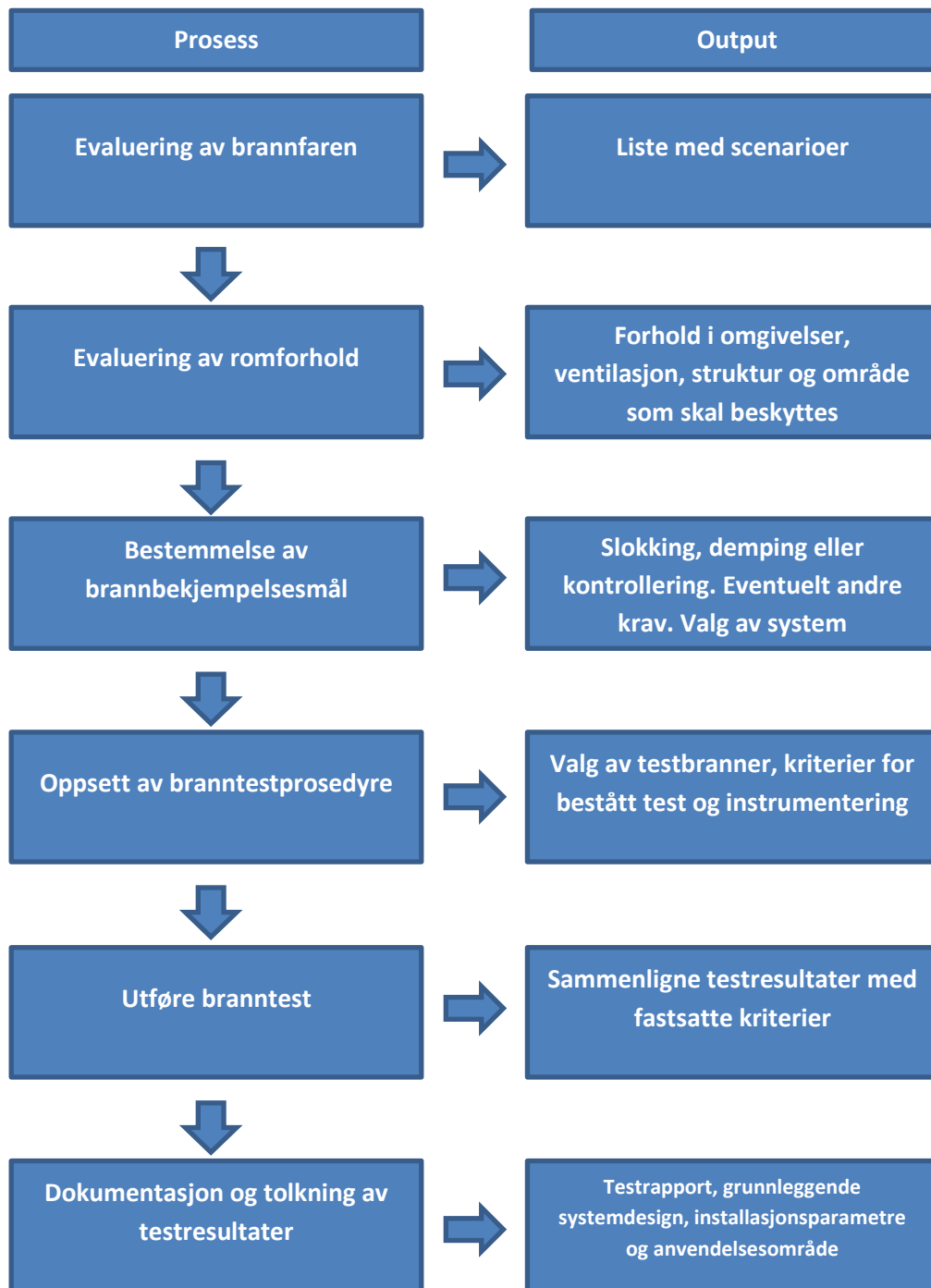
1. Brannfaren, det vil si type brennstoff, plassering, størrelse, hindringer for vanntåken, antennelseskilde og antennelsesprosedyre. Testprotokoller bør være tilpasset en av de spesifikke fareklassene i NS-EN 12845 (standardorganisasjonen, 2009a) , det vil si lav fareklasse, LH eller ordinære fareklasser, OH 1-4.
2. Forholdene i branncellen, det vil si om brannen er ventilasjons- eller brenselkontrollert, volum, luftstrømningsrate for tvungen ventilasjon, dimensjon og retning for naturlig ventilerings.

3. Vanntåkesystemets brannbekjempelsesmål i henhold til strukturell integritet, skader på sensitivt utstyr, røykskade, vannskade, synlighet, antennelighet og forhindring av overtenning. Ingen vanntåkesystemer vil ha 100 % pålitelighet, men vanntåkesystemer som har blitt verifisert gjennom fullskala testprotokoller vil normalt ha liten sannsynlighet for å feile i en reell situasjon. For å sikre høy pålitelighet når brannbekjempelsesmålet er slokking bør vanntåkesystemene testes for flere antennesscenarioer og ved bruk av flere ulike parametre for å finne rekkevidden i systemet.

I tillegg skal testprotokollene utvikles, utføres og tolkes av kvalifiserte branntestlaboratorier. Annex B gir også henvisninger for utførelse og dokumentasjon av testene (standardorganisasjonen, 2011).

Figur 37 viser i grove trekk framgangsmåten ved bruk av Annex B for framstilling av testprotokoll, utførelse, tolkning og dokumentasjon av testresultater.





Figur 37: Flytskjema for etablering av testprotokoll samt utførelse, tolkning og dokumentasjon av testresultater i henhold til Annex B i CEN/TS 14972 (standardorganisasjonen, 2011)

## Del 2: Risikovurdering av brannsikringstiltak ved Moholt 50|50

### 7. Innledning

#### 7.1. Introduksjon til kapitlet

Dette kapitlet inneholder et sammendrag av hva som er gjort og kommet fram til i løpet av risikovurderingen, samt en innledende beskrivelse av hva som skal undersøkes og hvilke forhold som begrenser vurderingen.

#### 7.2. Sammendrag

Hensikten med denne risikovurderingen er å verifisere og underbygge sikkerhet for verdier ved Studentskipnaden i Trondheims, SiTs nye studentboliger på Moholt ved bruk av et vanntåkesystem som aktivt brannsikringstiltak. Det skal opprettes i alt 5 bygg hvor det kun er 2.-9. etasje som undersøkes i denne risikovurderingen. Disse etasjene består av 15 hybelenheter med fellesareal.

SiT har et ønske om bruk av eksponerte massivtreflater i bygningene, noe som påvirker dimensjoneringen og brannforløpet. Det er krav i byggt teknisk forskrift (Byggkvalitet, 2015) om at analysebyggverket skal beholde global bæreevne og stabilitet i et fullstendig brannforløp. Ved brann vil de eksponerte massivtreflatene føre til forkulling og redusert tverrsnitt i den bærende konstruksjonen, slik at den kan miste sin bæreevne og stabilitet. Det skal derfor vurderes om de aktive- og passive tiltakene som er gjort i analysebyggverket er tilstrekkelig for å redusere brannspredning, tilrettelegger for slokking av brann og at sannsynligheten for global strukturell kollaps er tilstrekkelig lav.

For evaluering av sikkerheten er det brukt både kvalitative- og kvantitative analysemetoder. Det har også blitt dratt nytte av kunnskap fra en branntest av en hybelenhet med korridor som er gjort i forbindelse med kartleggingen av brannsikkerheten ved Moholt 50|50 (Hox, 2015). For evaluering av pålitelighet i vanntåkesystem er det benyttet en komparativ feiltreanalyse. Det er også utført en sensitivitetsanalyse som kartlegger hvilke komponenter som er mest kritisk med tanke på pålitelighet ved aktivering.

I denne risikovurderingen er det gjort et forsøk på å estimere sannsynlighet for global strukturell kollaps ved alvorlig brann i analysebyggverket ved å ta hensyn brannspredning, sannsynlighet for overtenning, areal og flere andre faktorer. Sannsynligheten for antennelse og svikt i barriærer er kartlagt og kombinert med sannsynligheten for feil i analysebyggverket ved brann for å estimere den strukturelle brannsikkerheten. Risikovurderingen har vist at brannsikkerheten ved bruk av vanntåkesystemer kan være tilstrekkelig dersom det fokuseres på pålitelighet i enkelte komponenter og at oppbygningen av systemet legger grunnlag for tilstrekkelig pålitelighet. Det er dessuten også viktig å forhindre relativt stor brannspredning. Eksponert massivtre kan føre til en mer dimensjonerende brann etter overtenning enn ved bruk av ubrennbare overflater, derfor er det viktig å redusere sannsynligheten for overtenning. Antennelsesfaren og mengde variabel brannlast bør også holdes på nivået som er tilsiktet i analysebyggverket. En kvantitativ analyse av effekten av innføring av selvslukkende branndører har vist at sannsynligheten for feil ved brann kan reduseres betydelig selv om påliteligheten i én enkelt dør ikke er

så stor. Brannimpregnering av eksponerte massivtreflater kan forhindre produksjonen av pyroliserende gasser fra treverket og redusere brannspredningsfaren betraktelig.

### 7.3. Introduksjon

SiT er byggherre for 5 bygninger i 9 og 10 gjeldende etasjer ved Moholt studentby. Til sammen skal disse byggene inneholde 632 hybelenheter, leiligheter, vaskekjeller, postrom med mer. Denne risikovurderingen vil kun omfatte hybelenhetene i 2.-9. etasje, som har lik planløsning i hver etasje. En etasje består av 15 hybelenheter som omkranser et fellesareal med kjøkken og stue. Kjeller og 1. etasje oppføres i betongkonstruksjon og 2.-9. etasje utføres med bærende vegg- og dekkelementer i massivtre.

I følge byggt teknisk forskrift (Byggkvalitet, 2015) skal bygninger over 4 etasjer opprettholde sin globale bæreevne og stabilitet i det fullstendige brannforløp. Ved bruk av innvendige eksponerte overflater i tre antas det at bygget brenner til det kollapser med mindre det gjøres tiltak for å stoppe en brann. Det vil si manuel slokking utført av brukere, automatisk slokkeanlegg eller brannvesen.

I veiledningen til byggt teknisk forskrift (Byggkvalitet, 2015) er det ved bruk av ubrennbare overflater, A2-s1,d0 tilstrekkelig å dimensjonere med en bæreevne på 90 min. På dette grunnlaget antas det at 90 min er det lengste tillatte fullstendige brannforløpet og at bæreevnen dimensjoneres etter dette, samt at brannen må slokkes innen 90 min.

For at en brann skal kunne slokkes innen 90 min må brannspredningen begrenses slik at det vil være mulig å utføre for brannvesenet (Buchanan, 2002). Risikovurderingen skal derfor gi svar på om valgte aktive- og passive brannsikringstiltak i analysebyggverket gir tilstrekkelig brannsikkerhet med tanke på brannspredning, slokking og fare for global strukturell kollaps. Det vil kun fokuseres på materielle verdier. Risikoevaluering skal også benyttes som et middel for å oppnå en konklusjon på problemstillingen i oppgaven, det vil si hvordan å etablere et pålitelig forhold mellom aktiv- og passiv brannsikring ved bruk av vanntåkesystemer i høye trehus.

## 8. Rammebetingelser

### 8.1. Introduksjon til kapitlet

I dette kapitlet beskrives hvilke rammebetingelser som påvirker planlegging og gjennomføringen av risikovurderingen. Disse betingelsene deles inn i eksterne- og interne rammebetingelser, samt rammebetingelser i selve analysebyggverket.

### 8.2. Eksterne rammebetingelser

De eksterne rammebetingelsene er gitt av myndighetskravene i Plan- og Bygningsloven:

- Byggteknisk forskrift (TEK10) (Byggkvalitet, 2015) sist endret 01.01.2015
- Veiledningen til byggteknisk forskrift (VTEK) (Byggkvalitet, 2015) sist endret 02.02.2015

### 8.3. Interne rammebetingelser

#### 8.3.1. Strategier og mål

SiT har over 50 års erfaring med drift av studentboliger og har krav basert på erfaring som stilles ut over minstekravene som er gitt i veiledningen (Byggkvalitet, 2015), så langt det er naturlig og praktisk gjennomførbart:

- SiT har et ønske om utstrakt bruk av tre i prosjektet, som et ledd i videreutvikling av treprosjekter i den historiske og moderne trebyen Trondheim. Det er også et ønske å fremheve tre som et miljøvennlig og framtidsrettet bygningsmateriale med svært positive egenskaper i forhold til både indre- og ytre miljø og at dette samtidig kan kombineres med god brannsikkerhet.
- For å tilrettelegge for et positivt bomiljø har SiT lagt vekt på at kommunikasjonen mellom hybelenhetene og fellesareal i hver etasje skal være tilnærmet som i en boligsituasjon.

#### 8.3.2. Brukere av risikovurderingen

Risikovurderingen er en del av en masteroppgave ved studiet Bygg- og miljøteknikk ved instituttet for bygg, anlegg og transport, Se 1.6.1 - Målgruppe.

#### 8.3.3. Områder som skal beskyttes

Analysen er begrenset til å vurdere brannsikkerheten i studentbyggene fra 2.-9. etasje og omfatter sikkerhet for verdier.

#### 8.3.4. Driftsorganisasjon og forutsatt aktivitet i det ferdige bygget

Denne risikovurderingen er kun brukt som case i en masteroppgave og det forutsettes derfor ikke at driftsorganisasjonen ved SiT viderefører de strategier, rutiner og regler som utledes i denne risikovurderingen.

#### 8.4. Rammebetingelser ved analysebyggverket

Analysebyggverkene har 9 eller 10 tellende etasjer og havner derfor i brannklasse 3 eller 4 (Byggkvalitet, 2015) hvor bruk av ubeskyttet massivtre ikke er en preakseptert løsning. For nærmere detaljer, se 4 - Branndimensjonering i høye trehus.

I «§ 11-17. Tilrettelegging for rednings- og slokkemannskap» i byggt teknisk forskrift (Byggkvalitet, 2015) kreves det at slokkemannskap må ha god tilgang til brann med slokkeutstyr. Veiledningen (Byggkvalitet, 2015) spesifiserer videre at tilgjengeligheten for slokkemannskaper er preakseptert dersom øverste gulv ikke er høyere enn 23 m. Øverste gulv ved Moholt 50|50 er 24,2 m.

Det antas at høydebegrensningen har med maksimal rekkevidde i de lokale brannvesens høyderedskaper å gjøre. Alle høyderedskapene til Trondheim Brannvesens har større rekkevidde enn 2,47 m og kan derfor utføre redning og slokking i øverste etasje i alle tilfeller (Denstad, 2015). På grunnlag av dette anses kravet fra byggt teknisk forskrift (Byggkvalitet, 2015) å være oppfylt. Tilgjengelighet for brannvesen er allerede kartlagt i SiTs prosjekteringsmateriale (Denstad, 2015, Magnusson, 2015) og vil derfor ikke analyseres videre i denne risikovurderingen.

Studentarealene har 15 hybelenheter som ligger rundt et fellesareal i hver etasje. Slokking utført av brannvesen kan foregå via innvendig trapp, samt via fellesarealet til en utvendig trapp.

## 9. Planlegging

### 9.1. Introduksjon til kapitlet

Denne delen av risikovurderingen omfatter planlegging i forkant av selve analysen. Dette innebærer å redegjøre for hvem som skal utføre analysen og hvordan utførelsen er organisert. I tillegg skal det fastsettes hva som skal vurderes og hvilke metoder som skal benyttes for dette.

### 9.2. Generelt

Analysebyggverket er beskrevet i en tidligere brannteknisk risikovurdering (Magnusson, 2015, Denstad, 2015) fra SiT og beskrivelsen vil bli benyttet i denne risikovurderingen. Det er imidlertid gjort endringer i beskrivelsen av analysebyggverket for å tilpasse risikovurderingen til problemstillingen i oppgaven. Sprinklersystemet er byttet ut med et vanntåkesystem og i tillegg er det ikke benyttet gipskledning i bærende vegger og himling (hovedbærekonstruksjonen) i hybelenhet og fellesareal, med unntak av baderom.

Risikovurderingen og medfølgende analyse er utført selvstendig, men har latt seg inspirere av to dimensjonerende brannscenarier fra tidligere brannteknisk risikovurdering (Magnusson, 2015, Denstad, 2015). Det spesifiseres at årsaker, konsekvenser, risiko med mer som følge av disse brannscenariene er blitt analysert selvstendig i forbindelse med risikovurderingen i denne oppgaven. Der risikovurderingen har latt seg inspirere eller har tatt materiale fra tidligere utført arbeid vil dette bli kommentert.

### 9.3. Mandat

SiT som er byggherre for Moholt 50|50 har godkjent at prosjektmateriale blir brukt som case i denne oppgaven.

Prosjektet omfatter 5 boligbygninger i 9 og 10 etasjer hvor det finnes studentboliger i alle bygg i 2.-9. etasje. Analysen omfatter kun de sistnevnte etasjene. Byggene har bærende vegg- og dekkelementer i massivtre og innvendige eksponerte massivtreflater i de relevante etasjene. Kjeller og 1. etasje vil ha bærende konstruksjon i betong.

Hensikten med risikovurderingen er å etablere et brannsikkert forhold mellom aktive- og passive brannsikringstiltak ved bruk av vanntåkesystemer i det relevante bygget. Dette for å oppnå et akseptabelt sikkerhetsnivå for verdier som innebærer å begrenset brannutvikling og brannspredning, at brannen slokkes i løpet av 90 min og at risikoen for global strukturell kollaps er tilstrekkelig lav.

Risikoanalysen skal utføres av forfatter av oppgaven.

### 9.4. Organisering

Forfatter av oppgaven er formell leder for gjennomføring av risikovurderingen.

Prosjekteringen følger byggt teknisk forskrift (Byggkvalitet, 2015) og innebærer analyse av et byggverk i brannklasse 3 eller 4 med fravik fra preaksepterte ytelser når det gjelder brennbare overflater i vegger

og himling. Arbeidsgruppen ska i følge NS 3901 – Krav til risikovurdering av brann i byggverk (Norge, 2012) bestå av minst 3 personer.

På grunn av oppgaveform vil det ikke være mulig å utføre oppgaven i en arbeidsgruppe på minst 3 personer og analysen vil derfor kun utføres av forfatter av oppgaven.

## 9.5. Problem- og målformulering

Hovedmålet med risikoanalysen er å kunne bidra til et svar på problemstillingen i oppgaven, det vil si hvordan å etablere et forhold mellom aktiv- og passiv brannsikring ved bruk av vanntåkesystem.

Risikovurderingen og oppgaven er begrenset til å omfatte sikkerhet for verdier.

Sikkerheten for verdier skal estimeres ved å analysere følgende forhold:

1. Brannutvikling og brannspredning
2. Slokking
3. Sannsynlighet for global strukturell kollaps

I risikovurderingen skal det undersøkes om et massivtrebygg av denne typen kan motstå et fullstendig brannforløp ved bruk av et vanntåkesystem som aktiv brannsikring. Dette innebærer også å analysere mulige utfall hvor vanntåkesystemet svikter.

For at et bygg i brannklasse 3 eller 4 skal kunne motstå et fullstendig brannforløp skal det bærende hovedsystemet i følge «§ 11-4. Bæreevne og stabilitet» i byggteknisk forskrift (Byggkvalitet, 2015) dimensjoneres for å kunne opprettholde global bæreevne og stabilitet gjennom et fullstendig brannforløp, slik dette kan modelleres.

## 9.6. Valg av analysemodell

I henhold til NS 3901 - krav til risikovurderinger av brann i byggverk (Norge, 2012) kan analysen utføres på to måter:

- Risikoanalyse
- Komparativ analyse

I denne risikoevalueringen skal det utføres en risikoanalyse som skal initierende hendelser og konsekvenser og tilhørende sannsynligheter skal identifiseres og sammenstilles. Analysen skal utføres både kvalitativt og kvantitativt.

## 9.7. Valg av analysemetoder og beslutningskriterier

### 9.7.1. Beslutningskriterier

Akseptgrensene for risiko vil være avhengig av gjeldende verdier i samfunnet og virksomhet. For å vurdere om en risiko er akseptabel kan det tas utgangspunkt i normer, erfaring, krav fra myndigheter, standarder og lignende.

Risikoanalysen skal evaluere brannsikkerheten for verdier med tanke på brannspredning, slokking og global strukturell kollaps. Unødvendig stor brannspredning vil vanskeliggjøre slokking og må derfor forhindres. For å avgjøre hva som er «unødvendig stor» brannspredning benyttes GAMAB-prinsippet (Rausand and Utne, 2009), som innebærer at brannspredningen i analysebyggverket skal sammenlignes med sammenlignbare, eksisterende bygg.

Det tas derfor utgangspunkt i veiledningen til byggt teknisk forskrift (Byggkvalitet, 2015). Her er det preakseptert å benytte ubrennbare overflater for analysebyggverket, og derfor velges følgende risikoakseptkriterie.

1. Brannspredningen skal være tilnærmet lik en situasjon med ubrennbare overflater

Analysebyggverket befinner seg i brannklasse 3 eller 4 hvor bruk av brennbare overflater ikke er preakseptert i følge veiledningen til byggt teknisk forskrift (Byggkvalitet, 2015) og dermed oppstår det fravik. «§ 11-4. Bæreevne og stabilitet» i byggt teknisk forskrift (Byggkvalitet, 2015) setter samtidig krav om at et bygg i brannklasse 3 og 4 skal ha tilstrekkelig bæreevne og stavbilitet i det fullstendige brannforløp slik dette kan modelleres. På grunnlag av dette kravet og at den bærende konstruksjonen vil forkulle fullstendig ved en alvorlig brann som ikke stoppes er brannslokking helt nødvendig.

I veiledningen til byggt teknisk forskrift (Byggkvalitet, 2015) skal et bygg tilsvarende analysebygget med ubrennbare overflater dimensjoneres for 90 min brann. Derfor antas det at det fullstendige brannforløpet må reduseres til maksimalt 90 min. Oppsummert resulterer dette i det andre risikoakseptkriteriet:

2. Brannen må slokkes innen 90 min

Begrenset brannspredning og slokking av brannen er nødvendig for å forhindre global strukturell kollaps. Det er imidlertid også nødvendig å kvantifisere sannsynligheten for dette for å verifisere at sikkerheten er tilstrekkelig. Som krav til brannsikkerhet stilles derfor det tredje og siste risikoakseptkriteriet:

3. Sannsynligheten for at en brann skal føre til global strukturell kollaps,  $p_f$  (failure fire) skal være mindre enn  $7,23E-05$

Verdien  $7,23E-05$  anses som tilstrekkelig lav sannsynlighet for global strukturell kollaps i boka «Implementation of Eurocodes – Handbook 5» (Project, 2005), som danner grunnlaget for de forenklede metodene i Eurokode 1 del 1-2 (standardorganisasjonen, 2008).

### 9.7.2. Analysemetoder

På grunn av kompleksitet må verifisering av brannsikkerheten ved bruk av aktive- og passive brannsikringstiltak gjøres ved både kvalitativ- og kvantitativ analyse. Bygget skal ha tilstrekkelig brannsikkerhet i henhold til verdier som innebærer å analysere brannutvikling og brannspredning, slokking og sannsynligheten for global strukturell kollaps. Mangel på pålitelighetsdata og statistikk for vanntåkesystemer gjør at bruken av kvantitative metoder er noe begrenset. Det vil derfor gjøres litteratursøk på metoder som er relevante og mulige å ta i bruk underveis i utføringen av risikoanalysen.



Dette kan innebære:

- Feiltreanalyse
- Statistiske beregninger
- Hendelsestre
- Bow-tie diagram
- Bruk av erfaringsbasert statistikk fra lignende systemer

## 9.8. Forenklinger

### 9.8.1. Design, installasjon og vedlikehold

#### *Vanntåkesystem*

Vanntåkesystemer må verifiseres gjennom fullskala branntester, noe som ikke lar seg gjøre i denne risikovurderingen på grunn av mangel på kompetanse og ressurser, se 6 - Verifikasjonsmetoder ved bruk av vanntåkesystemer. For rom som skiller seg fra de typiske testrommene i testprotokollene i Vedlegg 5, må det også opprettes egne testprotokoller.

For å avgjøre om testresultater fra et bruksområde kan benyttet for et annet bruksområde med nokså like parametre kreves faglig ekspertise. Forfatter har ikke kompetanse til å interpolere testresultater fra lignende tester, eller avgjøre kvalitativt om vanntåkesystem kan implementeres ved bruk av eksisterende testresultater for svært like bruksområder.

I denne risikoanalysen antas det derfor at vanntåkesystemet vil kunne slukke, eller kontrollere og dempe en brann slik at brannvesen kan fullføre slokkingen. Det antas at det på forhånd er verifisert via en fullskala test og at vanntåkesystemet er dimensjonert, installert og vedlikeholdt etter en relevant standard.

### 9.8.2. Pålitelighet

På grunn av mangel på pålitelighetsdata for vanntåkesystemer er komponentdata hentet fra liknende utstyr, spesielt sprinklersystemer. Pålitelighetsdataene som er benyttet tar ikke hensyn til operasjonstiden i vanntåkesystemet, vedlikeholdsintervall eller menneskelig innblanding etter aktivering.

### 9.8.3. Redundans

Det antas basert på tidligere brannteknisk risikovurdering (Denstad, 2015) at global strukturell kollaps vil forhindres inntill mer enn ett dekke og én vegg av massivtre mister sin bæreevne.

## 9.9. Datarunnlag

### 9.9.1. Tegninger og dokumenter fra SiT

I forbindelse med Moholt 50|50 prosjektet er det allerede utført en risikoanalyse. Alle konstruksjonstegninger, beskrivelser av bygget og forhold i henhold til brannvesen er hentet fra «Moholt 50|50 Studenttårn A,B,C,D,E Brannkonsept» (Magnusson, 2015) og «Moholt 50|50 Studenttårn A,B,C,D,E Brannteknisk Risikovurdering» (Denstad, 2015).

### 9.9.2. Fullskala branntest

En fullskala branntest av en representativ hybelenhet er utført ved SP - Fire Research i desember 2014. I risikoanalysen er et benyttet data fra rapporten «Branntest av Massivtre» (Hox, 2015) som er laget i forbindelse med forsøket. Forfatter av oppgaven var til stede under forsøket.

### 9.9.3. Standarder og litteratur

Statistikk for ulike brannsikringstiltak og metode for beregning av sannsynlighet for global strukturell kollaps ved bruk av automatiske slokkeanlegg er hentet fra «Implementation of Eurocodes – Handbook 5» (Project, 2005). Det er valgt å ta utgangspunkt i denne håndboka fordi den gjennomgår grunnlaget for de forenklede metodene som er gitt i Eurokode 1 del 1-2 (standardorganisasjonen, 2008).

For å sammenligne temperaturrene fra testresultatene (Hox, 2015) er formlene for standard temperaturtid kurve fra Eurokode 1 del 1-2 (standardorganisasjonen, 2008) benyttet.

For konstruksjon av feiltreene i Figur 49 og Figur 50 er det benyttet informasjon om vanntåkesystemer som ble funnet i litteraturstudiet, henholdsvis fra «An Independent Guide on Water Mist Systems for Residential Buildings» (Williams and Jackman, 2006). Det er i tillegg brukt eksempler fra ulike rapporter for risikoevaluering av sprinklersystemet (Commission, 2008, Spyrou, 2011, Moinuddin et al., 2008).

I den komparative feiltreanalysen basert på feiltreene i Figur 49 og Figur 50 benyttes metoden beskrevet i artikkelen «Water Mist Fire Protection Analysis» (Xu and Fuller, 2013). Denne brukes for å finne påliteligheten for aktivering av vanntåkesystemer ved å sammenligne måten et vanntåkesystem og et referansesprinklersystem er bygd opp. Artikkelen er skrevet for FM Global som er et forsikringsselskap som står bak vanntåkestandard FM 5560 (Approvals, 2012) og som er anerkjent via byggt teknisk forskrift (Byggkvalitet, 2015). Metoden ble valgt etter å ha kontaktet en av hovedpersonene bak Forsikringsselskapenes Godkjennelsesnevnds nye veiledning (Fedøy, 2015)

### 9.9.4. Statistikk

All data for pålitelighet i komponenter er hentet fra rapporten «Effectiveness of Fire Safety Systems for Use in Quantitative Risk Assessments» fra New Zealand Fire Service Commission (Commission, 2008). Dataene her er hentet fra diverse anerkjente kilder. Verdiene av pålitelighet symboliserer sannsynligheten for feiling innenfor en vedlikeholdssyklus, eller sannsynligheten for menneskelig feil og utstyrsfeil. Påliteligheten er hentet fra komponenter som er benyttet i ulike systemer og er i rapporten (Commission, 2008) benyttet for å estimere påliteligheten i ulike sprinklersystemer. Statistikken er altså ikke hentet fra komponenter i vanntåkesystemer.

Pålitelighetene for hver komponent er angitt som en forventet verdi, samt en høy og lav grenseverdi basert på en triangulærfordeling. Det er antatt at sprinkler- og vanntåkesystemet er riktig dimensjonert, installert og vedlikeholdt. En oversikt over den benyttede pålitelighetsdataen finnes i Vedlegg 7. Verdier for lateral brannspredning i eksponerte trevegger er hentet fra artikkelen «Predicting Fire Growth Involving Interior Finish Materials Including the Effects of Lateral Flame Spread and Layer Heating» (Lattimer and Beyler, 2003). Artikkelen er publisert på «The National Institute of Standards and Technology» sine nettsider.

## 10. Risikoanalyse

### 10.1. Introduksjon til kapitlet

Dette kapitlet omfatter risikoanalysen i risikovurderingen. Her skal initierende hendelser, konsekvenser og sannsynligheter identifiseres og sammenstilles. På grunn av fravik fra preaksepterte ytelser i henhold til kravet om ubrennbare overflater i brannklasse 3 er det utført en kvalitativ- og kvantitativ analyse av hvorvidt et vanntåkesystem er tilstrekkelig pålitelig i henhold til å forhindre strukturell kollaps. Samt om det kan oppfylle kravene som er gitt i byggteknisk forskrift (Byggkvalitet, 2015).

Beskrivelsene av analysebygget er hentet fra prosjektmateriale fra SiT (Magnusson, 2015, Denstad, 2015). Der det er brukt andre kilder vil disse bli referert til. Det er her beskrevet forhold som påvirker den strukturelle brannsikkerheten og etableringen av et vanntåkesystem.



Figur 38: Studentbygg med 9 etasjer ved Moholt 50|50 (Hox, 2015)

### 10.2. Beskrivelse av analysebyggverket

#### 10.2.1. Bæresystem

De fem studentblokkene bygg A-E får 9-10 etasjer. 1. etasje og kjeller vil ha bærende konstruksjon i betong mens 2.-9. etasje, som er relevant for denne risikovurderingen har bærende vegg- og dekkelementer i massivtre. Alle vegger og dekker i massivtre som er relevante for oppgaven er bærende, derfor skilles det ikke mellom hoved- og sekundærbærende konstruksjoner. Et eksempel på bygg A-E er skissert i Figur 38.

Alle vegger og dekker er stabiliserende skiver som opptar horisontallaster fra vind og forankres i betongkonstruksjonen i de to nederste etasjene. Bæremessig antas det at bygget fremdeles vil stå i en ulykkestilstand hvor ett vegg- og dekkelement mister bæreevnen på grunn av brann (Denstad, 2015). Bygget vil fremdeles ha global bæreevne og stabilitet på grunn av at kreftene omfordes til den tilstøtende konstruksjonen, en såkalt redundans av krefter.

### 10.2.2. Arealer og virksomhet

2.-9. etasje er lik i alle bygninger og hver av disse etasjene inneholder 15 studenthybler med felles kjøkken og fellesarealer. I følge «§ 11-8. Brannceller» i veiledningen til byggt teknisk forskrift (Byggkvalitet, 2015) er det krav om å dele boenheter inn i egne brannceller. Boenheter kan for eksempel være hybelleiligheter eller lignende og innehar alle nødvendige funksjoner. Hybelenhetene i hver etasje inneholder ikke alle nødvendige funksjoner hver for seg, derfor regnes hver etasje som én boenhet og dimensjoneres som én branncelle.



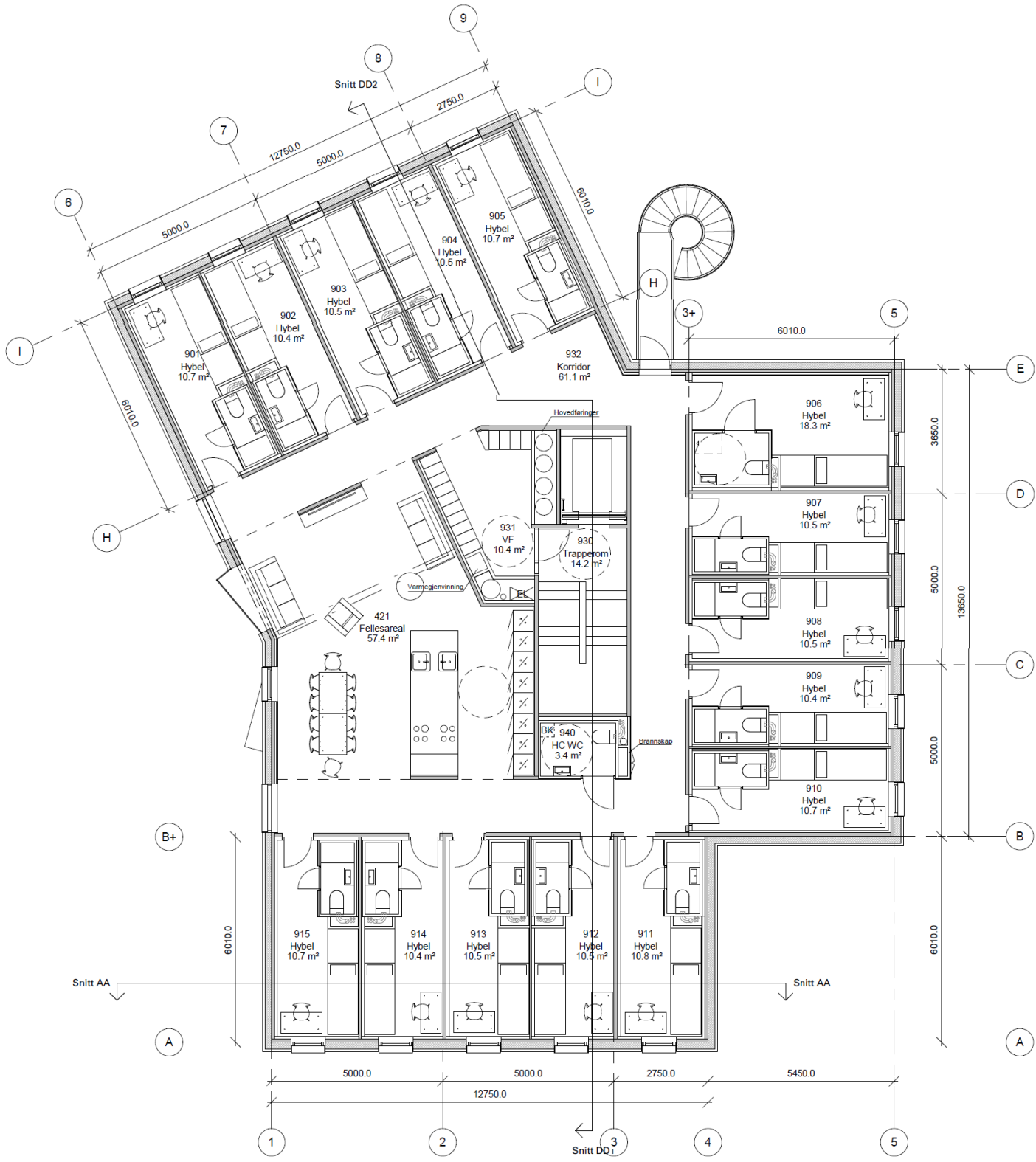
Figur 39: Illustrasjon av korridor mot utvendig trapp (Denstad, 2015)

Brannkonseptet gjelder for den spesifiserte virksomheten i bygningene i en normal driftssituasjon. Studentboligene skal ikke leies ut som hotell eller vandrehjem.

### 10.2.3. Planløsning

Hybelenhetene i 2.-9. etasje i bygg A-E har lik innredning med garderobeskap, seng, stol og skrivepult, se planløsning i Figur 40. I hver etasje er hybelenheten nærmest utgangsdør til innvendig trapp tilpasset rullestolbruker. Alle 15 hybelenheter har egne bad og deler kjøkken og fellesareal.

Det er tilgang til en innvendig- og en utvendig trapp i hver etasje. Den utvendige trappen har hvilerepos i plan 5 som ligger skjermet mot stråling, brann og røykgasser. Trappen vil være tilgjengelig for redningsmannskaper i hele brannforløpet for aktuelle brannscenarier. I hvilereposet er det gjort ekstra plass for å forbedre forholdene for hvile eller for å forenkle et eventuelt møte mellom brannvesen og redningspersonell. En illustrasjon av korridor mot utvendig trapp finnes i Figur 39. Den utvendige spiraltrappen er illustrert i Figur 38. Innvendig trapp er utført som Tr1-trapp med trykksatt stigeledning og uttak i hver etasje. Det er selvlukker og økt krav til brannmotstand på dør til trapperommet (EI<sub>2</sub>60-CS<sub>a</sub>).

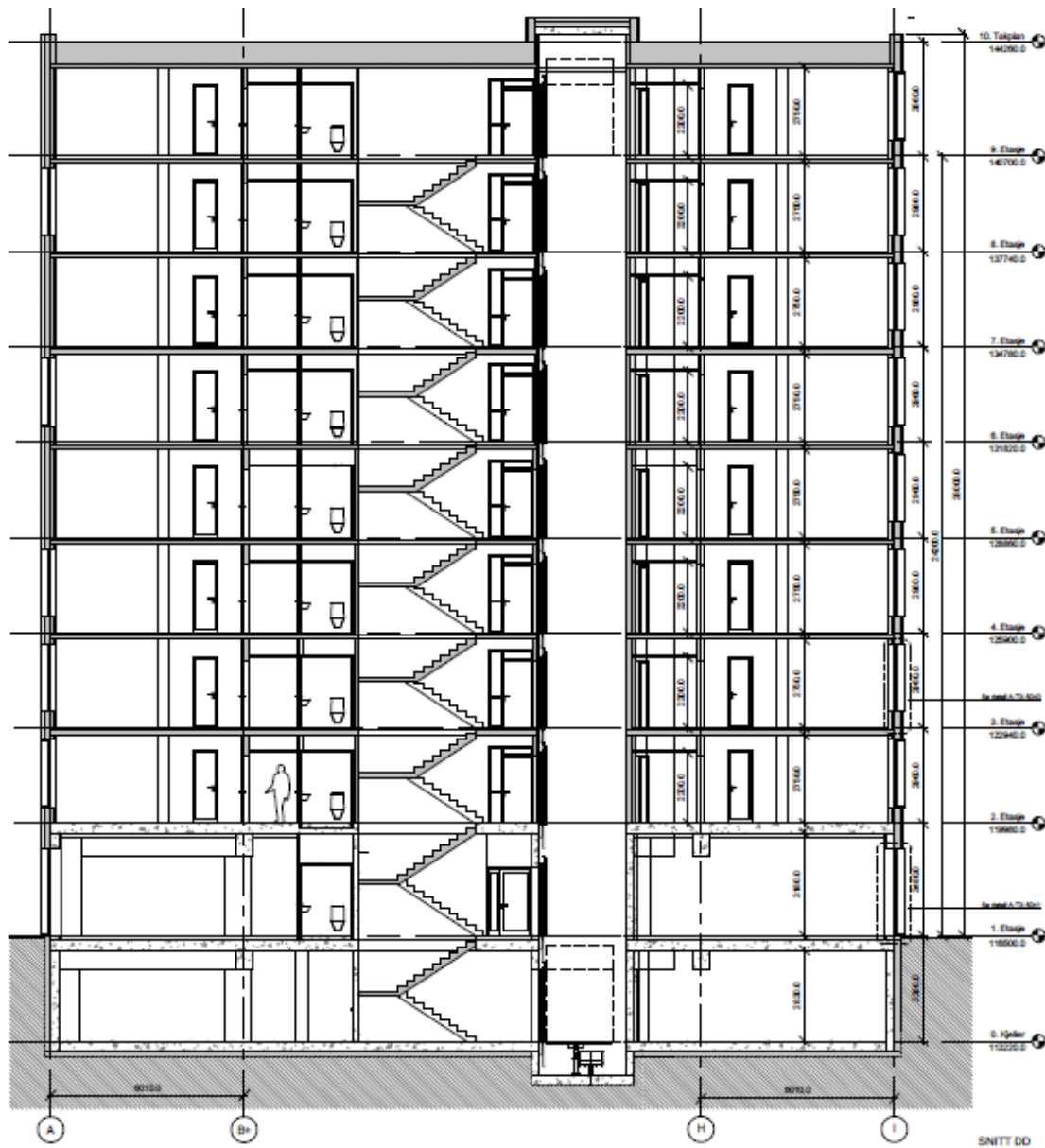


Figur 40: Planløsning for 9. etasje (Magnusson, 2015)

#### 10.2.4. Høyde

Blokkene har en gesimshøyde på 27,1 m og klassifiseres som høye byggverk (Byggkvalitet, 2015). Etasjehøyden i 2.-9. etasje og er 2,75 m. Ett av byggene A-E har hybelleilighet i kjeller og får derfor en ekstra tellende etasje (Byggkvalitet, 2015), det vil si totalt 10 etasjer. Selv om byggene er definert med ulikt antall etasjer vil de være like høye. 10. etasje vil derfor ikke omtales videre i risikovurderingen. Avstand fra terreng til gulv i 9. etasje er 24,2 m.

Et typisk vertikalsnitt av bygg A-E finnes i Figur 41. Legg merke til at kjeller og første etasje har bærende konstruksjon i betong.



Figur 41: Typisk vertikalsnitt av bygg A-E. Betongkonstruksjonen er markert med hvitt fyll og små grå trekantfigurer (Magnusson, 2015)



### 10.2.5. Brannenergi

#### *Hvilken brannenergi finnes i det aktuelle bygget*

Brannenergi består av det brennbare innholdet i branscellen, det vil si variabel brannenergi og den brennbare delen av konstruksjonen, altså permanent brannenergi. Med eksponerte overflater i massivtre vil brannenergien i studentboligene potensielt være veldig stor dersom disse tar fyr. Den totale brannenergien er derfor avhengig av brannforløpet, forkullingsdybden og dermed forkullingshastigheten i massivtre i dimensjonerende brannscenarier.

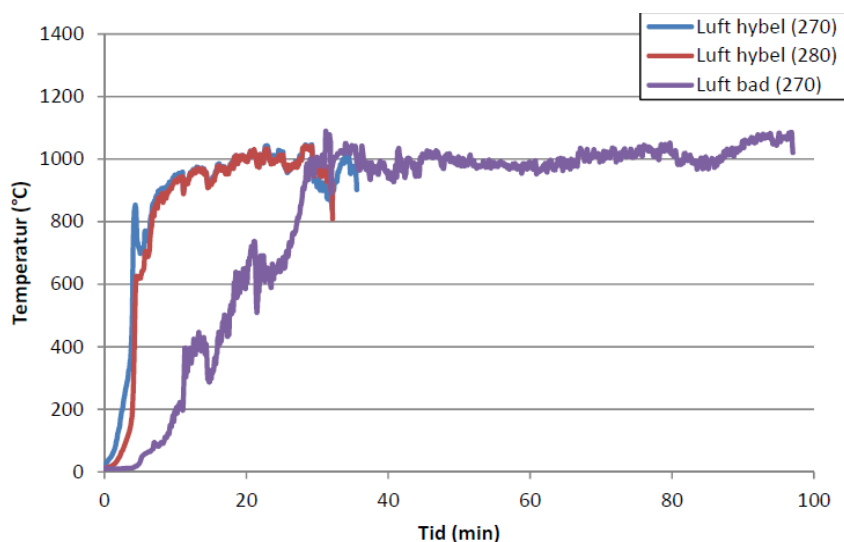


Figur 42: Oversikt over plassering av variabel brannenergi i hybelenhet i brann testen utført av SP Fire Research (Hox, 2015)

#### *Branntest utført av SP Fire Research*

For å få økt kunnskap om brannutviklingen i bygninger av massivtre ble det gjennomført en branntest av en representabel hybelenhet uten aktive sprinkler ved SP Fire Researchs laboratorium i Trondheim, kalt «Test 2» (Hox, 2015).

Testen symboliserte en situasjon hvor begge sprinklerne i hybelenheten sviktet, men med to operative sprinkler i korridor. Testrommet besto av hybelenheten som vises i Figur 42 og deler av utvendig korridor. Hybelenheten hadde gipskledning på en kortvegg (se rundt vindu i Figur 42) og en langvegg (veggen som er delvis skjult bak pallene til høyre i Figur 42). Det var også gipskledd rundt badet og døra inn til badet kan ses fremst til høyre i figuren.



Figur 43: Oversikt over temperaturer i hybelenheten i Test 2, hvor tallene i parentes markerer temperaturmålerens høyde over gulv i cm. Grafen viser at temperaturmålerene i hybelen måler nokså like målinger. Temperaturen på badet stiger saktere men når samme temperatur som de to målerene i hybelen ved rundt 30 min (Hox, 2015)

Ut fra undersøkelser og erfaringer fra SiT har Rambøll som er prosjekterende part i dette prosjektet beregnet en sannsynlig variabel brannenergi på 652 M/m<sup>2</sup> gulvareal (Denstad, 2015). Det er også denne verdien som ble bruk i Test 2 (Hox, 2015).

Den beregnede variable brannenergien er vesentlig lavere enn dimensjonerende verdi for boliger som finnes i Eurokode 1 del 1-2 (standardorganisasjonen, 2008). Her er middelveidien for spesifikk brannlast per gulvareal  $780 \text{ MJ/m}^2$ , mens 80 % fraktilen er på  $948 \text{ MJ/m}^2$  i en Gumbel-fordeling.

### ***Brannforløp i test 2***

Forsøkene (Hox, 2015) viste at en overtent hybelenhet med eksponerte flater i massivtre ikke vil slokke av seg selv. Figur 43 framstiller temperaturforløpet i hybelenheten i Test 2 og viser at det ikke var tegn til temperaturreduksjon etter at den variable brannenergien var brent opp og de brennbare overflatene ble antent. Dette indikerer at størrelsen på den variable brannlasten har lite å si i et rom med eksponerte flater i massivtre etter overtenning.

Litteraturstudiet har vist at størrelsen på antennelseskilden har stor innvirkning på brannvekstraten i brennbare kledninger. En økning i varmeavgivelsesrate fra 100 kW til 160 kW kan endre brannvekstraten fra «slow» til «ultra fast» (Nystedt, 2012), se 3.4–Brann i tre. Hvis den variable brannlasten i dette tilfellet anses som antennelseskilden til den permanente brannlasten, vil den variable brannlasten ha mye å si for brannforløpet før overtenning dersom den ikke bekjempes i en tidlig fase.

Temperaturene i hybelenheten i Test 2 (Hox, 2015) har brattere stigningskurve enn- og overstiger standard temperatur-tid kurven for store deler av brannen. Dette diskuteres videre i 10.8 – Analyse av konsekvenser og vises i Tabell 29. Den relativt store temperaturøkningen i Test 2 indikerer at brannspredningen skjer raskere ved bruk av eksponerte brennbare overflater. Testen ble avbrutt etter 1 time og 36 min på grunn av global strukturell kollaps i taket (Hox, 2015). På grunn av at testen ble avbrutt er det ikke mulig å si noe helt sikkert angående varigheten i et fullstendig brannforløp, men det kan med stor sannsynlighet antas at massivtrekonstruksjonen ville brent fullstendig opp.

### ***Forkullingsrate i test 2***

Testen viste en gjennomsnittlig forkullingsrate på  $1,1 \text{ mm/min}$  som er en betydelig større verdi enn den normerte verdien for forkullingsrate i laminert tre på  $0,65 \text{ mm/min}$  i Eurokode 5 del 1-2 (standardorganisasjonen, 2010a) gjengitt i Tabell 2 i 3.4 - Brann i tre. Under testen ble det observert flak av forkullet materiale falle fra de eksponerte massivtreflatene (Hox, 2015). Dette tyder på at det har skjedd delaminering, en effekt som bidrar til økt forkullingshastighet (Friquin, 2010). I veggflatene som var beskyttet med gipskledning var forkullingsdybden gjennomsnittlig 2 cm (Hox, 2015), det vil si betydelig mindre enn i de eksponerte massivtreflatene (Hox, 2015).

Dersom en bærende konstruksjon i massivtre er dimensjonert R90 for en nominert brann vil den ha en brannmotstand på under R60 i en brann tilsvarende den i Test 2 (Hox, 2015). Det antas derfor at bæresystemet dimensjoneres etter de forkullingsraten  $1,1 \text{ mm/min}$ , det vil si en mer konservativ dimensjonering.

### ***Konklusjon vedrørende dimensjonerende brannenergi***

I denne risikoanalysen er det antatt at vanntåkesystemet er verifisert for å slokke eller dempe og kontrollere en brann slik at den enkelt lar seg slokke fullstendig av brukere eller brannvesen. For å bestå en verifikasjonstest må vanntåkesystemet forhindre overtenning (Mengshoel, 2015). Det er derfor sett bort fra permanent brannenergi og kun fokusert på variabel brannenergi i denne risikoanalysen.



Hybelenheten som ble benyttet i Test 2 hadde en omhyllingsflate på 70,7 m<sup>2</sup> (Hox, 2015). Dette gir en spesifikk brannenergi per omhyllingsflate på:

$$652 \frac{MJ}{m^2} \times 26,4 m^2 \div 70,7 m^2 = 244 \frac{MJ}{m^2}$$

Det antas videre at dette er den dimensjonerende variable brannenergien i analysebyggverket.

### 10.2.6. Risikoklasse

Risikoklasse er bestemt i henhold til «§ 11-2. Risikoklasser» i byggt teknisk forskrift (Byggkvalitet, 2015) som er gjengitt i Tabell 9 i 4.4 - Brannsikkerhetsstrategi. Hybelenhetene havner i risikoklasse 4, tilsvarende som for boliger. Her er anvendelsesområdet beregnet for ikke-sporadisk personopphold og overnatting. Det antas at brukere kjenner til rømningsforhold og det er forutsatt at bruk av byggverket medfører liten brannfare. Studentboligene forutsettes ikke utleid i sommerhalvåret.

### 10.2.7. Brannklasse

I følge veiledningen til «§ 11-3. Brannklasser» i byggt teknisk forskrift (Byggkvalitet, 2015) vil bygninger med 5 etasjer eller mer i risikoklasse 4 automatisk havne i brannklasse 3.

Det må imidlertid også vurderes om analysebyggverket befinner seg innenfor brannklasse 4, som beskrives i byggt teknisk forskrift (Byggkvalitet, 2015). Her er konsekvensene for liv, helse, samfunnsmessige interesser og miljø ved brann er særlig store og derfor må disse aspektene vurderes.

Det antas at sannsynligheten for uønskede konsekvenser for liv og helse er avhengig av sannsynligheten for at en alvorlig brann ikke slokkes før brannvesenet starter slokking. Ved bruk av tall fra beregninger gjort i 10.9 - Usikkerhetsanalyse estimeres sannsynligheten for en alvorlig brann i analysebyggverket i løpet av en bygningslevetid på 55 år:

$$P_{t(\text{Brann før brannvesen starter slokking})} = p_{fi}^{\text{Antennelse}} \times p_f^{\text{Brukere}} \times \prod p_f^{\text{aktive brannsikringstiltak}}$$

$$P_{t(\text{Brann før brannvesen starter slokking})} = 0,040 \times 0,400 \times 0,084 = 1,34 \times 10^{-3}$$

Videre antas det at sannsynligheten for en alvorlig brann er like stort hvert år, noe som gir et gjentakintervall på:

$$55 \text{ år} \div 1,34 \times 10^{-3} = 410\,448 \text{ år}$$

Boka «Risikoanalyse – teori og metoder» (Rausand and Utne, 2009) klassifiserer sannsynligheten ut fra den beregnede frekvensen som «svært lite sannsynlig». Når det gjelder konsekvenser for liv og helse er rømningsforholdene i analysebyggverket betydelig forbedret i forhold til minstekravene (Byggkvalitet, 2015). I tillegg vil et vanntåkesystems evne til å fortynne og fordrive røyk og blokkere stråling kunne ha betydelig positiv effekt på rømningsforhold i tidlig fase av en brann. Personskader og dødsfall kan allikevel ikke ses bort fra. Det antas at det er realistisk at en alvorlig brann kan føre til små og store personskader, samt 3-10 døde. Boka «Risikoanalyse – teori og metoder» (Rausand and Utne, 2009) klassifiserer disse konsekvensene som «svært store».

Det antas at konsekvensene for samfunnsmessige interesser er avhengig av sannsynligheten for global strukturell kollaps ved alvorlig brann i analysebyggverket. Før ytterligere tiltak er denne sannsynligheten beregnet til å være  $6,71E-05$  i 10.9 - Usikkerhetsanalyse. Denne verdien symboliserer sannsynligheten for global strukturell kollaps i analysebyggverket i løpet av en bygningslevetid på 55 år, når brannvesen starter slokking innen 20 min. Dette gir et gjentaksintervall på:

$$55 \text{ år} \div 6,71 \times 10^{-5} = 819\,672 \text{ år}$$

Sannsynligheten klassifiseres (Rausand and Utne, 2009) ut fra den beregnede frekvensen som «svært lite sannsynlig». Det antas at byggekostnadene for et studentbygg ligger mellom 20-200 millioner. Konsekvensene ved global strukturell kollaps som følge av en alvorlig brann klassifiseres (Rausand and Utne, 2009) derfor som «stor». Det lagres ingen miljøgifter i studentbyggene og dersom ett av dem skulle feile ved brann anses dette for å ha liten miljømessig betydning. Ut fra klassifiseringssystemet (Rausand and Utne, 2009) er konsekvensen for miljø «liten».

En oppsummering av diskusjonen angående sannsynlighet og konsekvens oppsummeres i risikomatrisen i Tabell 26.

| Sannsynlighet/<br>Konsekvens | 1<br>Svært lite sannsynlig    | 2<br>Lite sannsynlig | 3<br>Sannsynlig | 4<br>Ganske sannsynlig | 5<br>Svært sannsynlig |
|------------------------------|-------------------------------|----------------------|-----------------|------------------------|-----------------------|
| <b>5<br/>Katastrofal</b>     | 6                             | 7                    | 8               | 9                      | 10                    |
| <b>4<br/>Svært stor</b>      | 5: Liv og helse               | 6                    | 7               | 8                      | 9                     |
| <b>3<br/>Stor</b>            | 4: Samfunnsmessige interesser | 5                    | 6               | 7                      | 8                     |
| <b>2<br/>Middels</b>         | 3                             | 4                    | 5               | 6                      | 7                     |
| <b>1<br/>Liten</b>           | 2: Miljø                      | 3                    | 4               | 5                      | 6                     |

Tabell 26: Risikomatrise, grønt område (verdier mellom 2-5) er akseptabelt område hvor det kun er nødvendig å bruke ALARP-tiltak videre. Gult område (verdier mellom 6-7) er akseptabelt område, men ved bruk av ALARP-prinsippet og vurdering av videre undersøkelser. Rødt område (Verdier mellom 8-10) er ikke-akseptabelt område, her må det gjøres risikovurderende tiltak (Rausand and Utne, 2009).

Som Tabell 26 viser befinner risikoen for liv, helse, samfunnsmessige interesser og miljø seg innenfor grønt område som betyr at det ikke er nødvendig med ytterligere risikoreducerende tiltak. Ut fra dette konkluderes det med at det ikke er grunnlag for å plassere analysebyggverket i brannklasse 4 med tanke på risiko for liv, helse, samfunnsmessige interesser og miljø.

Veiledningen til byggt teknisk forskrift (Byggkvalitet, 2015) angir også at byggverk med spesifikk brannenergi over  $400 \text{ MJ/m}^2$  omhyllingsflate bør plasseres i brannklasse 4. Den spesifikke brannenergien

per omhyllingsflate for hybelenheten i Test 2 antas å være den dimensjonerende verdien i 2.-9. etasje og er beregnet til å være 244 M/m<sup>2</sup>. Det vil altså ikke være grunnlag for å plassere bygningene i brannklasse 4 på grunn av størrelse på spesifikk brannenergi. Bygg A-E plasseres derfor i brannklasse 3.

### 10.2.8. Tilrettelegging for slokking og forutsetning for beredskap

#### *Brannvesen*

Brannvesenet får alarm via et vaktsselskap og har gode forutsetninger for å være raskt på stedet og foreta kontrollering og slokking av brann. Moholt 50|50 ligger en avstand 3,2 km fra hovedbrannstasjonen i Trondheim, noe som øker forutsetningene for rask igangsetting ytterligere. En mer nøyaktig evaluering av utrykningstid vil bli gjort i 10.9 - Usikkerhetsanalyse.

Veiledningen til «§ 11-17. Tilrettelegging for rednings- og slokkemannskap» i byggt teknisk forskrift (Byggkvalitet, 2015) setter en begrensning på 23 m høyde fra laveste punkt på oppstillingsplassen til høyeste gulv i en bygning for å sikre brannvesenets tilgang med høyderedskaper. Veiledningen antar også at kun bygg inntil 8 etasjer forutsettes å ha god tilgjengelighet for brannvesenets høyderedskap. Trondheims brannvesen sine høyderedskaper har en minimum kapasitet på 25 m høyde ved 10 m utlegg. Hvert bygg er plassert slik at oppstillingsplass for høyderedskaper er uavhengig av årstid. Tilgangen ved bruk av høyderedskaper anses derfor ikke som problematisk selv om bygg A-E overstiger 8 etasjer (Denstad, 2015).

Bygningen innehar innvendig trykksatt trapperom som er anlagt med stigeledning med uttak på repos for hver etasje, samt utvendig trapp med ekstra hvilerepos på plan 5. Det antas at et vanntåkesystem som blant annet bekjemper brann ved å tynne ut røyk og giftige gasser (Grant and Drysdale, 1997) bidrar til å forbedre slokkeforholdene ytterligere, både for brannmannskap og brukere.

#### *Manuel slokking utført av brukere*

Det forutsettes at det finnes manuelle brannslukningsapparat i tillegg til utplassert brannslange i hver etasje. Det skal også plasseres et brannteppe på kjøkkenet for slokking av brann i forbindelse med matlaging.

#### *Ekstern kontroll*

SiT har egen vaktssentral som er direkte tilkoblet brannalarmsentralen i alle de gjeldende byggene.

### 10.2.9. Vannforsyning

Slokkevannsforsyningen på Moholt og området rundt er relativt stor og pålitelig. En 200 mm hovedvannledning er forsynt fra to høydebasseng, hvor forsyning fra det ene erstatter det andre ved kapasitetsproblemer. Hver side av hovedvannledningen har kapasitet til å tilfredsstille et sprinklerssystems krav til vannmengde fullstendig i henhold til NS-EN 12845 (standardorganisasjonen, 2009a, Denstad, 2015).

Den relativt gode vannforsyningen på Moholt gjør det mulig å etablere et tradisjonelt sprinklersystem uten at det gjøres tiltak for å øke vanntrykket. Dette er viktig for konstruksjonen av feiltreet for referansesprinklerssystemet i den komperative feiltreanalysen i 10.9 - Usikkerhetsanalyse.

## 10.2.10. Automatisk slokkeanlegg

### *Krav om automatisk slokkeanlegg*

Det relevante bygget har heis og befinner seg i risikoklasse 4. I følge «§ 11-12 - Tiltak for å påvirke rømnings- og redningstider» i byggteknisk forskrift (Byggkvalitet, 2015) er det derfor krav om automatisk slokkeanlegg.

### *Kompenserende tiltak*

Eksponerte overflater i tre med euroklasse D-s3,d0 tilfredstiller ikke de preaksepterte ytelsene for materialvalg i overflater i sekundær- og hovedbæresystem, samt trappeløp i brannklasse 3 i veiledningen til byggteknisk forskrift (Byggkvalitet, 2015). Her er det preakseptert med euroklasse A2-s2,d0, det vil si ubrennbare overflater. Det oppstår fravik fra preakseptert design og derfor må det gjøres tiltak som kompenserer for at overflatene er brennbare. For å oppnå dette er det valgt å benytte et vanntåkesystem, som verifiseres analytisk ved både kvalitative og kvantitative metoder i 10.9 - Usikkerhetsanalyse.

Det er et krav fra byggteknisk forskrift (Byggkvalitet, 2015) om at hovedbæresystem i brannklasse 3 skal være stabilt gjennom et fullstendig brannforløp. For nærmere forklaring, se 4.4.2 - Brannklasse. I utgangspunktet betyr dette at branndesignet må sørge for at brannen slukkes.

### *Relevant standard for dimensjonering*

Minimumskravet ved bruk av sprinkler i 9 etasjes bygninger i risikoklasse 4 er boligsprinkler type 3 etter standarden NS INSTA 900-1 (Norge, 2013). Dette betyr at NS INSTA 900-1 (Norge, 2013) og NS-INSTA 900-3 (Norge, 2014) skal benyttes så langt det er mulig ved dimensjonering av vanntåkesystem i denne klassen. Se «§ 11-12 Tabell 1: Type sprinklersystem i byggverk risikoklasse 4» i veiledningen til byggteknisk forskrift (Byggkvalitet, 2015), gjengitt i Vedlegg 5.

| Bruksområde   | Areal                | Fareklasse (standardorganisasjonen, 2009a) |
|---------------|----------------------|--------------------------------------------|
| Soverom, bad  | 10-18 m <sup>2</sup> | LH                                         |
| Stue, kjøkken | 57 m <sup>2</sup>    | LH                                         |
| Korridor      | 61 m <sup>2</sup>    | LH                                         |
| Gang          | 10 m <sup>2</sup>    | LH                                         |
| Trapperom     | 14 m <sup>2</sup>    | LH                                         |
| Fellesbad     | 3,4 m <sup>2</sup>   | LH                                         |

Tabell 27: Oversikt over rom i 2.-9. etasje

Et type 3 sprinklersystemer er beregnet for helseinstitusjoner, boliger for handikappede, studentboliger og lignende som faller inn under lav fareklasse, LH. NS INSTA 900-1 (Norge, 2013) spesifiserer at dersom en bygning innehar virksomheter med mer dimensjonerende brannfarer skal et sprinklersystem dimensjoneres etter NS-EN 12845 (standardorganisasjonen, 2009a). Som Tabell 27 viser er alle områdene i de relevante etasjene klassifiseres som LH. Tabell 27 viser også at fellesarealet, det vil si stue, kjøkken, gang og korridor som ikke har branncellebegrensende egenskaper har et samlet areal på

129 m<sup>2</sup>. Disse overstrider maksimalt areal på 126 m<sup>2</sup> i hver branncelle med brannmotstand under REI30 i lav fareklasse (standardorganisasjonen, 2009a). På grunnlag av dette og at eksponerte overflater i massivtre medfører større potensiell brannenergi og utfordring ved brannbekjempelse velges det å dimensjonere etter ordinær fareklasse 1, OH1.

Legg merke til at fellesbadet har et areal på mindre enn 5 m<sup>2</sup>. Badet er ikke erklært for elektriske maskiner som vaskemaskiner, tørketromler og lignende og har gipskledning i alle flater. I slike rom er det i følge veiledningen til byggt teknisk forskrift preakseptert å ikke benytte automatisk slokkeanlegg (Norge, 2013).

At OH1 er dimensjonerende brannfare fører til et krav fra byggt teknisk forskrift (Byggkvalitet, 2015) om at dimensjonering skal være i henhold til NS-EN 12845 (standardorganisasjonen, 2009a) eller andre anerkjente standarder der NS-EN 12845 ikke er dekkende. NS-EN 12856 dekker blant annet ikke testing av vanntåkedyser og hele vanntåkesystemer. Eksempel på alternative anerkjente standarder finnes i 6.3 Standarder.

Byggt teknisk forskrift (Byggkvalitet, 2015) setter krav til minimum 60 min varighet av vannforsyning for type-3 anlegg, beskrevet i INSTA-900-1 (Norge, 2013). Minste varighet av vannforsyning i NS-EN 12845 (standardorganisasjonen, 2009a) er 60 min. Eksponerte flater i tre representerer en potensiell stor brannlast og fare for økt brannspredning (Nystedt, 2011). På grunnlag av dette og at brannen må slokkes innen 90 min settes minimum operasjonstid til 90 min.

### *Valg av automatisk slokkesystem*

Det valgte automatiske slokkesystemet er et vanntåkesystemet, henholdsvis et høytrykksystem og et våtrørsystem med varmesensitive automatiske dyser. Vanntåken produseres kun av trykksatt vann uten tilsetningsstoffer.

I motsetning til ved bruk av sprinklersystemer er det ikke tilstrekkelig vanntrykk ved Moholt 50|50 for å kunne drive et vanntåkesystem uten å tilføre ekstra trykk. For å skape tilstrekkelig vanntrykk skal systemet drives av to selvstendige elektriske pumper med ekstra strømaggregat og vannforsyning fra hovedvannledning og lagringstank. Vannforsyning fra trykksatte tanker ses bort fra på grunn av at de som regel kun benyttes i små rom (HI-FOG, 2015).

Det valgte vanntåkesystemet for risikovurderingen samsvarer med et «System F» i henhold til NFPA 750 (Association, 2015e) beskrevet i 5.4 - Ulike typer vanntåkesystemer. Dette vil si at det valgte systemet antas å ha en pålitelighet som ligger rundt midt på treet sammenlignet med andre vanntåkesystemer, se Figur 29 i kapittel 5.

### **10.2.11. Brannsikringstiltak**

I tillegg til automatisk vannslokkeanlegg er det i prosjekteringsdokumentasjonen som er blitt benyttet for beskrivelse av analysebyggverket (Denstad, 2015, Magnusson, 2015) planlagt følgende aktive- og passive brannsikringstiltak:

### **Aktive**

- Komfyrvakt.
- Brannslange i hver etasje
- Brannteppe på kjøkkenet for slokking av brann i tidlig fase i forbindelse med matlaging
- Brannslukkingsapparat
- Selvlukkende dører til trapperom med brannmotstand EI<sub>2</sub>60-CS<sub>a</sub>.

### **Passive**

- Ubrennbare overflater bak integrerte elektriske apparater som komfyr, mikrobølgeovn, vaskemaskin, oppvaskmaskin etc.
- Dør til hybelenhet med brannmotstand minimum EI<sub>2</sub>30-S<sub>a</sub>. På den måten vil hybelenheten fungere som en isolerende branncelle i inntil 30 min. Denne dimensjoneringen er ut over kravene i Byggteknisk forskrift (Byggkvalitet, 2015)

Disse tiltakene velges å benyttes også i denne risikovurderingen. I tillegg benyttes følgende aktive- og organisatoriske brannsikringstiltak:

### **Aktive**

- Tidsteller på enkelte stikkontakter langs vegger i fellesareal der det er mulig slik at apparater ikke står på lenger enn nødvendig

### **Organisatoriske**

Brannfaren skal reduseres ved følgende forbud og restriksjoner:

- Forbud mot bruk av levende lys
- Forbud mot røyking
- Forbud mot private apparater for oppvarming ut over det integrerte oppvarmingssystemet
- Matlaging på komfyr er begrenset til før klokken 23:00 og etter klokken 06:00

#### **10.2.12. Brannalarmanlegget**

Brannalarmanlegget vil ha automatisk varsling til vaktsselskap i tråd med driftsavtalene i SiT. Det er deteksjon med summer på alle hybelenheter, dvs soverom. Alarmen går via en døgnåpen sentral som gir direkte beskjed til det lokale brannvesenet.

#### **10.2.13. Ventilasjonsanlegget**

Ventilasjonsanlegget er utstyrt med røyksikker avtrekksvifte i bypass, som er klassifisert til å trekke ut røyk med en temperatur på 300 °C i en time. Når brannrøyken ventileres blandes den varme røyken med luft fra andre brannceller og ledes via en egen kanal forbi varmeveksler og filter. Det vil være mulig å stenge av ventilasjonsanlegget ved utløsning av brannalarm.

#### **10.2.14. Innvendige overflater/kledninger**

Det forutsettes at det er eksponert massivtre i alle vegger og himlinger i 2.-9. etasje, bortsett fra områder i nærheten av elektriske apparater og lignende hvor brannfaren er spesielt stor. Her vil det

benyttes områder med ubrennbare overflater. Alle massivtregulv er beskyttet med påstøp og trinnlydplate og alle bad har gipskledning i vegger og himling.

#### 10.2.15. Brannceller

Veiledningen til byggt teknisk forskrift (Byggkvalitet, 2015) definerer at en boenhet skal ha alle nødvendige romfunksjoner, dvs bad, kjøkken, stue, soverom osv. Veiledningen gir også preaksepterte løsninger der boenheter skal ha branncellebegrensende vegger. Hybelenhetene inneholder ikke alle romfunksjoner, derfor vil de relevante etasjene dimensjoneres som én branncelle (Byggkvalitet, 2015).

Allikevel vil massivtreveggene mellom hybelenhetene ha brannskillende egenskaper og fungere som passiv brannsikring ved at brann- og røykspredning forhindres. Det er satt inn branndører i hybelenhetene slik at brannmotstanden i skillekonstruksjonen oppnår klasse EI30. Dør til trapperom vil ha en brannmotstand på EI<sub>2</sub>60-CS<sub>a</sub> og i tillegg være selvluukkende. Det antas derfor at brannmotstanden i skillekonstruksjon i trapperom er minst like høy som i hybelenhetene.

### 10.3. Valg av analysemetoder

For å svare på problemstillingen i denne risikovurderingen er det nødvendig å utføre både kvalitativ og kvantitativ analyse. I den forbindelse skal det benyttes følgende analysemetoder:

- Bow-tie analyse for å finne mulige årsaker for antennelse og konsekvensene av disse i analysebyggverket.
- Feiltreanalyse for å estimere påliteligheten ved oppstart av det valgte vanntåkesystemet, relativt i forhold til påliteligheten i et relevant referansesprinklersystem.
- Hendelsestreanalyse for å analysere konsekvenser av at ulike brannsikringstiltak feiler.
- Pålitelighetsanalyse for å estimere sannsynligheten for global strukturell kollaps i analysebyggverket med de valgte aktive- og passive brannsikringstiltakene.
- Ut fra feiltreanalysen, hendelsestreanalysen og pålitelighetsanalysen skal dimesjonerende faktorer for pålitelighet kartlegges. Ved å benytte ulike verdier for disse skal det gjøres en sensitivitetsanalyse.

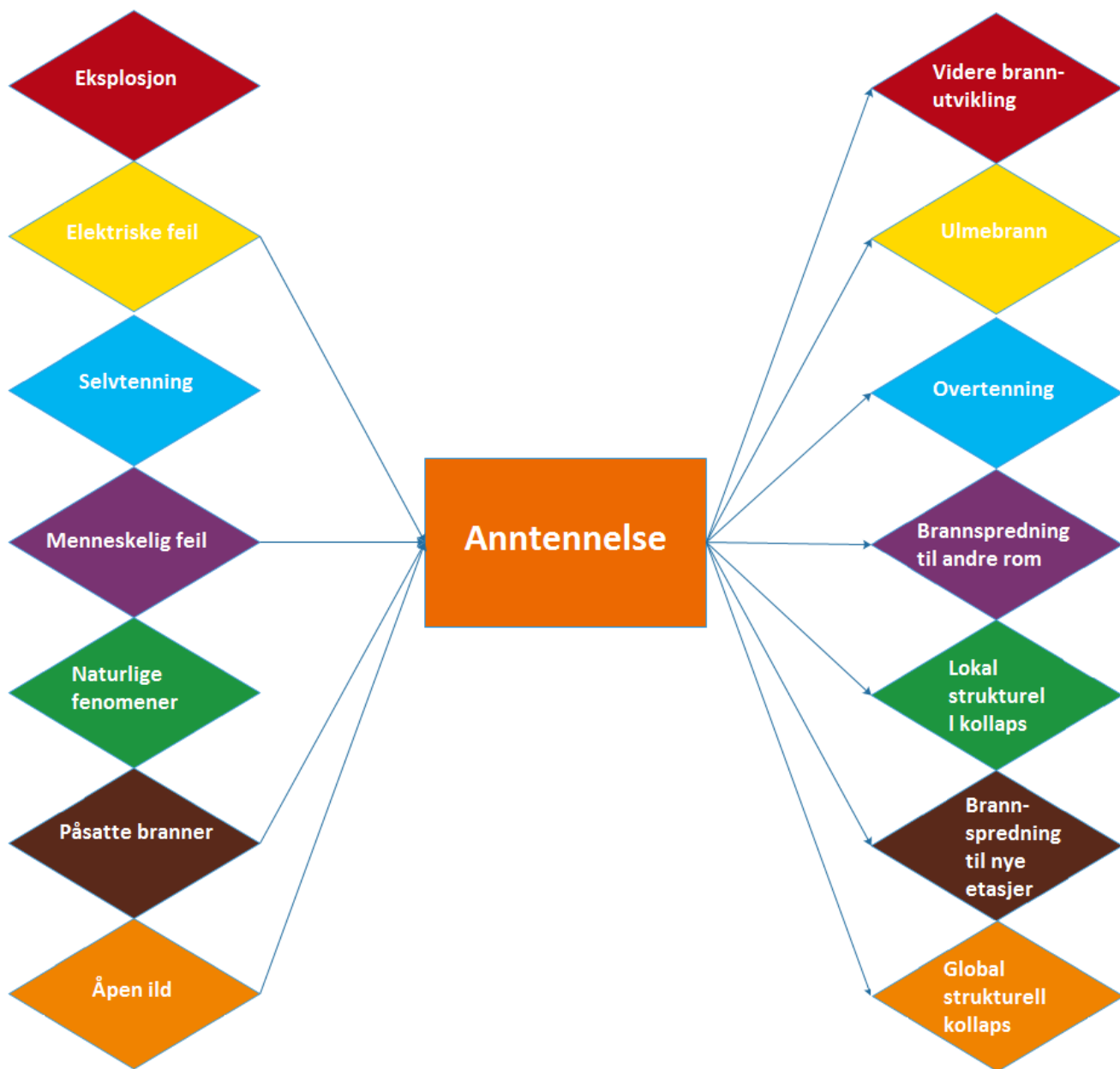
Bow-tie- og hendelsesanalysen skal gjøres kvalitativt og feiltre-, pålitelighets- og sensitivitetsanalysen skal gjøres kvantitativt.

### 10.4. Fastsetting av risikoakseptkriterier

Risikoakseptkriteriene er ikke endret fra de som ble fastsatt i 9.7 - Valg av analysemetoder og beslutningskriterier.

### 10.5. Fareidentifikasjon

Det er ikke funnet noen brannfarer som må vurderes spesielt i de relevante etasjene ut over det som er beskrevet i «§ 11-2. Risikoklasser» i veiledningen til byggt teknisk forskrift (Byggkvalitet, 2015). Identifikasjonen av potensielle brannfarer er derfor utført samtidig med Analysen av årsaker og sannsynlighet i 0. En oppsummering av relevante årsaker for antennelse og negative konsekvenser med tanke på brannutvikling som følge av dette er vist i Figur 44. Årsakene for antennelse er her sortert i nokså «grove» kategorier. Disse framstilles mer nøyaktig i neste delekappittel.



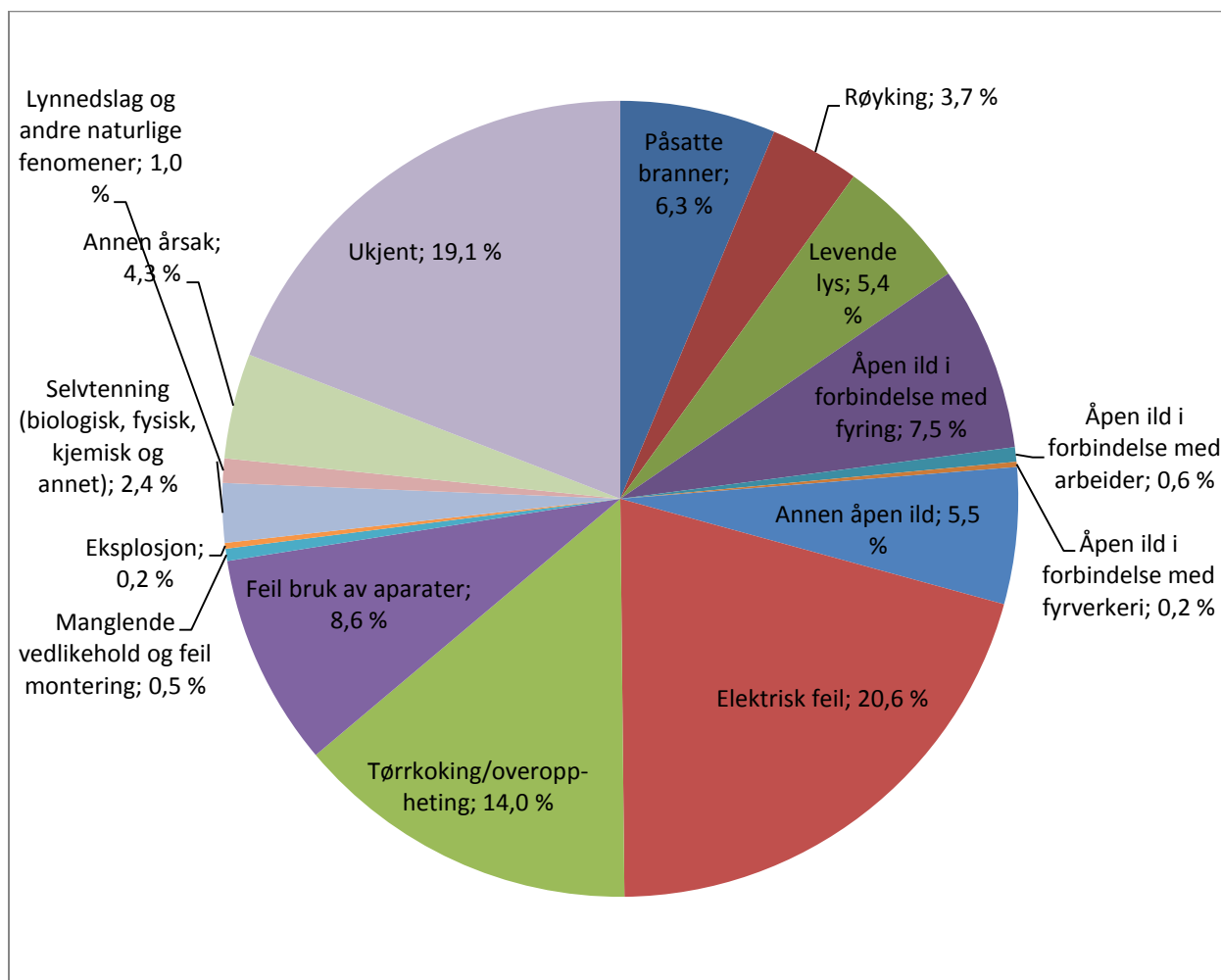
Figur 44: Bow-tie diagram med oversikt over mulige årsaker til antennelse og de negative konsekvensen som følge av dette. I denne risikoanalysen er det kun fokusert på årsakene og konsekvensene som er bundet til boksen "antennelse» med rette streker i figuren. Grunnen til at enkelte årsaker er sett bort fra utypes i 10-6 – Analyse av årsaker og sannsynligheter. Når det gjelder konsekvens er det er sett bort fra brannspredning til andre bygninger på grunn av begrensninger i oppgaven



## 10.6. Analyse av årsaker og sannsynlighet

### 10.6.1. Generelt om brannårsak

Direktoratet for samfunnsikkerhet og beredskap (Beredskap, 2015) har gitt ut en oversikt over rapporterte og ikke-rapporterte branner i boliger i alle kommuner i Norge mellom 2009 og 2013. Det er totalt registrert 14259 branner i perioden, hvor 4240 av dem er rapporterte. Av de rapporterte brannene har 19,1 % ukjent brannårsak. En fordeling av de rapporterte brannårsakene finnes i Figur 45.



Figur 45: Oversikt over antall rapporterte boligbranner i Norge i perioden 2009-2013 sortert etter brannårsak (Beredskap, 2015)

I hver av de relevante etasjene bor det 15 personer, som nok er en del flere per areal enn i vanlige boliger. Dette kan øke sannsynlighet for brannstart som følge av økt menneskelig aktivitet for eksempel ved feil bruk av apparater, tørrkoking og større belastning på elektrisk utstyr.

Som følge av forbud mot levende lys, innføring av komfyrvakt og begrenset brukstid av komfyr antas det at sannsynligheten for brannstart her er redusert.

Elektriske feil står for hele 20,6 % av brannårsakene i statistikken fra Direktoratet for samfunnsikkerhet og beredskap (Beredskap, 2015). Feil i elektriske apparater kan ofte ikke forhindres, men konsekvensene er redusert i analysebyggverket ved etablering av ubrennbart materiale i overflater bak integrert elektrisk utstyr. Risikoen for direkte påtenning av massivtrevegg kan reduseres ved å etablere tidstellere på enkelte stikkontakter langs vegger, hvor strømtilgangen kuttes etter en viss tid. Forbud mot private ikke-integrerte varmeovner antas også å redusere risikoen for brann.

Åpen ild i forbindelse med fyring står for 7,5 % av de registrerte brannårsakene (Beredskap, 2015). På grunn av at det ikke fyres med åpen ild i den relevante etasjen ses det bort fra brannfaren som følge av dette. I bow-tie diagrammet i Figur 44 er bruk av levende lys og sigaretter inkludert i «åpen ild», hvor riktig dette valget er kan nok diskuteres. Sannsynligheten for brann på grunn av disse årsakene anses som betydelig redusert på grunn av forbud mot levende lys og røyking innendørs.

Påsatt brann må også tas hensyn til og i følge Figur 45 står disse for 6,3 % av brannstartstilfellene. Det antas at sannsynligheten for påsatt brann er svært liten i fellesareal og hybelenhet der kun beboere har tilgang. Dørene antas å være låst når det ikke er noen stede. I trappoppgang og utendørs hvor det til enkelte tider på døgnet oppholder seg lite folk og hvem som helst har tilgang antas det at sannsynligheten for påsetting av brann er større. Denne risikoanalysen vil ikke analysere et utvendig påsatt brannscenario på grunn av begrensning i oppgaven.

Av diskusjonen over konkluderes det med at på tross av økt brukerantall per areal i forhold til vanlige boliger er brannfaren som følge av aktive, passive og organisatoriske tiltak redusert i etasje 2.-9. ved Moholt 50|50.

### **10.6.2. Brannstart i hybelenhet**

I hybelenhetene anses sannsynligheten for antennelse i ikke-integrerte elektriske apparater for å være størst. Sannsynligheten for brannstart antas å være redusert ved å innføre forbud mot privat varmovn i hybelenhet.

Brannspredning og antennelse av eksponert massivtre kan skje via variabel brannlast i hybelenheten eller direkte fra for eksempel elektrisk utstyr ved en stikkontakt. Egne lagringsboder i kjeller antas å avlaste den variable brannenergien en viss grad. Sannsynligheten for antennelse av eksponerte flater og brannspredning øker dersom beboer ikke er til stede og kan foreta manuel slokking, eller vanntåkesystemet og eventuelt alarmanlegget ikke fungerer.

### **10.6.3. Brannstart i fellesareal**

Det forutsettes mindre brannlast i fellesareal enn i hybelenhetene, noe som reduserer sannsynlighet for brannspredning og antennelse av eksponerte flater av massivtre.

### ***Kjøkken***

Direktoratet for samfunnsikkerhet og forvaltnings statistikk (Beredskap, 2015) angir at den nest største årsaken til brannstart er tørrkoking ved feil bruk av komfyr. Statistikk med oversikt over de mest hyppige brannstartsområder i familieboliger fra rapporten «U.S. Experience with Sprinklers» (John R. Hall, 2013) viser at kjøkkenet er det angitte området hvor det starter flest branner med 18 % av

brannstartstilfellene. Ut fra statistikken konkluderes det med at sannsynligheten for brannstart på kjøkkenet er relativt stor.

I analysebyggverket anses sannsynligheten for brannstart i kjøkkenområdet for å være betydelig redusert på grunn av innføring av komfyrvakt. Det er også utført ubrennbare overflater på kritiske områder bak elektrisk utstyr og lignende. Ved bruk av kjøkkenapparater med høy effekt som for eksempel microbølgeovn, brødrister, vaffeljern og lignende antas det at brukere er til stede som kan varsle og foreta slokking av brannen i en tidlig fase. Som tidligere nevnt er forutsetningen for manuel slokking forbedret ved etablering av brannslange i hver etasje, samt slokkeduk på kjøkkenet. Det antas at SiT står for nødvendig opplæring av brukere og at tilgjengeligheten er tilstrekkelig slik at tiltakene enkelt kan tas i bruk.

### *Stue*

Brannstart i stue er mest sannsynlig i forbindelse med elektrisk utstyr (Beredskap, 2015). Det integrerte utstyret forutsettes å være plassert ved ubrennbare overflater og derfor ha redusert mulighet til å forårsake brannstart. Det ikke-integrerte utstyret vil derfor være mer kritisk. Innføring av forbud mot private varmeovner samt innføring av tidstellere på utsatte stikkontakter der hvor det er mulig antas å redusere antennelsesfaren.

### *Gang*

En gang med garderobeskap og skohyller inneholder normalt en del brannlast. Antenneskildene her er begrenset til stikkontakter, taklys og elektriske brytere og derfor antas sannsynligheten for brannstart for å være liten.

### *Korridor*

Her antas det liten variabel brannlast. Antenneskildene er begrenset til stikkontakter, taklys og elektriske brytere og derfor antas sannsynligheten for brannstart for å være liten.

### *Fellesbad*

Her antas det liten variabel brannlast og permanent brannlast. Antenneskildene er begrenset til stikkontakter, taklys, elektriske brytere og elektriske apparater og derfor antas sannsynligheten for brannstart å være liten.

#### **10.6.4. Trapperom**

Her antas det liten variabel brannlast. Antenneskildene er begrenset til stikkontakter, taklys og elektriske brytere, men også påtenning.

Sannsynligheten for antennelse i trapperom antas å være av samme størrelsesorden som i hybelenhet på grunn av at sannsynligheten for påtenning er nokså jevnstor med sannsynlighet for feil bruk av apparater i Figur 45. Feil bruk av apparater antas som tidligere nevnt å være den største sannsynlige årsaken til brann i hybelenhet i tillegg til elektriske feil. Sannsynligheten for alvorlig brann antas imidlertid å være mindre i trapperommet på grunn av liten brannlast og dermed begrensede spredningsmuligheter.

### *Generelt om fellesareal*

Sannsynligheten for brannstart anses som mindre enn i en vanlig bolig på grunn av forbud mot røyking og levende lys. En sigarett kan være en potensiell kilde til ulmebrann (Friquin, 2010), som kan utvikle seg lenge uten å bli oppdaget for så å blusse opp ved plutselig tilgang på oksygen. Generelt lite brannlast og tiltak mot brannspredning fra potensielle brannkilder anses å redusere sannsynligheten for en alvorlig brann. Ved spesielle arrangementer som fører til større brannfare forutsettes det at det er mennesker til stede som kan slokke brannen tidlig i forløpet.

## **10.7. Brannscenarier**

I følge NS-EN 3901 (Norge, 2012) skal følgende brannscenarier analyseres:

1. Et alvorlig brannscenario med rask brannutvikling og høy branneffekt som representerer det værste troverdige brannscenarioet i byggverket.
2. Brann som oppstår i et rom som normalt er uten personer og som kan true et større antall personer i andre deler av byggverket.
3. Brann som utvikler seg langsomt og som ikke utløser et automatisk brannslokkeanlegg.
4. Representative brannscenarier for det aktuelle byggverket som skal analyseres for å avdekke robustheten i den branntekniske utformingen.

### **10.7.1. Brannscenario 1**

I følge NS-EN 3901 (Norge, 2012) kan det i komplekse byggverk være nødvendig å analysere flere varianter av brannscenario 1 med ulik brannstart for å forutsi dimensjonerende scenario. Studentbyggene antas ikke å være komplekse bygg, derfor analyseres kun ett brannscenario her.

Brannstart i ikke-integrert elektrisk utstyr under skrivebord hvor vanntåkesystemet i hele etasjen feiler anses som det verst tenkelige brannscenarioet, se Figur 46. Her vil en brann ligge skjult for direkte påføring av vanntåke og samtidig ha relativt gode muligheter for å spre seg videre. Det forutsettes at hybelenheten har åpen dør og at vinduet sprekker på grunn av høy varme, slik at det er tilstrekkelig lufttilførsel for overtenning. På grunn av den åpne døra vil det være mulig å få brannspredning ut av hybelenheten før det er gått 30 min, altså før brannmotstanden i skillekonstruksjonen feiler.

Brannscenario 1 er nokså likt et brannscenario som er valgt i tidligere brannteknisk risikovurdering (Magnusson, 2015, Denstad, 2015) fra SiT, hvor to sprinklerhoder i sprinklersystemet i hybelenheten feiler. I denne risikoanalysen er det valgt at hele vanntåkesystemet i etasjen feiler. Valget er tatt på grunnlag av påliteligheten som ble funnet i feiltreanalysen av vanntåkesystemer utført i 10.9 - Usikkerhetsanalyse.



Figur 46: Antennelse under skrivebord i hybelenhet i branntest utført av SP Fire Research (Hox, 2015)

### 10.7.2. Brannscenario 2

Brannen skal plasseres ved det lokalet i bygget som har det største personantallet. Scenarioet kan utelates i byggverk med heldekkende brannsløkkeanlegg eller heldekkende brannalarmanlegg (Norge, 2012). De relevante byggene innehar begge deler, derfor vil det ikke være nødvendig å analysere dette brannscenarioet. Det velges allikevel å utføre en analyse av følgende brannscenario:

Brannscenario 2 antas å samsvare med brann som følge av elektrisk feil i fellesbad. Det antas at fellesbadet har lukket dør slik at sannsynligheten for at brannen oppdages raskt reduseres. Brann i tekniske sjakter og hulrom vil ikke analyseres her på grunn av at oppgaven er begrenset til å gjelde rombrann.

### 10.7.3. Brannscenario 3

Dette brannscenarioet er spesielt viktig for byggverk hvor det skal skje overnatting eller som er beregnet for personer som ikke kan bringe seg selv i sikkerhet (Norge, 2012). Scenarioet antas å sammenfalle med brann i fellesarealet. Her vil det normalt ikke oppholde seg folk på natta og det vil dermed være begrensede muligheter til å oppdage en brann når alarm- og vanntåkesystemet ikke aktiveres. En sakte utviklende brann kan skje dersom eksponerte massivtreflater eller møbler antennes av en stor antenneskilde, for eksempel et elektrisk apparat.

Brannscenario 3 samsvarer med et brannscenario som er valgt i tidligere brannteknisk risikovurdering (Magnusson, 2015, Denstad, 2015).

### 10.7.4. Brannscenario 4

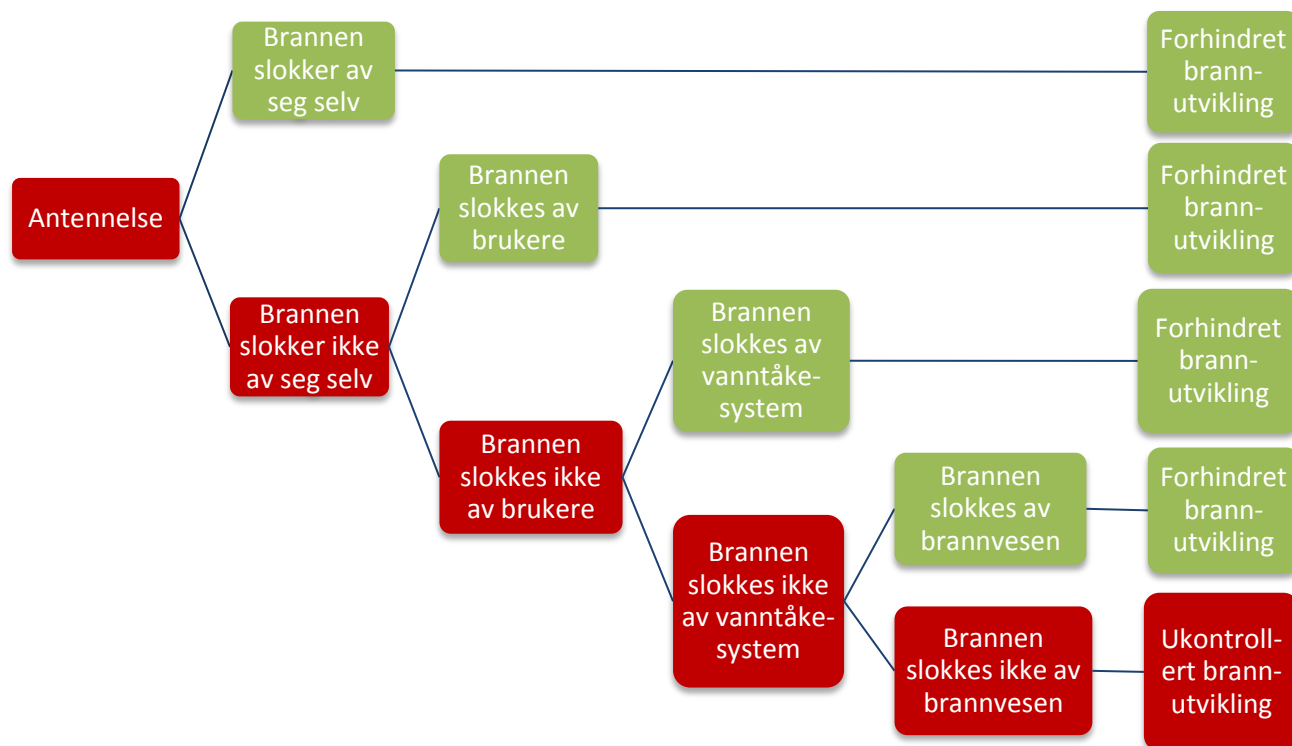
Representative brannscenarioer kan bestemmes ut fra statistikk, erfaring eller analyse av virksomheter og byggverk (Norge, 2012). Et sannsynlig brannscenario er brannspredning til fasade ut av knust vindu ved overtenning i hybelenhet. Denne oppgaven er imidlertid begrenset til å ta for seg innvendig brann, derfor vil ikke dette scenarioet analyseres her.

Statistikk for brannårsaker i boliger i Figur 45 har vist at påtenning er en sannsynlig brannårsak på lik linje med feil bruk av elektriske apparater. På grunnlag av dette representerer brannscenario 4 et tilfelle ved påsatt brann i trapperom ved bruk av en kanne bensin eller lignende.

## 10.8. Analyse av konsekvenser

### 10.8.1. Generelt

Som Figur 47 viser er det i analysebyggverket opprettet barrierer som forhindrer ukontrollert brannutvikling. Denne risikoanalysen har tatt som utgangspunkt at en brann skal kunne slokkes av én barriere alene. Det vil si at dersom brannen ikke slokker av seg selv, brukere eller vanntåkesystem skal brannvesen alene kunne utføre slokkejobben innen 90 min.



Figur 47: Hendelsestre for aktuelle scenarioer for slokking av brann og konsekvenser av suksess og feiling i disse med tanke på om videre brannutvikling forhindres eller ikke, ved eksponerte flater i massivtre

## 10.8.2. Brannscenario 1

### *Brannutvikling*

Dersom det ikke er utført et avgrenset område med ubrennbar overflate i området ved antennelseskilden kan den eksponerte massivtreveggen begynne å brenne. Et eksempel på dette er antennelse under skrivebord, se Figur 46 som er hentet fra SP Fire Researchs rapport fra branntesten av hybelenheten (Hox, 2015).

I branntesten (Hox, 2015) ble detektoren i hybelenheten utløst etter 1 min og 6 sek. I dette brannscenarioet var døren i hybelenheten åpen og røyken utløste derfor detektoren i gangen etter 1 min og 10 sek (Hox, 2015). Rask deteksjon øker sannsynlighet for manuel slokking utført av brukere før brannen utvikler seg videre og dessuten at brannvesen er raskt på plass. Selv om vanntåkesystemet i dette brannscenarioet ikke aktiveres forutsettes det at alarmanlegget fungerer og varsler brukere og brannvesen. Dermed vil brannvesenets brannsløkking kunne skje som tilsiktet.

Dersom det ikke utføres manuel slokking eller denne feiler kan brannen spre seg videre oppover til skrivepulten som potensielt har stor og hurtigspredende brannlast i form av papir og bøker. I et lite rom vil den variable brannlasten kunne stå nært hverandre og kledningene og føre til raskt brannspredning og overtenning.

Brannscenario 1 samsvarer stort sett med Test 2 (Hox, 2015), men en viktig forskjell er at det i testen var aktivert to sprinkler i korridoren utenfor den åpne døra i hybelenheten. Testen ble også utført med gipskledning på to vegger og rundt bad mens analysebyggverket har eksponert massivtre i alle vegger og himling i hybelenheter og fellesareal. Disse aspektene resulterer i større permanent brannenergi og sannsynlighet for brannspredning ut av en hybelenhet.

| Hendelse                                                                                                   | Tidspunkt     | Temperatur i hybelenhet °C |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|----------------------------|
| <b>Røykvarsler aktiveres i hybelenhet</b>                                                                  | 1 min 10 sek  | 59                         |
| <b>Overtenning i hybelenhet</b>                                                                            | 4 min 10 sek  | 822                        |
| <b>Vindusglasset med tre lag glass knuser fullstendig</b>                                                  | 5 min 45 sek  | 770                        |
| <b>Himlingen i korridoren faller ned</b>                                                                   | 8 min 30 sek  | 891                        |
| <b>Første observasjon som viser at en av de gipskledde veggene brenner</b>                                 | 47 min        | 1025                       |
| <b>Første observasjon som viser at deler av den eksponerte massivtreveggen ved vinduet er gjennombrant</b> | 1 time 10 min | 1025                       |
| <b>Observasjon av gjennombranning i ubeskyttet massivtrevegg</b>                                           | 1 time 25 min | 980                        |
| <b>Taket kollapser og forsøket avsluttes</b>                                                               | 1 time 36 min | 1072                       |

Tabell 28: Oversikt over brannforløp i branntest av hybelenhet, Test 2 (Hox, 2015)

Tabell 28 viser en oversikt over brannutviklingen i Test 2 (Hox, 2015). Her ses det at overtenningen skjedde etter 4 min og 10 sek. De målte temperaturene er gjengitt sammen med standard temperatur-tid kurven (standardorganisasjonen, 2008) i Tabell 29.

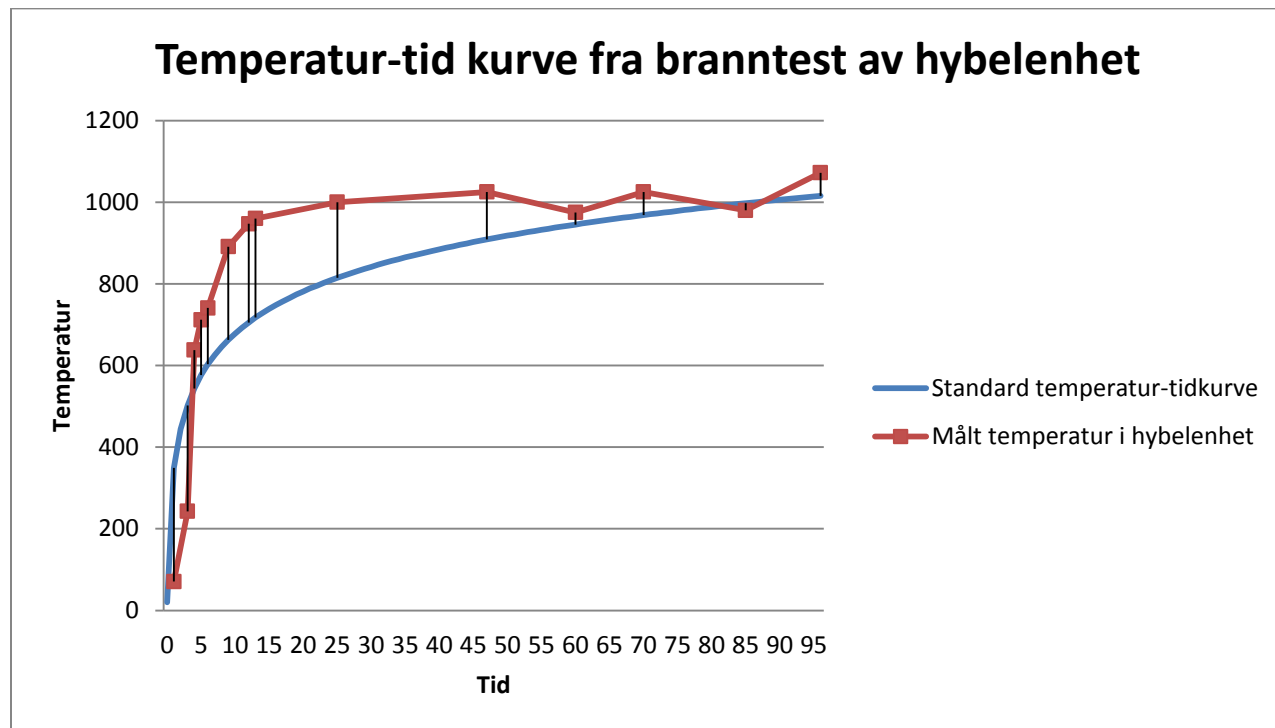
Eurokode 1 del 1-2 (standardorganisasjonen, 2008) spesifiserer ikke om tiden brukt for utregning av standard temperatur-tid kurven er tid fra antennelse eller tid fra brannen tar skikkelig fatt.

Temperaturene i Test 2 (Hox, 2015) er målt fra antennelseskilden ble antent, henholdsvis et kar med heptan under skrivebordet. På grunn av usikkerhet angående tid og at overtenning er et fenomen som skjer nokså spontant er det vanskelig å konkludere noe om hvordan tiden før overtenning i testen er i forhold til standard temperatur-tid kurven.

Stigningen og høyden av grafen i Tabell 29 forteller imidlertid at når overtenningen i Test 2 (Hox, 2015) skjedde overgikk temperaturøkningen standard temperatur-tid kurven, det vil si at grafen er brattere. Etter overtenning vil all permanent brannenergi i rommet delta i brannen (Drysdale, 2011).

Tabell 29 viser også at temperaturen i testen (Hox, 2015) overgikk standard temperatur-tid kurven i hele testen etter overtenning, med unntak av én måling etter rundt 85 min. Standard temperatur-tid kurven er basert på randverdiene av en rekke værste tenkelige tilfeller av rombrann med skillekonstruksjon i

betong (standardorganisasjonen, 2008). Testresultatene indikerer derfor at bruk av eksponerte massivreflater i rom kan føre til relativt høye temperaturer ved brann. Hvis samme tankegang overføres til analysebyggverket, hvor alle vegger og himling har eksponert massivtre kan det antas at brannbelastningen vil være minst like stor i brannscenario 1 som i Test 2 eller større.



Tabell 29: Temperatur fra branntest av hybelenhet, Test 2 (Hox, 2015) sammenlignet med standard temperatur-tid kurve (standardorganisasjonen, 2008)

### Brannspredning

Døra i hybelenheten antas å være åpen og dermed er brannspredning til tilstøtende rom sannsynlig dersom brannutviklingen ikke stoppes. Brannspredning vanskeliggjør brannsløkkingsarbeid og derfor er det interessant å kunne si noe om hvor raskt denne vil skje.

Etter overtenning sto flammer ut av døra til hybelenheten (Hox, 2015). De operative sprinklerne i korridoren hadde liten eller ingen effekt, selv om vanntrykket ble økt i løpet av testen. Det måtte derfor kompenseres med manuell slokking gjennom resten av testen, som tyder på at brannspredningen var relativt kraftig. Fellesarealet inneholder som tidligere beskrevet liten variabel brannlast, men ved overtenning og stor flammespredning ut a hybelenhet kan de eksponerte massivtreflatene antennes direkte og spre brannen videre.

En økning i varmeavgivelsesrate i en antenneskilde fra 100 kW til 160 kW kan endre brannvekstraten fra «slow» til «ultra fast» ved brennbare overflater i et rom (Nystedt, 2012). Dersom en overtent hybelenhet anses som antenneskilden til den permanente brannenergien i fellesarealet er det all grunn til å tro at brannspredningen videre i fellesarealet kan gå raskt. Temperaturen i korridoren



oversteget 300 °C etter rundt 5 min, altså etter overtenning i hybelenheten, se Tabell 28 (Hox, 2015). Dette er en kritisk temperatur hvor treverk vil antenne (Drysdale, 2011). Ved feiling i aktivering av vanntåkesystem i hele etasjen kan brannspredning til fellesareal skje enda raskere enn i Test 2 (Hox, 2015). Under testen ble det observert voldsomme flammer som strakte seg fra hybelenheten og relativt langt ut i korridoren.

Det antas at sannsynligheten for en brann som ikke slokkes av brukere i hybelenheten er størst dersom brukeren ikke er hjemme og at det da er størst sannsynlighet for at døra er lukket. Døra er dimensjonert med en brannmotstand på EI<sub>2</sub>30-S<sub>a</sub> og gir potensielt brannvesenet relativt god tid til å utføre slokking før brannen spres videre til fellesareal.

### *Bæreevne, stabilitet og tilgang*

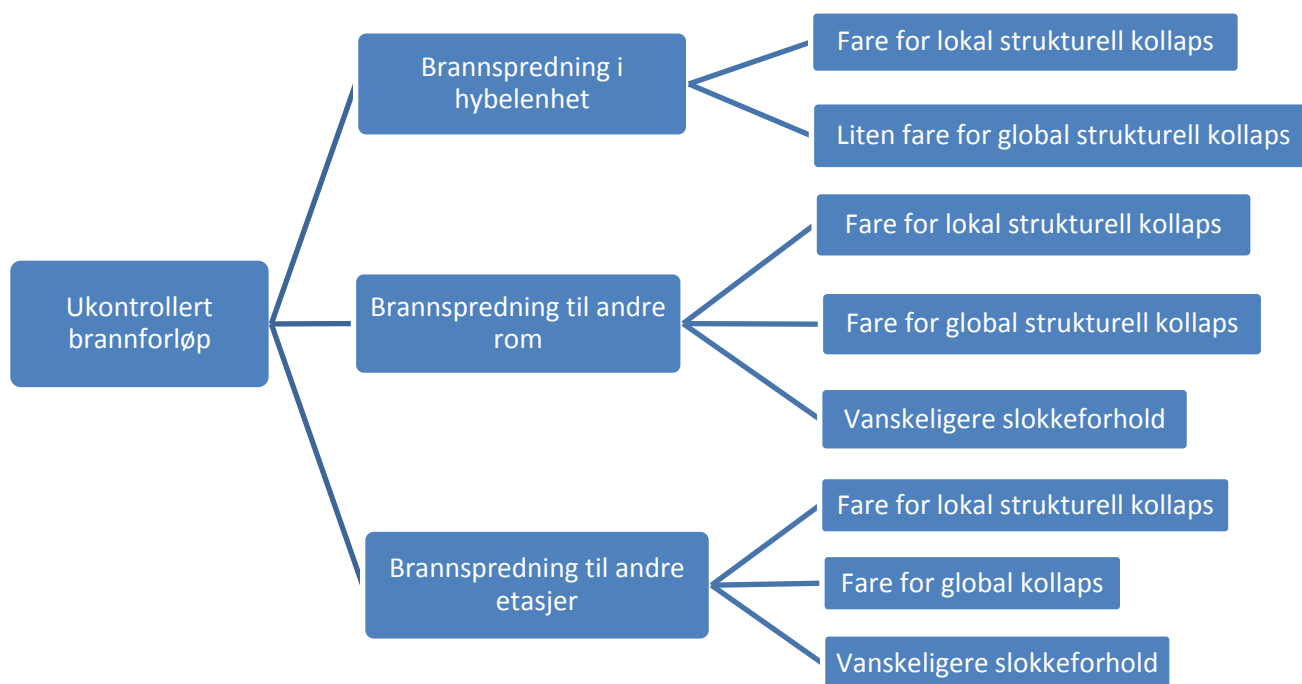
Temperaturen i massivtreelementet i gulvet ble målt til langt under 300 °C etter 90 min brannpåkjenning (Hox, 2015). Dette gjør at brannmannskap kan oppholde seg her og at slokkingen kan skje som normalt også etter 90 min brannpåkjenning. Som Tabell 28 viser kollapset taket i hybelenheten etter 96 min. Takkonstruksjonen bestod av 100 mm tykt massivtre med 40 mm utvendig påstøp.

Dersom konstruksjonen er dimensjonert for 90 min brannpåkjenning vil brannvesen ha relativt god tid til å utføre slokking. Brannens omfang påvirker brannvesenets kapasitet og står derfor igjen som et kritisk moment. Litteratur (Nystedt, 2011) og testresultater (Hox, 2015) har vist at spredning av brann kan skje relativt raskt ved bruk av eksponerte treflater i vegger og himling. Konsekvensene av ulike former for brannspredning oppsummeres i Figur 48.

Etter 90 min brann vil vegg- og dekkelementer kunne kollapse. På grunn av måten konstruksjonen er bygd opp på vil kreftene kunne overføres ved redundans, inntil mer enn ett vegg- og dekkelement mister bæreevnen (Denstad, 2015). Dette betyr at selv om det vil skje en lokal kollaps i for eksempel ett veggelement i hybelenheten, kan resten av konstruksjonen absorbere kreftene og forhindre global strukturell kollaps. Ved overtenning i hybelenheten i analysebyggverket vil derimot fire veggelementer og himlingen miste bæreevnen etter 90 min brannpåkjenning. Dersom det er nødvendig å øke bæreevnen ut over 90 min må det altså gjøres ytterligere tiltak i hybelenhetene.

Figur 48 viser et hendelsestre over hvilke konsekvenser ulike former for brannspredning kan ha for strukturell bæreevne og stabilitet og slokkeforhold.

Det antas at global strukturell kollaps kan forekomme selv om brannen ikke spres fra hybelenheten. I et slikt tilfelle vil derimot brannvesen ha gode forutsetninger for å slokke brannen i løpet av 90 min og derfor anses global strukturell kollaps her for å være urealistisk. Det antas at på grunn av vanskeliggjøring av slokkeforhold vil brannspredning til andre rom og etasjer øke faren for global strukturell kollaps betydelig. Ut fra dette konkluderes det med at brannspredning må forhindres så langt som det er mulig.



Figur 48: Konsekvenser med tanke på stukturell bæreevne, stabilitet og slokkeforhold

### 10.8.3. Brannscenario 2

Etter antenelse i et elektrisk apparat er det begrensede måter for brannen å spre seg videre. Fellesbadet inneholder liten variabel brannlast som sammen med ubrennbare overflater i vegger og himling gjør brannspredningen svært begrenset. Dersom en brann skulle vokse seg relativt stor antas det at brannalarmanlegget vil aktivere og varsle brukere og brannvesen som relativt enkelt kan slokke den.

Dersom døra som antas å ha brannmotstand holdes lukket vil brannen med relativt lite brannlast få begrenset oksygentilførsel. Det antas at sannsynligheten for at brannen skal spre seg gjennom den lukkede døra er liten. Dersom dette skjer vil vanntåkesystemet i fellesarealet aktivere og dempe og kontrollere brannen slik at den kan slokkes manuelt av brukere eller brannvesen.

### 10.8.4. Brannscenario 3

Fellesarealet inneholder relativt lite variabel brannlast og antenneskildene er hovedsaklig hvitevarer, komfyr, mikrobølgeovn og lignende. Komfyren vil være utstyrt med komfyrvakt og derfor er sannsynligheten for tørrkoking begrenset. Komfyrvakten forutsettes å fungere som varmedetektor og kutter strømforsyning dersom temperaturen blir for høy.

Antenelse av veggene bak integrerte elektriske apparater antas å være den største brannfaren men disse vil være kledd i ubrennbare materialer slik at brannen i tidlig fase begrenses til apparatet. Dersom brannen virkelig tar fatt i apparatet antas det at alarmsystem og vanntåkesystem aktiveres. Hvis det

utvikler seg en brann i forbindelse med matlaging eller elektrisk utstyr når det er brukere til stede antas det at det er gode forutsetninger for slokking ved bruk av brannteppe eller tilgjengelig slokkeutstyr i etasjen.

Faren for ulmebrann og etterfølgende voldsom oppblussing av brann ansees som liten på grunn av at massivtreveggene er beskyttet med ubrennbare flater mot de integrerte elektriske apparatene. Forbud mot røyking og levende lys vil også virke reduserende på faren for ulmebrann i massivtreflater og møbler.

Når det ikke befinner seg brukere i fellesarealet som kan oppdage en sakte utviklende brann som ikke utløser brannalarm eller vanntåkesystem antas dørene til hybelenhetene å være lukket. Dette kan for eksempel tilsvare en situasjon på natta eller i et tilfelle hvor ingen er hjemme. Dersom brannen plutselig blusser opp antas det at alarmsystemet sanser brannen og aktiverer vanntåkesystemet som kan slokke eller dempe og kontrollerer brannen til brannvesenet er på plass. Dørene til hybelenhetene har en brannmotstand på EI<sub>230</sub>-S<sub>a</sub>, som reduserer sannsynligheten for brannspredning i etasjen betraktelig i løpet av brannforløpet.

Overtenning i fellesareal anses som lite sannsynlig på grunn av sammenhengen mellom åpningsfaktor og temperaturutvikling (Drysdale, 2011) som er vist i Figur 27 i 5.8 - Faktorer som påvirker effekten av vanntåke. Relativt lav temperatur ved brann i fellesareal vil kunne redusere brannspredning og antennelse av eksponerte massivtreflater sammenlignet med hybelenheten.

#### 10.8.5. Brannscenario 4

Trapperommet inneholder liten variabel brannlast men i et tilfelle med påsatt brann kan det antas at brannscenarioet tilføres brannlast, for eksempel en kanne med bensin eller lignende. I en slik brann antas vanntåkesystemet å aktivere og slokke eller dempe og kontrollere brannen til den slokkes av brannvesen eller brukere. Vanntåkesystemers bruksområde er imidlertid begrenset til brannscenarioer de er testet og verifisert for og derfor er det nødvendig at vanntåkesystemet er dimensjonert for scenarioet. Som tidligere beskrevet er det i denne risikoanalysen antatt at vanntåkesystemet er riktig dimensjonert, installert og vedlikeholdt.

Dersom den tilførte variable brannlasten er så stor at vanntåkesystemet ikke klarer å bekjempe den påsatte brannen vil de eksponert massivtreflatene kunne ta fyr. Dette representerer en stor mengde brannenergi. På grunn av usikkerhet rundt størrelse av den variable lasten antas det konservativt at dette er et realistisk tilfelle. Dersom den permanente brannenergien deltar vil brannen kunne spre seg over flere etasjer uten barrierer med brannmotstand. Ved åpne vinduer og dører kan skorsteinseffekten øke brannspredningen (Shi et al., 2012).

### 10.9. Usikkerhetsanalyse

#### 10.9.1. Kvalitativ analyse

For å verifisere at den strukturelle brannsikkerheten er tilstrekkelig ved bruk av et vanntåkesystem i analysebyggverket utføres det her en kvalitativ analyse ved bruk av metoder beskrevet i rapporten «Verifying Fire Safety Design in Sprinklered Buildings» (Nystedt, 2011).

Det ses på to eksempler hvor det ene er preakseptert ved bruk av gipskledning i vegger og himling, kontra et tilfelle med eksponert massivtre i vegger og himling. I begge tilfellene er det benyttet vanntåkesystemet som er beskrevet i 10.2 –Beskrivelse av analysebyggverket.

Hensikten med dette er å finne ut om brannsikkerheten er tilstrekkelig uten bruk av kledning eller om det må kompenseres med kledning for å oppnå tilstrekkelig brannsikkerhet. Vanntåkesystem er benyttet i begge tilfellene på grunn av at det uansett er krav om automatisk slokkeanlegg i de relevante etasjene i henhold til byggteknisk forskrift (Byggkvalitet, 2015).

Strukturell bæreevne og stabilitet kan i prinsippet dimensjoneres ved bruk av preakseptert design og anses som tilstrekkelig pålitelig dersom forkullingsraten som ble registrert i Test 2 (Hox, 2015) benyttes som dimensjonerende verdi. Bruk av gipskledning åpner imidlertid for mindre tverrsnittsdimensjoner (standardorganisasjonen, 2008).

### **Brannfaren**

Analysen av konsekvenser har vist at dersom vanntåkesystemet feiler kan det relativt raskt skje overtenning i hybelenheten og føre til videre brannspredning til fellesareal. På grunn av mer utstrakt bruk av eksponert massivtre i analysebyggverket er det grunn til å tro at brannfaren vil være enda større enn i branttesten (Hox, 2015). Forskjellen mellom scenarioene er det imidlertid vanskelig å si noe om helt sikkert uten å utføre en ny test. Uansett konkluderes det med at brannfaren er relativt stor med tanke på at testresultatene i et antatt mindre dimensjonerende scenario oversteg standard temperatur-tid kurve, se Tabell 29. Test 2 (Hox, 2015) har visst tegn som tyder på at hovedbæresystemet vil forkulle fullstendig i løpet av et fullstendig brannforløp ved brann i hybelenheten med en andel av overflatene i eksponert massivtre. For å forhindre global strukturell kollaps er det derfor helt nødvendig at vanntåkesystemet minimum klarer å dempe og kontrollere brannen til brannvesen er på plass og kan foreta resterende slokking.

### **Forutsetninger for verifisering**

Fjerning av gipskledning kan ha negativ effekt på brannspredning i en bygning. Denne konklusjonen er basert på observert brannspredning til korridor under Test 2 (Hox, 2015). Høyere temperatur i et område øker omfanget av forkulling der temperaturen er over 300 °C (Drysdale, 2011). Sammen med økt mengde flammer og en mer voldsom brann kan dette føre til raskere brannspredning. Fjerning av gipskledning vil redusere brannsikkerheten med tanke på å kontrollere brannvekst, dette på grunnlag av at det eksponerte massivtreet gir brannen større potensiale til å vokse. Dersom den variable brannlasten er liten kan kledning forhindre antennelse av den permanente brannenergien og dermed forhindre global strukturell kollaps. Dette er imidlertid svært situasjonsavhengig og kan ikke tas som en selvfølge.

Et vanntåkesystemet vil kunne tynne ut og spre røyk over et større område. Dette kan forenkle manuell slokking ved at luftforhold på utsatte steder blir bedre og dermed bidra til økt sannsynlighet for vellykket brannbekjempelse. Uttykning og spredning av røyk kan føre til større røykkonsentrasjoner enkelte steder, men de negative effektene antas å ikke overstige de positive effektene av å tynne ut røyken på de mest utsatte stedene. Vanntåkesystemet kan også stoppe eller dempe og kontrollere en brann i tidlig fase og dermed forhindre global strukturell kollaps.

Diskusjonen over er oppsummert i Tabell 30 og her ses det at alle de negative konsekvensene som følge av fjerning av gipskledning vil bli kompensert for ved bruk av et vanntåkesystem. Den kvalitative analysen sier derimot ingenting om størrelsen på effektene og derfor kan det ikke uten videre konkluderes med at brannsikkerheten er verifisert.

| Hensikt med brannsikringstiltak<br>koplet til barriæregruppe | Endring i brannsikringstiltak |                                  |
|--------------------------------------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|
|                                                              | Tilført brannsikringstiltak   | Fjernet brannsikringstiltak      |
|                                                              | Vanntåkesystem                | Gipskledning i vegger og himling |
| <b>Redusere sannsynligheten for antennelse</b>               |                               |                                  |
| <b>Kontrollere brannvekst</b>                                | +                             | -                                |
| <b>Kontrollere røykspredning</b>                             | +                             |                                  |
| <b>Begrense brannspredning i bygningen</b>                   | +                             | (-)                              |
| <b>Forenkle redningsoperasjoner</b>                          |                               |                                  |
| <b>Forhindre global strukturell kollaps</b>                  | +                             | (-)                              |

Tabell 30: Tabellen viser en oversikt over positive og negative effekter i forhold til barriæregupper i et preakseptert og et alternativt design. «+» og «-» betyr at egenskapen i henhold brannsikkerheten er økt eller redusert. Der disse vises i parentes er effekten avhengig av flere forhold som er beskrevet ovenfor. Tabellen er inspirert av en kvalitativ analyse av brannsikkerhet ved bruk av sprinkler ved brennbare overflater i «Case Studies on the Verification of Fire Safety Design in Sprinklered Buildings» (Nystedt, 2012)

Den kvalitative analysen er basert på at vanntåkesystemet og gipskledningen har tilstrekkelig pålitelighet. For å evaluere påliteligheten kvalitativt beskriver rapporten «Verifying Fire Safety Design in Sprinklered Buildings» (Nystedt, 2011) en sjekklister som er utfylt i Tabell 31

I Tabell 31 vises det kvalitativt at vanntåkesystemet har relativt gode egenskaper i henhold til robusthet og pålitelighet. Det er imidlertid vanskelig å si noe om hvor avhengig et vanntåkesystem er av feil i komponenter og ytre faktorer som for eksempel vannforsyning og strøm før det er gjort en kvantitativ analyse. Som beskrevet i 5.9 - Pålitelighet finnes det ikke tilstrekkelig statistikk for pålitelighet i vanntåkesystemer. Det er derfor behov for en kvantitativ analyse av påliteligheten basert på påliteligheten i komponentene som vanntåkesystemet består av. En evaluering av risikoen for global strukturell kollaps og sannsynligheten for brannsløkking og brannspredning fortsetter derfor i den kvantitative analysen i neste avsnitt.

| Evaluering av egenskaper i vanntåkesystemet                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Egenskap                                                                                                                                                 | Svar                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| <b>Er effektiviteten avhengig av menneskelig handling</b>                                                                                                | I bunn og grunn ikke, men påliteligheten for aktivering kan være avhengig av vedlikehold, skade på komponenter og liknende som er et resultat av menneskelig handling eller mangel på dette.                                                                                                                                                                                                                                                |
| <b>Fører innføring av vanntåkesystemet til reduksjon i brannsikkerhet på flere barrieregrupper mens det kun tilfører økt brannsikkerhet på et punkt?</b> | Nei, det har positiv effekt på flere barrieregrupper og dekker alle de negative effektene ved fjerning av gipskledning.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| <b>Er vanntåkesystemet avhengig av flere delsystemer for å fungere?</b>                                                                                  | Et vanntåkesystem består av flere komponenter og om disse defineres som egne delsystemer kan være en smakssak. Oppgaven velger å se på vanntåkesystemet som ett system, derfor blir svaret nei. Hvor avhengig et vanntåkesystem er av at de ulike komponentene fungerer vil undersøkes nærmere i 10.9.2 - Kvantitativ analyse. Vanntåkesystemet har varmesensitive lukkede dyser og aktiveringen er derfor ikke avhengig av et alarmsystem. |
| <b>Har designet den nødvendige grad av fleksibilitet for å takle mulige branner i bygningen?</b>                                                         | Et vanntåkesystem kan kun verifiseres ved testing av komponenter samt hele systemet i et miljø som er representativt for bruksområdet. I denne risikovurderingen er det antatt at vanntåkesystemet er riktig dimensjonert, installert og vedlikeholdt, derfor er svaret ja.                                                                                                                                                                 |
| <b>Vil effektiviteten av vanntåkesystemet være avhengig av tid og hvilke vedlikeholds krav finnes?</b>                                                   | Vanntåkesystemer krever vedlikehold i henhold til relevant standard. Enkelte komponenter vil forringes med tid uavhengig av om systemet er i bruk dersom det ikke vedlikeholdes.                                                                                                                                                                                                                                                            |
| <b>Hvor sårbart er vanntåkesystemet ved strømbrudd, feil i software og liknende?</b>                                                                     | En kvantitativ tilnærming til dette spørsmålet vil gjennomgås i 10.10 - Sensitivitetsanalyse. En feil i disse komponentene kan føre til at hele systemet svikter.                                                                                                                                                                                                                                                                           |

Tabell 31: Evaluering av vanntåkesystemets egenskaper

## 10.9.2. Kvantitativ analyse

### *Pålitelighet i valgt vanntåkesystem*

#### Valgt vanntåkesystem

I kapittel 5.9-Pålitelighet ble det beskrevet en metode for å evaluere påliteligheten for aktivering i vanntåkesystemer sammenlignet med påliteligheten i et referansesprinklersystem (Xu and Fuller, 2013). Metoden baseres på å koble sammen sannsynligheten for feil i komponentene for å estimere sannsynligheten for feil i hele vanntåkesystemet i en komparativ feiltreanalyse. Oppbygningen i det valgte vanntåkesystemet som ble beskrevet tidligere i risikovurderingen finnes i feiltreet i Figur 49.

Oppbygningen er basert på beskrivelsen av vanntåkesystemet og tidligere utførte feiltre fra en rekke rapporter, se 9.9 - Datarunnlag.

For å gjøre beregningene er det også nødvendig å vite hvordan referansesprinklersystemet er bygd opp, samt påliteligheten i komponentene systemene er bygd opp av.

### Valgt sprinklersystem

Sprinklersystemet har en oppbygning lik den vist i feiltreet i Figur 50. Legg merke til at det ikke er brukt pumpesystem i sprinklersystemet, dette fordi vannforsyningen ved Moholt 50|50 tilfredsstillende kravene for vannforsyning i NS-EN 12845 (standardorganisasjonen, 2009a). På grunnlag av kontakt med prosjekterende er det valgt å inkludere kontrollpanel i sprinklersystemet, se mail fra Björn Magnusson i Vedlegg 6.

### Pålitelighetsdata

All data for pålitelighet i komponenter er hentet fra rapporten «Effectiveness of Fire Safety Systems for Use in Quantitative Risk Assessments» fra «New Zealand Fire Service Commission» (Commission, 2008), se Vedlegg 7 for nærmere beskrivelse.

Det er viktig å poengtere at pålitelighetene som er benyttet her er fra forskjellige systemer og kan derfor variere fra påliteligheten i vanntåkesystemer. Som det ble nevnt i 5.9 - Pålitelighet vil for eksempel vanntåkesystemer være mer utsatt for feil ved lange vedlikeholdsintervaller enn sprinklersystemer (Arvidson, 2015).

I beregningene er det benyttet lokale verdier for pålitelighet i hovedvannforsyningen, som gjelder for Auckland i New Zealand (Commission, 2008). Det vil her utføres en komperativ feiltreanalyse og der slike verdier inngår på samme måte i begge feiltreene, slik som i denne analysen, vil bruk av en lokal verdi ha relativt liten påvirkning på resultatet.

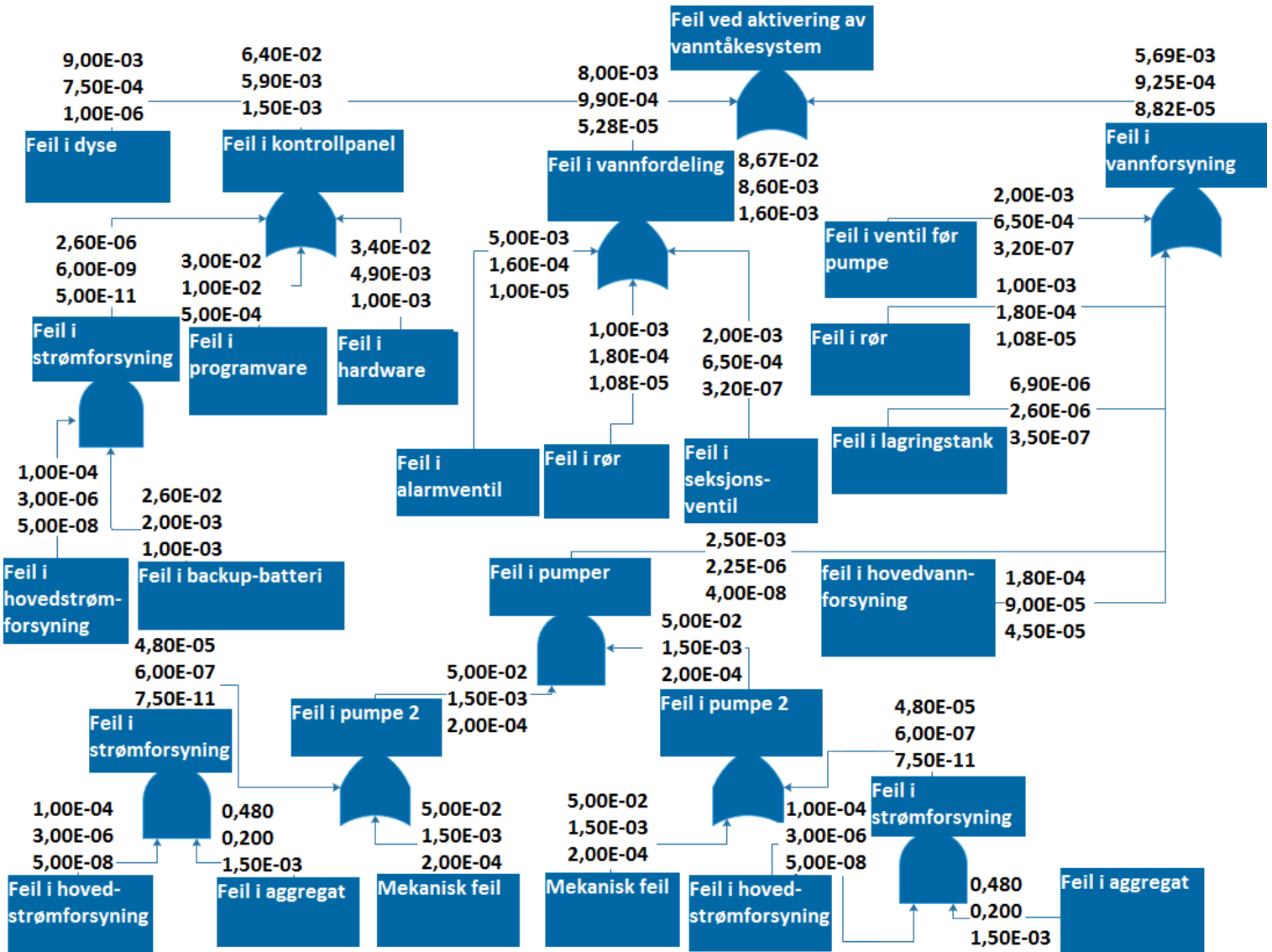
Vanntåkesystemer er som regel bygd opp av flere komponenter enn sprinklersystemer og derfor vil variasjonen mellom påliteligheten i feiltreene være avhengig av deltaljegraden, det vil si hvor mange komponenter det tas hensyn til. Forfatter har begrenset kunnskap om oppbygning av vanntåke- og sprinklersystemer og det er derfor tatt utgangspunkt feiltre fra en rekke rapporter, se 9.9 - Datarunnlag. En nærmere beskrivelse av påliteligheten i enkelte komponenter vil bli gjort videre i analysen der det er hensiktsmessig.

### Antakelser

I oppbyggingen av feiltreene er det gjort forenklinger, de viktigste er oppsummert her:

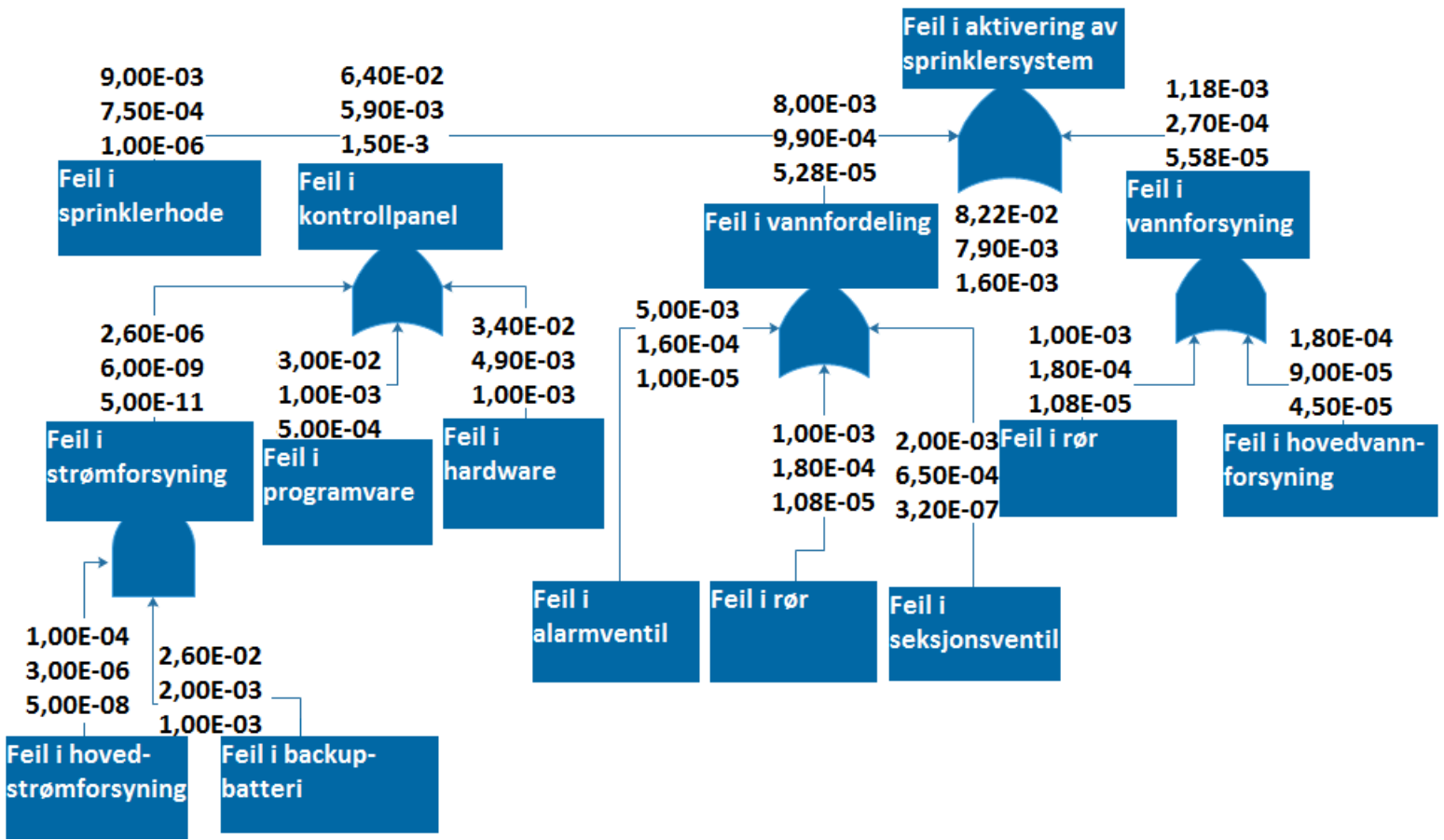
- For antakelser som følge av begrensninger i komponentdata, se 9.8 – Forenklinger.
- Det er antatt at komponentene i de ulike systemene har samme pålitelighet, selv om pålitelighetsdataene tidligere er brukt i sprinklersystemer og ikke nødvendigvis tilsvarer påliteligheten i komponenter i et vanntåkesystem. For eksempel er det antatt at vanntåkedyser og sprinklerhoder har samme sannsynlighet for feil ved aktivering.

- Feil i rør som følge av tetthet, lekkasje eller utilgjengelighet beregnes i sannsynlighet per meter. Rørene i sprinklersystemet og vanntåkesystemet antas å være like lange og hver delestrekning antas å være 5 m.



Figur 49: Feiltre for valgt vanntåkesystem. Verdiene i figuren beskriver høyeste verdi, forventet verdi og laveste verdi for sannsynligheten for feil i en triangularfordeling. Verdiene som er benyttet finnes i Vedlegg 7.





Figur 50: Feiltre for referansesprinklersystem. Verdiene i figuren beskriver høyeste verdi, forventet verdi og laveste verdi for sannsynligheten for feil i en triangulærfordeling. Verdiene som er benyttet finnes i Vedlegg 7.

Av Figur 49 og Figur 50 vises det at de to valgte systemene kun varierer i komponentoppbygningen i vannforsyning, hvor vanntåkesystemet blant annet har elektriske pumper, strømaggregat, ekstra ventil og lagringstank. Til sammenligning er påliteligheten i vannforsyning i sprinklersystemet kun avhengig av hovedvanntilførselen.

Den komperative feiltreanalysen skal gi svar på hvordan forholdet mellom pålitelighet i det valgte vanntåkesystemet og et relevant referansesprinklersystem er. I en virkelig situasjon vil påliteligheten i komponentene variere i både positiv og negativ retning i forhold til forventede verdier. Om påliteligheten i en vilkårlig komponent er mindre eller større enn forventet verdi er ikke godt å si, derfor er det i denne komperative feiltreanalysen gjort tre beregninger hvor det er valgt kun forventede verdier, kun øvre grenseverdier eller kun nedre grenseverdier i alle komponentene i begge feiltreene.

Resultatene fra beregningene i feiltreene vises i Tabell 32. Den benyttede pålitelighetsdataen finnes i Vedlegg 7.

| System                                                                   | Sannsynlighet for feiling ved oppstart |             |              |
|--------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|-------------|--------------|
|                                                                          | Forventet verdi                        | Øvre grense | Nedre grense |
| <b>Vanntåkesystem, <math>P_{Vanntåke}</math></b>                         | 8,60E-03                               | 8,67E-02    | 1,60E-03     |
| <b>Sprinklersystem, <math>P_{Sprinkler}</math></b>                       | 7,90E-03                               | 8,22E-02    | 1,60E-03     |
| <b><math>f_{pålitelighet} = P_{Vanntåke} \times P_{Sprinkler}</math></b> | 1,08                                   | 1,05        | 1,02         |

Tabell 32: Resultater fra komperativ feiltreanalyse

Resultatene i Tabell 32 viser at som forventet er påliteligheten større i sprinklersystemet, men kanskje ikke fullt som forventet at forskjellen i pålitelighet er størst ved bruk av forventede verdier i alle komponentene. Denne verdien vil bli benyttet videre i risikoanalysen.

Ved å analysere pålitelighetene for hver komponent forstås det at kontrollpanelet er det området i begge systemene som har minst pålitelighet, da spesielt i programvaren, se Figur 49 og Figur 50. Dette bør være et fokusområdet ved etablering av vanntåke- og sprinklersystemer.

Kontrollpanelet inngår imidlertid i begge disse systemene og er ikke opphavet til ulik pålitelighet. Variasjonen i pålitelighet skyldes at vannforsyningen er preget av ekstra komponenter i form av én ventil, én lagringstank og to pumper med ett aggregat hver. Pålitelighetsdataene (Commission, 2008) viser at det her bør legges spesielt fokus på aggregat, lagringstank og ventiler. Sikkerheten økes betraktelig ved å ha to selvstendige pumper.

Resultatet fra den komparative feiltreanalysen viser at ved bruk av forventede verdier i alle komponentene er sannsynligheten for feil ved aktivering 8 % større i vanntåkesystemet enn i sprinklersystemet. Dette er et nokså godt resultat i forhold til resultatene som ble framstilt i «Water Mist Fire Protection Reliability Analysis» (Xu and Fuller, 2013) og kan skyldes bruk av ulike pålitelighetsverdier, ulikt referansesprinklersystem, forskjellig detaljgrad i feiltreene, ulik oppbygning i feiltreene med mer. Resultatene hadde for eksempel blitt langt mer konservative dersom referansesprinklersystemet ikke hadde vært avhengig av kontrollpanel. Ut fra denne komparative feiltreanalysen konkluderes det med at påliteligheten i det valgte vanntåkesystemet er relativt stor.

I 10.10 - Sensitivitetsanalyse vil det utføres en ny analyse ved å benytte øvre grenseverdier for ulike påliteligheter i kritiske komponenter og barrierer som kartlegges i usikkerhetsanalysen.

### **Sannsynlighet for global strukturell kollaps ved brann**

I boka «Implementation of Eurocodes – Handbook 5» (Project, 2005) er det beskrevet en metode for å beregne sannsynligheten for global strukturell kollaps i bygningselementer på grunn av brann med et gjentaksintervall på 55 år, som symboliserer bygningslevetiden. Metoden tar blant annet hensyn til

hvordan påliteligheten automatiske vannbaserte slokkesystemer påvirker sannsynligheten for global strukturell kollaps.

Brann regnes som en ulykkeslast og påvirker bæreevnen i en bygning. Ved beregninger av sannsynlighet for global strukturell kollaps i et bygg er det satt et mål om at denne ikke skal være større enn  $P_t(\text{feil}) = 7,23E-05$  innenfor bygningens levetid på 55 år, altså (Project, 2005):

$$P_t(\text{feil ved brann}) \times P_t(\text{brann}) = P_t(\text{Feil}) < 7,23 \times 10^{-5}$$

Sannsynligheten for en alvorlig brann er gitt ved formellen under (Project, 2005):

$$P_t(\text{Brann}) = p_{fi}^{\text{Antennelse}} \times p_f^{\text{Brannvesen}} \times p_f^{\text{Brukere}} \times \prod p_f^{\text{aktive brannsikringstiltak}}$$

Hvor:

- $p_{fi}^{\text{Antennelse}} = \text{Sannsynligheten for antennelse}$
- $p_f^{\text{Brannvesen}} = \text{Sannsynlighet for at brannvesen ikke klarer å slokke brannen}$
- $p_f^{\text{Brukere}} = \text{Sannsynlighet for at brukere ikke klarer å slokke brannen}$
- $\prod p_f^{\text{aktive brannsikringstiltak}} = \text{Sannsynligheten for feil i aktive brannsikringstiltak}$

Beregner sannsynligheten for antennelse,  $p_{fi}^{\text{Antennelse}}$

I hybelenheten antas brannfaren å være normal, slik som vist i Tabell 33. I tillegg til type virksomhet har også størrelse på gulvarealet påvirkning på sannsynligheten for antennelse. Tabellen viser sannsynligheten for feil i løpet av en bygningslevetid på 55 år, derav 55 i senket skrift i benevnelsen på sannsynligheten for antennelse,  $p_{fi,55}^{\text{Antennelse}}$ .

| Kategori     | Virksomhet                         | Fare for brannaktivering | $P_{f,55} (10^{-5}/m^2)$ |
|--------------|------------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| <b>CAT 1</b> | Museum, kunstgalleri               | Lav                      | 0,22                     |
| <b>CAT 2</b> | Hotell, skole, kontor              | Normal                   | 2,2                      |
| <b>CAT 3</b> | Maskinverksted                     | Høy                      | 22                       |
| <b>CAT 4</b> | Maleverksted, kjemisk laboratorium | Veldig høy               | 220                      |
| <b>CAT 5</b> | Malingsfabrikk, fyrverkeriindustri | Ultra-høy                | 2200                     |

Tabell 33: Oversikt over sannsynlighet for brannstart ved en bygningslevetid på 55 år, avhengig av virksomhet og areal (Project, 2005)

I denne beregningen antas det forenklet at alle etasjer og kjeller i analysebyggverket har lik planløsning som i 9. etasje i Figur 40 i 10.2.3 - Planløsning. I 9. etasje er det totale arealet for hybelenhetene 166 m<sup>2</sup>. Sannsynlighet for antennelse i hybelenhetene i hele analysebyggverket, det vil si alle 9 etasjer og kjeller er beregnet til å være:

$$p_{fi,55,hybelenhet,CAT\ 2}^{Antennelse} = 10 \times 2,20 \times 10^{-5} \times 166 = 0,037$$

Fellesarealet inkludert fellesbad og trapperom i Figur 40 i 10.2.3 - Planløsning har et totalt areal på 137 m<sup>2</sup>. Beskrivelsen av analysebyggverket har vist at brannlasten i dette området her er relativt liten og godt beskyttet fra brannfarer. Derfor antas det at fellesarealet inkludert fellesbad og trapperom faller inn under «CAT 1», det vil si lav fare for brannaktivering i Tabell 33. Henholdsvis i samme kategori som museum og kunstgalleri. Nedenfor beregnes sannsynlighet for brannstart i fellesareal i hele analysebyggverket i «CAT 1»:

$$p_{fi,55,fellesareal,CAT\ 1}^{Antennelse} = 10 \times 0,22 \times 10^{-5} \times 137 = 0,003$$

Ved å kombinere sannsynlighetene for brannstart i fellesareal, fellesbad, trapperom og hybelenheter oppnås følgende verdier for hele analysebyggverket:

$$p_{fi,55,Analysebyggverk,CAT\ 2+CAT\ 1}^{Antennelse} = 0,037 + 0,003 = 0,040$$

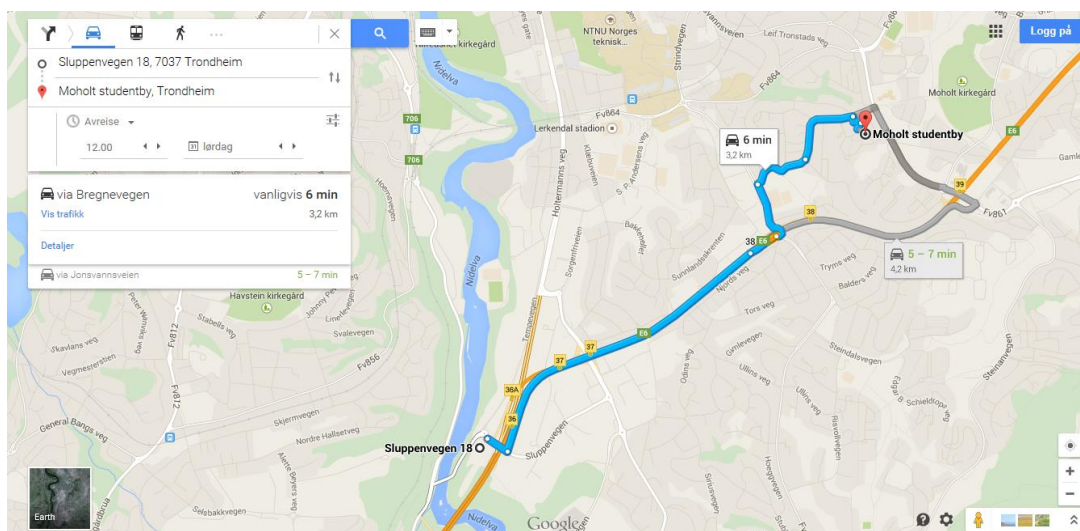
Sannsynlighet for feiling ved brannslukking utført av brannvesen,  $p_f^{Brannvesen}$

Tabell 34 viser en oversikt over sannsynligheter for feiling ved slukking utført av brannvesen.

Brannvesenet i Trondheim er profesjonelle og på grunn av relativt kort avstand (3,2 km) fra Moholt samt automatisk brannvarsling direkte til brannstasjonen er det gode forutsetninger for rask igangsetting av slukking.

| Type brannvesen           | Tid mellom alarmen går og når brannslukkingen starter |                     |                     |
|---------------------------|-------------------------------------------------------|---------------------|---------------------|
|                           | ≤ 10 min                                              | 10 min < t ≤ 20 min | 20 min < t ≤ 30 min |
| <b>Profesjonelle</b>      | 0,05                                                  | 0,1                 | 0,2                 |
| <b>Ikke-profesjonelle</b> | 0,1                                                   | 0,2                 | 1                   |

Tabell 34: Sannsynlighet for feiling ved slukking utført av brannvesen (Project, 2005)



Figur 51: Oversikt over kjørestrekning og antatt kjøretid (Maps, 2015)

Figur 51 viser en oversikt over kjøretid mellom brannstasjonen på Sluppen og Moholt Studentby. Googles veibeskrivelse (Maps, 2015) tar hensyn til trafikkpåkjenningen når kjøretiden beregnes og den dimensjonerende tiden er funnet gjennom å analysere en ukes samtlige tidspunkter. Antatt kjøretid langs E6 er mellom 5-7 min i «rushen» og 5 min til vanlig. Det antas at andre biler vil vike for beredskapsbiler i en krisesituasjon og dessuten kjøre raskere enn fartsgrensen. Derfor vil det være sannsynlig at brannvesenet vanligvis bruker rundt 5 min på strekningen.

Dette gir grunnlag for å starte slokkingen innen 10 min, men det er også sannsynlig at denne verdien overstrides. For beregningene velges det derfor to verdier:

- $t \leq 10 \text{ min}: p_f^{\text{Brannvesen } 10 \text{ min}} = 0,05$
- $10 \text{ min} < t \leq 20 \text{ min}: p_f^{\text{Brannvesen } 20 \text{ min}} = 0,1$

Det antas at brannvesenet alltid vil være til stede innen 20 min og at det derfor ikke er behov for ikke-profesjonelt brannvesen.

Sannsynlighet for feiling ved slokking utført av brukere,  $p_f^{\text{Brukere}}$

Boka «Implementation of Eurocodes – Handbook 5» (Project, 2005) gir at sannsynligheten for feiling ved slokking utført av brukere er:

$$p_f^{\text{Brukere}} = 0,4$$

Sannsynlighet for feiling av vanntåkesystem,  $\prod p_f^{\text{aktive brannsikringstiltak}}$

For analyse av sannsynlighet for global strukturell kollaps vil det her bli benyttet det samme vanntåkesystemet som ble analysert i feiltreanalysen. Som tidligere nevnt er det på grunn av mangel på statistikk over pålitelighet i vanntåkesystemer (Xu and Fuller, 2013) nødvendig å ta i bruk statistikk fra sprinklersystemer eller lignende systemer.

| Bruksområde               | Antall branner med sprinkler til stede | Andel hvor sprinklene ikke opererte, $p_{f,\text{sprinkler}}^{\text{aktivering}}$ | Andel hvor sprinklerene ikke var effektive etter aktivering, $p_{f,\text{sprinkler}}^{\text{effektivitet}}$ | Andel hvor sprinklersystemet ikke fungerte tilstrekkelig, $p_{f,\text{sprinkler}}^{\text{pålitelighet}}$ |
|---------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Alle typer boliger</b> | 26 280                                 | 5,0 %                                                                             | 3,0 %                                                                                                       | 8,0 %                                                                                                    |

Tabell 35: Statistikk over sannsynlighet for feil i våtrørssprinklersystemer fra en amerikansk undersøkelse for boliger utført mellom 2007-2011 (John R. Hall, 2013)

Rapporten «Verifying Fire Safety Design in Sprinklered Buildings» (Nystedt, 2011) fra Universitetet i Lund omhandler ulike tiltak for verifisering av sprinklersystemer hvor det er benyttet statistikk fra rapporten «U.S Experience With Sprinklers And Other Automatic Fire Extinguishing Equipment» (John R. Hall, 2010). Denne oppgaven vil også benytte statistikk fra denne rapporten, i tillegg til «U.S Experience With Sprinklers» (John R. Hall, 2013). Disse rapportene inneholder omfattende undersøkelser med en variert

statistikk over påliteligheten i sprinklersystemer. Det ikke er blitt funnet tilsvarende norsk rapporter i løpet av framstillingen av denne oppgaven.

Tabell 35 viser at påliteligheten i sprinklersystemer er delt opp i pålitelighet for aktivering og pålitelighet for effektiv operasjon. I den komparative feiltreanalysen som tidligere ble gjort i oppgaven ble det funnet et forholdstall mellom påliteligheten i det valgte vanntåkesystemet og et relevant referansesprinklersystem som kunne vært brukt som erstatning. For å forsøke å veie pålitelighetsdataene for sprinklersystemer slik at de blir mer tilpasset vanntåkesystemer multipliseres  $p_{f,sprinkler}^{effektivitet}$  med faktoren for forventede verdier funnet i feiltreanalysen,  $f_{p\text{p\text{litelighet}}}$ :

$$p_{f,vannt\ddot{a}ke}^{aktivering} = p_{f,sprinkler}^{aktivering} \times f_{p\text{p\text{litelighet}}}$$

$$p_{f,vannt\ddot{a}ke}^{aktivering} = 5,0 \% \times 1,08 = 5,4 \%$$

Videre antas det at påliteligheten for effektiv operasjon er den samme for sprinkler- og vanntåkesystemer, altså:

$$p_{f,vannt\ddot{a}ke}^{effektivitet} = p_{f,sprinkler}^{effektivitet}$$

Dette gir en antatt sannsynlighet for feil i vanntåkesystemet på:

$$p_{f,vannt\ddot{a}ke}^{p\text{litelighet}} = p_{f,vannt\ddot{a}ke}^{effektivitet} + p_{f,vannt\ddot{a}ke}^{aktivering} = 3,0 \% + 5,4 \% = 8,4 \%$$

#### Sannsynligheten for global strukturell kollaps ved brann, $P_t(\text{feil ved brann})$

Boka «Implementations of Eurocodes» (Project, 2005) viser til en tabell med ulike sannsynligheter for feil ved brann i en kontorbygning med bærende konstruksjon av stål og med brannceller av ulike dimensjoner. «Feil ved brann» samsvarer med sannsynligheten for strukturell kollaps i et bygg på grunn av brann. Kollaps av stålkonstruksjoner er avhengig av hvor mye varme som overføres fra en brann til bygningselementene (Project, 2005). Det samme gjelder ikke for trekonstruksjoner, som isolerer godt mot varme men brenner med relativt jevn forkullingshastighet slik at tverrsnittet og bæreevnen reduseres (Drysdale, 2011).

Sannsynlighetene for feil ved brann i stålbygningen som er brukt som eksempel i «Implementations of Eurocodes» (Project, 2005) varierer mellom 0,009 og 0,36 avhengig av areal i brannrommet.

Dersom en brann i et massivt rehus med eksponerte vegger og himlinger i massivtre tar skikkelig fatt og ingenting gjøres for å forhindre videre brannutvikling er det stor sannsynlighet for at det fullstendige brannforløpet vil vare helt til bygget er brent opp (Hox, 2015). Sannsynligheten for feil ved brann i et massivt rehus med eksponerte vegger og himlinger antas derfor for å være 100 %, det vil si:

$$P_t(\text{feil ved brann}) = 1,0$$

På grunn av kompleksitet er det ikke tatt hensyn til redundans i bærekonstruksjonen ved denne antakelsen. Det spesifiseres at dette er en konservativ antakelse.

For å redusere forkulling og dermed sannsynligheten for feil ved brann kan forkulling midlertidig utsettes eller brannspredning forhindres. I Figur 48 i 10.8 i Analyse av konsekvenser ble det antydnet at dersom brannspredningen ut av opphavsrommet forhindres inntil brannvesenet starter slokking vil sannsynligheten for global strukturell kollaps være liten.

Videre i oppgaven vil det gjøres et forsøk på å estimere sannsynligheten for feil ved brann i analysebyggverket ved å anslå faren for brannspredning mellom hybelenhet, fellesareal og trapperom. Det antas at det vil forekomme feil ved brann dersom brannen spres ut av opphavsrommet før brannvesenet er på plass, som er en ganske konservativ antakelse. Alle vegger mellom de definerte rommene er av massivtre med brannmotstand og derfor antas det at brannen kun kan spres gjennom dører. Dersom dørene er lukket har disse tilstrekkelig brannmotstand til å forhindre brannspredning innen brannvesenet er på plass (EI 30 og EI 60). Brannen er definert som spredt når flammene går gjennom en døråpning. Det antas at brannvesenet starter slokking innen 10 eller 20 min.

Resultater fra Test 2 (Hox, 2015) har vist at ved brann med åpen dør i hybelenhet vil det forekomme overtenning og brannen vil spre seg i løpet av rundt 5 min. Det antas derfor at brannen vil spre seg til fellesareal uavhengig av hvor brannstarten befinner seg i hybelenheten dersom døra er åpen. Det har i løpet av framstillingen av oppgaven ikke lyktes i å finne statistikk over sannsynligheten for at dører til hybelenheter i studentkollektiver er åpne. Artikkelen «Modelling Fire Spread in Buildings» (Elms et al., 1984) har benyttet en verdi på 0,5 for dører i boliger ved beregning av brannspredning. På grunnlag av dette benyttes denne verdien også her.

Sannsynligheten for brannstart i fellesareal er på grunn av ulike antennelseskilder avhengig plassering i rommet, men det antas her at sannsynligheten for brannstart er jevnt fordelt over hele arealet. Sannsynligheten for brannspredning til andre rom innen brannvesenet er på plass er avhengig av brannspredningshastighet, antennelsessted og om dørene brannen sprer seg til er åpne eller ikke. På grunnlag av den tidligere beskrevde sammenhengen mellom åpningsfaktor og sannsynlighet for overtenning antas det at det ikke skjer en overtenning i fellesarealet før brannvesenet starter slokking.

I artikkelen «Predicting Fire Growth Involving Interior Finish Materials Including the Effects of Lateral Flame Spread and Layer Heating» (Lattimer and Beyler, 2003) er sideveis flammespredning fra et hjørne med brennbare overflater i kryssfinér før overtenning beregnet via data fra en ASTM E1354 cone calorimeter test og en ASTM E1321: Lateral Flame Spread test. Beregningene stemte relativt bra overens med resultater fra en storskala romhjørnetest i samme artikkel.

Det antas forenklet at brannen spres i 15 min før slokkingen starter og at tiden før brannvesenet starter slokking kun påvirker sannsynligheten for at brannen slokkes av brannvesenet. Det antas forenklet at sideveis flammespredning i massivtreflater etter 15 min er 1,1 m (til hver side), som samsvarer med resultatene fra beregninger og testresultater i artikkelen (Lattimer and Beyler, 2003). Det antas at denne brannspredningshastigheten gjelder langs veggene uavhengig av om brannen oppstår i et hjørne eller ikke.

Flammespredning langs gulv er sterkt avhengig av variabel brannlast og er derfor vanskelig å estimere. I fellesarealet befinner det seg lite variabel brannlast i nærhet av dører til hybelenhetene. For å gjøre et

estimat på brannspredning langs gulvet i fellesareal antas det at flammespredningen har en radius på 1,1 m fra antennestedet etter 15 min, altså tilsvarende sideveis flammespredning (Lattimer and Beyler, 2003).

Når det gjelder trapperommet antas det konservativt at dersom det oppstår brann her vil brannen uansett spre seg til fellesarealet ved åpen dør i løpet av 15 min. Det ses bort fra spredning til andre etasjer. Dører mellom fellesareal og trapperom er selvlukkende og antas å ha en pålitelighet på 0,8 (Institution, 2003)

Til nå har oppgaven gått gjennom sammenhengen mellom brannstart og brannspredning. På grunn av at rommene som analyseres her har ulik sannsynlighet for overtenning og ulik pålitelighet i branndører, er det nødvendig å veie sannsynligheten for brannspredning etter hvor brannen starter. Det antas fortsatt at sannsynligheten for brannstart i hybelenheten er normal, og at sannsynligheten for brannstart i fellesareal og trappoppgang er lav på grunn av generelt liten brannfare og brannlast.

Sannsynligheten for brannstart i hybelenheten og trapperom er som tidligere nevnt antatt å være den samme uansett hvor den starter. I fellesarealet er sannsynligheten for brannspredning imidlertid avhengig av hvor den oppstår. Dersom brannspredningen har radius på 1,1 m i løpet av 15 min vil brannen kunne spres gjennom én dør, to dører eller ikke i det hele tatt, fra fellesareal til hybelenhetene. Beregningene av størrelsen på arealet for brannspredning til ulike antall dører finnes i Vedlegg 8. Disse verdiene skal videre benyttes for å beregne den samlede sannsynligheten for brannspredning ut av rommet brannen startet i, som vises i Tabell 36. Legg merke til at parametrene A, B, C, D og E er forklart i tabellteksten.

Tabell 36 viser at ut fra antakelsene som er gjort om global strukturell kollaps som følge av brannspredning ut av brannens oppstartsrom er den samlede sannsynligheten for feiling ved brann beregnet til å være:

$$P_t(\text{feil ved brann}) = 0,499$$

Denne verdien erstatter den tidligere antatte verdien og benyttes videre i risikovurderingen. En nærmere beskrivelse av beregningene finnes i Vedlegg 9.



| Område             | Brannspredning              | A:   | B:   | C:                    | D:<br>(B x C) | E:<br>(D / D <sub>tot</sub> ) | F:<br>Sannsynlighet<br>for<br>brannspredning<br>vektet etter<br>sannsynlighet<br>for brannstart<br>(A x E) |
|--------------------|-----------------------------|------|------|-----------------------|---------------|-------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Hybelenhet</b>  | Hybelenhet →<br>Fellesareal | 0,5  | 166  | $2,20 \times 10^{-5}$ | 3,56 E-03     | 0,973                         | 0,487                                                                                                      |
| <b>Fellesareal</b> | Fellesareal →               | 0,5  | 17,5 | $0,22 \times 10^{-5}$ | 3,85 E-05     | 1,05E-02                      | 0,005                                                                                                      |
|                    | → Én<br>Hybelenhet          |      |      |                       |               |                               |                                                                                                            |
|                    | Fellesareal →               | 0,75 | 11   | $0,22 \times 10^{-5}$ | 2,42 E-05     | 7,00E-03                      | 0,005                                                                                                      |
|                    | → To<br>hybelenheter        |      |      |                       |               |                               |                                                                                                            |
|                    | Fellesareal →               | 0,2  | 2    | $0,22 \times 10^{-5}$ | 4,40 E-06     | 0,001                         | 2,00E-04                                                                                                   |
|                    | →<br>Trapperom              |      |      |                       |               |                               |                                                                                                            |
| <b>Trapperom</b>   | Trapperom →<br>Fellesareal  | 0,2  | 14,2 | $0,22 \times 10^{-5}$ | 3,12 E-05     | 0,009                         | 0,002                                                                                                      |
| <b>Sum</b>         |                             |      | 303  |                       | 3,66 E-03     |                               | 0,499                                                                                                      |

Tabell 36: Utregning av samlet sannsynlighet for brannspredning ut av rommet brannen startet i, vektet etter sannsynlighet for brannstart i de ulike rommene. A: Sannsynlighet for brannspredning gjennom dør. B: Areal av brannspredningsområde (m<sup>2</sup>). C: Sannsynlighet for antennelse per areal. D: Sannsynlighet for antennelse. E: Andel tilfeller hvor brannspredningen skjer på følgende måte.

Beregning av sannsynlighet for global strukturell kollaps i analysebyggverket

Tabell 37 viser sammendraget av beregningene for sannsynligheten for global strukturell kollaps i ulike situasjoner. Resultatene viser at brannsikkerheten er tilstrekkelig i alle situasjoner for de valgte parametrene i usikkerhetsanalysen. Det vil si at sikkerheten er tilstrekkelig dersom brannvesenet starter slokkingen etter 10 min, men innen 20 min. Beregningene finnes i Vedlegg 9.

| Situasjon                                                        | $P_{t(\text{Feil ved brann})}$ | $P_{t(\text{Feil ved brann})}^{\text{Maksimalverdi}}$ | Sikkerhet |
|------------------------------------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Vanntåkesystem, brannvesen starter slokking innen 10 min</b>  | 3,35 E-05                      | 7,23E-05                                              | Ok        |
| <b>Sprinklersystem, brannvesen starter slokking innen 10 min</b> | 3,19 E-05                      | 7,23E-05                                              | Ok        |
| <b>Vanntåkesystem, brannvesen starter slokking innen 20 min</b>  | 6,71 E-05                      | 7,23E-05                                              | Ok        |
| <b>Sprinklersystem, brannvesen starter slokking innen 20 min</b> | 6,38 E-05                      | 7,23E-05                                              | Ok        |

Tabell 37: Oppsummering av beregninger for sannsynlighet for global strukturell kollaps ved bruk av parametre fra usikkerhetsanalysen

Sannsynligheten for global strukturell kollaps ved bruk av et alternativt sprinklersystem er tatt med for å vise effekten av pålitelighetsforholdet som ble funnet i den komparative feiltreanalysen tidligere i usikkerhetsanalysen. Som forventet er sannsynligheten for global strukturell kollaps mindre ved bruk av sprinklersystemet, men forskjellen er relativt liten. Ved bruk av «goal seeker» funksjonen i Excel er det beregnet at sikkerheten mot global strukturell kollaps er tiltrekkelig når brannvesen starter slokking innen 20 min inntill, påliteligheten i vanntåkesystemet er mindre enn 90,9 %. Dette er ikke langt fra verdien 91,6 % som ble funnet via den komparative feiltreanalysen og derfor er det viktig å kartlegge hvilke dominerende faktorer som påvirker påliteligheten i vanntåkesystemet. Sensiviteten i pålitelighet i vanntåkesystemet og andre parametre i beregningene undersøkes videre i 10.10 - Sensitivitetsanalyse.

## 10.10. Sensitivitetsanalyse

### 10.10.1. Sensitivitet med tanke på komponentoppbygging i vanntåkesystem

Tabell 38 viser hvordan endring av påliteligheten i utsatte komponenter i vanntåkesystemet påvirker sannsynligheten for global strukturell kollaps i analysebyggverket. De kritiske parametrene ble funnet ved å analysere pålitelighetsverdiene og oppbygningen i feiltreene for vanntåke- og sprinklersystemene. For å undersøke sensitiviteten som følge av endringer i pålitelighet er det er valgt øvre grenseverdier for disse, se Vedlegg 7.

| Scenario                                  | Pålitelighetsforhold funnet i komparativ feiltreanalyse, $f_{\text{pålitelighet}}$ | Grenseverdi for sannsynlighet for global strukturell kollaps | Sannsynlighet for global strukturell kollaps når brannvesenet starter slokking innen 10 min | Sannsynlighet for global strukturell kollaps når brannvesenet starter slokking innen 20 min | Kommentar                                         |
|-------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| Parametre fra usikkerhetsanalysen         | 1,08                                                                               | 7,23E-5                                                      | 2,35 E-5                                                                                    | 6,71 E-5                                                                                    | Ok i alle tilfeller, som tidligere vist           |
| Bruk av ett pumpesystem                   | 1,27                                                                               | 7,23E-5                                                      | 3,73 E-5                                                                                    | 7,47 E-5                                                                                    | Tilstrekkelig pålitelighet avhengig av brannvesen |
| Liten pålitelighet i dobbelt pumpe-system | 1,40                                                                               | 7,23E-5                                                      | 3,99 E-5                                                                                    | 7,98 E-5                                                                                    | Tilstrekkelig pålitelighet avhengig av brannvesen |
| Liten pålitelighet i kontrollpanel        | 8,43                                                                               | 7,23E-5                                                      | 1,80 E-4                                                                                    | 3,60 E-4                                                                                    | Ikke OK i noen tilfeller                          |

Tabell 38: Oversikt over hvordan pålitelighet i ulike komponenter og oppbygning av vanntåkesystemet påvirker sannsynligheten for global strukturell kollaps i analysebyggverket

Det er relativt stor forskjell mellom nedre, forventede og øvre verdier i pålitelighet, spesielt i aggregat og programvaren i kontrollpanelet. Dette kan vitne om at komponentene fra statistikken er fra ulike systemer med ulike bruksområder og at komponentene har forskjellig kvalitet. De øvre verdiene fremstår som svært konservative. For eksempel øvre grenseverdier for aggregat som viser til at disse feiler ved oppstart i nær halvparten av tilfellene, noe som virker urealistisk. Verdien er svært konservativ dersom pumpesystemet vedlikeholdes og kontrolleres jevnlig. Pålitelighetsverdiene for programvaren i kontrollpanelet er basert på statistikk for svikt i industrielle datmaskiner som følge av menneskelig feil og trenger på ingen måte å samsvare med påliteligheten i et kontrollpanel i et vanntåkesystem. Feiltreene og beregningene som er gjort i forbindelse sensitivitetsanalysen finnes i Vedlegg 11. Beregningene av sannsynlighet for feil i vanntåkesystemene i de ulike scenarioene innes i Vedlegg 10.

Tabell 38 viser at endringer i pålitelighet i pumpesystem og kontrollpanel, samt oppbygning av vanntåkesystem vil føre til utilstrekkelig høy sannsynlighet for global strukturell kollaps når brannvesenet starter slokking etter mer enn 10 min. Sannsynligheten for global strukturell kollaps er tilnærmet tilstrekkelig liten i alle tilfeller uavhengig av brannvesen ved bruk av kun ett pumpesystem. Påliteligheten er derimot relativt langt unna grensen på  $7,23 \text{ E-5}$  i de andre scenarioene i tabellen. Spesielt liten pålitelighet i kontrollpanel har stor betydning. En annen ting som er viktig å legge til merke er at bruk av ett pålitelig pumpesystem gir bedre sikkerhet enn bruk av to pumpesystemer med lav grenseverdi for pålitelighet.

### 10.10.2. Sensitivitet med tanke på endring av variabel brannenergi og antennelsesfare

I usikkerhetsanalysen ble det valgt at faren for antennelse i fellesareal og trappoppgang er lav. Oppgaven skal nå se på hvordan en endring til normal antennelsesfare påvirker sannsynligheten for global strukturell kollaps.

Areal av fellesareal og trapperom er  $137 \text{ m}^2$ , som gir følgende sannsynlighet for antennelse for hele analysebyggverket basert på verdiene i Tabell 33.

$$p_{fi,55,fellesareal,CAT 2}^{Antennelse} = 10 \times 2,2 \times 10^{-5} \times 137 = 0,030$$

$$p_{fi,55,Analysebyggverk,CAT 2+CAT 2}^{Antennelse} = 0,037 + 0,030 = 0,067$$

På grunn av antatt sammenheng mellom brannfare, brannlast og feil ved brann vil også sistnevnte påvirkes av økt antennelsesfare. Effekten av økt antennelsesfare er beregnet i Vedlegg 11 og ny sannsynlighet for feil ved brann er:

$$P_t(\text{feil ved brann}) = 0,490$$

Dette tilsvarer en reduksjon i sannsynlighet for global strukturell kollaps ved brann med rundt 2 % i forhold til de opprinnelige valgte verdiene. Dette kan høres litt merkelig ut, men årsaken er at en større andel av brannene vil oppstå i fellesarealet hvor sannsynligheten for feil ved brann antas å være mindre. Allikevel vil sannsynligheten for global strukturell kollaps samlet øke på grunn av større antennelsesfare.

| Scenario                                        | Sannsynlighet for global strukturell kollaps ved opprinnelige parametre | Sannsynlighet for global strukturell kollaps ved normal antennelsesfare i hele etasjen | Grenseverdi for global strukturell kollaps | Kommentar              |
|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|------------------------|
| <b>Brannvesen starter slokking innen 10 min</b> | 3,35 E-5                                                                | 5,51 E-05                                                                              | 7,23 E-5                                   | Ok i alle tilfeller    |
| <b>Brannvesen starter slokking innen 20 min</b> | 6,71 E-5                                                                | 1,10 E-04                                                                              | 7,23 E-5                                   | Avhengig av brannvesen |

Tabell 39: Sannsynlighet for global strukturell kollaps ved normal antennelsesfare i alle arealer i analysebyggverket

Beregninger av sannsynlighet for global strukturell kollaps med normal antennelsesfare i hele etasjen ved ellers bruk av parametrene fra den kvantitative analysen finnes i Vedlegg 11. Oppsummeringen av disse finnes i Tabell 39, som viser at dersom antennelsesfaren i fellesareal og trapperom øker fra lav til normal nærmest dobles sannsynligheten for global strukturell kollaps og vil føre til utilstrekkelig sikkerhet avhengig av brannvesen.

### 10.10.3. Sensitivitet med tanke på endring i bannspredningshastighet

Det skal her undersøkes sammenhengen mellom bannspredningshastighet og global strukturell kollaps ved å se på endringene i sannsynlighet for feil ved brann,  $P_t(\text{feil ved brann})$ . Det antas at økt bannspredningshastighet kun påvirker brannens utbredelse og ikke sannsynligheten for antennelse.

Da antas fremdeles at brannen vil spre seg fra hybelenhet og trapperom uansett oppstartssted dersom de respektive dørene er åpne. En økning i bannspredningshastighet vil derfor kun påvirke bannspredningen i fellesareal, og dermed også sannsynligheten for feil ved brann. For å anslå effekten av økt bannspredning er arealene for bannspredning til én og to dører doblet og firedoblet.

Beregningene som finnes i Vedlegg 11 har vist at den nye sannsynligheten for feil ved brann ved dobling av bannspredningspredningsarealet er:

$$P_t(\text{feil ved brann}) = 0,500$$

Ved firedobling av bannspredningsarealet er verdien:

$$P_t(\text{feil ved brann}) = 0,520$$

Effekten av økningen i sannsynligheten for feil ved brann vises Tabell 40. Tabellen viser at en dobling av bannspredningsarealet har relativt lik påvirkning på sannsynlighet for global strukturell kollaps som en økning av antennelsesfaren i fellesareal og trapperom. Økningen i sannsynlighet for feil ved brann ville vært større dersom bannspredning fra hybelenheter og trapperom også hadde vært avhengig av bannspredningshastigheten. Her er det konservativt antatt at disse vil overtenne uansett. Ut fra dette kan det konkluderes med at sannsynligheten for overtenning har spesielt mye å si for sannsynligheten for global strukturell kollaps.

| Scenario                                        | Sannsynlighet for global strukturell kollaps ved opprinnelige parametre | Sannsynlighet for global strukturell kollaps ved dobling av brannspredningsareal i fellesareal | Sannsynlighet for global strukturell kollaps ved firedobling av brannspredningsareal i fellesareal | Grenseverdi for global strukturell kollaps | Kommentar              |
|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|------------------------|
| <b>Brannvesen starter slokking innen 10 min</b> | 3,35 E-5                                                                | 6,26 E-5                                                                                       | 6,52 E-5                                                                                           | 7,23 E-5                                   | Ok i alle tilfeller    |
| <b>Brannvesen starter slokking innen 20 min</b> | 6,71 E-5                                                                | 1,25 E-4                                                                                       | 1,33 E-4                                                                                           | 7,23 E-5                                   | Avhengig av brannvesen |

Tabell 40: Sammenligning av sannsynlighet for global strukturell kollaps ved økt brannspredningshastighet og ved opprinnelige parametre fra usikkerhetsanalysen

#### 10.10.4. Nødvendig tid før brannvesen starter slokking

Til nå har sensitivitetsanalysen vist at tid før brannvesen starter slokking er en kritisk parameter når det skjer negative endringer i vanntåkesystemets pålitelighet, eller når brannlasten i fellesareal og trapperom økes. Det er derfor gjort beregning av nødvendig tid før slokking i de ulike scenarioene for å oppnå tilstrekkelig lav sannsynligheten for global strukturell kollaps. Disse beregningene finnes i Vedlegg 11. Her er nødvendig tid før slokkingen starter beregnet ved å interpolere mellom verdiene i Tabell 34. Det antas at sannsynligheten for slokking ikke reduseres ytterligere dersom slokkingen starter før 10 min. Beregningene er gjengitt i Tabell 41 og kommentarene er basert på at det antas at brannvesenet vil starte slokkingen i løpet av 15 min.

Tabell 41 viser at brannsikkerheten er tilstrekkelig dersom brannvesenet starter slokking i alle tilfeller, untatt ved liten pålitelighet i kontrollpanel i vanntåkesystemet og når brannfaren i fellesareal og trapperom har økt fra liten til normal. Nødvendig tid før slokkingen starter i det sistnevnte scenarioet er 13 min, som er nokså nært den antatte tiden i den kvantitative analysen på 15 min. For å oppnå tilstrekkelig sikkerhet ved liten pålitelighet i kontrollpanel må det gjøres sikkerhetstiltak. Tilstrekkelig sikkerhet kan ikke oppnås ved å bare redusere tid før slokking.

| Scenario                                    | Nødvendig tid før brannvesen starter slokking for å oppnå tilstrekkelig lav sannsynlighet for global strukturell kollaps | Kommentar                                                                                                          |
|---------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| De valgte parametrene i usikkerhetsanalysen | Mer enn 20 min                                                                                                           | OK                                                                                                                 |
| Ved bruk av kun én elektrisk pumpe          | 19 min                                                                                                                   | Ok                                                                                                                 |
| Lite pålitelig dobbelt pumpesystem          | 18 min                                                                                                                   | Ok                                                                                                                 |
| Lite pålitelig kontrollpanel                | Mindre enn 10 min                                                                                                        | Ikke mulig å oppnå tilstrekkelig sikkerhet ved å redusere tid før slokking utført av brannvesen i dette scenarioet |
| Normal antennelsesfare i hele etasjen       | 13 min                                                                                                                   | Ikke ok                                                                                                            |
| Doblet brannspredningsareal                 | Mer enn 20 min                                                                                                           | Ok                                                                                                                 |
| Firedoblet brannspredningsareal             | 20 min                                                                                                                   | Ok                                                                                                                 |

Tabell 41: Oversikt over nødvendig tid før slokking utført av brannvesen starter i ulike scenarioer. Det antas at Trondheim brannvesen tidligst vil kunne starte slokking innen 15 min

## 10.11. Beskrivelse av risiko

### 10.11.1. Brannscenario 1

En fullskala test for hybelenheten som samsvarer med brannscenario 1 (Hox, 2015) har vist at brannspredning fra hybelenheten kan skje raskt når det automatiske slokkeanlegget feiler. Overtenning skjedde i løpet av rundt 5 min og etter dette vil alle brennbare overflater i rommet delta i brannen.

I Test 2 (Hox, 2015) ble det observert stor flammespredning ut mot korridoren på tross av at det var plassert to funksjonelle sprinklerhoder der. I brannscenario 1 feiler hele vanntåkesystemet og dette symboliserer derfor et mer konservativt tilfelle. Usikkerhetsanalysen har vist at brannvesenet vil være på plass etter rundt 15 min, altså etter at brannspredningen til korridoren i testen skjedde i testen. Dermed vil ingen brannsikringstiltak i brannscenario 1 kunne stoppe brannspredning fra hybelenheten.

Litteratur fra Universitetet i Lund (Nystedt, 2011) beskriver at brennbare overflater vil føre til økt brannspredning. I tillegg vil en overtenning tilføre en stor mengde permanent brannenergi og øke sannsynlighet for videre brannspredning på grunn av stor produksjon av brennbare gasser. Dette understøtter observasjonene og resultatene fra branntesten av hybelenheten (Hox, 2015). Det finnes imidlertid ikke et nøyaktig svar på hvordan brannutviklingen i en hybelenhet med eksponert massivtre i

alle vegger og himling vil være i forhold til resultatene i Test 2, hvor overflatene var delvis kledde i gips. Det antas at en brann i analysebyggverket vil være mer dimensjonerende.

#### **10.11.2. Brannscenario 2**

Brannscenario 2 symboliserer en skjult brann på fellesbadet hvor det er relativt liten brannfare og liten brannlast. Når døra er lukket er det lite sannsynlig at brannen spres videre. Det er ikke vanntåkesystem på fellesbadet, men det antas at vanntåkesystemet i tilstøtende rom vil dempe og kontrollere brannen til den slokkes av brukere eller brannvesen, dersom brannen skulle spre seg gjennom døra.

#### **10.11.3. Brannscenario 3**

Brannscenario 3 symboliserer et tilfelle hvor det på nattetid oppstår en sakte utviklende brann i fellesarealet og hvor ingen er tilstede som kan oppdage brannen, samt at varslingssystemet feiler.

Fellesarealet har liten brannlast og få antennelseskilder. En antennelse vil høyst sannsynlig skje i elektriske apparater som er isolert fra annen brannlast via ubrennbare flater. Komfyr er utstyrt med kjøkkenvakt og derfor anses risikoen for brannstart her for å være betydelig redusert.

Dersom brannen på tross av tiltakene skulle utvikle seg å bli relativt stor antas det at vanntåkesystemet aktiveres via de varmesensitive dysene og slokker eller demper og kontrollerer brannen til brannvesenet er på plass.

I et scenario med ingen til stede er dørene til hybelenhetene og trappoppgang med stor sannsynlighet lukket. Alle dørene har en brannmotstand på EI 30 vil gi brannvesen relativt god tid til å slokke brannen før den har spredt seg til andre rom.

#### **10.11.4. Brannscenario 4**

Brannscenario 4 er valgt basert på sannsynlige hendelser for å avdekke robustheten i brannedesignet. Dersom det ved påtenning i trapperom tilføres stor variabel brannlast kan vanntåkesystemet få redusert effektivitet dersom det ikke er dimensjonert for dette. Brannen vil dermed kunne utvikle seg til brannvesenet er på plass. Dersom vanntåkesystemet skulle feile vil brannen kunne spre seg over flere etasjer og inn i fellesareal dersom de selvluukkende dørene er åpne. Stor ventilasjon og skorsteinseffekt i trappeløp kan øke denne effekten.

## 11. Risikoevaluering

### 11.1. Introduksjon til kapitlet

Dette kapitlet sammenstiller resultatene fra risikoanalysen med kriteriene som ble satt i planleggingen. Etter sammenstillingen vil det kartlegges om det eventuelt er behov for ytterlige tiltak og effekten av disse vil bli estimert. Når det endelige branndesignet er valgt konkluderes det angående resultatet i risikovurderingen.

### 11.2. Generelt

#### 11.2.1. Brannspredning

##### *Brannscenario 1*

En branntest (Hox, 2015) har vist at overtenningen i hybelenheten vil kunne skje relativt raskt og føre til voldsom flammespredning etter at de brennbare overflatene deltar i brannen. På grunnlag av stor sannsynlighet for overtenning ved feiling av vanntåkesystemet og stor etterfølgende brannspredning anses risikoen for å være stor.

##### *Brannscenario 2*

Sannsynligheten for relativt stor brannspredningen antas å være liten på grunn av at fellesbadet har ubrennbare overflater. I tillegg er antennelsesfare og brannlast lav og dør med brannmotstand er lukket.

##### *Brannscenario 3*

I brannscenario 3 anses sannsynligheten for relativt stor brannspredning som tilstrekkelig lav på grunn av liten brannlast og mindre sannsynlighet for overtenning. I tillegg er sannsynligheten for lukkede dører til tilstøtende rom stor ved en brann hvor ingen brukere er til stede, for eksempel på nattestid.

##### *Brannscenario 4*

Brannspredningen ved påtennelse kan skje raskt og spre seg over flere etasjer dersom vanntåkesystemet ikke er dimensjonert for ekstra tilført variabel brannenergi.

#### 11.2.2. Brannslukking

10.8 - Analyse av konsekvenser har vist at brannen kan slokkes av seg selv, brukere, vanntåkesystem eller brannvesen. Dersom brukere og vanntåkesystem ikke presterer å slokke en brann ligger alt ansvar hos brannvesenet. Beskrivelsen av analysebyggverket og den kvantitative analysen har vist at brannvesenet har gode forutsetninger for å slokke en brann via tilgjengelighet til alle de relevante etasjene, via innvendig og utvendig trapp, samt egne høyderedskaper. Avstand fra hovedbrannstasjonen til Moholt 50|50 gjør at brannvesenet kan starte slukking innen rundt 15 min og har gode forutsetninger for å slokke brannen innen 90 min.

Det antas at dersom brannens utbredelse blir stor så vil brannvesenets slokkearbeid forsinkes og muligens overstige 90 min.



### ***Brannscenario 1***

Testresultater fra SP Fire Research (Hox, 2015) har vist at brannspredning fra hybelenhet kan skje før brannvesen er på plass dersom vanntåkeanlegget feiler. Dette vil vanskeliggjøre slokking.

### ***Brannscenario 2***

Brannen vil mest sannsynlig forbli liten og ikke spre seg. Slokking utført av brukere eller brannvesen antas derfor å ikke være en stor utfordring.

### ***Brannscenario 3***

Det er gjort diverse tiltak for å redusere antennelsesfaren og brannspredning i fellesarealet. Det er dessuten begrenset brannlast som brannen kan spres i. Dersom brannen skulle vokse seg relativt stor antas vanntåkesystemet å aktivere og slokke eller dempe og kontrollere brannen inntil den slokkes manuelt av brukere eller brannvesen.

### ***Brannscenario 4***

Eventuel rask spredning over flere etasjer ved feiling i vanntåkesystem antas å vanskeliggjøre slokking betraktelig.

## **11.2.3. Strukturell kollaps**

### ***Alle brannscenarioer***

Den kvantitative analysen og sensitivitetsanalysen har vist at sannsynligheten for global strukturell kollaps er tilstrekkelig lav i alle tilfeller som er undersøkt når brannvesenet er på plass i løpet av 15 min, untatt når påliteligheten i kontrollpanel er liten og brannlasten og brannfaren i fellesareal og trappeløp økes.

## **11.3. Sammenligning av risiko og risikoakseptkriterier**

I dette avsnittet vil risikoen som er funnet evalueres opp mot hvert enkelt risikokriterie som ble satt før risikoanalysen startet.

### **11.3.1. Brannspredning**

#### ***Brannscenario 1***

På grunnlag av stor sannsynlighet for overtenning og voldsom brannspredning som følge av dette anses risikoakseptet for ikke å være oppfylt i hybelenheten i brannscenario 1.

#### ***Brannscenario 2***

På grunnlag av få antennelseskilder, liten brannlast, brannmotstand i dør og ubrennbare overflater anses risikoakseptkriteriet for brannspredning å være oppfylt i brannscenario 2.

#### ***Brannscenario 3***

Sannsynlighet for overtenning er liten, vanntåkesystemet vil aktivere og brannvesen vil kunne forhindre brannspredning til andre rom. På grunnlag av dette anses risikoakseptkriteriet for brannspredning å være oppfylt i fellesarealet i brannscenario 3.

#### **Brannscenario 4**

Faren for rask brannutvikling over flere etasjer ved feiling av vanntåkesystem gjør at risikoakseptkriteriet for brannspredning i brannscenario 4 ikke anses som oppfylt.

#### **11.3.2. Brannslukking**

I utgangspunktet er sannsynligheten for at en brann skal slukkes relativt stor på grunn av god tilrettelegging for brannvesen og kort avstand til Trondheim brannstasjon. Direkte overføring av brannalarm til brannsentral, relativt god pålitelighet i vanntåkesystem og dessuten ekstra tiltak for slukking utført av brukere øker sannsynligheten for slukking ytterligere.

Stor brannspredning vil derimot gjøre brannslukkingen vanskeligere og er derfor avgjørende for om risikoakseptkriteriet oppfylles eller ikke.

#### **Brannscenario 1**

Risikoakseptkriteriet anses for ikke å være oppfylt på grunn av faren for stor brannspredning.

#### **Brannscenario 2**

Risikoakseptkriteriet anses for å være oppfylt.

#### **Brannscenario 3**

Risikoakseptkriteriet anses for å være oppfylt.

#### **Brannscenario 4**

Risikoakseptkriteriet anses for ikke å være oppfylt på grunn av faren for stor brannspredning over flere etasjer, på tross av selvlukkende dører inn til fellesareal.

#### **11.3.3. Sannsynlighet for global strukturell kollaps**

Beregningene i den kvantitative analysen og sensitivitetsanalysen har vist at faren for global strukturell kollaps er tilstrekkelig lav i alle brannscenarioer det er tatt hensyn til dersom påliteligheten i kontrollpanelet holdes høy og antennelsesfaren og brannlasten i fellesarealet holdes lav. Akseptkriteriet antas derfor for å være oppfylt med forbehold om at det utføres jevnlig kontroll og vedlikehold av vanntåkesystemet, med spesielt fokus på kontrollpanel. Det er også en forutsetning om at brannlast og antennelsesfare i fellesareal og trapperom holdes som tilsiktet.

### **11.4. Evaluering av eventuelle ytterligere tiltak og deres risikoreducerende effekt**

Grunnlaget for at risikoakseptkriterie 1 og 2 ikke er oppfylt er uakseptabel brannspredning i og fra hybelenhet og trapperom. Det bør derfor gjøres tiltak for å redusere brannspredningen slik at den blir tilnærmet lik en situasjon med ubrennbare overflater.

I brannscenario 1 var døra til hybelenheten åpen men dersom døra med brannmotstand EI 30 i hadde vært lukket ville brannspredningen ut av hybelenheten vært unngått før brannvesenet var på plass. Bruk av selvlukkende dører vil derfor være et naturlig alternativ.

En selvlukkende dør alene vil ikke forhindre brannspredning i rommet. På grunnlag av at det er vanskelig å gjøre tiltak som forhindrer brannspredning i den variable brannlasten er det derfor naturlig å se etter tiltak som kan forhindre brannspredning i den permanente brannlasten, det vil si de eksponerte massivtreflatene i hybelenhet og trapperom. Ideelt sett bør det benyttes et brannsikringstiltak som tilfredstiller SiTs ønske om å benytte eksponerte vegger og himling i massivtre.

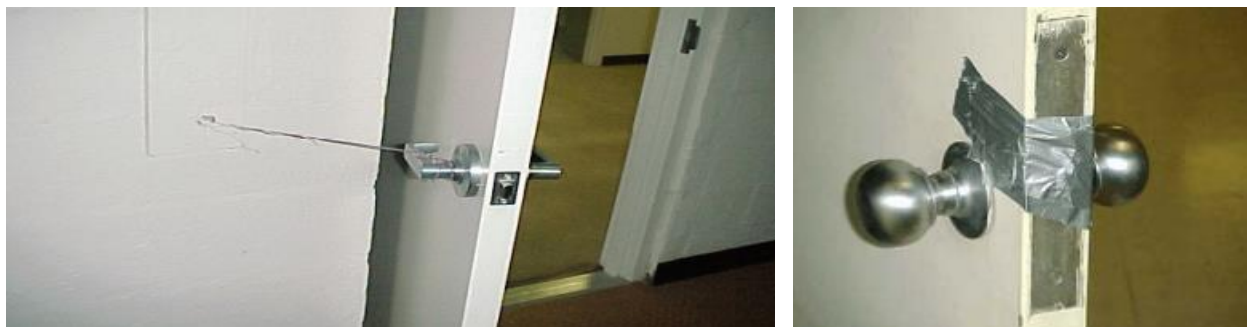
### 11.5. Identifisering av mulige tiltak

Et aktuelt tiltak for å hindre brannspredning i og fra hybelenheten kan være selvlukkende dører med brannmotstand EI 30.

Et aktuelt tiltak for å hindre uønsket brannspredning fra hybelenhetene som følge av brann i eksponerte massivtreflater vil være bruk av brannimpregnering. Det kan også benyttes kledning i gips. Brannimpregnering eller gipskledning kan også benyttes for å hindre uønsket brannspredning i eksponerte massivtreflater i trappeløp.

### 11.6. Vurdering av effekten av tiltak

#### 11.6.1. Selvlukkende branndører



Figur 52: Ulike tiltak utført av brukere for å holde selvlukkende dører åpne (Compliance, 2008)

Selvlukkende branndører i hybelenhetene vil kunne hindre brannspredning til og fra hybelenhetene i den tiden døra har brannmotstand. En lukket dør vil dessuten redusere oksygentilførsel til brannen og redusere sannsynligheten for overtenning. Påliteligheten i selvlukkende branndører regnes for å være 80 % (Institution, 2003), det vil si at ved brann antas slike dører å være åpne i 2 av 10 tilfeller. Påliteligheten er ikke direkte imponerende og grunnen til dette kan være tiltak fra brukere for å holde dørene oppe, se Figur 52.

Etablering av selvlukkende dører som tiltak virker delvis mot SiTs ønske om god kommunikasjonen mellom hybelenhetene og fellesareal i hver etasje, tilnærmet som i en boligsituasjon. For å anslå effekten av selvlukkende dører i hybelenhetene er det gjort kvantitative beregninger på hvordan de påvirker sannsynligheten for global strukturell kollaps, se Vedlegg 12.

Installering av selvlukkende dører i hybelenheten er beregnet til å gi en sannsynlighet for feil ved brann på:

$$P_t(\text{feil ved brann}) = 0,201$$

Det vil si mer enn en halvering av sannsynligheten fra det opprinnelige analysebyggverket, som var 0,499. Dette på tross av at påliteligheten i selvlukkende dører «bare» er 80 % (Institution, 2003). Dette fører til endringer i sannsynlighet for global strukturell kollaps og nødvendig tid før slokking utført av brannvesen. Oppsummeringen av beregningene finnes i Tabell 42.

| Scenario                                 | Før tiltak:<br>Sannsynlighet for global strukturell kollaps | Etter tiltak:<br>Sannsynlighet for global strukturell kollaps | Grenseverdi for sannsynlighet for global strukturell kollaps | Før tiltak:<br>Nødvendig tid før brannvesen starter slokking | Etter tiltak:<br>Nødvendig tid før brannvesen starter slokking |
|------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| Parametre fra usikkerhetsanalysen        | 5,03 E-05                                                   | 2,03 E-05                                                     |                                                              | 22 min                                                       | Over 20 min                                                    |
| Ved bruk av kun én elektrisk pumpe       | 5,60 E-05                                                   | 2,26 E-05                                                     |                                                              | 19 min                                                       | Over 20 min                                                    |
| Liten pålitelighet i dobbelt pumpesystem | 5,99 E-05                                                   | 2,41 E-05                                                     |                                                              | 18 min                                                       | Over 20 min                                                    |
| Liten pålitelighet i kontrollpanel       | 2,70 E-04                                                   | 1,09 E-04                                                     |                                                              | Ikke mulig å oppnå                                           | 10 min                                                         |
| Normal antennelsesfare i hele etasjen    | 8,27 E-05                                                   | 3,52 E-05                                                     |                                                              | 13 min                                                       | Over 20 min                                                    |
| Doblet brannspredningsareal              | 5,04 E-05                                                   | 2,10 E-05                                                     |                                                              | Over 20 min                                                  | Over 20 min                                                    |
| Firedoblet brannspredningsareal          | 5,24 E-05                                                   | 2,02 E-05                                                     |                                                              | 20 min                                                       | Over 20 min                                                    |

Tabell 42: Selvlukkende dørers effekt på global strukturell kollaps når brannvesenet starter slokking etter 15 min og nødvendig tid før brannvesen starter slokking for å holde sannsynligheten for global strukturell kollaps tilstrekkelig lav.

Tabell 42 viser at brannsikkerheten i analysebyggverket kan økes betraktelig ved bruk av selvlukkende dører i hybelenhetene. Sikkerheten for global strukturell kollaps vil være tilstrekkelig lav for alle scenarier unntatt der det er valgt øvre verdier for påliteligheten i kontrollpanel i vanntåkesystem.

Markedspris på selvlukkere for branddører ligger på rundt 2000 Kr per stykk (Brannservice, 2015, AS, 2015a). Med 15 dører i hver etasje gir dette en materialkostnad for alle 8 etasjer på:

$$8 \times 15 \times 2000 \text{ Kr} = 240\,000 \text{ Kr}$$

### 11.6.2. Brannbehandling av eksponerte massivtreflater

Ved å benytte brannimpregnering på myke treslag kan euroklassen endres fra D-s2,d0 til B-s1,d0 for gran og B-s2,d0 for furu (AS, 2014). Klassifiseringen beskriver at behandlet tre gir et svært begrenset bidrag til brannen (B), lite røykproduksjon (s1), noe røykproduksjon (s2) og ingen brennende dråper (d0).

Et alternativt produkt er FireGuard brannhemmende væske (AS, 2014) som er dokumentert miljøvennlig og oppfyller EUs nye byggevareforordning. Impregneringen finnes også i en fargefri variant og oppfyller dermed SiTs ønske om eksponert tre i overflater. Impregneringen hindrer produksjon av brennbare gasser i treet slik at treverket ikke antennes, men kun forkulles. Som følge av at det ikke oppstår flammer i treverket vil ikke brannen spres videre dersom den oppstår her (AS, 2014).

Eksponert massivtre i hybelenheten utgjør en relativt stor andel av brannlast og overflateareal. Det antas at forhindret brannspredning her vil redusere sannsynligheten for brannspredning ut av en åpen dør i hybelenheten. Brannimpregnering antas på samme måte å kunne redusere brannspredning i trapperom. Den kvantitative effekten av brannimpregnering på sannsynligheten for global strukturell kollaps er ikke utført her på grunn av usikkerhet rundt endring i brannspredningshastighet.

Brannhemmende behandling av heltre ligger i pris på rundt 280 kr/m<sup>2</sup> (Fiksdal, 2015), og hybelenhetene har et overflateareal på rundt 370 m<sup>2</sup> per etasje. Materialkostnadene for brannimpregnering av hybelenhetene i alle 8 etasjer er derfor:

$$8 \times 370 \text{ m}^2 \times 280 \frac{\text{Kr}}{\text{m}^2} = 828\,800 \text{ Kr}$$

Trapperommet har en overflate på rundt 30 m<sup>2</sup> i hver etasje, dette gir følgende materialkostnader for brannimpregnering av trappeløp i 8 etasjer:

$$8 \times 30 \text{ m}^2 \times 280 \frac{\text{Kr}}{\text{m}^2} = 67\,200 \text{ Kr}$$

### 11.6.3. Kledning med gips.

Ved å kle inn eksponerte flater i hybelenheten i massivtre med gips kan forkullingen forhindres i en periode på opptil 56 min, se Tabell 3 i 3.4 - Brann i tre. Gips kan være et alternativ, men å kle inn alle flater i gips er utelukket på grunn av SiTs ønske om å vise fram treverket. Brannimpregnering anses på grunn av estetikk og økonomi som en god løsning i trapperom, derfor vil gipskledning bli sett bort fra her.

Redundans gjør at det bærende veggssystemet vil ha global bæreevne og stabilitet inntil mer enn to bærende massivtreelementer (én vegg og ett dekke) mister sin bæreevne. Et naturlig alternativ vil derfor være å benytte gipskledning på 3 vegger og eksponert massivtre i himling og én vegg i hybelenheten. De sistnevnte flatene kan alternativt være brannimpregnert. Denne løsningen vil også kunne tillate å redusere tverrsnittsdimensjonene i hovedbæresystemet. Dersom det benyttes 2 stk 30 mm type F gipsplater fra Tabell 3 forhindres forkullingen i rundt 50 min. Hvis det antas at forkullingshastigheten er lik 1,1 mm/min (Hox, 2015) kan dette gi en mulig tverrsnittsreduksjon på:

$$1,1 \text{ mm/min} \times 56 \text{ min} = 61,6 \text{ mm}$$

Altså en potensiell reduksjon i nødvendig tverrsnitt på rundt 6 cm, som kan gi store besparelser dersom brann er dimensjonerende last. Dette vil imidlertid ikke undersøkes videre i oppgaven.

Ved å utnytte strukturell redundans i konstruksjonen og la én langvegg og himlingen være i eksponert massivtre er nødvendig areal for kledning rundt 22 m<sup>2</sup> per hybel. Markedsprisen på 15 mm branngips er rundt 120 kr/m<sup>2</sup> (Bygg-Nett.no, 2015). Bruk av dobbel gipskledning i hybelenhetene i alle 8 etasjer gir materialkostnader på :

$$15 \times 8 \times 2 \times 22 \text{ m}^2 \times 120 \frac{\text{Kr}}{\text{m}^2} = 28\,800 \text{ Kr}$$

## 11.7. Konklusjoner og dokumentasjon

Her oppsummeres de viktigste resultatene fra risikoanalysen, som har vist at 2.-9. etasje i bygg A-E ved Moholt 50|50 vil kunne opprettholde bæreevne og stabilitet i et fullstendig brannforløp. For å oppnå dette må stor brannspredning forhindres, brannen må slokkes og sannsynligheten for global strukturell kollaps må være tilstrekkelig liten. Ved bruk av ubrennbare overflater som er preakseptert løsning (Byggkvalitet, 2015) er det tilstrekkelig å dimensjonere med en bæreevne på 90 min. Derfor antas det at et fullstendig brannforløp maksimalt kan vare i 90 min og at en brann må stoppes innen da.

### 11.7.1. Brannspredning og brannsløkking

Analysen har vist at det dimensjonerende brannscenarioet med tanke på brannspredning og brannsløkking er ved brann i hybelenhet og trapperom hvor vanntåkesystemet feiler ved oppstart eller er ineffektivt.

Bruk av brannimpregnering i eksponerte massivtreflater i hybelenheten vil kunne redusere den raske brannspredningen ut mot korridor som ble observert i en branntest for en representativ hybelenhet (Hox, 2015). Ved å forhindre pyroliserende flammer i massivtreet kan massivtreoverflatene få tilnærmede ubrennbare egenskaper og faren for unødvendig stor brannspredningen anses på grunnlag av dette som tilstrekkelig liten. Brannimpregnering vil imidlertid ikke kunne forhindre forkulling, overtenning og brannspredning ut av hybelenheten.

Hybelenhetene i alle 8 etasjer har relativt stor overflateareal og derfor vil brannimpregnering bli relativt dyrt i forhold til å installere selvlukkere på branndører. Det antas at arbeidskostnadene, som det ikke er tatt hensyn til i denne risikovurderingen ikke vil påvirke kostnadsforholdet mellom alternativene betydelig.

Kledning av tre massivtrevegger i branngips framstår som et godt alternativ med tanke på økonomi og utnyttelse av strukturell redundans i analysebyggverket. Effekten av kledning på brannspredning ved åpen dør og overtenning i hybelenhet er derimot vanskelig å estimere.

Kvalitativ analyse i 11.6 - Vurdering av effekten av tiltak har vist at etablering av branndører i hybelenhetene har svært positiv effekt på brannsikkerheten med tanke på brannspredning, nødvendig tid før sløkking og sannsynligheten for global strukturell kollaps. Ut fra dette konkluderes det at

innføring av selvlukkende dører i hybelenhetene er det beste av de nevnte alternativene, og at brannsikkerheten vil være tilstrekkelig høy. Det er heller ingen av de andre alternativene som vil kunne begrense oksygentilførselen til hybelenheten. Begrenset ventilasjon vil være en fordel for effektiviteten i vanntåkesystemet. Det antas at selvlukkende dører i hybelenhetene vil påvirke kommunikasjonen mellom beboerne i etasjen noe negativt og på den måten virke mot SiTs ønske om god kommunikasjon. Det antas likevel at planløsningen legger til rette for god kommunikasjon mellom beboerne i felleskjøkken og stue, tilnærmet en boligsituasjon. Brannspredningen i trapperom antas å være tilstrekkelig lav ved brannimpregnering av massivtreoverflatene, som samtidig vil kunne sikre synlig treverk. På grunnlag av innføring av selvlukkende dører i hybelenheter og brannimpregnering av trapperom anses risikoakseptkriteriene for brannspredning og slokking for å være oppfylt.

### 11.7.2. Sannsynlighet for global strukturell kollaps

Den komparative feiltreanalysen i usikkerhetsanalysen har vist at påliteligheten for i vanntåkesystemer kun er 0,4 % lavere enn tilsvarende påliteligheten i et representabelt alternativt sprinklersystem, ved bruk av forventede pålitelighetsverdier. Det har vist seg at vedlikehold av pumpesystem, antall pumper og pålitelighet i kontrollpanel er kritiske momenter som har mye å si for påliteligheten i hele vanntåkesystemet. I pumpesystemet er det store variasjoner i pålitelighetsverdier for aggregat.

Den kvalitative analysen har vist at bruk av vanntåkesystem vil kunne kompensere for de negative effektene av å fjerne gipskledning, dvs mindre kontroll på brannvekst og brannspredning. I tillegg vil et vanntåkesystem kunne tynne ut røyk og på den måten forenkle slokkearbeid. Et vanntåkesystem kan også forhindre global strukturell kollaps i analysebyggverket. Beregningen av sannsynlighet for global strukturell kollaps har vist at dersom brannvesenet starter slokking innen 15 min i det opprinnelige analysebyggverket er påliteligheten i brannsikkerhetsdesignet tilstrekkelig for alle scenarioer unntatt der påliteligheten i kontrollpanelet i vanntåkesystemet er lav og der antennelsesfaren i fellesareal og trapperom er økt fra lav til normal. Nødvendig tid før slokking utført av brannvesenet starter før ytterligere tiltak ved normal antennelsesfare i fellesareal og trapperom er 13 min, ikke langt unna antatt tid på 15 min. Før ytterligere tiltak er ikke sikkerheten ved liten pålitelighet i kontrollpanel tilstrekkelig uavhengig av når brannvesenet starter slokking. De brukte verdiene for pålitelighet symboliserer nokså lave verdier og det antas at sikkerheten for global strukturell kollaps er tilstrekkelig også før ytterligere tiltak.

Etter ytterligere tiltak er nødvendig tid før slokking utført av brannvesenet over 20 min i alle scenarioer utenom når påliteligheten i kontrollpanel i vanntåkesystemet er lav. Sannsynligheten for global strukturell kollaps er veldig sensitiv med tanke på påliteligheten i kontrollpanelet, men anses som ok dersom det utføres jevnlig kontroll. Det er også viktig å unngå antennelseskilder og relativt stor brannlast som kan spre brannen videre i fellesareal og trapperom. En økning fra lav til normal antennelsesfare vil i det opprinnelige branndesignet (før ytterlige tiltak) doble sannsynligheten for global strukturell kollaps, se Tabell 39. Sannsynlighet for overtenning har også stor innvirkning på sannsynlighet for kollaps på grunn av at dette øker faren for brannspredning betraktelig.

Ved valg av selvlukkende dører antas sannsynligheten for global strukturell kollaps å være tilstrekkelig lav i alle scenarioer som er tatt hensyn til og risikoakseptkriteriet anses derfor for å være oppfylt.

## Del 3: Diskusjonskapittel

### 12. Diskusjon

#### 12.1. Introduksjon til kapitlet

I dette kapitlet diskuteres det rundt temaene som er behandlet i oppgaven og det trekkes sammenhenger mellom aktuelle forhold. Diskusjonen leder til en konklusjon som er svaret på problemstillingen i oppgaven. Etter konklusjonen gis det anbefalinger ut fra hva som er funnet og samtidig gis det forslag til videre relevant arbeid.

#### 12.2. Diskusjon vedrørende bæresystemer

Bærende veggssystemer av massivtreelementer er gunstige med tanke på bæremessig redundans i forhold til søylesystemer på grunn av måten kreftene fordeles på i konstruksjonen. Fokus på styrke og stivhet i både massivtreelementets hoved- og tverretning er viktig for å utnytte potensiell redundans. Ved brann reduseres tverrsnittene og de indre sjiktene blir dermed utsatt for stadig større påkjenning. Dette indikerer at det bør velges relativ høy fasthetsklasse også i indre sjikt i massivtreelementer.

#### 12.3. Diskusjon vedørende brannutvikling i høye trehus

Før overtenning vil eksponerte flater i tre ha liten påvirkning på brannen, men effekten kan ikke ses helt bort fra for fordi den vil gi en brann flere muligheter til å spres. Antennelse vil med størst sannsynlighet skje i den variable brannlasten før brannen eventuelt sprer seg videre til eksponerte treflater. I startfasen av en brann vil den variable brannlasten ha mest å si. Når eksponerte flater tar fyr kan brannspredningen skje raskere og i alle materialets retninger. Brennbare overflater har mer å si i startfasen av en brann i små rom hvor brannlasten står nært de eksponerte overflatene. Hastigheten på brannspredningen er avhengig av størrelsen på antennelseskilden og litteratur som er gjennomgått (Nystedt, 2012) har vist at en antennelseskilde kan gi eksponerte treflater lik brannvekstrate som i PE skumplast, se Tabell 8. Dette virker nokså ekstremt, men det kan uansett konkluderes med at det bør tilstrebes å unngå store mengder høyt brennbar variabel brannlast.

Ubehandlet treverk har euroklasse D som tilsier at materialet vil antenne før 10 min med 100 W varmpåkjenning i en room corner test. Dette er en vesentlig forskjell fra ubrennbare materialer som for eksempel gips, som kun har et svært begrenset bidrag til en brann etter først å ha blitt utsatt for 100 W i 10 min og deretter 300 W i 10 min. Det spesifiseres at det er snakk om overtenning i materialet, i en rombrann kan overtenning skje uavhengig av om overflatene er brennbare eller ikke. Ved å brannbehandle treverk kan det oppnå euroklasse B (AS, 2015b) som tilsier at det ikke vil forekomme overtenning i løpet av en tilsvarende room corner test som ble beskrevet ovenfor. Brannbehandling av treverk vil derimot ikke kunne forhindre forkulling og redusert bæreevne.

Etterhvert som temperaturene øker i brannrommet vil produksjonen av brennbare gasser bli større og øke sannsynligheten for overtenning. Etter en eventuel overtenning vil alle overflater i brannrommet delta i brannen. Den permanente brannenergien i form av eksponert tre utgjør en stor potensiell brannlast og antennelse av denne vil gjøre en brann vanskeligere å slokke.



Store mengder overlater i tre vil produsere brennbare gasser som ved antennelse øker temperatur og varmeavgivelse (Friquin, 2010). Ut fra dette kan det konkluderes med at eksponerte brennbare overflater har mest å si i små rom hvor temperaturen stiger raskt og det relativt lett kan skje overtenning. Rombranner med eksponerte treflater kan overstige standard temperatur-tid kurve (Hox, 2015), noe som indikerer at disse brannene kan være spesielt utfordrende å bekjempe. Dersom de brennbare gassene ikke antennes før de har forlatt brannrommet kan det oppstå voldsom flammespredning ut av åpninger (Shi et al., 2012).

Ved delaminering øker forkullingshastighet og temperatur (Friquin, 2010) og dermed de eksponerte flatenes bidrag til en brann. Det bør derfor opprettes ekstra tykke lameller ved de innvendige overflatene. Brannen kan svekkes ved å ventilasjonskontrollere den. Dette kan innebære å øke sannsynligheten for at dører og vinduer er lukket eller å benytte brannvinduer med flere lag glass. I høye hus kan skorsteinseffekten bidra til økt ventilasjon som igjen kan føre til økt brannspredning og mer oksygentilførsel til brannen.

#### 12.4. Diskusjon vedrørende vanntåkesystemers brannbekjempelsesegenskaper

Vanntåkesystemer bekjemper brann ved å angripe alle branntrekantens tre sider, det vil si ved å redusere brannlast, oksygen og varme. Til sammenligning vil tradisjonelle sprinklersystemer kun redusere brannlast og varme. Små dråper har større overflate per volum enn større dråper og siden fordampningen skjer i overflaten vil fordamping av vanntåke og nedkjøling av brannsøyle og omgivelser skje relativt raskt. For slokking av klasse A branner er kjøling den viktigste slokkemekanismen (Lakkonen, 2015, Wighus, 2015). På grunn av at forbrenningen i forkullende materialer skjer relativt dypt i materialet er direkte væting den viktigste kjølemetoden. Små vanndråper har mindre kinetisk energi og vil derfor ha mindre sannsynlighet for å penetrere flammesøylen, for deretter å væte overflaten direkte. Overflatespenningen i dråpene øker når diameteren blir mindre, noe som fører til fører til reduserte væteegenskaper (Grant and Drysdale, 1997). Ut fra dette kan det konkluderes med at det bør tilstrebes en relativt stor dråpediameterfordeling.

Når vanntåken fordampes skjer en voldsom utvidelse som fører til uttynning av brennbare gasser og fordrivelse av oksygen. Ved brann i høye trehus med eksponerte treflater kan det potensielt forekomme en stor produksjon av pyrolysegasser. Det kan derfor tenkes at fordriving av brennbare gasser er en relativt gunstig effekt med tanke på å redusere gasskonsentrasjonen til under eksplosjonsfaren. Dette krever imidlertid en effektiv blanding av gasser og vanntåke, som økes via dynamisk miksing. Denne effekten er nokså begrenset i byggverkene som er av interesse i oppgaven på grunn av relativt mange hindringer og begrensede muligheter til å endre dette. Når det gjelder fordriving av oksygen kan treverk brenne ved relativt lave oksygenkonsentrasjoner og inneholder dessuten oksygen (Wighus, 2015). Dette indikerer at forkullende branner er relativt vanskelige å slokke ved oksygenfordriving.

Små dråper holder seg lengre i lufta og har derfor større sannsynlighet for å kjøle brannlast i omgivelser og på den måten redusere temperatur, varmeavgivelsesrate og brannspredning. Varmeavgivelsesraten har relativt stor effekt på forkullingsraten og kan derfor være viktig å redusere. På grunn av større muligheter for spredning er små dråper en fordel der branner er ligger skjult for direkte væting. Ved stor

ventilasjon eller andre forhold som endrer vandrdråpenes hastighetsretning er det derimot større sannsynlighet for at små vandrdåper ender opp der hvor de ikke har noen nytte med tanke på brannbekjempelse. På den måten er vanntåkesystemer spesielt sensitive med tanke på ventilasjon.

Blokkering av strålevarme som følge av små vandrdåper kan redusere brannspredning, antennelse og dessuten beskytte slokkemannskaper brukere ved rømning.

## **12.5. Diskusjon vedrørende når vanntåkesystemer kan benyttes**

Vanntåkesystemer kan benyttes der det settes krav om- eller er preakseptert med automatiske slokkeanlegg og samtidig der det er behov for automatiske slokkeanlegg. Vanntåkesystem har også sine begrensninger i bruksområder og disse aspektene diskuteres videre her.

### **12.5.1. Krav om automatisk slokkeanlegg**

Byggteknisk forskrift (Byggkvalitet, 2015) setter krav om automatisk slokkeanlegg for bygninger i risikoklasse 4 med heis og bygninger i risikoklasse 6.

### **12.5.2. Preakseptert løsning med automatisk slokkeanlegg**

Veiledning til byggteknisk forskrift (Byggkvalitet, 2015) gir preaksepterte løsninger for bruk av automatiske slokkesystemer basert på risikoklasse, bruttoareal og brannenergi i det gjeldende byggverket og henviser til sprinklertyper og tilhørende standarder. Standardene for boligsprinkler gjelder også for vanntåkesystemer og dermed veiledes det indirekte om hvilke klasser vanntåkesystemer som det minimum skal benyttes i de ulike anvendelsesområdene.

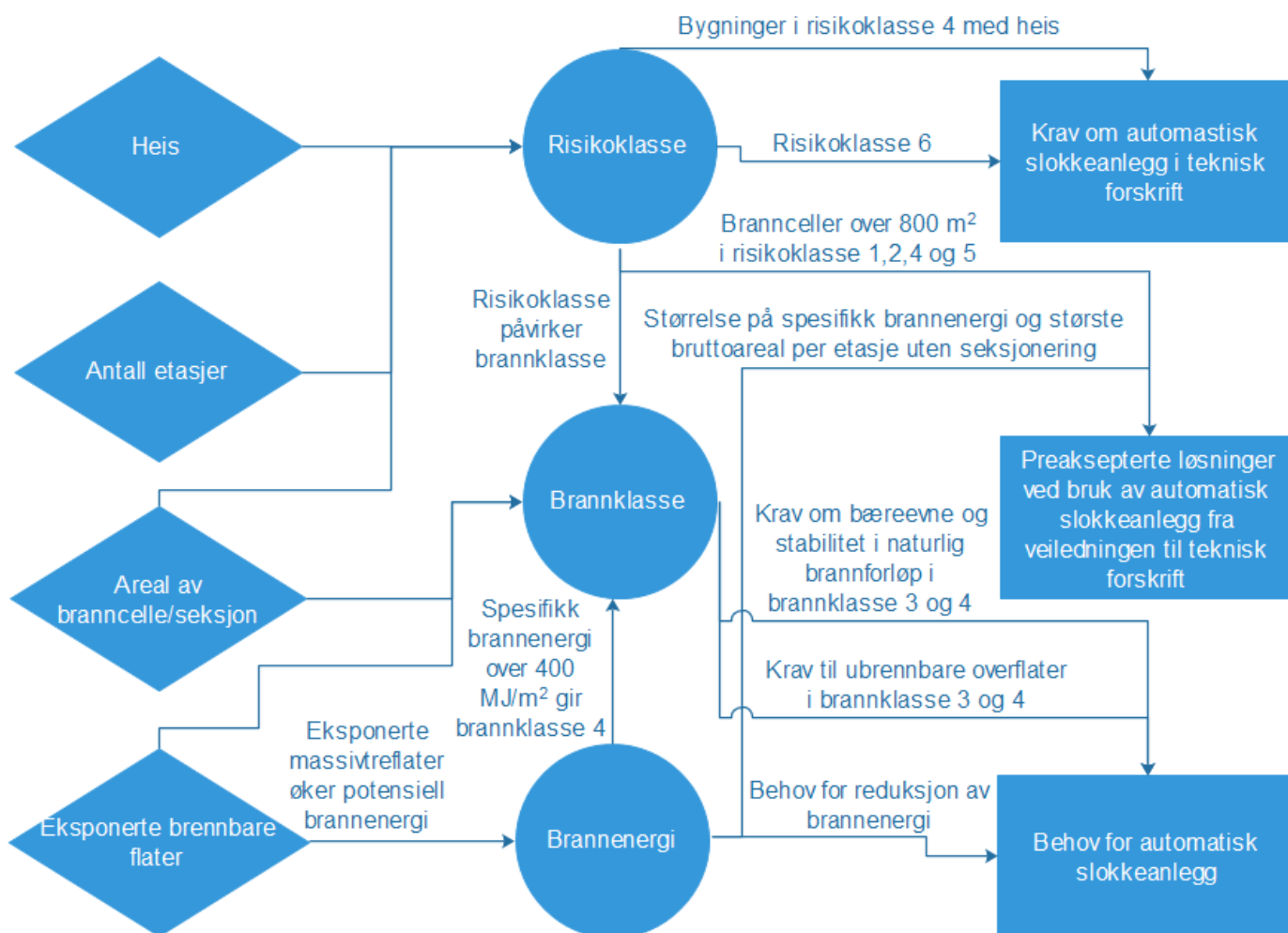
Når det gjelder kommersielle vanntåkesystemer henviser veiledningen (Byggkvalitet, 2015) til Forsikringsselskapenes Godkjenningsnevnds veiledning for vanntåkesystemer (Godkjennelsesnevnd, 2009) indirekte til hvilke vanntåkestandarder som kan benyttes. Denne veiledningen kommer i en ny og oppdatert versjon i løpet av våren 2015, men i skrivende stund er ikke denne versjonen kommet enda. Denne oppgaven inkluderer allikevel en liste over de kommende anbefalte standardene etter å ha kontaktet en av hovedpersonene bak den nye veiledningen på mail (Fedøy, 2015).

### **12.5.3. Behov for automatisk slokkesystem**

Vanntåkesystemer kan benyttes som kompensasjon for manglende sikkerhet og fravik fra preaksepterte løsninger, som for eksempel ved bruk av brennbare overflater i brannklasse 3. I brannklasse 3 og 4 er det krav om bæreevne og stabilitet i et «fullstendig brannforløp» (Byggkvalitet, 2015) som innebærer at avkjølingsfasen skal inkluderes. For å muliggjøre bruk av eksponerte treflater som vil forkulle fullstendig i løpet av et fullstendig brannforløp er det behov for å forhindre brannutviklingen. Dette er mulig å oppnå ved bruk av et vanntåkesystem.

Et vanntåkesystem kan også benyttes bevisst for å redusere brannklassen fra 3 til 4 i et bygg ved å redusere dimensjonerende brannenergi (Byggkvalitet, 2015), som igjen kan føre til en enklere og mer lønnsom dimensjonering. I følge veiledningen til byggteknisk forskrift (Byggkvalitet, 2015) kan det gjøres unntak fra dimensjonering av fullstendig brannforløp i «industribygg og lignende» med høy brannenergi hvor det er tilrettelagt for sikker rømning og sikkerhet for brannmannskap. Dette kan oppnås ved bruk av vanntåkesystemer.

Det er nokså mange faktorer som påvirker krav, preaksepterte løsninger og behov for automatiske slokkeanlegg, disse oppsummeres i Figur 53.



Figur 53: Forhold som påvirker krav, preaksepterte ytelser og behov for automatisk slokkeanlegg. Forholdene gjelder for trehus beregnet for ikke-sporadisk personopphold, hvor personene kjenner rømningsveier

#### 12.5.4. Bruksområde

For å sikre tilstrekkelig pålitelighet i vanntåkesystemer må de verifiseres gjennom fullskala branntester. For å gjøre dette kan det benyttes testprotoller med ulike bruksområder fra forskjellige standarder hvor noen av dem inkluderer overflater i eksponert tre. Enkelte standarder er mer konservative enn andre, standarden FM 5560 (Approvals, 2012) har for eksempel kun testprotokoller for LH, det vil si lav fareklasse i det amerikanske klassifiseringssystemet fra FM Global (Approvals, 2012). Den høyeste fareklassen som er funnet i en testprotokoll i denne oppgaven er OH3, henholdsvis i det europeiske klassifiseringssystemet (standardorganisasjonen, 2009a). Annex B i standarden CEN/TS 14972 (standardorganisasjonen, 2011) gjør det mulig å opprette en egen testprotokoll så det kan tenkes at

vanntåkesystemer kan verifiseres for høyere fareklasser enn OH3. Det er imidlertid ikke funnet eksempler på dette i løpet av framstillingen av oppgaven.

## **12.6. Diskusjon vedrørende pålitelighet i vanntåkesystemer**

Pålitelighet i vanntåkesystemer deles inn i pålitelighet for aktivering og pålitelighet for effektiv operasjon ved brann.

### **12.6.1. Pålitelighet for effektiv operasjon**

Påliteligheten for effektiv operasjon verifiseres gjennom fullskala branntester som finnes i ulike standarder. Det finnes i følge veiledningen til byggt teknisk forskrift (Byggkvalitet, 2015) ingen gyldige metoder for å interpolere resultater fra ulike tester, derfor er bruksområdet begrenset til parametrene i testen. Begrensede mengder tilgjengelige testprotokoller og høye kostnader for eventuell framstilling av nye testprotokoller og fullskala branntester kan øke sannsynligheten for at vanntåkesystemer blir sett bort fra som løsning. Det er også en tidskrevende og uoversiktlig prosess å sette seg inn i de ulike standardene og testprotokollene som blant annet opererer med ulike definisjoner av fareklasse, brannscenarioer, testvarighet med mer. Dette gjør også at testresultater ikke er direkte sammenlignbare.

Vanntåkestandarder opererer med ulike dimensjonerende fareklasser i testprotokollene, dette kan vitne om usikkerhet i bransjen vedrørende vanntåkesystemers egenskaper. International Water Mist Organisation er ikke like konservativ som norsk regelverk (Byggkvalitet, 2015) og tillater interpolering av testresultater (Association, 2015b). Det spesifiseres imidlertid at dette må utføres av et ekspertpanel. For å forenkle prosessen ved å ta i bruk vanntåkesystemer bør det etableres en fullverdig internasjonal standard slik at behovet for fullskala branntester reduseres betraktelig. Det bør også dannes retningslinjer for interpolering av testresultater.

Regelverkene er forskjellige ulike steder i verden og noen leverandører produserer systemer som kun er verifisert gjennom simuleringer. Testresultater (Arvidson, 2015) har dessuten vist at påliteligheten i komponenter varierer stort mellom ulike leverandører. Dette understreker nødvendigheten av å undersøke om leverandørene er tilstrekkelig verifisert.

### **12.6.2. Pålitelighet for aktivering**

Pålitelighet for aktivering er avhengig av valg av komponenter, oppbygning, installasjon, dimensjonering, bruk og vedlikehold. Den totale påliteligheten i et system kan estimeres ved komparativ feiltreanalyse, hvor påliteligheten i et vanntåkesystem sammenlignes med påliteligheten i et referansesprinklersystem.

På grunn av at vanntåkesystemer er relativt nylig tatt i bruk i boligbranner og lignende finnes det lite tilgjengelig pålitelighetsstatistikk. Påliteligheten i komponenter kan derfor hentes fra lignende systemer, for eksempel sprinklersystemer. Disse systemene kan ha ulike påkjenninger, oppbygning, vedlikehold med mer. Derfor vil ikke nødvendigvis pålitelighetsdataene være representable for vanntåkesystemer. Der det benyttes statistikk for sprinklerhoder i stedet for dyser kan for eksempel sannsynligheten for tetting være større i dysene på grunn av mindre dimensjoner. For å forhindre feil som følge av dårlig vannkvalitet bør det benyttes filter og legges til rette for kontroll og rengjøring av vanntåkesystemer.

Det bør også benyttes komponenter som ikke korroderer. Vanntåkesystemer består som regel av flere komponenter enn sprinklersystemer og derfor er det sannsynlig at påliteligheten er mindre.

Testresultater (Arvidson, 2015) har vist at vanntåkesystemer er mer utsatt for feil ved lange vedlikeholdsintervaller enn sprinklersystemer. En komparativ feiltreanalyse utført i denne oppgaven har kartlagt at kontrollpanel er en kritisk komponent som det bør fokuseres spesielt på. Påliteligheten kan økes ved å skape redundans i systemet, for eksempel ved å benytte to separate pumpesystemer med selvstendig strømforsyning. Den komparative feiltreanalysen har imidlertid vist at én pumpe med stor pålitelighet gir mindre sannsynlighet for feil ved aktivering enn to pumper med liten pålitelighet. Det bør spesifiseres at resultatene er avhengig av den benyttede pålitelighetsdataen og bør derfor ikke tas som gitt, men som en indikasjon.

### **12.7. Diskusjon vedrørende bestemmelse av brannsikringsnivå ved bruk av aktiv- og passiv brannsikring**

Krav om strukturell bæreevne og stabilitet gjennom et fullstendig brannforløp i brannklasse 3 og 4 (Byggkvalitet, 2015) gjør at det er nødvendig å stoppe et brannforløp i trehus mellom 5 og 16 etasjer. Dette kan oppnås blant annet ved bruk av vanntåkesystemer.

I risikovurderingen i Del 2: Risikovurdering av brannsikringstiltak ved Moholt 50|50 ble sikkerheten for verdier undersøkt ved å analysere brannspredning, muligheter for slokking og sannsynlighet for global strukturell kollaps, som er avhengige av hverandre. Dersom et vanntåkesystem fungerer slik det skal vil brannutviklingen stoppes og forhindre global strukturell kollaps.

Når et vanntåkesystem svikter er brannvesenets utrykningstid kritisk for om sannsynligheten for global strukturell kollaps er tilstrekkelig lav. Sannsynligheten for at en brann tar skikkelig fatt er størst i den variable brannlasten, som har størst innvirkning på utviklingsfasen i en brann. Sensitivitetsanalysen i risikovurderingen har vist at sannsynligheten for global strukturell kollaps øker betydelig når antennelsesfaren og den variable brannlasten økes i bruksområdet. For å oppnå tilstrekkelig brannsikkerhet i et bygg er det derfor viktig å begrense den variable brannlasten til slik den var tilsiktet i brannsikringsstrategien.

Når den permanente brannlasten i form av brennbare overflater antennes kan dette gi økt brannspredning, spesielt i rom som lett kan overtennes. Stor utbredelse av en brann gjør slokking vanskeligere og reduserer sikkerheten med tanke på global strukturell kollaps. Det bør derfor gjøres grundige undersøkelser av brannvesenets utrykningstid og tilgangsmuligheter. Direkte varsling fra brannalarmsystem til brannsentralen kan redusere utrykningstiden. Det bør også legges til rette for bruk av høyderedskaper og tilgang til alle etasjer via trapp uansett hvor det brenner.

Dersom undersøkelser viser at brannspredning i et scenario kan bli omfattende før brannvesenet antas å kunne starte slokking når et vanntåkesystem feiler, bør det gjøres passive tiltak ut over minstekrav (Byggkvalitet, 2015) som reduserer brannspredning og sannsynligheten for overtenning. Eksponert treverk i overflater kan få tilnærmede ubrennbare egenskaper ved å benytte innkledning, brannimpregnering eller brannmaling. Ved bruk av innkledning kan overflatene tilfredstille

preaksepterte krav (Byggkvalitet, 2015). Selvlukkende dører kan forhindre brannspredning i tiden disse er dimensjonert for å ha brannmotstand. Samtidig kan oksygentilførselen til en brann reduseres og dermed redusere sannsynlighet for overtenning.

For at det skal forekomme global strukturell kollaps må det skje en alvorlig brann og til nå har det blitt diskutert rundt forhold som bidrar til å begrense brannforløpet. Sannsynligheten for global strukturell kollaps varierer imidlertid avhengig av bygningstype. I risikovurderingen ble det benyttet en metode for beregning av sannsynligheten for global strukturell kollaps beskrevet i «Implementation of Eurocodes, Handook 5» (Project, 2005). Sannsynlighetene for feiling ved brann i denne boka var tilpasset kontorbygninger med bærende konstruksjon i stål. I risikovurderingen ble det gjort et forsøk på å estimere sannsynligheten for feil ved brann i et høyt trebygg ved å ta hensyn til sannsynlighet for brannstart, brannstartsted, brannspredningshastighet, sannsynlighet for overtenning, pålitelighet i branndører med mer. Beregningene gav verdier som var noe mer konservative enn stålbygninger.

Sensitivitetsanalysen av antakelsene rundt global strukturell kollaps i trebygninger med eksponerte massivtreflater viste at sannsynlighet for overtenning har stor betydning. På grunnlag av resultater fra en branntest av en representativ hybelenhet (Hox, 2015) ble det antatt at brannspredningen ville skje relativt raskt ut av et rom dersom det skjedde overtenning og døra i rommet stod åpen. Mengde brannlast og antennelsesfare har også stor innvirkning på resultatet. I antakelsene ble det ikke tatt hensyn til redundans i bærekonstruksjonen, altså overføring av krefter ved feiling av et bygningselement til tilstøtende elementer i et bærende veggssystem. Redundans antas å kunne redusere sannsynligheten for global strukturell kollaps betydelig og det bør derfor vektlegges å kartlegge bærekonstruksjonens egenskaper. Ved strategisk bruk av redundans kan det oppnås et høyere brannsikkerhetsnivå ved bruk av færre passive brannsikringstiltak og dermed mindre ressurser.

## 12.8. Konklusjon

### 12.8.1. Hvordan påvirkes brannutviklingen av eksponerte treflater i høye trehus?

Påvirkningen er avhengig av fase i brannforløpet. En antennelse vil med størst sannsynlighet skje i i variabel brannlast men kan også skje direkte i de eksponerte flatene. Uansett tilfelle bidrar de eksponerte flatene til at brannen har økt mulighet til å spre seg videre. Dersom antennelseskilden er stor kan brannspredningshastigheten øke betraktelig. Etter overtenning i et rom vil alle flater delta i brannen og store mengder tre kan føre til stor produksjon av brennbare gasser som øker brannens intensitet i temperatur og varmeavgivelse. Dersom de brennbare gassene antennes først etter de forlater åpninger ut av brannrommet kan voldsomme flammer bidra til videre brannspredning. Det konkluderes derfor med at eksponerte treflater har størst påvirkning på brannforløpet når de benyttes i rom hvor det lett kan oppstå overtenning og der en brann har mulighet til å spre seg videre til tilstøtende rom.

### 12.8.2. Når er det krav om, preakseptert eller behov for automatisk slokkeanlegg og når kan vanntåkesystemer kan benyttes?

I byggt teknisk forskrift (Byggkvalitet, 2015) er det krav om automatisk slokkeanlegg i:

- Risikoklasse 4 der det finnes heis.

- Risikoklasse 6.

Veiledningen til byggteknisk forskrift (Byggkvalitet, 2015) gir preaksepterte ytelser ved bruk av automatiske slokkesystemer når:

- Brannceller med åpen forbindelse over flere plan i byggverk i risikoklasse 1, 2, 4 og 5, hvor samlet bruttoareal er større enn 800 m<sup>2</sup> for plan som har åpen forbindelse.

Det gis også veiledning til hvilken type vanntåkesystemer som er preaksepterte ved å referere til preaksepterte standarder som gjelder for både vanntåke- og sprinklersystemer (Norge, 2013, Norge, 2010, Norge, 2014).

Det er kan være behov for automatiske slokkanlegg når:

- Kompensere for fravik fra preaksepterte ytelser slik at brannsikringsnivået blir tilsvarende eller bedre. For eksempel der det skal dimensjoneres etter et fullstendig brannforløp i høye trehus med eksponerte treflater i brannklasse 3 og 4 (Byggkvalitet, 2015), for å stoppe brannforløpet og forhindre global strukturell kollaps.
- For å redusere brannenergien dersom denne er dimensjonerende for brannklasse. Dersom spesifikk brannenergi reduseres til under 400 MJ/m<sup>2</sup> (Byggkvalitet, 2015) kan brannklassen reduseres fra 4 til 3, og det kan benyttes en mindre konservativ dimensjonering.
- I "industribygg og lignende med høy brannenergi" kan det gjøres unntak fra krav om fullstendig brannforløp dersom nødvendig tid for rømning og sikkerhet for brannmannskaper er ivaretatt (Byggkvalitet, 2015). Vanntåkesystem har gode egenskaper når det gjelder reduksjon av temperatur og blokkering av varmestråling og vil derfor kunne forbedre disse forholdene betraktelig.

Når det gjelder begrensninger for bruk av vanntåkesystemer er det funnet at vanntåkesystemer kan benyttes i bruksområder fra lav fareklasse, LH til ordinær fareklasse 3, OH3 i klassifiseringssystemet fra NS-EN12845 (standardorganisasjonen, 2009a). Lav fareklasse og ordinær fareklasse beskrevet i NFPA 13 (Association, 2013b). Samt «Hazard Class» 1 og 2, HC1 og HC2 beskrevet i FM 5560 (Association, 2013b). Opprettelse av nye testprotokoller for fullskala test og verifisering av vanntåke gjør at systemene potensielt kan benyttes i høyere fareklasser. Det eksisterer testprotokoller med bruksområder med brennbare overflater i vegger.

### 12.8.3. Hvordan påvirkes vanntåkesystemers egenskaper for brannbekjempelse av brannfaren i høye trehus?

Små vandrdåper vil ha relativt lite kinetisk energi og mindre evne til å penetrere brannsøylen og nå forkullingssonen som befinner seg relativt dypt i treverk. Redusert dråpediameter vil også øke overflatespenningen og redusere de vætende egenskapene. Direkte væting av forkullingssonen er den viktigste slokkemekanismen i forkullende branner og derfor har vanntåke begrensede egenskaper når det forkullede laget er dypt. Dersom et vanntåkesystem aktiverer som tilsiktet vil forkullingen med stor sannsynlighet være svært begrenset.



Vanntåke har oksygenfordrivende egenskaper men treverk kan forkulle ved lave oksygenkonsentrasjoner så effekten av denne mekanismen anses som svært begrenset. Uttynning av brennbare gasser kan imidlertid tenkes å ha stor positiv effekt på grunn av potensiell stor produksjon av brennbare gasser ved store mengde eksponert treverk og høye temperaturer. Denne effekten kan forhindre voldsomme flammer og stor brannspredning.

Ventilasjon eller andre forhold som påvirker vanntåkens bevegelsesretning kan spesielt føre små vandrdåper bort fra tilsiktet sted. Bedre spredning av dråper med eller uten hjelp fra ventilasjon er imidlertid en fordel der branner ligger skjult bak en hindring. Varmeavgivelsesraten har relativt stor innvirkning på forkullingsraten i tre og derfor kan det tenkes at vanntåkens blokkering av stråling har positiv effekt på brannbekjempelsesegenskapene.

#### **12.8.4. Hvordan finne pålitelighet i vanntåkesystemer og hvilke dominerende faktorer påvirker denne?**

Påliteligheten for effektiv operasjon verifiseres gjennom fullskala branntest av et vanntåkesystem i et representativt bruksområde. Påliteligheten for aktivering kan estimeres ved komparativ feiltreanalyse av et vanntåkesystem og et referansesprinklersystem. På grunn av mangel på statistikk for vanntåkesystemer kan pålitelighetsdata fra lignende systemer benyttes. Oppbygningen av vanntåkesystemet har mye å si for den relative påliteligheten, som kan økes ved å skape redans i systemet. For eksempel ved å etablere to selvstendige vanntilførsler, to selvstendige pumpesystemer eller to strømtilførsler. Dersom antall komponenter som ikke overlapper hverandres egenskaper øker, vil påliteligheten bli lavere i systemet. På grunn av at vanntåkesystemer stort sett består av flere komponenter enn sprinklersystemer vil disse ha lavere pålitelighet. Sprinklersystemer kan dimensjoneres uten kontrollpanel og dette vil øke den relative påliteligheten i forhold til vanntåkesystemer.

Påliteligheten i systemet er også avhengig av påliteligheten i enkeltkomponenter. I feiltreanalysen ble det kartlagt at kontrollpanel, pumper og aggregat er kritiske komponenter som ved endring i pålitelighet har mest å si for påliteligheten i hele systemet.

#### **12.8.5. Hvordan evaluere strukturell brannsikkerhet ved bruk av vanntåkesystemer, for så å eventuelt gjøre ytterligere aktive- eller passive brannsikringstiltak?**

For å evaluere den strukturelle brannsikkerheten i høye trehus kan det gjøres en risikovurdering som undersøker om branndesignet er tilstrekkelig med tanke på å motså et fullstendig brannforløp. Dette kan innebære å undersøke om forholdene er lagt til rette for å forhindre unødvendig stor brannspredning, at brannen slokkes og å undersøke om sannsynligheten for global strukturell kollaps er tilstrekkelig lav.

Sannsynligheten for global strukturell kollaps er avhengig av sannsynligheten for en alvorlig brann. Denne kan estimeres ved:

- Bow-tie analyse for å finne mulige årsaker for antennelse og konsekvensene av disse i analysebyggverket.



- Ved å kartlegge barrierer for brannforløpet og pålitelighet i disse. For eksempel slokking utført av brukere, brannvesen og automatiske slokkesystemer.
- Hendelsestreanalyse for å analysere konsekvenser av at ulike brannsikringstiltak feiler.

Slik kan hendelser og pålitelighet sammenstilles for å estimere sannsynligheten for en alvorlig brann. Sannsynligheten for global strukturell kollaps er også avhengig av sannsynligheten for feil ved brann i analysebyggverket. I risikovurderingen i oppgaven ble denne sannsynligheten estimert ved å ta hensyn til brannstartssted, antennelsesfare, spredningsfare, sannsynlighet for overtenning, brannspredningshastighet og pålitelighet i branndører.

Ved å kombinere sannsynlighetene som er funnet kan sannsynlighet for global strukturell kollaps estimeres og sammenlignes med en grenseverdi for aksept på  $7,23E-05$  (Project, 2005). Dersom denne grensen overstrides ved bruk av vanntåkesystemer kan det gjøres ytterligere passive- eller aktive brannsikringstiltak og effekten av disse kan estimeres kvalitativt eller kvantitativt. På denne måten kan forholdet mellom aktiv- og passiv brannsikring bestemmes. Sensitivitetsanalysen i risikovurderingen i Del 2: Risikovurdering av brannsikringstiltak ved Moholt 50|50 har vist at pålitelighet i vanntåkesystemet, sannsynlighet for overtenning, mengde variabel brannlast, antennelsesfare og brannvesenets utrykningstid er dimensjonerende faktorer med tanke på strukturell brannsikkerhet. Disse aspektene bør vies ekstra oppmerksomhet ved dimensjonering av høye trehus.

## 12.9. Anbefalinger

### 12.9.1. Pålitelighet i vanntåkesystemer

For å opprettholde høy pålitelighet i vanntåkesystemer er vedlikehold og kontroll av systemene viktig som forenkles ved å dimensjonere systemet slik at det lett lar seg gjøre. Det bør legges spesielt vekt på vedlikehold av kontrollpanel. Påliteligheten i komponenter er avhengig av leverandør og type komponent, verifiseringsmetode mer mer, det bør derfor vies ekstra oppmerksomhet rundt valg av komponenter.

### 12.9.2. Sannsynlighet for global strukturell kollaps

Sannsynlighet for kollaps er svært avhengig av sannsynlighet for overtenning, derfor bør antennelsesfaren holdes lav og den variable brannlasten bør holdes som tilsiktet. Det bør fokuseres spesielt på små rom, hvor overtenning lettere kan skje.

## 12.10. Videre arbeid

### 12.10.1. Statistikk

Det bør samles inn statistikk for pålitelighet i vanntåkesystemer og sannsynligheter for at branndører uten selvlukkere er lukket i studentboliger.

### 12.10.2. Redundans

Det bør framstilles en fremgangsmetode som gjør det lettere å estimere strukturell redundans i høye trehus, slik at de positive effektene på bæreevne og stabilitet kan dras nytte av ved branndimensjonering.

### **12.10.3. Feil ved brann som fører til global strukturell kollaps**

I oppgaven ble det gjort et forsøk på å estimere sannsynligheten for feil ved brann i høye trebygninger, denne metoden bør utvikles videre. Det bør også kartlegges hvordan en brann kan spre seg videre til tilstøtende rom.

### **12.10.4. Interpolering av testresultater**

Det bør dannes retningslinjer for interpolering av testresultater fra fullskala branntest av vanntåkesystemer.

## Vedlegg

Oversikt over vedlegg:

- Vedlegg 1 – Beregning av forkullingshastighet etter metoden i Annex A i Eurokode 5 – del 1-2
- Vedlegg 2 – Beregning av spesifikk brannenergi
- Vedlegg 3 – Ulike fareklassesystemer
- Vedlegg 4 – Sammenheng mellom risikoklasse og valg av standard for dimensjonering av sprinkler
- Vedlegg 5 – Relevante testprotokoller for dimensjonering av kommersielle vanntåkesystemer
- Vedlegg 6 – Mail
  - Arnstein Fedøy, Sprinkler- & Vanntåkesystemer AS
  - Erling Mengshoel, Prevent Systems AS
  - Ragnar Wighus, SP Fire Research AS
  - Max Lakkonen, Fogtec Fire Protection
  - Roger Fiksdal, XL-bygg
  - Björn Magnusson, Rambøll AS
- Vedlegg 7 – Pålitelighet i komponenter
- Vedlegg 8 – Beregning av brannspredning i fellesareal
- Vedlegg 9 – Beregninger fra 10.9.2 - Kvantitativ analyse
- Vedlegg 10 – Feiltre brukt i sensitivitetsanalysen
- Vedlegg 11 – Beregninger gjort i sensitivitetsanalysen
- Vedlegg 12 – Beregning av effekten av ytterligere tiltak

## Vedlegg 1 – Beregning av forkullingshastighet etter metoden i Annex A i Eurokode 5 – del 1-2

Forkullingsraten for det naturlige brannforløpet,  $\beta_{par}$  beregnes som en vektet verdi av den nominelle forkullingsraten,  $\beta_n$  gitt ved (standardorganisasjonen, 2010a):

$$\beta_{par} = 1,5 \beta_n \frac{0,2\sqrt{\Gamma} - 0,04}{0,16\sqrt{\Gamma} + 0,08}$$

Parameteren  $\Gamma$  som inngår herer gitt ved (standardorganisasjonen, 2010a):

$$\Gamma = \frac{\left(\frac{O}{b}\right)^2}{\left(\frac{0,04}{1160}\right)^2}$$

Hvor:

- $O$  = Åpningsfaktor ( $m^{0.5}$ ). Denne beskriver tilgangen på oksygen i rommet som er avhengig av størrelse på ventilerende åpninger i forhold til det totale overflatearealet i branncellen, samt høyden disse er plassert i.
- $b$  = Faktor for absorpsjon i skillekonstruksjonen ( $\sqrt{\rho c \lambda}$ )
  - Hvor:
    - $\rho$  = Omsluttende bygningsdelers massetetthet ( $Kg/m^3$ )
    - $c$  = Omsluttende bygningsdelers varmekonduktivitet ( $J/KgK$ )
    - $\lambda$  = Omsluttende bygningsdelers varmekonduktivitet ( $W/mK$ )

Metoden beskriver videre hvordan forkullingsraten endres i løpet av brannforløpet og gir empiriske metoder for beregning av forkullingsdybde basert på tiden som har gått i brannforløpet. Metoden er også begrenset for bruk innenfor følgende parameterverdier (standardorganisasjonen, 2010a):

$$t_0 \leq 40 \text{ min}$$

$$d_{char} \leq \frac{b}{4}$$

$$d_{char} \leq \frac{h}{4}$$

Her er:

- $t_0$  = Tiden forkullingsraten er konstant
- $b$  = Bredden av tverrsnittet
- $h$  = Dybden av tverrsnittet

Dette vil si at metoden gjelder kun for branner der forkullingsraten er konstant, hvor brannen varer i under 40 min og hvor forkullingen er mindre eller lik en  $\frac{1}{4}$  av bredden og dybden i tverrsnittet. Ved

lengre branner for eksempel på grunn av stor brannlast eller liten åpningsfaktor, vil denne metoden ikke lenger være gyldig.

## Vedlegg 2 – Beregning av spesifikk brannenergi

### Metode for beregning av brannenergi

For beregning av dimensjonerende spesifikk brannenergi benyttes følgende formel (standardorganisasjonen, 2008):

$$q_{f,d} = q_{f,k} \times m \times \delta_{q1} \times \delta_{q2} \times \delta_n$$

Her er:

- $q_{f,k}$  = Den karakteristiske spesifikke brannenergien per enhet gulvareal ( $\text{MJ}/\text{m}^2$ )
- $m$  = Forbrenningsfaktor
- $\delta_{q1}$  = Faktor som tar hensyn til brannaktiveringsrisiko basert på branncellens størrelse
- $\delta_{q2}$  = En faktor som tar hensyn til brannaktiveringsrisiko basert på bruk av branncellen
- $\delta_n$  = En faktor som tar hensyn til ulike brannbekjempelsestiltak, blant annet bruk av automatiske vannslokkesystemer.

Denne oppgaven omhandler bruk av vanntåkesystemer i høye trehus, derfor er det naturlig å fokusere på faktorene  $q_{f,k}$  og  $\delta_n$ .

Den karakteristiske spesifikke brannenergien,  $q_{f,k}$  bør omfatte alt brennbart innhold i en bygning i tillegg til de aktuelle brennbare delene av konstruksjonen (standardorganisasjonen, 2008). For trehus vil dette være innholdet i bygningen samt den delen av konstruksjonen som forventes å forkulle i løpet av det dimensjonerende brannforløpet.

Det brennbare innholdet i bygningen er avhengig av byggets bruk. Bruken kan variere i løpet av konstruksjonens levetid og derfor bør det velges dimensjonerende verdier av brannenergi som ikke forventes å bli overstredet i 80 % av tiden. For å gjøre dette kan tabell E.4 – Spesifikk brannenergi i Eurokode 1 del 1-2 benyttes, her gjengitt som Tabell 43.

| Bruk                                | Gjennomsnitt | 80 % - Fraktil |
|-------------------------------------|--------------|----------------|
| <b>Bolig</b>                        | 780          | 948            |
| <b>Sykehus (rom)</b>                | 230          | 280            |
| <b>Hotell (rom)</b>                 | 310          | 377            |
| <b>Bibliotek</b>                    | 1500         | 1824           |
| <b>Kontor</b>                       | 420          | 511            |
| <b>Klasserom i skole</b>            | 285          | 347            |
| <b>Handlesenter</b>                 | 600          | 730            |
| <b>Teater/kino</b>                  | 300          | 365            |
| <b>Transport (offentlig område)</b> | 100          | 122            |

Tabell 43: Gumbel-fordeling av spesifikk brannenergi ( $\text{MJ}/\text{m}^2$ ) for ulike bruksområder (standardorganisasjonen, 2008)

Der Tabell 43 ikke kan benyttes kan det gjøres spesielle undersøkelser med tanke på karakteristisk spesifikk brannenergi for hvert enkelt tilfelle (standardorganisasjonen, 2008).

For permanent brannenergi som ikke forventes å variere i løpet av konstruksjonens levetid bør de forventede verdiene benyttes som dimensjonerende verdier i beregningene. For beregning av karakteristisk spesifikk brannenergi i en bygning, altså bygningsdeler, kledninger og innredninger benyttes metoden gitt i E.2.2 i Eurokode 1 del 1-2 (standardorganisasjonen, 2008).

Metoden tar hensyn til vekten av materialet som forventes å brenne samt dets netto brennverdi og en faktor som tar hensyn til beskyttet brannenergi. Den sistnevnte faktoren er med på grunn av at det ikke er nødvendig å ta hensyn til brannenergi i et lukket rom som er dimensjonert for å tåle påkjeningen, eller brannenergi i rom av ubrennbare materialer som holder seg intakte gjennom branneksposeringen (standardorganisasjonen, 2008). Dette kan for eksempel være ved bruk av gipskledning.

### Faktor for reduksjon i brannenergi som følge av automatisk slukkeanlegg

Faktoren  $\delta_n$  tar hensyn til ulike brannbekjempelsestiltak, og er summen av en rekke differensialfaktorer (standardorganisasjonen, 2008):

$$\delta_n = \prod_{i=1}^{10} \delta_{ni}$$

Hvor

- $\delta_{ni}$  = Ulike differensialfaktorer for aktive brannsikringstiltak, det vil si automatisk brannsløkking, automatisk deteksjon og alarm og manuel brannsløkking.

Oppgaven vil kun gå nærmere inn på differensialfaktorer som påvirkes av implementeringen av et vanntåkesystem, dvs:

- $\delta_{n1}$  = Faktor som tar hensyn til om det er installert automatisk vannslukkeanlegg
- $\delta_{n2}$  = Faktor som tar hensyn til om det automatiske vannslukkesystemet har uavhengig vannforsyning

Faktoren  $\delta_{n1}$  tar hensyn til automatiske vannslukkesystemer og har en verdi på 0,61 (standardorganisasjonen, 2008). Det vil si at om det er installert et vannslukkeanlegg, for eksempel et vanntåkesystem kan den dimensjonerende spesifikke brannlasten reduseres med 39 %.

For bygninger er det et mål om at sannsynligheten for global strukturell kollaps,  $p_{t,55}$  skal være mindre enn  $7,23 \times 10^{-5}$  gjennom en bygningslevetid på 55 år. Denne sannsynligheten er gitt ved (Project, 2005):

$$p_{f,55} = p_{fi,55} \times p_{ffi}$$

Hvor:

- $p_{t,55}$  = Sannsynligheten for feiling i løpet av bygningens levetid
- $p_{fi,55}$  = Sannsynligheten for en alvorlig brann i løpet av bygningens levetid
- $p_{ffi}$  = Sannsynligheten for feiling ved en alvorlig brann

Ved bruk av aktive brannsikringstiltak reduseres sannsynligheten for at brannen utvikles til overtenning og dermed også sannsynligheten global strukturell kollaps. Sannsynligheten for global strukturell kollaps er lik sannsynligheten for feiling ved brann i bygningens levetid,  $p_{t,55}$  multiplisert med sannsynligheten for alvorlig brann. Den sistnevnte sannsynligheten er avhengig av påliteligheten i det automatiske slokkesystemet. Sannsynligheten for en alvorlig brann er gitt ved (Project, 2005):

$$p_{fi,55} = [(p_f^{antennelse}) \times (p_f^{OC} \times p_f^{PS})] \times \left[ \prod p_f^{Aktivt sikringstiltak} \right]$$

Hvor:

- $p_f^{antennelse}$  = Sannsynligheten for antennelse, som varierer etter bruksområde. Boka «Implementation of the Eurocodes, Handbook 5» (Project, 2005) angir en metode for å beregne sannsynlighet for antennelse basert på arealstørrelse og gjentakintervall. Verdiene kan hentes i ulike databaser og som eksempel er verdien for boligbygg, offentlige bygg, kontrorer etc:

$$p_{fi}^{IGNITION} = 2,2 \times 10^{-5} / (m^2 \times \text{år})$$

- $p_f^{OC}$  = Sannsynligheten for at brukere ikke klarer å slokke en brann
- $p_f^{PS}$  = Sannsynlighet for at brannvesen ikke klarer å slokke en brann
- $p_f^{Aktivt sikringstiltak}$  = Sannsynligheten for feiling i aktivt sikringstiltak

For å finne differensialfaktorene brukes følgende framgangsmetode (Project, 2005):

$$\delta_{ni}^{Aktiv sikringstiltak} = \gamma_{qf}^{Med aktive sikringstiltak} / \gamma_{qf}^{Uten aktive sikringstiltak}$$

Hvor:

- $\gamma_{qf}$  = En global faktor som er forholdstallet mellom dimensjonerende spesifikk brannenergi og karakteristisk spesifikk brannenergi, se under (Project, 2005):

$$\gamma_{qf} = q_{f,d} / q_{f,k} = 0,863605 \{1 - 0,233909(0,577216 + \ln[-\ln\phi(0,9\beta_{fi})])\}$$

Her er:

- $\phi$  = Normal kumulativ fordelingsfunksjon
- $\beta_{fi}$  = Pålitelighetsindeks relatert til  $p_{fi}$ , gitt ved:

$$\beta_{fi} = \beta_{fi,t} = -\phi^{-1}(p_{fi,t}) = -\phi^{-1}\left(7,23 \times 10^{-5} / p_{fi,55}\right)$$



Videre beskriver veiledningen boka «Implementations of Eurocodes, Handbook 5» (Project, 2005) et eksempel hvordan differensialfaktoren for reduksjon av spesifikk brannenergi ved implementering av et automatiske vannslokkeanlegg beregnes. Eksempelet nedenfor er gjengitt her for å gjøre litteraturen tydeligere og vise hvordan det er kommet fram til verdien 0,61 beskrevet tidligere i dette kapitlet.

La et gitt kontorbygg ha en branncelle med areal,  $A_{fi}$  på 1000 m<sup>2</sup> med og uten sprinklersystem.

#### *Global faktor i et scenario uten sprinklersystem:*

Sannsynlighet for antennelse:

$$p_{fi,55}^{IGNITION} = 2,2 \times 10^{-5} \times 1000 \text{ m}^2 = 2,2 \times 10^{-2}$$

Pålitelighetsindeks:

$$\beta_{fi} = \beta_{fi,t} = \phi^{-1} \left( 7,23 \times 10^{-5} / 2,2 \times 10^{-5} \right) = \phi^{-1}(3,29 \times 10^{-3}) = 2,718$$

Global faktor:

$$\gamma_{qf}^{Uten sprinkler} = q_{f,d} / q_{f,k} = 0,863605 \{1 - 0,233909(0,577216 + \ln[-\ln\phi(0,9 \times 2,718)])\} = 1,74$$

#### *Global faktor i et scenario med sprinklersystem:*

Sannsynlighetene for feiling i sprinklersystem med ulike oppbygninger finnes i Tabell 44.

| Aktivt brannsikringstiltak                                           | Sannsynlighet for feiling ved slokking av brann |
|----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| <b>Automatisk brannslokkesystem</b>                                  | 0,02                                            |
| <b>Automatisk brannslokkesystem med 1 uavhengig vannforsyning</b>    | 0,01                                            |
| <b>Automatisk brannslokkesystem med 2 uavhengige vannforsyninger</b> | 0,005                                           |
| <b>Automatisk varmedeteksjon og alarmsystem</b>                      | 0,25                                            |
| <b>Automatisk røykdeteksjon og alarmsystem</b>                       | 0,0625                                          |
| <b>Automatisk alarmoverføring til brannvesen</b>                     | 0,025                                           |

Tabell 44: Sannsynlighet for feiling av aktive brannsikringstiltak

Av tabellen velges følgende sannsynlighet for feil i sprinklersystemet:

$$p_f^{SP} = 0,02$$

Sannsynligheten for antennelse vektet deretter etter sannsynligheten for feiling i sprinklersystemet:

$$p_{fi,55} = 2,2 \times 10^{-5} / \text{m}^2 \times 0,02 = 4,4 \times 10^{-4}$$

Pålitelighetsindeks:

$$\beta_{fi} = \phi^{-1} \left( \frac{7,23 \times 10^{-5}}{4,4 \times 10^{-4}} \right) = \phi^{-1}(1,643 \times 10^{-1}) = 0,977$$

Global faktor:

$$\begin{aligned} \gamma_{qf}^{Med\ sprinkler} &= q_{f,d}/q_{f,k} = 0,863605 \{1 - 0,233909(0,577216 + \ln[-\ln \phi(0,9 \times 0,977)])\} \\ &= 1,062 \end{aligned}$$

### *Utregning av differensialfaktor*

De globale faktorene i scenarioene med og uten sprinkler kan kombineres for å regne ut differensialfaktoren ved bruk av sprinkler:

Dette gir en differensialfaktor,  $\delta_{n1}$  på :

$$\delta_{n1} = 1,062/1,74 = 0,61$$

Altså den samme verdien som oppgis i Eurokode 1 del 1-2 (standardorganisasjonen, 2008). Legg merke til at verdien her gjelder for kontorbygg meg 1000 m<sup>2</sup> gulvareal, og at det vil oppnås forskjellige verdier med ulike parametre. Differensialfaktoren,  $\delta_{n1}$  bør tilpasses bruksområdet. Variasjonen i differensialfaktorene er størst i brannceller med gulvareal mindre enn 200 m<sup>2</sup> (Project, 2005).

### Vedlegg 3 – Ulike fareklassesystemer

| Fareklassesystemet beskrevet i NS-EN 12845 (standardorganisasjonen, 2009a) |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                 |
|----------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Fareklasse                                                                 | Beskrivelse                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | Eksempler                                                                                                                                                                                                       |
| Lav fareklasse (LH)                                                        | <p>I hele eller deler av anvendelsesområder som er klassifisert som lav fareklasse er mengden eller brennbarheten av brannlasten er liten og det forventes en relativt liten varmeavgivelsesrate ved brann.</p> <p>Ingen enkeltceller er større enn 126 m<sup>2</sup> og har en brannmotstand på minst 30 min.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Skoler og andre utdanningsinstitusjoner</li> <li>- Kontorer</li> <li>- Fengsel</li> </ul>                                                                              |
| Ordinær fareklasse gruppe 1 (OH1)                                          | <p>I hele eller deler av anvendelsesområder som klassifiseres som OH1-4 finnes det seg middels brannlast med middels brennbarhet.</p> <p>Der materialer lagres i anvendelsesområder klassifisert i OH1-OH3 skal det dimensjoneres beskyttelse i hele rommet i henhold til minst OH3. Maksimal lagringshøyde er avhengig av undergruppene og lagringsmåte og skal ikke overstige verdiene som er gitt i tabell 1 i NS-EN 12845. Største lagringsareal skal være under 50 m<sup>2</sup> for hver enkeltblokk med minst 2,4 m klaring.</p> <p>Der det lagres varer i anvendelsesområder klassifisert i OH4, skal lagringslokalene behandles som høy fareklasse, lagring (HHS).</p> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Sykehus</li> <li>- Hotell</li> <li>- Bibliotek (ikke medregnet bokhandel)</li> <li>- Restaurant</li> <li>- Skole</li> <li>- Kontor</li> <li>- Datamaskinrom</li> </ul> |
| Ordinær fareklasse gruppe 2 (OH2)                                          | Se beskrivelse av OH1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Bakeri</li> <li>- Bryggeri</li> <li>- Laboratorium</li> <li>- Vaskeri</li> <li>- Parkering</li> <li>- Museum</li> </ul>                                                |
| Ordinær fareklasse gruppe 3 (OH3)                                          | Se beskrivelse av OH1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Teknisk driftsrom</li> <li>- Jernbanestasjon</li> <li>- Gårdsbygning</li> <li>- Varehus</li> <li>- Butikkssenter</li> <li>- Møbelstilling, møbelfabrikk</li> </ul>     |
| Ordinær fareklasse gruppe 4 (OH4)                                          | Se beskrivelse av OH1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Kino og teater</li> <li>- Konsertsal</li> <li>- Utstillingshall</li> </ul>                                                                                             |

Tabell 45: Fareklassesystemet beskrevet i NS-EN 12845 (standardorganisasjonen, 2009a)

| Fareklassesystem beskrevet i NFPA 13 (Association, 2013b) |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                      |
|-----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Fareklasse                                                | Beskrivelse                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Eksempler (Association, 2015d)                                                                                                                                                                                       |
| Light Hazard Occupancies                                  | <p>Hele eller deler av anvendelsesområder hvor andelen og brennbarheten av materialer er lav og det forventes relativt lave varmeavgivelsesrater.</p> <p>Mer eller mindre permanent plassering av møbler. Ingen produksjon eller lagring.</p>                                                                                                                                               | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Institusjonelle bygg</li> <li>- Skoler</li> <li>- Boliger</li> <li>- Religiøse bygg</li> <li>- Kontrorbygg</li> </ul>                                                       |
| Ordinary Hazards (Group 1)                                | <p>Hele eller deler av anvendelsesområder hvor brennbarheten i materialene er lav, mengden moderat og det forventes moderate varmeavgivelsesrater.</p> <p>Brennbare materialer skal ikke lagres i høyder som overstiger 8 ft (2,4 m).</p>                                                                                                                                                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Produksjons og prosesseringslokaler hvor bruk av brennbare væsker og gasser er svært begrenset eller ikke til stede for eksempel parkeringshus og bilforhandlere</li> </ul> |
| Ordinary Hazards (Group 2)                                | <p>Hele eller deler av anvendelsesområder hvor brennbarheten i materialen og mengden er moderat til høy og det forventes relativt høye varmeavgivelsesrater.</p> <p>Der hvor det forventes moderate varmeavgivelsesrater skal høyden av lagrede varer være under 12 ft (3,66 m). Der hvor det forventes høye varmeavgivelsesrater skal høyden av lagrede varer være under 8 ft (2,4 m).</p> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Landbruksbygninger</li> <li>- Butikker for maskinutstyr</li> <li>- Bagasjehåndteringsområ der på flyplasser</li> </ul>                                                      |

Tabell 46: Fareklassesystem beskrevet i NFPA 13 (Association, 2013b)

| Fareklassesystem beskrevet i FM Approvals dataark 3-26 (Global, 2012) |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|-----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Fareklasse                                                            | Beskrivelse                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Eksempler                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| Hazard Category 1 (HC-1)                                              | Lett belastede anvendelsesområder med ordinære brennbare materialer (Dette samsvarer med klasse A branner i det amerikanske klassifiseringsystemet i NFPA 10 (Association, 2013a)) hvor lagring av varer ikke er tillatt. Her forventes det relativt lave varmeavgivelsesrater.                                                                                                                                                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Leiligheter</li> <li>- Kontorer</li> <li>- Atrium</li> <li>- Skoler og andre utdanningsinstitusjoner</li> <li>- Religiøse bygg</li> <li>- Skjulte rom</li> <li>- Gymsaler</li> <li>- Sykehus og sykehuslaboratorier, med mindre lagring og prosessering av brennbare væsker er utstrakt</li> <li>- Institusjoner</li> <li>- Kjøkken</li> <li>- Bibliotek</li> <li>- Konferanserom</li> <li>- Butikker for metallarbeider</li> <li>- Pleiesenter</li> <li>- Museum</li> <li>- Kundeområder i restauranter</li> <li>- Ubrukte loft</li> </ul> |
| Hazard Category 2 (HC-2)                                              | Lett til moderat belastet anvendelsesområde med ordinære brennbare materialer. Lagring av varer er ikke tillatt. Produksjon av enkelte varer er tillatt.<br><br>I anvendelsesområder benyttet for produksjon skal råvarer av mindre brannfare (tre, papp, små mengder plast o.l) ikke være stablet høyere enn 6 ft (1,8 m). Der hyller under samme høyde gjør det mulig å plukke ned varer gjelder spesielle regler for lagring av plast. | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Parkeringshus</li> <li>- Utsteder</li> <li>- Konvensjonssenter</li> <li>- Ustillingshaller</li> <li>- Områder for prosessering av mat</li> <li>- Butikker for metallarbeider</li> <li>- Sportsarenaer</li> <li>- Teater og auditorier</li> <li>- Utstysrom</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Hazard Category 3 (HC-3)                                              | Hardt belastede anvendelsesområder med eller uten plast og med eller uten produksjon av varer. Her er det store mengder brennbart materiale, eller eventuelt skjærming av områder hvor det kan oppstå brann og brannen kan nå lagrede varer av uekspandert plastikk som har en høyde på opptil 1,5 m.                                                                                                                                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Reparasjonsgarager for biler og kjøretøy</li> <li>- Områder for delemontering av byggduler</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |

Tabell 47: Fareklassesystem skrevet i FM Approvals dataark 3-26 (Global, 2012)

### Bruksområde for fareklassesystemene

Fareklassesystemet fra NS-EN 12845 (standardorganisasjonen, 2009a) benyttes i de europeiske standardene:

- CEN/TS 14972 fra CEN, The European Committee For Standardization
- VdS 3188, VdS 4001 og VdS 2109 fra VdS, Verband der Schadenversichen eV

Det amerikanske fareklassesystem som beskrives i NPA 13 (Association, 2013b) benyttes i følgende standarder:

- NFPA 750 (Association, 2015e) fra NFPA, National Fire Protection Association
- UL 2167 fra Underwriters Laboratories Inc
- DD8458-1 og DD8489-7 fra BSI Standard Publication
- LPS 1283-1 fra BRE Global Ltd

Fareklassesystemet beskrevet i FM Globals datablad "Fire Protection Water Demand 3-26" (Global, 2012) benyttes i standarden:

- FM 5560 (Approvals, 2012) fra FM Approvals.

## Vedlegg 4 – Sammenheng mellom risikoklasse og valg av standard for dimensjonering av sprinkler

| Type byggverk i risikoklasse 4                                                                                                                                                                                                                                    | NS-INSTA<br>900<br>Type 1 | NS-INSTA<br>900<br>Type 2 | NS-INSTA<br>900<br>Type 3 | NS-EN<br>12845 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------|
| Eneboliger og tomannsboliger<br>Rekkehus med høyst tre etasjer over<br>terreng inklusive loftet, og en<br>kjelleretasje<br>Boliger og fritidsboliger med høyst fire<br>boligenheter og høyst tre etasjer over<br>terreng inklusive loftet, og en<br>kjelleretasje | x                         |                           |                           |                |
| Bygninger utformet som boliger med<br>høyst åtte etasjer og en kjelleretasje:<br>-Boligsameier, borettslag og lignende<br>-Studentboliger<br>-Internater<br>-Boligbrakker<br>-Terrasseleiligheter<br>-Barnehjem<br>-Fritidsboliger                                |                           | x                         |                           |                |
| Bygninger med ni etasjer eller mer,<br>utformet som boliger:<br>-Boligsameier, borettslag og lignende<br>-Studentboliger<br>-Internater<br>-Boligbrakker<br>-Terrasseleiligheter<br>-Barnehjem<br>-Fritidsboliger                                                 |                           |                           | x                         |                |
| Selvbetjente hytter                                                                                                                                                                                                                                               | x                         |                           |                           |                |
| Kombinerte bygninger (Dvs<br>bygninger med ulike risikoklasser)                                                                                                                                                                                                   | Boligdelen                | X <sup>1</sup>            | X <sup>1</sup>            |                |
|                                                                                                                                                                                                                                                                   | Næringsdelen              |                           |                           | X <sup>1</sup> |
| <sup>1</sup> Bruk tabellen for øvrig bestemmelse av type                                                                                                                                                                                                          |                           |                           |                           |                |

Tabell 48: Oversikt over preaksepterte type sprinklersystemer for risikoklasse 4 (Byggkvalitet, 2015)

| Type byggverk i risikoklasse 6                                                                                                        |                                                                                                                    | NS-INSTA 900 Type 1 | NS-INSTA 900 Type 2 | NS-INSTA 900 Type 3 <sup>1</sup> | NS-EN 12845      |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|---------------------|----------------------------------|------------------|
| <b>Arrestlokaler og fengsel</b>                                                                                                       |                                                                                                                    |                     |                     |                                  | X                |
| <b>Asylmottak og transittmottak</b>                                                                                                   |                                                                                                                    |                     |                     | X                                |                  |
| <b>Bolig beregnet for personer med behov for heldøgns pleie og omsorg i:</b>                                                          | Eneboliger og tomannsboliger<br>Rekkehus med inntil tre etasjer over terreng inklusive loftet, og en kjelleretasje | X                   |                     |                                  |                  |
|                                                                                                                                       | Andre bygninger                                                                                                    |                     |                     | X                                |                  |
| <b>Bolig spesielt tilrettelagt og beregnet for personer med funksjonsnedsettelse i:</b>                                               | Boliger med høyst fire boligenheter og inntil tre etasjer og en kjelleretasje                                      | X                   |                     |                                  |                  |
|                                                                                                                                       | Andre bygninger inntil 8 etasjer                                                                                   |                     | X                   |                                  |                  |
|                                                                                                                                       | Andre bygninger med 9 etasjer eller mer                                                                            |                     |                     | X                                |                  |
| <b>Feriekoloni og leirskole</b>                                                                                                       |                                                                                                                    |                     |                     | X                                |                  |
| <b>Overnattingssted og hotell</b>                                                                                                     |                                                                                                                    |                     |                     |                                  | X <sup>2,3</sup> |
| <b>Pleieinstusisjon og sykehjem</b>                                                                                                   |                                                                                                                    |                     |                     |                                  | X <sup>2,3</sup> |
| <b>Sykehus</b>                                                                                                                        |                                                                                                                    |                     |                     |                                  | X <sup>3</sup>   |
| <b>Turisthytte og vandrehjem</b>                                                                                                      |                                                                                                                    |                     |                     | X                                |                  |
| <sup>1</sup> Unntak for sprinklede loft i NS-INSTA 900 gjelder kun loft over én branncelle                                            |                                                                                                                    |                     |                     |                                  |                  |
| <sup>2</sup> Beboelsesrom og tilhørende rømningsveier kan sprinkles etter NS-INSTA 900 type 3.                                        |                                                                                                                    |                     |                     |                                  |                  |
| <sup>3</sup> Det skal benyttes hurtigutløsende sprinkler (QR- quick response) sprinkler for beboelsesrom og tilhørende rømningsveier. |                                                                                                                    |                     |                     |                                  |                  |

Tabell 49: Oversikt over preaksepterte type sprinklersystemer for risikoklasse 6 (Byggkvalitet, 2015)



## Vedlegg 5 – Relevante testprotokoller for dimensjonering av kommersielle vannåkesystemer

| VdS                                               |                                                                      |                                                                      |                                              |                                                    |                                                                      |                                                                      |
|---------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| <b>Navn på test</b>                               | OH1 Office (Schadenverhütung, 2010)                                  | OH1 Hotel (Schadenverhütung, 2011b)                                  | OH1 False ceiling (Schadenv erhütung, 2011c) | OH2 Garages (Rothe, 2014)                          | OH3 Storage compact (Schadenverhütung, 2011a)                        | OH3 Storage shelf (Schadenverhütung, 2011a)                          |
| <b>Fareklasse (standardorganisasjonen, 2009a)</b> | OH1                                                                  | OH1                                                                  | OH1                                          | OH2                                                | OH3                                                                  | OH3                                                                  |
| <b>Takhøyde</b>                                   | Ikke gitt, testet i laboratorier med ulik høyde                      | Ikke gitt, testet i laboratorier med ulik høyde                      |                                              |                                                    | Ikke gitt, testet i laboratorier med ulik høyde                      | Ikke gitt, testet i laboratorier med ulik høyde                      |
| <b>Areal</b>                                      | Takareal på 80 m <sup>2</sup>                                        | Takareal på 80 m <sup>2</sup>                                        | ≤ 50 m <sup>2</sup>                          |                                                    | Takareal på 80 m <sup>2</sup>                                        | Takareal på 80 m <sup>2</sup>                                        |
| <b>Testvariasjon</b>                              | Antall dyser<br><br>Testen skal kjøres med tilstrekkelig ventilasjon | Antall dyser<br><br>Testen skal kjøres med tilstrekkelig ventilasjon |                                              | Antall dyser                                       | Antall dyser<br><br>Testen skal kjøres med tilstrekkelig ventilasjon | Antall dyser<br><br>Testen skal kjøres med tilstrekkelig ventilasjon |
| <b>Testrepetisjon</b>                             | Testen må repeteres både med og uten testvariasjon                   | Testen må repeteres både med og uten testvariasjon                   |                                              | Testen må repeteres både med og uten testvariasjon | Testen må repeteres både med og uten testvariasjon                   | Testen må repeteres både med og uten testvariasjon                   |
| <b>Antennelseskilde</b>                           | Brenner + trekrybbe dynket i n-heptan.                               | Fiberbord dynket i n-heptan i en plastpose                           | Væskedam med heptan                          |                                                    | Esker med kopper                                                     | Esker med kopper                                                     |
| <b>Type brannlast</b>                             | 2 skrivebord                                                         | 4 Sofaer                                                             | Spesifisert                                  | Spesifisert                                        | Kartonger med kopper                                                 | Kartonger med kopper                                                 |
| <b>Materiale i vegger og tak</b>                  | Skillevegger av kryssfiner                                           | Ikke spesifisert (Schadenverhütung, 2011b)                           | Ubrennbart tak                               | Ikke spesifisert                                   | Ubrennbare materialer                                                | Ubrennbare materialer                                                |
| <b>Tabellen fortsetter på neste side</b>          |                                                                      |                                                                      |                                              |                                                    |                                                                      |                                                                      |

|                                             |                                                                                      |                                                                   |                                           |                                          |                                                                  |                                                                  |
|---------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| <b>Testvarighet</b>                         | 30 min etter aktivering av vanntåkedyser                                             | 10 min etter aktivering av vanntåkedyser                          | 10 min etter aktivering av vanntåkedyser  | 30 min etter aktivering av vanntåkedyser | 10 min etter aktivering av vanntåkedyser                         | 10 min etter aktivering av vanntåkedyser                         |
| <b>Kriterier for godkjenning og feiling</b> | Kartlegge forkullet areal på skillevegger, skrivebord osv.<br><br>Høyeste temperatur | Bestemme areal på skadet del av madrass<br><br>Høyeste temperatur | Forkullet areal<br><br>Høyeste temperatur |                                          | Begrenset skadeomfang på lagrede varer<br><br>Høyeste temperatur | Begrenset skadeomfang på lagrede varer<br><br>Høyeste temperatur |

Tabell 50: Oversikt over testprotokoller fra VdS (Schadenverhütung, 2010) (Schadenverhütung, 2011b) (Schadenverhütung, 2011a) (Schadenverhütung, 2011c) (Rothe, 2014)

| CEN/TS-14972                                      |                                                                                                                                            |                                                                                 |
|---------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Navn på test</b>                               | Office occupancies, OH1                                                                                                                    | Certain occupancies OH3                                                         |
| <b>Fareklasse (standardorganisasjonen, 2009a)</b> | OH1                                                                                                                                        | OH3                                                                             |
| <b>Takhøyde</b>                                   | 2 m eller høyere                                                                                                                           | Maksimum 8 m                                                                    |
| <b>Areal</b>                                      | Rom med ubegrenset størrelse og takareal på 80 m <sup>2</sup>                                                                              | Minimum 12,5 x 12,5 m = 156,25 m <sup>2</sup> , ellers ingen arealbegrensninger |
| <b>Testvariasjon</b>                              | Antall dyser                                                                                                                               | Antall dyser                                                                    |
| <b>Testrepetisjon</b>                             | Testen må repeteres med testvariasjon                                                                                                      | Testen må repeteres med testvariasjon                                           |
| <b>Antennelseskilde</b>                           | Gassbrenner og trekrybbe                                                                                                                   | Stålbrett fylt med heptan                                                       |
| <b>Type brannlast</b>                             | 2 Skrivebord                                                                                                                               | Kartonger med kopper                                                            |
| <b>Materiale i vegger og tak</b>                  | Kryssfiner i vegger                                                                                                                        |                                                                                 |
| <b>Testvarighet</b>                               | 30 min etter aktivering av vanntåkedysen                                                                                                   | 30 min etter aktivering av vanntåkedysen                                        |
| <b>Kriterier for godkjenning og feiling</b>       | Forkullet område på kledning<br><br>Antall gjenstander på skrivebord med brannskader<br><br>Temperaturstigningskurve og høyeste temperatur | Antall kartonger og kopper påvirket av brann<br><br>Høyeste temperatur          |

Tabell 51: Oversikt over testprotokoller i CEN/TS-14972 (standardorganisasjonen, 2011)

| Standard                                    | DD 8458-1 (BSI, 2010)                                                                                                             |                                       | DD 8489-7 (Rothe, 2014)               |                                       |                                       |
|---------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| <b>Navn på test</b>                         | Residential/domenstic compartment                                                                                                 | Small compartment                     | Large compartment                     | Open space                            | Workshop                              |
| <b>Fareklasse (Association, 2013b)</b>      | Light Hazard                                                                                                                      | Light Hazard                          | Light Hazard                          | Ligh Hazard                           | Light Hazard                          |
| <b>Takhøyde</b>                             | 2,5 m + 0,05 m                                                                                                                    |                                       |                                       |                                       |                                       |
| <b>Areal</b>                                | 8 x 4 m = 32 m <sup>2</sup>                                                                                                       |                                       |                                       |                                       |                                       |
| <b>Testvariasjon</b>                        | Plassering av brannscenario<br><br>Med og uten styrt ventilasjon                                                                  |                                       |                                       | Plassering av antennelseskilde        | Plassering av antennelseskilde        |
| <b>Test-repetisjon</b>                      | Testrepetisjon med testvariasjon                                                                                                  | Test-repetisjon uten test-variasjon   | Test-repetisjon uten test-variasjon   | Test-repetisjon med test-variasjon    | Test-repetisjon med test-variasjon    |
| <b>Antennelseskilde</b>                     | Trekrybbe                                                                                                                         |                                       |                                       |                                       |                                       |
| <b>Type brannlast</b>                       | Simulerte møbler                                                                                                                  | 2 Køyeseenger                         | Simulerte møbler                      | 4 sofaer                              | 2 Skrivebord                          |
| <b>Materiale i vegger og tak</b>            | Kryssfinér på to vegger                                                                                                           |                                       |                                       |                                       |                                       |
| <b>Testvarighet</b>                         | Domestic: 10 min etter at vanntåken er aktivert<br>Residential: 30 min etter at vanntåken er aktivert                             | 10 min etter at vanntåken er aktivert | 10 min etter at vanntåken er aktivert | 30 min etter at vanntåken er aktivert | 30 min etter at vanntåken er aktivert |
| <b>Kriterier for godkjenning og feiling</b> | Maksimums-temperaturer i ulike høyder i brannrommet<br><br>Skal være i stand til å undertrykke/-bekjempe brannen i testvarigheten |                                       |                                       |                                       |                                       |

Tabell 52: Oversikt over testprotokoller i DD 8458-1 (BSI, 2010) og DD 8489-7 (Rothe, 2014)

| FM 5560 (Global, 2012)                      |                                                                                                                                             |                                                                                                                                   |                                                                                                                                   |
|---------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Navn på test                                | Small compartment                                                                                                                           | Large Compartment                                                                                                                 | Open Space                                                                                                                        |
| <b>Fareklasse (Global, 2012)</b>            | HC 1                                                                                                                                        | HC 1                                                                                                                              | HC 1                                                                                                                              |
| <b>Takhøyde</b>                             | 2,4 m                                                                                                                                       | 2,4 m                                                                                                                             | 5,0 m                                                                                                                             |
| <b>Areal</b>                                | 3,0 x 4,0 m rom (12 m <sup>2</sup> ) + korridor                                                                                             | Kvadratisk romform og minst 37 m <sup>2</sup>                                                                                     | Takareal på minst 80 m <sup>2</sup>                                                                                               |
| <b>Testvariasjon</b>                        |                                                                                                                                             |                                                                                                                                   | Plassering av brannscenario                                                                                                       |
| <b>Testrepetisjon</b>                       | Valgfri testrepetisjon uten testvariasjon                                                                                                   | Valgfri testrepetisjon uten testvariasjon                                                                                         | Testrepetisjon og testvariasjon                                                                                                   |
| <b>Antennelseskilde</b>                     | Fiberplate dynket i n-heptane i en plastikkpose                                                                                             | Trekrybbe                                                                                                                         | Fiberplate dynket i n-heptane i en plastikkpose                                                                                   |
| <b>Type brannlast</b>                       | 2 Køyesenger                                                                                                                                | Simulerte møbler                                                                                                                  | 4 Sofaer                                                                                                                          |
| <b>Materiale i vegger og tak</b>            | 45 mm mineralull dekket av 13 mm ubrennbare veggplater, dekket av 3 mm dekorativt panel. Taket i brannrommet skal være av cellulose-fliser. | 45 mm mineralull dekket av 13 mm ubrennbare veggplater. Trepaneler skal dekke to av veggene. Taket skal ha gipskledning.          | En himling på minst 1 m <sup>2</sup> direkte over brannen skal være produsert av cellulose-fliser.                                |
| <b>Testvarighet</b>                         | 10 min, hvor måletiden starter etter aktivering av vanntåkedysene. All gjennværende brann etter disse 10 min skal slokkes manuelt           | 10 min, hvor måletiden starter etter aktivering av vanntåkedysene. All gjennværende brann etter disse 10 min skal slokkes manuelt | 10 min, hvor måletiden starter etter aktivering av vanntåkedysene. All gjennværende brann etter disse 10 min skal slokkes manuelt |
| <b>Kriterier for godkjenning og feiling</b> | Dyser i korridor skal ikke aktiveres<br><br>Begrenset skade på køyesenger<br><br>Krav til maksimal temperatur                               | Dyser i døråpning skal ikke aktiveres<br><br>Krav til maksimal temperatur                                                         | Krav om antall dyser som aktiveres<br><br>Krav om skadeomfang på brannscenario<br><br>Krav til maksimale temperaturer             |

Tabell 53: Oversikt over testprotokoller i FM 5560 (Global, 2012)

| UL 2167 (Rothe, 2014)                  |                                                    |                                          |                         |                                                                                                        |                                          |                                             |                                          |
|----------------------------------------|----------------------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|---------------------------------------------|------------------------------------------|
| <b>Navn på test</b>                    | Small cabin                                        | Small corridor                           | Large                   | Public space                                                                                           | Ordinary Hazard                          | Residential                                 | Light Hazard                             |
| <b>Fareklasse (Association, 2013b)</b> | Low hazard                                         | Low hazard                               | Low hazard              | Low hazard                                                                                             | OH 1                                     | Low hazard                                  | Low hazard                               |
| <b>Takhøyde</b>                        |                                                    |                                          |                         |                                                                                                        |                                          |                                             |                                          |
| <b>Areal</b>                           |                                                    |                                          |                         |                                                                                                        |                                          |                                             |                                          |
| <b>Testvariasjon</b>                   | Plassering av antennelseskilde<br><br>Antall dyser | Plassering av brannscenario              |                         | Plassering av brannscenario<br><br>Plassering av antennelseskilde<br><br>Med og uten styrt ventilasjon | Plassering av brannscenario              | Plassering av brannscenario                 | Plassering av antennelseskilde           |
| <b>Testrepetisjon</b>                  | Testrepetisjon med testvariasjon                   | Testrepetisjon med testvariasjon         | Ingen testrepetisjon    | Testrepetisjon med testvariasjon                                                                       | Testrepetisjon med testvariasjon         | Testrepetisjon med eller uten testvariasjon | Testrepetisjon med testvariasjon         |
| <b>Antennelseskilde</b>                |                                                    |                                          |                         |                                                                                                        |                                          |                                             |                                          |
| <b>Type brannlast</b>                  | 2 kjøyesenger                                      | Spesifisert                              | Simulerte møbler        | 4 sofaer                                                                                               | Kartonger med kopper                     | Simulerte møbler                            | Simulerte møbler                         |
| <b>Materiale i vegger og tak</b>       |                                                    |                                          |                         |                                                                                                        |                                          |                                             |                                          |
| <b>Plassering av termoelement</b>      |                                                    |                                          |                         |                                                                                                        |                                          |                                             |                                          |
| <b>Testvarighet</b>                    | 10 min etter aktivering av vanntåkedysen           | 10 min etter aktivering av vanntåkedysen | 10 min etter antennelse | Ikke definert                                                                                          | 10 min etter aktivering av vanntåkedysen | 30 min etter antennelse                     | 10 min etter aktivering av vanntåkedysen |

Tabell 54: Oversikt over testprotokoller i UL 2167 (Rothe, 2014)

## Vedlegg 6 – Mail

### Arnstein Fedøy, Sprinkler- & Vanntåkesystemer AS

#### *Spørsmål til Håvard Grønstad 16.2.15*

Hei Håvard Grønstad

Jeg heter Anders Brandser Ressheim og skriver nå masteroppgave ved NTNU om bruk av vanntåkeanlegg i høye trehus. En av hensiktene med oppgaven er å kartlegge hva som skal til for at rådgivere skal kunne designe og verifisere vanntåkesystemer.

Tek 10 førte meg til FG's "Veiledning for Vanntåkesystemer", hvor det står at for verifisering av vanntåkeanlegg kreves det test av komponenter og utstyr, samt fullskala test av hele anlegget. For

testing av komponenter og utstyr anbefales det å benytte eksisterende standarder og dersom det ikke finnes en egnet standard skal dette i stedet evalueres av et kvalifisert organ. For fullskala test står det kun at det skal benyttes akkrediterte testinstitusjoner.

Jeg har undersøkt en del standarder for vanntåke og har funnet ut at det finnes testprotokoller for fullskala tester i disse. Dette er standarder som FM 5560, CEN/TS 14975, VdS, UL2167, DD8458-1, DD8489-n osv. Jeg mener det er viktig for rådgivere å vite hvilke tester som eksisterer for å få begrep om hvilke bruksområder for vanntåke som er mulige.

Derfor har jeg tenkt å skrive om fullskala testprotokoller i min oppgave. Siden det i FGs veiledning ikke står hvilke testprotokoller for fulltest av vanntåke som kan benyttes, trenger hjelp til å plukke ut hvilke som kan benyttes.

Jeg lurar også på om du kan anbefale en vanntåkestandard for design av vanntåkesystemer og gi en begrunnelse for hvorfor jeg burde benytte denne i min oppgave.

Håper du kan hjelpe meg med dette.

Mvh Anders Brandser Ressheim

#### *Svar fra Arnstein Fedøy 16.2.15*

Hei Anders. Har fått videreformidlet denne eposten av Håvard.

Kort om meg selv: Er utdannet branningeniør fra HSH, der jeg skrev hovedoppgaven min på sammenligning av sprinkler og vanntåke. Har siden jobbet i rent sprinklerfirma og rent vanntåkefirma. Felles for de begge, var at de mente selv at løsning på et brannproblem var deres respektive system. Det er ikke tilfelle. Noen ganger kan flere systemer være riktig, andre ganger bare et og noen ganger er et ikke-vannbaserte slokkesystemer som jeg bruker tiden min på, rett. Kunden skal uansett presentere for best løsning og fins det flere enn en, kan han da velge. Har siden 2012 siddet i styret hos Brannfaglig Fellesorganisasjon, har vært en av initiativtaker til det første Vanntåkekonferansen i 2013 (ny kommer i år) og sitter som en av lederne i forumet (med blant annet Håvard) som har jobbet med ny FG-veiledning for vanntåkesystemer (og som også kommer ut som 3 revisjon i vår).

Slik jeg tolker din epost har den fire spørsmål:

1. Hva skal til for å bruke vanntåke i høyhus av tre?
2. Må man bruke en standard for vanntåkesystemer for å følge PLB?
3. Hva sier FG-veiledningen om gjeldene standarder?
4. Kan vi anbefale en vanntåkestandard?

1. Det er slik i dag at TEK10 og VTEK ikke lenger skiller mellom de forskjellige typer slokkesystemer, men går under betegnelsen Brannsløkkeanlegg/Slokkeanlegg. Dette gjelder f. eks både sprinkler og vanntåke (men ikke begrenset til dette). Videre stilles det nå krav (plikt) om installerte slokkeanlegg når samlet bruttoareal med åpen forbindelse over flere plan/brannceller er mer enn 800 m<sup>2</sup>, byggverk i risikoklasse 4 hvor det er krav om heis?? og byggverk i risikoklasse 6. Tabell 1 og 2 §11-12 i VTEK klargjør hvilken byggverk vi her snakker om (selv om opplistingen snakker om sprinkler). Det er i dag ingen begrensning i bruk av vanntåke for høyhus, så lenge det er krav om slokkeanlegg i bygget. Det som vil være aktuelt å se på er hvilken dimensjonering som skal legges til grunn. Tabell 1 kan brukes til å beskrive et INSTA Type 2 anlegg i et høyhus på fra 5 til 9 etasjer, selv om dette aldri var forutsetning for boligsprinkler etter FM/UL/NFPA 13 der dagens boligsprinklerteknologi kommer fra. Hvis samme tankegang slår ut på vanntåke, kan dette være meget uheldig i og med dagens utfordring med forkullingen i tre og vanntåke som ikke evner helt samme penetrering i treverk som sprinkler gjør.

2. Det er både krav etter PLB om følge en gitt vanntåkestandard og ikke krav om å bruke en slik. KRAV: Der det i dag kan brukes INSTA 900 skal det ved bruk av vanntåkesystemer brukes INSTA 900-3. INSTA er felles nordisk standard (ikke europeisk slik f. eks NS-EN 12845 er) og skal følges i de nordiske landene. INSTA 900-3 sier noe om hvilken type branntester som skal utføres for vanntåke og består for å være i henhold til PLB (INSTA 900-2 gjelder boligsprinklerdyser). 900-3 er ikke komplett standard og sier ikke noe om to andre områder som alle andre standarder gjør, komponenttest og tilvirknings test (dette gjør INSTA 900-2 som 900-3 henviser til på disse punktene). Ingen systemer har i dag fullgod dokumentasjon etter denne, den eneste er bare testet i flatt tak uten hindringer på 2,5 m høyde, ikke skråtak, ikke som tørt eller med frostvæske for å nevne noe. IKKE KRAV: Hvis man velger en mer krevende dimensjonering (f. eks likestilt etter NS 12845) eller området faller utenfor bolig, så kan andre standarder brukes eller ved fullskalatesting etter gjeldene applikasjon/bruksområde. Også her gjelder at alle vesentlige egenskaper dokumenteres.

3. Gjeldene veiledning bruker ord som: Godkjent for bruksområde, godkjennelsesdokumenter og at NFPA 750 skal ligge til grunn. Dagens veiledning vil få en langt klarer tekst enn den gjør i dag og en klar henvisning til gjeldene standarder. NFPA 750 viser til følgende standarder: VdS, UL, FM og IMO. I revidert utgave vil ikke IMO kunne legges til grunn, da dette er en standard for maritim sektor. Dette er forgjengeren til alle standarder og er meget god, men for at det skal bli lettere å navigere i standarder vil denne etter revidering ikke lengers brukes. Som en analogi kan du si at «frukt og grønnsaker» ikke lenger skal blandes, vil nå bare jobbe med «frukt».



4. I revidert utgave vil følgende standarder kunne brukes: FM 5560, VdS, UL 2167 (selv om den for øyeblikket er trukket inn grunnet omfattende revisjon av standarden) og LPS 1283-1. Sistnevnte har underliggende forslag til utkast (Development Draft)DD8458-1 og DD8489-7 som ikke på lang tid vil bli standard og dermed er vil ikke det komme godkjente vanntåkesystemer etter LPS 1283 på like lang tid. I tillegg har vi tatt inn CEN/TS 14972 som ikke er en standard, men en Technical Specification. Vi håper at denne på et eller annet tidspunkt skal bli en felles europeisk standard og ønsker til oppmuntre til dette ved å sidestille denne. Når det gjelder kravene til denne, må punkt 2 i besvarelsen min også følges med fullgod dokumentasjon.

Jeg har forutsett at du har noe kunnskap på området, men er det noe som du lurer på, som ble vel teknisk osv., send dette på epost og så vil jeg komme tilbake til per epost eller tlf.

Snakkes.

Med vennlig hilsen/ with kind regards

ARNSTEIN FEDØY

Faglig leder/Professional

Manager SPRINKLER- & VANNTÅKESYSTEMER AS

### *Spørsmål 26.2.15*

Hei Arnstein

Takk igjen for hjelp i forrige mail, den var til stor hjelp. I forbindelse med mailen har jeg fire spørsmål, disse er markert med @ i teksten nedenfor. Håper du har anledning til å svare på disse.

I forrige mail ble det skrevet at FGs nye veiledning vil anbefale følgende standarder:

- FM 5560
- VdS
- UL 2167
- LPS 1283-1
- CEN/TS 17972

@ Her er ikke NFPA 750 nevnt, vil ikke denne lenger være anbefalt eller ble den glemt av i farten?

Det ble skrevet at i FGs nye veiledning vil anbefale LPS 1283-1 og at denne "har underliggende forslag til utkast (Development Draft)DD8458-1 og DD8489-7 som ikke på lang tid vil bli standard og dermed er vil ikke det komme godkjente vanntåkesystemer etter LPS 1283 på like lang tid"

@ Menes det med dette at LPS 1283-1 vil utfases av DD8458-1 og DD8489-7? Jeg ser de har ulike utgivere, henholdsvis BRE Global Ltd og BSI Standard Publication.

Det står at PLB (jeg antar at det menes PBL, altså plan og bygningsloven?) bestemmer at NS-INSTA 900 skal benyttes der det er mulig å benytte den.

@ Finnes bestemmelsen om bruk av standard i plan og bygningsloven, og vet du isåfall hvor den står?

@ Vil bruk av NS-INSTA 900 serien være tilstrekkelig for verifisering av vanntåkesystemer, eller kreves det en fullskala test i tillegg til dette?

Håper du kan hjelpe meg med dette

Mvh Anders Brandser Ressheim

### *Svar 27.2.15*

Hei igjen Andres.

Grunnen til at jeg ikke nevnte NFPA 750 under oppramsing av produktstandarder er fordi dette er en installasjonstandard for vanntåke (hva må man tenke på når det gjelder rør og annet materiale i en vanntåkeinstallasjon) og hvordan noen typer farer skal beskyttes (punktbeskyttelse, rombeskyttelse, osv). NFPA 750 er henvist til som et tillegg til FG-veiledningen og skal følges. Derimot nevner ikke NFPA 750 de samme standardene som vi gjør i FG-veiledning, derfor overstyrer vi den. Hadde vi gått for de samme, så ville blant annet IMO godkjente dyser/systemer vært innfor. Dette endres i neste utgave.

Angående LPS 1283-1 REQUIREMENTS AND TEST METHODS FOR THE APPROVAL OF WATERMIST SYSTEMS FOR USE IN COMMERCIAL LOW HAZARD OCCUPANCIES: Dette er med andre en overliggende standard som referer til flere DD. Den identifiserer bare hvilken evaluering og testing som skal ligge til grunn for godkjenning av f. eks. vanntåkedysere/systemer til boligbruk. Når DD blir en standard vil man få en godkjenning etter LPS 1283 for sitt område og vil da ligge under BRE Global.

PBL betyr Plan- og Bygnings Loven:-). Lovhjelmingen for bruk av NS 12845 (og INSTA 900 i noen tilfeller) finner du VTEK §11-12.

For å bruke vanntåke etter INSTA skal vanntåkedysene/systemet være testet etter INSTA 900-3. Som redegjort for tidligere er ikke dette lett for de som har gjort brannforsøk etter denne. Eneste veien videre er for vanntåkedysere etter INSTA er å dokumentere dysene med flere forsøk, slik at alle relevante egenskaper er testet. Siden det er NS12845 som er utgangspunktet for all sprinkling/slokkeanlegg kan alternativt NS 12845 legges til grunn og andre ekvivalente godkjenninger (FM 5560, VdS, osv.) kan brukes. Dette gir også mer robust anlegg både i forhold til dimensjonering og krav til komponenter/overvåkning.

Håper du blir litt klokere av dette. Noen av oss har brukt lang tid å skjønne det du får nå ved å stille gode spørsmål. Ha en fortsatt god helg.

Mvh

Arnstein Fedøy

**Spørsmål 20.3.15**

Hei Arnstein

Håper alt står bra til. Jeg lurer på om du veit om det finnes noe anerkjent statistikk over pålitelighet i vanntåkesystemer? Jeg holder på med en risikoanalyse og trenger noen harde fakta å banke i bordet med!

Mvh Anders Brandser Ressheim

**Svar 20.3.15**

Hei.

Dette er det nærmeste jeg har. Det fins ikke mye rapporterte feil med vanntåke, sannsynlig fordi man har brukt den nesten 150 årlige historien til sprinkler for å eliminere vekk de vanligste feilene, slik som valg av rørtyper, oppsett pumpe, plassering dyser, osv.

Lykke til med risikoanalysen.

Mvh

Arnstein Fedøy

**Erling Mengshoel, Prevent Systems AS****Spørsmål 18.3.15**

Hei

Jeg heter Anders Brandser Ressheim og skriver masteroppgave om bruk av vanntåkesystemer i trehus over 4 etasjer ved NTNU. Hensikten med oppgaven er blant annet å kartlegge hva som skal til for å verifisere vanntåkesystemer, og dermed øke kunnskapsnivået og bruken i bransjen.

Jeg har kommet godt i gang med oppgaven og har noen spørsmål som jeg håper dere har anledning til å svare på.

- 1) Hvilke av vanntåkens slokkemekanismer anser du som de viktigste i klasse A branner? Altså, hvordan påvirker forkulling effektiviteten av slokkemekanismene.
- 2) Hvilken rolle spiller brennbare overflater av tre (i vegger + eventuelt tak) i et rom i brannutviklingen, i henholdsvis tidlig fase og etter overtenning?
- 3) Hvordan er brannutviklingen i et rom med overflater i tre sammenlignet med overflater i gips?
- 4) Hvordan vil vanntåke kunne påvirke brannutviklingen i rom med overflater i tre, henholdsvis før og etter overtenning? Hensikten med dette spørsmålet er blant annet å evaluere påliteligheten til vanntåke ved sein aktivering, dette er et viktig aspekt i min oppgave. Vil det være mulig å skaffe testresultater som omhandler dette og som jeg kan benytte i min oppgave?

- 5) Hvilke effekter som følge av brann i et høyt trehus kan virke inn på brannbekjempelseeffektiviteten og påliteligheten i vanntåkesystemer? For eksempel: Skorsteinseffekt-> Økt ventilasjon, mer?
- 6) Jeg skal utføre en risikoanalyse for bruk av vanntåke i rom med vegger i ubeskyttet tre og er i den forbindelse på utkikk etter statistikkdata for pålitelighet av vanntåke. Kan dere anbefale noe relevant litteratur på dette?

Mvh Anders Brandser Ressheim

### **Svar 30.3.15**

Hei,

Jeg har vært på utenlandsreise, og har derfor ikke hatt anledning til å svare før.

Vi utvikler lavtrykk vanntåke dyser til automatiske slokkeanlegg, som skal branntestes iht internasjonale branntest standarder for å bevise at effekten er minst like bra eller bedre enn et standard sprinklersystem. For å bestå disse testene gjelder det å ta brannen i en tidlig fase. Hvis brannen nærmer seg overtenning, har man ikke bestått testkravene. Om brannen starter i kjeller eller i 14. etg. spiller derfor liten rolle, brannen skal kontrolleres med normalt maksimum 4 dyser utløst, i store åpne rom. Vår teknologi angriper alle sidene av branntrianglet, så brannlast og forløp vil avgjøre om det er fortrenge oksygenet, senke temperaturen eller væte ned brannlasten som har størst effekt. Det er flere videoer på våre web sider som illustrerer dette.

Dysene og systemet komponent testes for å ivareta påliteligheten.

Du har en del branntekniske spørsmål som bedre kan svares av SP Fire Research, men du kan gjerne ringe meg hvis du ønsker litt mer utfyllende info.

Med vennlig hilsen

Erling Mengshoel

Daglig leder

Prevent Systems AS

### **Ragnar Wighus, SP Fire Research AS**

#### **Spørsmål 5.3.15**

Hei Ragnar Wighus

Jeg heter Anders Brandser Ressheim og skriver masteroppgave om bruk av vanntåkesystemer i trehus over 4 etasjer ved NTNU. Hensikten med oppgaven er blant annet å kartlegge hva som skal til for å verifisere vanntåkesystemer, og dermed øke kunnskapsnivået og bruken i bransjen. Jeg har kommet godt i gang med oppgaven og har 5 spørsmål i forbindelse med risikoanalysen. Etter å ha snakket med

min rådgiver Harald Landrø ble jeg anbefalt å kontakte deg og håper du har anledning til å svare på disse.

- 1) Hvilke av vanntåkens slokkemekanismer anser du som de viktigste i klasse A branner? Altså, hvordan påvirker forkulling effektiviteten av slokkemekanismene.
- 2) Hvilken rolle spiller brennbare overflater av tre (i vegger + eventuelt tak) i et rom i brannutviklingen, i henholdsvis tidlig fase og etter overtenning?
- 3) Hvordan er brannutviklingen i et rom med overflater i tre sammenlignet med overflater i gips?
- 4) Hvordan vil vanntåke kunne påvirke brannutviklingen i rom med overflater i tre, henholdsvis før og etter overtenning? Hensikten med dette spørsmålet er blant annet å evaluere påliteligheten til vanntåke ved sein aktivering, dette er et viktig aspekt i min oppgave. Vil det være mulig å skaffe testresultater som omhandler dette og som jeg kan benytte i oppgaven?
- 5) Hvilke effekter som følge av brann i et høyt trehus kan virke inn på brannbekjempelseeffektiviteten og påliteligheten i vanntåkesystemer? For eksempel: Skorsteinseffekt-> Økt ventilasjon, mer?

Håper du kan hjelpe meg med dette

Mvh Anders Brandser Ressheim

#### **Svar 10.4.15**

Hei, det har tatt litt tid før jeg fikk reagert på dette. Jeg har fått henvendelse fra Bettina McDowell i IWMA om å svare på konkrete spørsmål om dette temaet fra Anders, og har derfor svart på engelsk. Jeg sender også dette svaret til IWMA, til orientering til Bettina.

Når det gjelder litteratur anbefaler jeg å starte på vær hjemmeside, <http://spfr.no/> og søke med mitt navn (Wighus) under publikasjoner.

Hilsen Ragnar Wighus

SP Fire Research AS

#### ***Vedlegg i mail fra Ragnar Wighus:***

I Have a few questions about the use of water mist systems, and hope you can answer them. **The most important ones is 1,4 and 5, especially number 4.** Yours sincerely, Anders Brandser Ressheim

#### **Answers by Ragnar Wighus 2015.04.10**

- 1) Which of the fire-fighting mechanisms in water mist systems is most important in class A fires, and which ones are not so important? In other words, which fire-fighting mechanisms is most important in charring fires?

A: The fire-fighting mechanisms of water mist in Class A fires are dependent of the enclosure conditions. If the enclosure is large, or is well ventilated, the success factor of water mist is like the Sprinkler systems, with direct hit of water on the burning surface and pre-wetting of unburnt surfaces. If the enclosure is smaller, one will have an effect from water mist on the gas phase conditions, even on the

flame conditions. Cooling of the gases and inerting by the water vapour may influence the total fire atmosphere; reduce the re-radiation to the burning surfaces and the pre-heating of unburnt material.

As you may know, the effect of water vapour on glowing or smoldering fires may be limited for cellulosic materials, since they contain Oxygen and then do not need Oxygen from the air. Direct hit by water onto glowing material may however cool and reduce the combustion process.

No distinct limits exist between fire-fighting mechanisms, and in practice, the final result of a fire-fighting attempt will be a sum of different mechanisms.

- 2) How will unprotected surfaces of timber (mainly walls, but unprotected ceilings is also relevant) affect the fire development in a room fire, before and after flashover?

A: Unprotected timber will of course participate in the fire development, as other combustible surfaces.

- 3) How is the fire development in room fires with unprotected timber surfaces (f.e cross laminated timber) compared with a room with surfaces protected with gypsum boards?

A: There is no clear answer to this, one will need tests in realistic scales to find out.

- 4) How will use of water mist affect the fire development in a room with surfaces in unprotected timber? Is it possible to get test results that show the effect and use it in my thesis?

A: SPFR as cannot provide test results from customers. In case you are aware of tests that have been carried out, the owner of the test results must be consulted.

- 5) Is there some extra considerations you have to take when using water mist systems in tall buildings? Like for instance the buoyancy/chimney effect and more?

A: The first consideration about using water mist in tall buildings is to investigate the time of activation of the system. Traditional sprinkler technology is vulnerable for ceiling height, since the time it takes to obtain activation temperature of thermally sensitive activation measures (e.g. glass bulbs) is dependent of fire plume height. The time to activation will influence how large the fire has been at release of the system, and is important both to the damage level and to the possibility to control a fire.

Next consideration is the possibility of the water mist spray to interact with the fire plume and with the fire base. This is decided by the droplet size distribution and the velocity distribution of the water mist spray, which vary from system to system.

## **Max Lakkonen, Fogtec Fire Protection**

### ***Spørsmål (11.3.15) og svar (27.4.15)***

Hi Max Lakkonen

My name is Anders Brandser Ressheim and right now I'm writing my thesis about the use of water mist systems in tall timber buildings at the Norwegian University of Science and Technology (NTNU). One of the purposes with the thesis is to share information and increase the use of water mist among consultants.

I've been speaking to Björn Magnusson who works in Rambøll in Trondheim, and recommended me to contact you. I have a few questions about the use of water mist systems, and hope you can answer them. The most important ones are 1, 4 and 5, especially number 4.

- 1) Which of the fire fighting mechanisms in water mist systems is most important in class A fires, and which ones are not so important? In other words, which fire fighting mechanisms is most important in charring fires?

Your application is fire control system (OH1). The cooling of combustion is still having the major part of fire fighting. Also wetting surfaces and cooling on fuel level / partly isolating fuel from combustion has a role (also preventing ignition). But this as well as interting (fires do not grow very large).

- 2) How will unprotected surfaces of timber (mainly walls, but unprotected ceilings is also relevant) affect the fire development in a room fire, before and after flashover?

I believe the impact of walls / ceiling material is minor unless they will not start to burn. If you are in "flashover" then something with fire fighting system has gone wrong.

- 3) How is the fire development in room fires with unprotected timber surfaces (f.e cross laminated timber) compared with a room with surfaces protected with gypsum boards?

I don't think that there would be a major (relevant) difference if fire fighting system works. (relevant means that temperatures would be so much higher that something additional would start to burn)

- 4) How will use of water mist affect the fire development in a room with surfaces in unprotected timber? Is it possible to get test results that show the effect and use it in my thesis?

This is very theoretical question. There is not a standardised test where such thing would be measured. Fire development/damage, e.g. according OH1, is measured with plywood boards.

- 5) Are there some extra considerations you have to take when using water mist systems in tall buildings? Like for instance the buoyancy/chimney effect and more?

Not really. (high-pressure) Water mist systems are quite ideal for tall buildings as the hydrostatic pressure is not a problem. There are more problems for smoke management.

Yours sincerely, Anders Brandser Ressheim

**Roger Fiksdal, XL-bygg**

**Spørsmål 13.5.15**

Hei

Jeg heter Anders Brandser Ressheim og holder for tiden på med siste innspurt av min masteroppgave ved NTNU. Etter å ha vært i kontakt med Moelven AS ble jeg anbefalt ta videre kontakt med dere. Jeg

lurer på om dere kan gi meg et (grovt) estimat på kvadratmetersprisen for brannimpregnering av massivtre med FireGuard brannhemmende væske. Håper dere kan hjelpe meg med dette.

Mvh Anders Brandser Ressheim

### ***Svar 15.5.15***

Hei.

Ca kr 280,- pr m2 netto til deg for heltre.

Vi impregnerer ikke massivtre formater

Mvh

Roger Fiksdal

Kundeansvarlig

### ***Björn Magnusson, Rambøll AS***

#### ***Spørsmål 16.4.15***

Hei Björn

Jeg holder på med på pålitelighetsstudie av vanntåkesystemer og skal sammenligne komponentoppbyggingen i et valgt vanntåkesystem med et relevant sprinklersystem. Jeg tenkte å benytte det sprinklersystemet som er prosjektert for Moholt 50|50, og lurer på om du kan skaffe meg noe info på dette. De viktigste jeg lurer på er egentlig:

- 1) Er det benyttet pumpesystem eller er det tilstrekkelig med trykket i hovedvannledningen?
- 2) Er aktiveringen av anlegget avhengig av et kontrollpanel av noe slag, eller er det kun trykksatt vann fra hovedvannledning som aktiveres når det automatiske sprinklerhodet aktiveres? altså uten noe elektronisk innblanding.
- 3) Grovt sett hvilke komponenter det består av, men det finnes andre eksempler jeg kan bruke. Når det gjelder pålitelighet er derimot 1) og 2) veldig avgjørende, derfor er disse punktene viktigst.

Håper du kan hjelpe meg med dette.

Mvh Anders

#### ***Svar 16.4.15***

Hei



På Moholt er det bra vanntrykk. Det er ikke nødvendig med trykkøkningpumpe. Det er kun sprinklerhodet som er barrieren.

Det er avstengingventil på sprinklersonen og for hovedledningen til sprinklersentralen. Begge disse skal ha overvåking for å sikre at de alltid er låst i åpen stilling. Vanligste årsaken at sprinkler ikke fungerer er at anlegget har vært avstengt..

Håper dette hjelper deg på veien.

Komponentene tror jeg beskrives i starten av sprinklerstandarden. Kan ev. Få noe fra RIV.

/Björn

## Vedlegg 7 – Pålitelighet i komponenter

| Komponent                               | Sannsynlighet for feiling ved oppstart |             |              | Kommentar                                                                                    |
|-----------------------------------------|----------------------------------------|-------------|--------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                         | Forventet verdi                        | Øvre grense | Nedre grense |                                                                                              |
| <b>Hovedstrømforsyning</b>              | 3,00E-06                               | 1,00E-04    | 5,00E-08     |                                                                                              |
| <b>Backup-Batteri</b>                   | 2,00E-03                               | 2,60E-02    | 1,00E-03     |                                                                                              |
| <b>Aggregat</b>                         | 0,200                                  | 0,480       | 1,50E-03     | Den forventede verdien er konservativt ved godt vedlikehold                                  |
| <b>Sprinklerhode</b>                    | 7,50E-04                               | 1,00E-06    | 9,00E-03     | Feil ved behov, konservativ verdi for nye sprinklersystemer                                  |
| <b>Kontrollpanel – Hardware</b>         | 4,90E-03                               | 0,034       | 1,00E-03     |                                                                                              |
| <b>Kontrollpanel – Software</b>         | 1,00E-03                               | 3,00E-02    | 5,00E-04     | Data er basert på sannsynligheten for menneskelig feil ved bruk av industrielle datamaskiner |
| <b>Elektrisk pumpe</b>                  | 1,50E-03                               | 5,00E-02    | 2,00E-04     | Dataene dekker et pålitelighet for et vidt spekter av vedlikeholds nivå.                     |
| <b>Hovedvannforsyning – Auckland</b>    | 9,00E-05                               | 1,80E-04    | 4,50E-05     |                                                                                              |
| <b>Vanntank</b>                         | 2,60E-06                               | 6,90E-06    | 3,50E-07     | Feiling av vanntank som fører til at hele vanntilførselen stopper                            |
| <b>Hovedventil</b>                      | 6,50E-04                               | 2,00E-03    | 3,20E-05     |                                                                                              |
| <b>Seksjonsventil</b>                   | 6,50E-04                               | 2,00E-03    | 3,20E-05     |                                                                                              |
| <b>Alarmventil</b>                      | 1,60E-04                               | 5,00E-03    | 1,00E-05     |                                                                                              |
| <b>Rørfordeling – Behovsfeil</b>        | 1,80E-04                               | 1,00E-03    | 1,00E-05     | Behovsfeil basert på blokkade av rør på grunn av dårlig utført arbeid og kontroll            |
| <b>Rørfordeiling - Utilgjengelighet</b> | 1,60E-08/m                             | 3,20E-08/m  | 8,00E-07/m   |                                                                                              |

Tabell 55: Sannsynlighet for feiling av komponenter gitt ved en triangulærfordeling (Commission, 2008)

## Vedlegg 8 – Beregning av brannspredning i fellesareal



Figur 54: Beregning av areal hvor brannen kan spre seg fra fellesareal til hybelenheter og trapperom i løpet av 15 min. De blå skraverte arealene symboliserer der flammespredningen kan skje til én dør. De rosa skraverte arealene symboliserer der brannspredningen kan skje til to dører. Flammespredningen, altså radien i sirkelene er satt til 1,1 m. Plantegningen er hentet fra SiTs prosjekteringsmateriale. Det meste av detaljer i figuren kan ikke leses og den er hovedsaklig lagt som vedlegg for å gi innsikt i hvordan brannspredningsarealene ble beregnet (Magnusson, 2015, Denstad, 2015)

## Vedlegg 9 – Beregninger gjort i den kvantitative analysen

| Sannsynlighet for feil ved brann i analysebyggverket med parametre valgt i usikkerhetsanalysen |       |                   |              |               |                   |  |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------------------|--------------|---------------|-------------------|--|
| a                                                                                              | b     | c                 | d = b x c    | e = d / d_sum | f = a x e         |  |
| p_dør(er)                                                                                      | areal | p_sanns_per_areal | p_antennelse | andel         | pt_feil_ved_brann |  |
| Brannspredning                                                                                 |       |                   |              |               |                   |  |
| Hybelenhet → Fellesareal                                                                       | 166   | 2,20E-05          | 0,003654     | 0,974         | 0,487             |  |
| Fellesareal → Én Hybelenhet                                                                    | 17,5  | 2,20E-06          | 0,000039     | 0,010         | 0,005             |  |
| Fellesareal → To hybelenheter                                                                  | 11,0  | 2,20E-06          | 0,000024     | 0,006         | 0,005             |  |
| Fellesareal → Trapperom                                                                        | 2,00  | 2,20E-06          | 0,000004     | 0,001         | 0,000             |  |
| Trapperom → Fellesareal                                                                        | 14,2  | 2,20E-06          | 0,000031     | 0,008         | 0,002             |  |
| Sum                                                                                            | 303   |                   | 0,003753     | 1,000         | 0,499             |  |

Tabell 56: Beregning av sannsynlighet for feil ved brann i analysebyggverket. Resultatet i beregningen er markert med oransje skrift og grå bakgrunn

$$P_t(\text{feil ved brann}) \times P_t(\text{brann}) = P_t(\text{Feil}) < 0,0000723$$

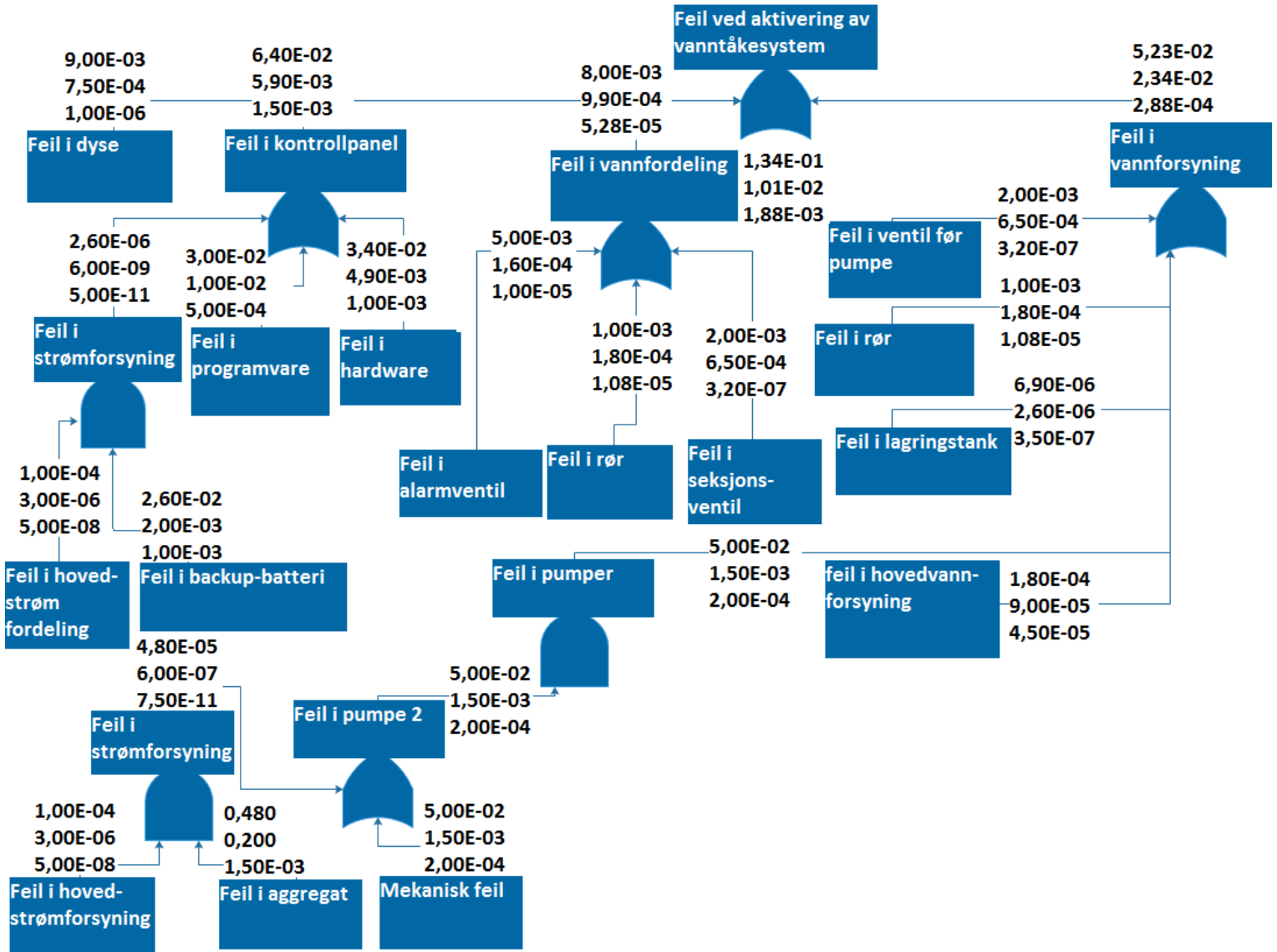
$$P_t(\text{Brann}) = p_{fi}^{\text{Antennelse}} \times p_f^{\text{Brannvesen}} \times p_f^{\text{Brukere}} \times \prod p_f^{\text{aktive brannsikrings tiltak}}$$

| <b>Beregning av sannsynligheten for strukturell kollaps ved de valgte parametrene i usikkerhetsanalysen</b> |              |              |           |                   |                   |          |  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|--------------|-----------|-------------------|-------------------|----------|--|
|                                                                                                             | p_antennelse | p_brannvesen | p_brukere | p_vanntåkesystem  | pt_feil ved brann | pt_feil  |  |
| Brannvesen innen 10 min                                                                                     | 0,04         | 0,05         | 0,4       | 0,084             | 0,499             | 3,35E-05 |  |
| Brannvesen innen 20 min                                                                                     | 0,04         | 0,1          | 0,4       | 0,084             | 0,499             | 6,71E-05 |  |
|                                                                                                             |              |              |           |                   |                   |          |  |
| <b>Beregning av sannsynlighet for strukturell kollaps ved bruk av sprinklersystem</b>                       |              |              |           |                   |                   |          |  |
|                                                                                                             | p_antennelse | p_brannvesen | p_brukere | p_sprinklersystem | pt_feil ved brann | pt_feil  |  |
| Brannvesen innen 10 min                                                                                     | 0,04         | 0,05         | 0,4       | 0,08              | 0,499             | 3,19E-05 |  |
| Brannvesen innen 20 min                                                                                     | 0,04         | 0,1          | 0,4       | 0,08              | 0,499             | 6,39E-05 |  |

Tabell 57: Beregninger av sannsynligheten for global strukturell kollaps i analysebyggverket, henholdsvis med vanntåkesystem og sprinklersystem. Beregningene med vanntåkesystemet representerer parametrene som ble valgt i usikkerhetsanalysen

## Vedlegg 10 – Feiltre brukt i sensitivitetsanalysen

### Feiltre ved bruk av én pumpe i vanntåkesystemet



Figur 55: Feiltre av vanntåkesystem med ett pumpesystem

Ved å ta i bruk den forventede verdien for pålitelighet ved oppstart i referansesprinklersystemet fra Figur 50 i usikkerhetsanalysen beregnes det relative pålitelighetsforholdet til vanntåkesystemet med ett pumpesystem i Figur 55:

$$f_{\text{p\aa}litelighet} = 0,101 \div 7,90 \times 10^{-3} = 1,27$$

Sannsynligheten for feil ved aktivering i vanntåkesystemet i Figur 55 er altså 27 % høyere enn for referansesprinklersystemet. Ved bruk av samme framgangsmåte og statistikk (John R. Hall, 2013) som i 10.9.2 - Kvantitativ analyse beregnes den totale sannsynligheten for feil i vanntåkesystemet i Figur 55:

$$p_{f,\text{vannt\aa}ke}^{\text{aktivering}} = p_{f,\text{sprinkler}}^{\text{aktivering}} \times f_{\text{p\aa}litelighet}$$

$$p_{f,\text{vannt\aa}ke}^{\text{aktivering}} = 5,0 \% \times 1,27 = 6,4 \%$$

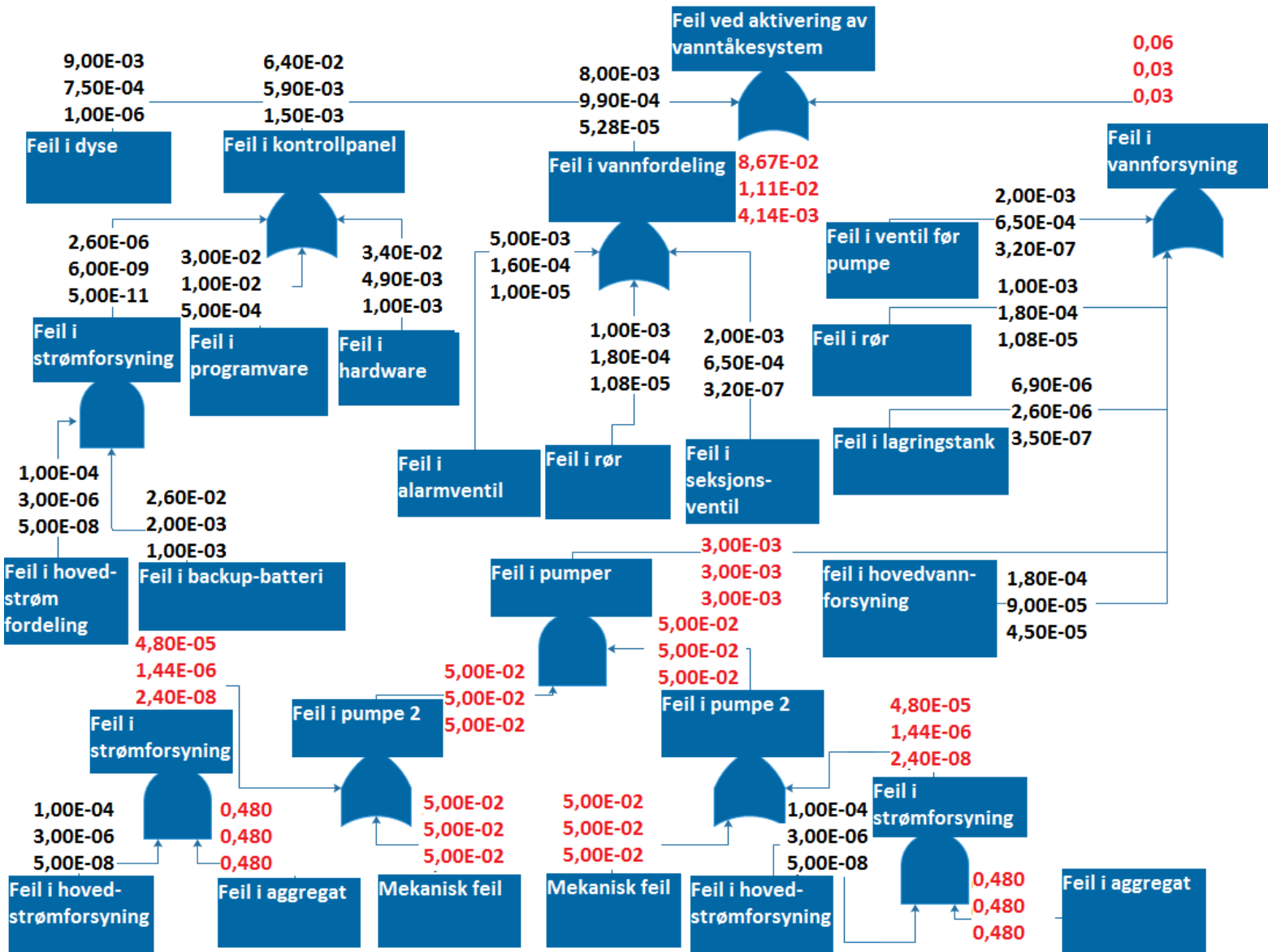
Videre antas det at påliteligheten for effektiv operasjon er den samme for sprinkler- og vanntåkesystemer, altså:

$$p_{f,\text{vannt\aa}ke}^{\text{effektivitet}} = p_{f,\text{sprinkler}}^{\text{effektivitet}}$$

Dette gir en antatt sannsynlighet for feil i vanntåkesystemet på:

$$p_{f,\text{vannt\aa}ke}^{\text{p\aa}litelighet} = p_{f,\text{vannt\aa}ke}^{\text{effektivitet}} + p_{f,\text{vannt\aa}ke}^{\text{aktivering}} = 3,0 \% + 6,4 \% = 9,4 \%$$

### Feiltre ved liten pålitelighet i dobbelt pumpesystem



Figur 56: Feiltre av vanntåkesystem med liten pålitelighet i pumpesystem. De parametrene som er endret i forhold til de opprinnelige parametrene i usikkerhetsanalysen er markert med røde tall. Det er valgt høyeste verdier for feil i komponentene, henholdsvis aggregater og mekanisk feil i pumper



Ved å ta i bruk den forventede verdien for pålitelighet for oppstart i referansesprinklersystemet fra Figur 50 i usikkerhetsanalysen beregnes det relative pålitelighetsforholdet til vanntåkesystemet med ett pumpesystem i Figur 56:

:

$$f_{\text{p\aa l i t e l i g h e t}} = 0,011 \div 7,90 \times 10^{-3} = 1,39$$

Sannsynligheten for feil ved aktivering i vanntåkesystemet i Figur 56

er altså 39 % høyere enn for referansesprinklersystemet. Ved bruk av samme framgangsmåte og statistikk (John R. Hall, 2013) som i 10.9.2 - Kvantitativ analyse beregnes den totale sannsynligheten for feil i vanntåkesystemet i Figur 56

:

$$p_{f,\text{vannt\aa k e}}^{\text{a k r i v e r i n g}} = p_{f,\text{s p r i n k l e r}}^{\text{a k r i v e r i n g}} \times f_{\text{p\aa l i t e l i g h e t}}$$

$$p_{f,\text{vannt\aa k e}}^{\text{a k r i v e r i n g}} = 5,00 \% \times 1,39 = 6,95 \%$$

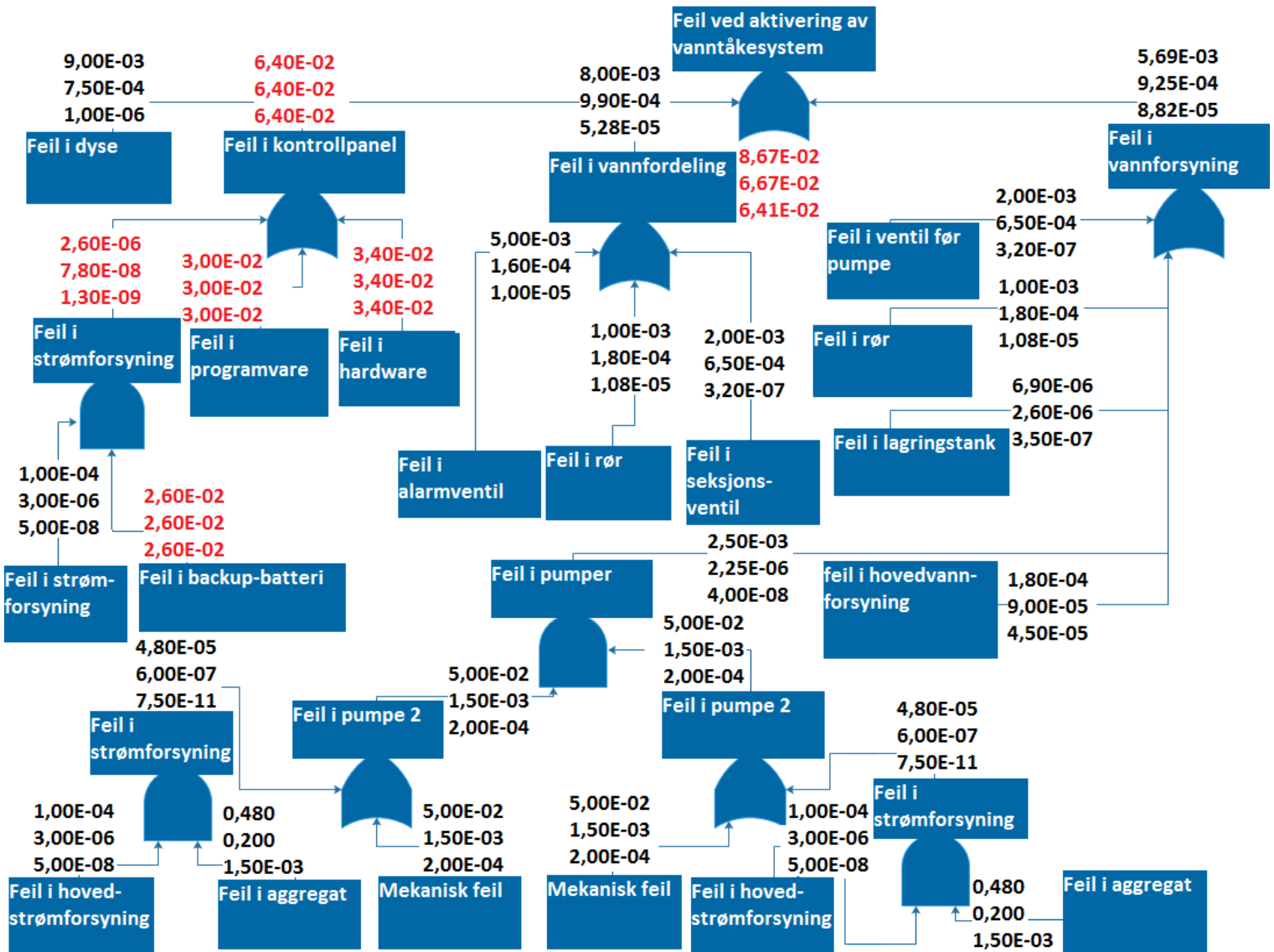
Videre antas det at påliteligheten for effektiv operasjon er den samme for sprinkler- og vanntåkesystemer, altså:

$$p_{f,\text{vannt\aa k e}}^{\text{e f f e k t i v i t e t}} = p_{f,\text{s p r i n k l e r}}^{\text{e f f e k t i v i t e t}}$$

Dette gir en antatt sannsynlighet for feil i vanntåkesystemet på:

$$p_{f,\text{vannt\aa k e}}^{\text{p\aa l i t e l i g h e t}} = p_{f,\text{vannt\aa k e}}^{\text{e f f e k t i v i t e t}} + p_{f,\text{vannt\aa k e}}^{\text{a k r i v e r i n g}} = 3,00 \% + 6,95 \% = 9,95 \%$$

## Feiltre ved lite pålitelighet i kontrollpanel



Figur 57: Feiltre av vanntåkesystem med lite pålitelig kontrollpanel. De parametrene som er endret i forhold til de opprinnelige parametrene i usikkerhetsanalysen er markert med røde tall. Det er valgt høyeste verdier for feil i komponentene, henholdsvis hardware i kontrollpanel, software i kontrollpanel og backup-batteri

Ved å ta i bruk den forventede verdien for pålitelighet for oppstart i referansesprinklersystemet fra Figur 50 i usikkerhetsanalysen beregnes det relative pålitelighetsforholdet til vanntåkesystemet med ett pumpesystem i Figur 57:

$$f_{\text{p\aa litelighet}} = 0,067 \div 7,90 \times 10^{-3} = 8,48$$

Sannsynligheten for feil ved aktivering i vanntåkesystemet i Figur 57 er altså 848 % høyere enn for referansesprinklersystemet. Ved bruk av samme framgangsmåte og statistikk (John R. Hall, 2013) som i 10.9.2 - Kvantitativ analyse beregnes den totale sannsynligheten for feil i vanntåkesystemet i Figur 57:

:

$$p_{f,\text{vannt\aa ke}}^{\text{akrivering}} = p_{f,\text{sprinkler}}^{\text{akrivering}} \times f_{\text{p\aa litelighet}}$$

$$p_{f,\text{vannt\aa ke}}^{\text{akrivering}} = 5,00 \% \times 8,48 = 42,4 \%$$

Videre antas det at påliteligheten for effektiv operasjon er den samme for sprinkler- og vanntåkesystemer, altså:

$$p_{f,\text{vannt\aa ke}}^{\text{effektivitet}} = p_{f,\text{sprinkler}}^{\text{effektivitet}}$$

Dette gir en antatt sannsynlighet for feil i vanntåkesystemet på:

$$p_{f,\text{vannt\aa ke}}^{\text{p\aa litelighet}} = p_{f,\text{vannt\aa ke}}^{\text{effektivitet}} + p_{f,\text{vannt\aa ke}}^{\text{akrivering}} = 3,00 \% + 42,4 \% = 45,4 \%$$

## Vedlegg 11 – Beregninger gjort i sensitivitetsanalysen

190

$$P_t(\text{feil ved brann}) \times P_t(\text{brann}) = P_t(\text{Feil}) < 0,0000723$$

$$P_t(\text{Brann}) = p_f^{\text{antennelse}} \times p_f^{\text{brannvesen}} \times p_f^{\text{brukere}} \times \prod p_f^{\text{objektive brannsikringstiltak}}$$

| Beregning av sannsynligheten for strukturell kollaps ved de valgte parametrene i usikkerhetsanalysen        |               |               |            |                   |         |  |  |  |             |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|---------------|------------|-------------------|---------|--|--|--|-------------|
|                                                                                                             | pf_antennelse | pf_brannvesen | pf_brukere | pt_feil_ved_brann | pt_feil |  |  |  |             |
| Brannvesen innen 10 min                                                                                     | 0,04          | 0,05          | 0,4        | 0,084             | 0,499   |  |  |  | 3,35328E-05 |
| Brannvesen innen 20 min                                                                                     | 0,04          | 0,1           | 0,4        | 0,084             | 0,499   |  |  |  | 6,70656E-05 |
| Beregning av sannsynligheten for strukturell kollaps i scenario med én elektrisk pumpe                      |               |               |            |                   |         |  |  |  |             |
|                                                                                                             | pf_antennelse | pf_brannvesen | pf_brukere | pt_feil_ved_brann | pt_feil |  |  |  |             |
| Brannvesen innen 10 min                                                                                     | 0,04          | 0,05          | 0,4        | 0,094             | 0,499   |  |  |  | 3,73E-05    |
| Brannvesen innen 20 min                                                                                     | 0,04          | 0,1           | 0,4        | 0,094             | 0,499   |  |  |  | 7,47E-05    |
| Beregning av sannsynligheten for strukturell kollaps i scenario med dårlig vedlikeholdt dobbelt pumpesystem |               |               |            |                   |         |  |  |  |             |
|                                                                                                             | pf_antennelse | pf_brannvesen | pf_brukere | pt_feil_ved_brann | pt_feil |  |  |  |             |
| Brannvesen innen 10 min                                                                                     | 0,04          | 0,05          | 0,4        | 0,100             | 0,499   |  |  |  | 3,99E-05    |
| Brannvesen innen 20 min                                                                                     | 0,04          | 0,1           | 0,4        | 0,100             | 0,499   |  |  |  | 7,98E-05    |
| Beregning av sannsynligheten for strukturell kollaps i scenario med dårlig vedlikeholdt kontrollpanel       |               |               |            |                   |         |  |  |  |             |
|                                                                                                             | pf_antennelse | pf_brannvesen | pf_brukere | pt_feil_ved_brann | pt_feil |  |  |  |             |
| Brannvesen innen 10 min                                                                                     | 0,04          | 0,05          | 0,4        | 0,452             | 0,499   |  |  |  | 1,80E-04    |
| Brannvesen innen 20 min                                                                                     | 0,04          | 0,1           | 0,4        | 0,452             | 0,499   |  |  |  | 3,60E-04    |

Tabell 58: Beregninger av sannsynligheten for global strukturell kollaps ved ulike senarioer. Parametre som er endret fra usikkerhetsanalysen og resultatene i beregningene er markert med oransje skrift og grå bakgrunn

$$P_i(\text{Feil ved brann}) \times P_i(\text{brann}) = P_i(\text{Feil}) < 0,0000723$$

$$P_i(\text{brann}) = p_{\text{antennelse}} \times p_{\text{brannvesen}} \times p_{\text{brukere}} \times \prod p_j$$

objektive brannsikringstiltak

| Beregning av sannsynligheten for strukturell kollaps i scenario med doblet brannspredningsareal i fellesrom       |                              |               |                   |                    |                   |                   |       |  |  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|---------------|-------------------|--------------------|-------------------|-------------------|-------|--|--|
|                                                                                                                   | pf_antennelse                | pf_brannvesen | pf_brukere        | pf_vannttåkesystem | pt_feil_ved_brann | pt_feil           |       |  |  |
| Brannvesen innen 10 min                                                                                           | 0,067                        | 0,05          | 0,4               | 0,094              | 0,500             | 6,26E-05          |       |  |  |
| Brannvesen innen 20 min                                                                                           | 0,067                        | 0,1           | 0,4               | 0,094              | 0,500             | 1,25E-04          |       |  |  |
| Sannsynlighet for feil ved brann i analysebygget ved brann i scenario med doblet brannspredningsareal i fellesrom |                              |               |                   |                    |                   |                   |       |  |  |
| Område                                                                                                            | a                            | b             | c                 | d = b x c          | e = d / d_sum     | d                 |       |  |  |
| Brannspredning                                                                                                    | p_dør(er)                    | areal         | p_sanns_per_areal | p_antennelse       | andel             | pt_feil_ved_brann |       |  |  |
| Hybelenhet                                                                                                        | Hybelenhet → Fellesareal     | 0,5           | 166               | 2,20E-05           | 3,65E-03          | 0,957             | 0,478 |  |  |
|                                                                                                                   | Fellessareal → En Hybelenhet | 0,5           | 35                | 2,20E-06           | 7,70E-05          | 0,020             | 0,010 |  |  |
| Fellessareal                                                                                                      | Fellessareal → To hybelenhet | 0,75          | 22                | 2,20E-06           | 4,84E-05          | 0,013             | 0,010 |  |  |
|                                                                                                                   | Fellessareal → Trapperom     | 0,2           | 4                 | 2,20E-06           | 8,80E-06          | 0,002             | 0,000 |  |  |
| Trapperom                                                                                                         | Trapperom → Fellesareal      | 0,2           | 14                | 2,20E-06           | 3,12E-05          | 0,008             | 0,002 |  |  |
| Sum                                                                                                               |                              |               | 303               |                    | 3,82E-03          |                   | 0,500 |  |  |

Tabell 59: Beregninger av sannsynligheten for global strukturell kollaps ved doblet brannspredningsareal i fellesareal. Parametre som er endret fra usikkerhetsanalysen og resultatene i beregningene er markert med oransje skrift og grå bakgrunn

|                                                                                                                                                             |                             |               |                     |                   |                   |                   |  |  |  |  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|---------------|---------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--|--|--|--|
| $P_c(\text{Feil ved brann}) \times P_c(\text{brann}) = P_c(\text{Feil}) < 0,0000723$                                                                        |                             |               |                     |                   |                   |                   |  |  |  |  |
| $P_c(\text{Brann}) = p_f^{\text{intensiv}} \times p_f^{\text{brannvann}} \times p_f^{\text{brukere}} \times \prod p_f^{\text{pakative brannsløkkertiltak}}$ |                             |               |                     |                   |                   |                   |  |  |  |  |
| <b>Beregning av sannsynligheten for strukturell kollaps i scenario med normal antennesesfare i hele etasjen</b>                                             |                             |               |                     |                   |                   |                   |  |  |  |  |
| Brannvesen innen 10 min                                                                                                                                     | 0,067                       | pf_brannvesen | pf_brukere          | pf_vannmåkesystem | pt_feil_ved_brann | pt_feil           |  |  |  |  |
| Brannvesen innen 20 min                                                                                                                                     | 0,067                       |               | 0,1                 | 0,084             | 0,490             | 5,52E-05          |  |  |  |  |
|                                                                                                                                                             |                             |               | 0,4                 | 0,084             | 0,490             | 1,10E-04          |  |  |  |  |
| <b>Sannsynlighet for feil ved brann i analysebygget i scenario med normal antennesesfare i hele etasjen</b>                                                 |                             |               |                     |                   |                   |                   |  |  |  |  |
| Område                                                                                                                                                      | a                           | b             | c                   | d = b x c         | e = d / d_sum     | f = a x e         |  |  |  |  |
| Hybelenhet                                                                                                                                                  | Brannspredning              | areal         | p_sannsyn_per_areal | p_antennese       | andel             | pt_feil_ved_brann |  |  |  |  |
|                                                                                                                                                             | Hybelenhet → Fellesareal    | 0,5           | 2,20E-05            | 3,65E-03          | 0,788             | 0,394             |  |  |  |  |
|                                                                                                                                                             | Fellesareal → Én Hybelenhet | 0,5           | 2,20E-05            | 3,65E-04          | 0,083             | 0,042             |  |  |  |  |
|                                                                                                                                                             | Fellesareal → To hybelenhet | 0,75          | 2,20E-05            | 2,42E-04          | 0,052             | 0,039             |  |  |  |  |
|                                                                                                                                                             | Fellesareal → Trapperom     | 0,2           | 2,20E-05            | 4,40E-05          | 0,009             | 0,002             |  |  |  |  |
|                                                                                                                                                             | Trapperom → Fellesareal     | 0,2           | 2,20E-05            | 3,12E-04          | 0,067             | 0,013             |  |  |  |  |
| Sum                                                                                                                                                         |                             |               | 303                 | 4,64E-03          | 1,000             | 0,490             |  |  |  |  |

Tabell 60: Beregninger av sannsynligheten for global strukturell kollaps ved normal antennesesfare i hele etasjen. Parametre som er endret fra usikkerhetsanalysen og resultatene i beregningene er markert med oransje skrift og grå bakgrunn

$$P_i(\text{feil ved brann}) \times P_i(\text{brann}) = P_i(\text{Feil}) < 0,0000723$$

$$P_i(\text{brann}) = p_i^{\text{antennelse}} \times p_i^{\text{brannvesen}} \times p_i^{\text{brukere}} \times \prod p_j^{\text{objektive brannsikringstiltak}}$$

| Beregning av sannsynligheten for strukturell kollaps i scenario med firedoblet brannspredningsareal i fellesrom |                                                            |                  |              |                                |                          |                |                            |  |  |  |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|------------------|--------------|--------------------------------|--------------------------|----------------|----------------------------|--|--|--|
|                                                                                                                 | pf_antennelse                                              | pf_brannvesen    | pf_brukere   | pf_vanntåkesystem              | pt_feil_ved_brann        | pt_feil        |                            |  |  |  |
| Brannvesen innen 10 min                                                                                         | 0,067                                                      | 0,05             | 0,4          | 0,094                          | 0,520                    | 6,52E-05       |                            |  |  |  |
| Brannvesen innen 20 min                                                                                         | 0,067                                                      | 0,1              | 0,4          | 0,094                          | 0,520                    | 1,30E-04       |                            |  |  |  |
| Sannsynlighet for feil ved brann i analysebygget i scenario med firedoblet brannspredningsareal i fellesrom     |                                                            |                  |              |                                |                          |                |                            |  |  |  |
| Område                                                                                                          | a                                                          | b                | c            | d = b x c                      | e = d / d_sum            | f = a x e      |                            |  |  |  |
| Hybelenhet                                                                                                      | Brannspredning<br>Hybelenhet → Fellesareal                 | p_dør(er)<br>0,5 | areal<br>166 | p_sannns_per_areal<br>2,20E-05 | p_antennelse<br>3,65E-03 | andel<br>0,957 | pt_feil_ved_brann<br>0,478 |  |  |  |
| Fellesareal                                                                                                     | Fellesareal → Én Hybelenhet<br>Fellesareal → To hybelenhet | 0,5<br>0,75      | 70<br>44     | 2,20E-06<br>2,20E-06           | 1,54E-04<br>9,68E-05     | 0,040<br>0,025 | 0,020<br>0,019             |  |  |  |
| Trapperom                                                                                                       | Fellesareal → Trapperom                                    | 0,2              | 8            | 2,20E-06                       | 1,76E-05                 | 0,005          | 0,001                      |  |  |  |
| Sum                                                                                                             | Trapperom → Fellesareal                                    | 0,2              | 14           | 2,20E-06                       | 3,12E-05                 | 0,008          | 0,002                      |  |  |  |
|                                                                                                                 |                                                            |                  | 303          |                                | 3,95E-03                 |                | 0,520                      |  |  |  |

Tabell 61: Beregninger av sannsynligheten for global strukturell kollaps ved firedoblet brannspredningsareal i fellesareal. Parametre som er endret fra usikkerhetsanalysen og resultatene i beregningene er markert med oransje skrift og grå bakgrunn

$$P_c(\text{feil ved brann}) \times P_c(\text{brann}) = P_c(\text{Feil}) < 0,0000723$$

$$P_c(\text{Brann}) = p_{fi}^{\text{antennelse}} \times p_{pf}^{\text{brannvesen}} \times p_{pf}^{\text{brukere}} \times \prod p_{pf}^{\text{aktive brannsikrings tiltak}}$$

Beregning av nødvendig tid før slokkingen starter for ulike scenarier

|                                                          | pf_i_antennelse | pf_brannvesen | pf_brukere | pf_vanntåkesystem | pt_feil_ved_brann | pt_feil  |
|----------------------------------------------------------|-----------------|---------------|------------|-------------------|-------------------|----------|
| Parametre fra usikkerhetsanalysen                        | 0,04            | 0,110         | 0,4        | 0,084             | 0,499             | 7,38E-05 |
| Scenario med én elektrisk pumpe                          | 0,04            | 0,095         | 0,4        | 0,094             | 0,499             | 7,09E-05 |
| Scenario med liten pålitelighet i dobbelt pumpesystem    | 0,04            | 0,090         | 0,4        | 0,100             | 0,499             | 7,19E-05 |
| Scenario med lite pålitelighet i kontrollpanel           | 0,04            | 0,050         | 0,4        | 0,452             | 0,499             | 1,80E-04 |
| Scenario med normal antennelsefare i hele etasjen        | 0,067           | 0,065         | 0,4        | 0,084             | 0,490             | 7,17E-05 |
| Scenario med dobbelt brannspredningsareal i fellesrom    | 0,04            | 0,105         | 0,4        | 0,084             | 0,500             | 7,06E-05 |
| Scenario med firedoblet brannspredningsareal i fellesrom | 0,04            | 0,100         | 0,4        | 0,084             | 0,520             | 6,99E-05 |

Beregning av p\_brannvesen ved interpolering

|                                                          | a                   | b                   | c         | (b-c)/(20-10) x c |
|----------------------------------------------------------|---------------------|---------------------|-----------|-------------------|
| Parametre fra usikkerhetsanalysen                        | p_brannvesen_10 min | p_brannvesen_20 min | tid (min) | p_brannvesen      |
| Scenario med én elektrisk pumpe                          | 0,05                | 0,1                 | 22        | 0,11              |
| Scenario med liten pålitelighet i dobbelt pumpesystem    | 0,05                | 0,1                 | 19        | 0,095             |
| Scenario med lite pålitelighet i kontrollpanel           | 0,05                | 0,1                 | 18        | 0,090             |
| Scenario med normal antennelsefare i hele etasjen        | 0,05                | 0,1                 | 10        | 0,050             |
| Scenario med dobbelt brannspredningsareal i fellesrom    | 0,05                | 0,1                 | 13        | 0,065             |
| Scenario med firedoblet brannspredningsareal i fellesrom | 0,05                | 0,1                 | 21        | 0,105             |
|                                                          |                     |                     | 20        | 0,100             |

Tabell 62: Beregning av nødvendig tid før brannvesenet starter slokking for de ulike scenarioene i usikkerhetsanalysen. Parametre som er endret fra usikkerhetsanalysen og resultatene i beregningene er markert med oransje skrift og grå bakgrunn



$$P_t(\text{feil ved brann}) \times P_s(\text{brann}) = P_s(\text{Feil}) < 0,0000723$$

$$P_t(\text{brann}) = p_{fi}^{\text{Antennelise}} \times p_f^{\text{Brannvesen}} \times p_f^{\text{Brukere}} \times \prod p_f^{\text{aktive brannalarmeringsutrustning}}$$

Beregning av sannsynlighet for strukturell kollaps når brannvesen starter slokking etter 15 min for ulike scenarier

|                                                          | pfi_antennelise | pf_brannvesen | pf_brukere | pf_vanntåkesystem | pt_feil_ved_brann | pt_feil  |
|----------------------------------------------------------|-----------------|---------------|------------|-------------------|-------------------|----------|
| Parametre fra usikkerhetsanalysen                        |                 |               |            |                   |                   |          |
| Scenario med én elektrisk pumpe                          | 0,04            | 0,075         | 0,4        | 0,084             | 0,499             | 5,03E-05 |
| Scenario med liten pålitelighet i dobbelt pumpesystem    | 0,04            | 0,075         | 0,4        | 0,094             | 0,499             | 5,60E-05 |
| Scenario med lite pålitelighet i kontrollpanel           | 0,04            | 0,075         | 0,4        | 0,100             | 0,499             | 5,99E-05 |
| Scenario med normal antennelisefare i hele etasjen       | 0,067           | 0,075         | 0,4        | 0,452             | 0,499             | 2,70E-04 |
| Scenario med dobbelt brannspredningsareal i fellesrom    | 0,04            | 0,075         | 0,4        | 0,084             | 0,490             | 8,27E-05 |
| Scenario med firedoblet brannspredningsareal i fellesrom | 0,04            | 0,075         | 0,4        | 0,084             | 0,500             | 5,04E-05 |
|                                                          |                 |               |            |                   | 0,520             | 5,24E-05 |

Tabell 63: Beregning av sannsynlighet for global strukturell kollaps i analysebyggeverket i de ulike scenarioene i sensitivitsanalysen når brannvesen starter slokking innen 15 min. Parametre som er endret fra usikkerhetsanalysen og resultatene i beregningene er markert med oransje skrift og grå bakgrunn

## Vedlegg 12 – Beregning av effekten av ytterligere tiltak

$$P_t(\text{feil ved brann}) \times P_t(\text{brann}) = P_t(\text{Feil}) < 0.0000723$$

$$P_t(\text{brann}) = p_f^{\text{intensiv}} \times p_f^{\text{Brannuson}} \times p_f^{\text{Brukere}} \times \prod p_f^{\text{aktive brannberedningstiltak}}$$

| Sammenheng for feil ved brann i analysebyggeverket ved bruk av selvlukkende dører i scenarier med dobbelt brannspredningsareal i fellesområdet   |           |       |                   |              |               |                   |  |  |  |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|-------|-------------------|--------------|---------------|-------------------|--|--|--|
|                                                                                                                                                  | a         | b     | c                 | d = b x c    | e = d / d_sum | f = a x e         |  |  |  |
|                                                                                                                                                  | p_dør(er) | areal | p_sanns_per_areal | p_antennelse | andel         | pt_feil_ved_brann |  |  |  |
| Brannspredning                                                                                                                                   |           |       |                   |              |               |                   |  |  |  |
| Hybelenhet → Fellesareal                                                                                                                         |           | 0,2   | 166               | 3,65E-03     | 0,957         | 0,191             |  |  |  |
| Fellesareal → En Hybelenhet                                                                                                                      |           | 0,36  | 35                | 7,70E-05     | 0,020         | 0,004             |  |  |  |
| Fellesareal → To Hybelenheter                                                                                                                    |           | 0,2   | 22                | 4,84E-05     | 0,013         | 0,005             |  |  |  |
| Fellesareal → Trapperom                                                                                                                          |           | 0,2   | 4                 | 8,80E-06     | 0,002         | 0,000             |  |  |  |
| Trapperom → Fellesareal                                                                                                                          |           | 0,2   | 14                | 3,12E-05     | 0,008         | 0,002             |  |  |  |
| Sum                                                                                                                                              |           |       | 303               | 3,82E-03     |               | 0,202             |  |  |  |
| Sammenheng for feil ved brann i analysebyggeverket ved bruk av selvlukkende dører i scenarier med firedoblet brannspredningsareal i fellesområde |           |       |                   |              |               |                   |  |  |  |
|                                                                                                                                                  | a         | b     | c                 | d = b x c    | e = d / d_sum | f = a x e         |  |  |  |
|                                                                                                                                                  | p_dør(er) | areal | p_sanns_per_areal | p_antennelse | andel         | pt_feil_ved_brann |  |  |  |
| Brannspredning                                                                                                                                   |           |       |                   |              |               |                   |  |  |  |
| Hybelenhet → Fellesareal                                                                                                                         |           | 0,2   | 166               | 3,65E-03     | 0,924         | 0,185             |  |  |  |
| Fellesareal → En Hybelenhet                                                                                                                      |           | 0,2   | 70                | 1,54E-04     | 0,039         | 0,008             |  |  |  |
| Fellesareal → To Hybelenheter                                                                                                                    |           | 0,2   | 44                | 9,68E-05     | 0,024         | 0,005             |  |  |  |
| Fellesareal → Trapperom                                                                                                                          |           | 0,2   | 8                 | 1,76E-05     | 0,004         | 0,001             |  |  |  |
| Trapperom → Fellesareal                                                                                                                          |           | 0,2   | 14                | 3,12E-05     | 0,008         | 0,002             |  |  |  |
| Sum                                                                                                                                              |           |       | 303               | 3,95E-03     |               | 0,200             |  |  |  |

Tabell 64: Beregning av sannsynlighet for feil ved brann ved bruk av selvlukkende dører i hybelenhetene med dobbelt og firedoblet brannspredningsareal i fellesareal. Parametre som er endret fra usikkerhetsanalysen og resultatene i beregningene er markert med oransje skrift og grå bakgrunn

| $P_x(\text{Feil ved brann}) \times P_x(\text{brann}) = P_x(\text{Feil}) < 0,0000723$                                                                                             |           |       |                   |               |               |                   |  |  |  |  |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|-------|-------------------|---------------|---------------|-------------------|--|--|--|--|
| $P_x(\text{brann}) = P_{f_i}^{\text{Antenneseis}} \times P_{f_i}^{\text{Brannveien}} \times P_{f_i}^{\text{Brukere}} \times \prod P_{f_i}^{\text{aktive brannslukningsstiltak}}$ |           |       |                   |               |               |                   |  |  |  |  |
| Sannsynlighet for feil ved brann i analysebygget ved bruk av selvlukkende dører i scenariefot med de opprinnelige parametrene fra usikkerhetsanalysen                            |           |       |                   |               |               |                   |  |  |  |  |
|                                                                                                                                                                                  | a         | b     | c                 | d = b x c     | e = d / d_sum | f = a x e         |  |  |  |  |
|                                                                                                                                                                                  | p_dør(er) | areal | p_sanns_per_areal | p_antenneseis | andel         | pt_feil_ved_brann |  |  |  |  |
| Brannspredning                                                                                                                                                                   |           |       |                   |               |               |                   |  |  |  |  |
| Hybelenhet → Fellesareal                                                                                                                                                         | 0,2       | 166   | 2,20E-05          | 3,56E-03      | 0,973         | 0,195             |  |  |  |  |
| Fellesareal → Én Hybelenhet                                                                                                                                                      | 0,2       | 18    | 2,20E-06          | 3,85E-05      | 0,011         | 0,002             |  |  |  |  |
| Fellesareal → To hybelenheter                                                                                                                                                    | 0,36      | 11    | 2,20E-06          | 2,42E-05      | 0,007         | 0,002             |  |  |  |  |
| Fellesareal → Trapperom                                                                                                                                                          | 0,2       | 2     | 2,20E-06          | 4,40E-06      | 0,001         | 0,000             |  |  |  |  |
| Trapperom → Fellesareal                                                                                                                                                          | 0,2       | 14    | 2,20E-06          | 3,12E-05      | 0,009         | 0,002             |  |  |  |  |
| Sum                                                                                                                                                                              |           | 303   |                   | 3,66E-03      | 1,000         | 0,201             |  |  |  |  |
| Sannsynlighet for feil ved brann i analysebygget ved bruk av selvlukkende dører i scenariefot med normal antenneseisfare i hele etasjen                                          |           |       |                   |               |               |                   |  |  |  |  |
|                                                                                                                                                                                  | a         | b     | c                 | d = b x c     | e = d / d_sum | f = a x e         |  |  |  |  |
|                                                                                                                                                                                  | p_dør(er) | areal | p_sanns_per_areal | p_antenneseis | andel         | pt_feil_ved_brann |  |  |  |  |
| Brannspredning                                                                                                                                                                   |           |       |                   |               |               |                   |  |  |  |  |
| Hybelenhet → Fellesareal                                                                                                                                                         | 0,2       | 166   | 2,20E-05          | 3,65E-03      | 0,788         | 0,158             |  |  |  |  |
| Fellesareal → Én Hybelenhet                                                                                                                                                      | 0,2       | 18    | 2,20E-05          | 3,85E-04      | 0,083         | 0,017             |  |  |  |  |
| Fellesareal → To hybelenheter                                                                                                                                                    | 0,36      | 11    | 2,20E-04          | 2,42E-04      | 0,052         | 0,019             |  |  |  |  |
| Fellesareal → Trapperom                                                                                                                                                          | 0,2       | 2     | 2,20E-05          | 4,40E-05      | 0,009         | 0,002             |  |  |  |  |
| Trapperom → Fellesareal                                                                                                                                                          | 0,2       | 14    | 2,20E-05          | 3,12E-04      | 0,067         | 0,013             |  |  |  |  |
| Sum                                                                                                                                                                              |           | 303   |                   | 4,64E-03      | 1,000         | 0,208             |  |  |  |  |

Tabell 65: Beregning av sannsynlighet for feil ved brann ved bruk av selvlukkende dører i hybelenhetene med de valgte parametrene fra usikkerhetsanalysen og ved normal antenneseisfare i hele etasjen. Parametre som er endret fra usikkerhetsanalysen og resultatene i beregningene er markert med oransje skrift og grå bakgrunn

$$P_t(\text{feil ved brann}) \times P_t(\text{brann}) = P_t(\text{Feil}) < 0,0000723$$

$$P_t(\text{Brann}) = p_t^{\text{Antennelse}} \times p_f^{\text{Brannvesen}} \times p_f^{\text{Brukere}} \times \prod p_f^{\text{aktive brannsikringstiltak}}$$

| Beregning av sannsynlighet for strukturell kollaps ved bruk av selvlukkende dører i hybelenhet når brannvesen starter slokking etter 15 min | p_brannvesen | p_brukere | p_vanntåkesystem | pt_feil_ved_brann | pt_feil  |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|-----------|------------------|-------------------|----------|
| Parametre fra usikkerhetsanalysen                                                                                                           | 0,075        | 0,075     | 0,084            | 0,201             | 2,03E-05 |
| Scenario med én elektrisk pumpe                                                                                                             | 0,075        | 0,4       | 0,094            | 0,201             | 2,26E-05 |
| Scenario med liten pålitelighet i dobbelt pumpesystem                                                                                       | 0,075        | 0,4       | 0,100            | 0,201             | 2,41E-05 |
| Scenario med lite pålitelighet i kontrollpanel                                                                                              | 0,075        | 0,4       | 0,452            | 0,201             | 1,09E-04 |
| Scenario med normal antenneselsfare i hele etasjen                                                                                          | 0,075        | 0,4       | 0,084            | 0,208             | 3,52E-05 |
| Scenario med doblett brannspredningsareal i fellesrom                                                                                       | 0,075        | 0,4       | 0,084            | 0,208             | 2,10E-05 |
| Scenario med firedoblet brannspredningsareal i fellesrom                                                                                    | 0,075        | 0,4       | 0,084            | 0,200             | 2,02E-05 |

Tabell 66: Beregning av sannsynlighet for global strukturell kollaps i analysebyggverket når brannslukking utført av brannvesenet starter innen 15 min og ved bruk av selvlukkende dører i hybelenhetene for ulike scenarier når brannvesenet starter slokking etter 15 min. Parametre som er endret dra usikkerhetsanalysen og resultatene er markert med oransje skrift og grå bakgrunn

|                                                                                                                                                                   |                     |                     |           |                   |                  |       |                   |       |         |          |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|---------------------|-----------|-------------------|------------------|-------|-------------------|-------|---------|----------|
| $P_e(\text{feil ved brann}) \times P_e(\text{brann}) = P_e(\text{Feil}) < 0,0000723$                                                                              |                     |                     |           |                   |                  |       |                   |       |         |          |
| $P_e(\text{Brann}) = p_{f_i}^{\text{Antennelse}} \times p_f^{\text{Brannvesen}} \times p_f^{\text{Brukere}} \times \prod p_f^{\text{aktive brannsikringstiltak}}$ |                     |                     |           |                   |                  |       |                   |       |         |          |
| Beregning av nødvendig tid før slokking starter                                                                                                                   |                     |                     |           |                   |                  |       |                   |       |         |          |
| Parametre fra usikkerhetsanalysen                                                                                                                                 | p_brannvesen        | 0,1                 | p_brukere | 0,4               | p_vanntåkesystem | 0,084 | pt_feil ved brann | 0,201 | pt_feil | 2,70E-05 |
| Scenario med én elektrisk pumpe                                                                                                                                   |                     | 0,1                 |           | 0,4               | 0,094            |       |                   | 0,201 |         | 3,01E-05 |
| Scenario med liten pålitelighet i dobbelt pumpesystem                                                                                                             |                     | 0,1                 |           | 0,4               | 0,100            |       |                   | 0,201 |         | 3,22E-05 |
| Scenario med lite pålitelighet i kontrollpanel                                                                                                                    |                     | 0,05                |           | 0,4               | 0,452            |       |                   | 0,201 |         | 7,26E-05 |
| Scenario med normal antennelsesfare i hele etasjen                                                                                                                |                     | 0,1                 |           | 0,4               | 0,084            |       |                   | 0,208 |         | 4,69E-05 |
| Scenario med dobbelt brannspredningsareal i fellesrom                                                                                                             |                     | 0,1                 |           | 0,4               | 0,084            |       |                   | 0,208 |         | 2,80E-05 |
| Scenario med firedoblet brannspredningsareal i fellesrom                                                                                                          |                     | 0,1                 |           | 0,4               | 0,084            |       |                   | 0,200 |         | 2,69E-05 |
| Beregning av p_brannvesen ved interpolering                                                                                                                       |                     |                     |           |                   |                  |       |                   |       |         |          |
|                                                                                                                                                                   | a                   | b                   | c         | (b-c)/(20-10) x c |                  |       |                   |       |         |          |
| Parametre fra usikkerhetsanalysen                                                                                                                                 | p_brannvesen_10 min | p_brannvesen_20 min | tid (min) | p_brannvesen      |                  |       |                   |       |         |          |
| Scenario med én elektrisk pumpe                                                                                                                                   | 0,05                | 0,1                 | 20        | 0,100             |                  |       |                   |       |         |          |
| Scenario med liten pålitelighet i dobbelt pumpesystem                                                                                                             | 0,05                | 0,1                 | 20        | 0,100             |                  |       |                   |       |         |          |
| Scenario med lite pålitelighet i kontrollpanel                                                                                                                    | 0,05                | 0,1                 | 10        | 0,050             |                  |       |                   |       |         |          |
| Scenario med normal antennelsesfare i hele etasjen                                                                                                                | 0,05                | 0,1                 | 20        | 0,100             |                  |       |                   |       |         |          |
| Scenario med dobbelt brannspredningsareal i fellesrom                                                                                                             | 0,05                | 0,1                 | 20        | 0,100             |                  |       |                   |       |         |          |
| Scenario med firedoblet brannspredningsareal i fellesrom                                                                                                          | 0,05                | 0,1                 | 20        | 0,100             |                  |       |                   |       |         |          |

Tabell 67: Beregning av nødvendig tid før slokkingen starter ved bruk av selvlukkende dører i hybelene for ulike scenarier når brannvesenet starter slokking etter 15 min. Parametre som er endret fra usikkerhetsanalysen og resultatene i beregningene er markert med oransje skrift og grå bakgrunn. Parametre som er endret fra usikkerhetsanalysen og resultatene i beregningene er markert med oransje skrift og grå bakgrunn

## Kilder

- AKKREDITERING, N. 2015. *Hvem er akkreditert* [Online]. Available: <http://www.akkreditert.no/no/akkrediterte-organisasjoner/> [Accessed 5.4.15].
- ALFREDSEN, G., ASBJØRNSSEN, B. R., FLÆTE, P. O. & LARNØY, E. 2008. *Oppdragsrapport fra Skog og landskap 03/2008 - Miljøeffekter ved bruk av tre, Sammenstilling av kunnskap om tre og treprodukter* [Online]. Available: [http://www.skogoglandskap.no/filearchive/net\\_or\\_3\\_08\\_miljoeffekter\\_ved\\_bruk\\_av\\_tre.pdf](http://www.skogoglandskap.no/filearchive/net_or_3_08_miljoeffekter_ved_bruk_av_tre.pdf) [Accessed 20.5.15].
- APPROVALS, F. 2012. *FM 5560 - Approval Standard for Water Mist Systems* [Online]. Available: <https://www.fmglobal.com/assets/pdf/fmapprovals/5560.pdf> [Accessed 3.3.15].
- ARVIDSON, M. 2015. *Practical experience from actual water mist installations* [Online]. Available: [http://iwma.net/fileadmin/user\\_upload/Seminar\\_Lund\\_2014/SP\\_Sweden\\_Magnus\\_Arvidson\\_I\\_WMASemLund\\_2015\\_practexp.pdf](http://iwma.net/fileadmin/user_upload/Seminar_Lund_2014/SP_Sweden_Magnus_Arvidson_I_WMASemLund_2015_practexp.pdf) [Accessed 16.4.15].
- AS, A. B. 2015a. *Produkter* [Online]. Available: [http://www.brannvernbutikken.no/product\\_info.php?products\\_id=661&osCsid=e86cb7e86a24f43abd9a6520bbe62093](http://www.brannvernbutikken.no/product_info.php?products_id=661&osCsid=e86cb7e86a24f43abd9a6520bbe62093) [Accessed 20.5.].
- AS, M. W. 2014. *Branntrygt tre - Brannmalt, Brannimpregnert* [Online]. Available: <http://www.moelven.com/Documents/Wood%20AS/Brosjyrer/Wood%20prosjekt/Branntrygt%20Tre%202014.pdf> [Accessed 6.5.].
- AS, M. W. P. 2015b. *Brannhemmende malingsystem* [Online]. Available: [http://www.moelven.com/Documents/Wood%20AS/Brosjyrer/Wood%20prosjekt/MWP%20Brann\\_brosjyre.pdf](http://www.moelven.com/Documents/Wood%20AS/Brosjyrer/Wood%20prosjekt/MWP%20Brann_brosjyre.pdf) [Accessed 6.5.].
- ASEEVA, R., SERKOV, B. & SIVENKOV, A. 2013. *Fire Behavior and Fire Protection in Timber Buildings*.
- ASSOCIATION, I. W. M. 2015a. *FAQ* [Online]. Available: <http://iwma.net/about-us/faqs/> [Accessed 23.02.15 2015].
- ASSOCIATION, I. W. M. 2015b. *Position paper* [Online]. Available: [http://iwma.net/fileadmin/user\\_upload/general/position\\_paper\\_design\\_and\\_installation.pdf](http://iwma.net/fileadmin/user_upload/general/position_paper_design_and_installation.pdf) [Accessed 16.2.15.].
- ASSOCIATION, I. W. M. 2015c. *What do we do?* [Online]. Available: <http://iwma.net/about-us/what-we-do/> [Accessed 8.4.15.].
- ASSOCIATION, N. F. P. 2013a. *NFPA 10 - Standard for Portable Fire Extinguishers*.
- ASSOCIATION, N. F. P. 2013b. *NFPA 13 - Standard for Installation of Sprinkler Systems*.
- ASSOCIATION, N. F. P. 2015d. *Introduction to NFPA 13 and Occupancy Hazard Classifications* [Online]. Available: [http://www.nfpa.org/assets/gallery/13\\_demo/index.html](http://www.nfpa.org/assets/gallery/13_demo/index.html) [Accessed 27.3.15.].
- ASSOCIATION, N. F. P. 2015e. *NFPA 750 - Standard on Water Mist Fire Protection Systems*.
- BEREDSKAP, D. F. S. O. 2015. *Tabell: Boligbranner etter brannårsak. Kommune 2009-2013* [Online]. Available: [http://stat.dsb.no/Dialog/varval.asp?ma=010412&ti=Antall+boligbranner%2C+etter+brann%E5r+sak%2E+Kommune%2E+2009%2D2013&path=../Database/DSB/1\\_Brann/4\\_Arsaker/2\\_Fom2009/&lang=5](http://stat.dsb.no/Dialog/varval.asp?ma=010412&ti=Antall+boligbranner%2C+etter+brann%E5r+sak%2E+Kommune%2E+2009%2D2013&path=../Database/DSB/1_Brann/4_Arsaker/2_Fom2009/&lang=5) [Accessed 7.4.15 2015].
- BRANNSERVICE, B. 2015. *Produkter* [Online]. Available: [http://www.buskerud-brannservice.no/nettbutikk/dorma\\_ts\\_83\\_doerlukker\\_komplett\\_med\\_arm\\_og\\_monteringsplate\\_415/vis\\_prod/660](http://www.buskerud-brannservice.no/nettbutikk/dorma_ts_83_doerlukker_komplett_med_arm_og_monteringsplate_415/vis_prod/660) [Accessed 20.5.15.].
- BRINSON, A. 2014. *How does Water Mist fit into the Water-Based Fire-Fighting World?* [Online]. Available: [http://iwma.net/fileadmin/user\\_upload/IWMC\\_2014/EFSN\\_Alan\\_Brinson\\_IWMC\\_2014.pdf](http://iwma.net/fileadmin/user_upload/IWMC_2014/EFSN_Alan_Brinson_IWMC_2014.pdf) [Accessed 3.2.15.].

- BSI 2010. DD 8458-1:2010 - Draft for development: Fixed fire protection systems - Residential and domestic watermist systems - Part 1: Code for practice for design and installation.
- BSI 2011. DD 8489-7:2011 - Fixed fire protection systems. Industrial and commercial watermist systems. Tests and requirements for watermist systems for the protection of low hazard occupancies.
- BUCHANAN, A. H. 2002. *Structural design for fire safety*.
- BYGG-NETT.NO. 2015. *Branngips* [Online]. Available: <http://www.bygg-nett.no/shop/product/branngips-15-mm-120x240-cm?tm=nettbutikk/div-byggevarer/gipsplater-sponplater-mm> [Accessed 21.5.15].
- BYGGFORSK, S. 2001. 520.205 - *Massive trelementer. Typer og bruksområder* [Online]. Available: <http://bks.byggforsk.no/DocumentView.aspx?sectionId=2&documentId=3009> [Accessed 24.02.15 2015].
- BYGGFORSK, S. 2005. 571. 047 - *Gipsplater. Typer og egenskaper* [Online]. Available: <http://bks.byggforsk.no/DocumentView.aspx?documentId=570&sectionId=2> [Accessed 25.3.15].
- BYGGKVALITET, D. F. 2015. *Forskrift om tekniske krav til byggverk, TEK10 og VTEK* [Online]. Available: <http://dibk.no/no/BYGGEREGLER/Gjeldende-byggeregler/Veiledning-om-tekniske-krav-til-byggverk/#> 2.2.15].
- CENTRE, F. C. R. 1998. Fire performance of wall and ceiling lining materials, CRC Project 2 – Stage A, Fire Performance of Materials, Project Report FCRC – PR 98-02, Fire Code Reform Research Program, FCRC, Sydney.
- COMMISSION, N. Z. F. S. 2008. *Effectiveness of Fire Safety Systems for Use in Quantitative Risk Assessments* [Online]. Available: <http://www.fire.org.nz/Research/Published-Reports/Documents/a68c6def96931c2d5c5f392dd1e5bd17.pdf> [Accessed 10.4.15].
- COMPLIANCE, O. O. 2008. *Fire Doors - Keeping You Out of Harm's Way* [Online]. Available: [http://www.compliance.gov/forms-pubs/eresources/fastfacts\\_firedoors\\_080108.pdf](http://www.compliance.gov/forms-pubs/eresources/fastfacts_firedoors_080108.pdf) 6.5.15].
- DENSTAD, D. 2015. F-RAP-02, Moholt 50|50, Studenttårn A,B,C,D,E, Brannteknisk Risikovurdering.
- DRYSDALE, D. 2011. *An introduction to fire dynamics, third edition*.
- ELMS, D. G., BUCHANAN, A. H. & DUSING, J. W. 1984. *Modeling Fire Spread in Buildings* [Online]. Available: [http://download-v2.springer.com/static/pdf/86/art%253A10.1007%252FBF02390044.pdf?token2=exp=1432123182~acl=%2Fstatic%2Fpdf%2F86%2Fart%25253A10.1007%25252FBF02390044.pdf\\*~hmac=34a170426dc8568bddce98bbb8d7fdd92676877c3b576a7b98db8ee88f8c6524](http://download.v2.springer.com/static/pdf/86/art%253A10.1007%252FBF02390044.pdf?token2=exp=1432123182~acl=%2Fstatic%2Fpdf%2F86%2Fart%25253A10.1007%25252FBF02390044.pdf*~hmac=34a170426dc8568bddce98bbb8d7fdd92676877c3b576a7b98db8ee88f8c6524) 17.3.15].
- EVANS, F. G. 2003. Nr. 31, *FOKUS på tre - Brannbeskyttet trevirke* [Online]. Available: <http://www.trefokus.no/fullstory.aspx?m=1174&amid=15462> [Accessed 24.5.15].
- FALK, A. 2013. *Cross-laminated timber: driving forces and innovation* [Online]. Available: [http://www.researchgate.net/profile/Andreas\\_Falk3/publication/265054157\\_Cross-laminated\\_timber\\_driving\\_forces\\_and\\_innovation/links/53fd95e10cf2dca80003551b.pdf](http://www.researchgate.net/profile/Andreas_Falk3/publication/265054157_Cross-laminated_timber_driving_forces_and_innovation/links/53fd95e10cf2dca80003551b.pdf) [Accessed 12.5.15].
- FEDØY, A. 2015. Se Vedlegg 6 - Mail - Arnstein Fedøy, Sprinkler- & Vanntåkesystemer AS In: RESSHEIM, A. B. (ed.).
- FIKSDAL, R. 2015. Se Vedlegg 6 - Mail, Roger Fiksdal, XL-bygg. In: RESSHEIM, A. B. (ed.).
- FORSKNINGSINSTITUT, S. S. T. 2012. *Brandsäkra trähus 3: nordisk-baltisk kunskapsöversikt och vägledning*, Borås, Institutet.
- FRIQUIN, K. L. 2010. Material properties and external factors influencing the charring rate of solid wood and glue-laminated timber. 2010:128, X, 149 s. : ill.
- GLASØ, G. & LANDRØ, H. 2011. *Fokus på Tre Nr. 37 - Tre og Brann* [Online]. Available: <http://www.trefokus.no/fullstory.aspx?m=1174&amid=15454>.
- GLOBAL, F. 2012. FM Global Property Loss Prevention Data Sheets - Fire Protection Water Demand 3-26.



- GODKJENNELSESNEVND, F. 2009. *FG-veiledning for vanntåkesystemer* [Online]. Available: <http://sprinkler.fnh.no/pagefiles/13847/relaterte%20dokumenter/fg-veiledning%20for%20vannt%C3%A5kesystemer%20utgave%202.pdf> [Accessed 3.3.15].
- GRANT, G., BRENTON, J. & DRYSDALE, D. 2000. Fire suppression by water sprays.
- GRANT, G. B. & DRYSDALE, D. D. 1997. *The Suppression and Extinction of Class A Fires Using Water Sprays* [Online]. Available: <https://www.era.lib.ed.ac.uk/handle/1842/4789> [Accessed 27.3.15].
- HALL, J. R. 2013. U.S. Experience With Sprinklers.
- HALVORSEN, H. S. 2014. *Verifikasjon og dokumentasjon av branntekniske krav i teknisk forskrift ved bruk av trekonstruksjoner i fleretasjes bygninger* [Online]. Available: <http://daim.idi.ntnu.no/masteroppgaver/010/10827/tittelside.pdf> 14.1.15].
- HI-FOG. 2015. *HI-FOG System components* [Online]. Available: <http://www.marioff.com/fire-protection/hi-fogr-system-components> [Accessed 1.4.15].
- HOVEDORGANISASJON, F. 2015. *FG-godkjente foretak* [Online]. Available: <http://ess.fnh.no/Foretak/> [Accessed 4.3.15].
- HOX, K. 2015. Branntest av massivtre *In*: AS, S. F. R. (ed.).
- INSTITUTION, B. S. 2003. PD 7974-7:2003 - Application of fire safety engineering principles to the design of buildings. Probabilistic risk assessment.
- JACKMAN, L. 2013. *Watermist protection of domestic and residential occupancies – approvals approach* [Online]. Available: [http://iwma.net/fileadmin/user\\_upload/IWMC\\_2013/BRE\\_Jackman\\_IWMC\\_2013.pdf](http://iwma.net/fileadmin/user_upload/IWMC_2013/BRE_Jackman_IWMC_2013.pdf) [Accessed 24.4.15].
- JOHN R. HALL, J. 2010. *U.S. Experience With Sprinklers And Other Automatic Fire Extinguishing Equipment* [Online]. Available: [http://www.tvspfpe.org/images/us\\_experience\\_with\\_sprinklers.pdf](http://www.tvspfpe.org/images/us_experience_with_sprinklers.pdf) [Accessed 23.4.15].
- JOHN R. HALL, J. 2013. *U.S. Experience With Sprinklers* [Online]. Available: <http://www.nfpa.org/research/reports-and-statistics/fire-safety-equipment/us-experience-with-sprinklers> [Accessed 23.4.15].
- LAKKONEN, M. 2015. Se Vedlegg 6 - Mail - Max Lakkonen, Fogtec Fire Protection. *In*: RESSHEIM, A. B. (ed.).
- LATTIMER, B. Y. & BEYLER, C. L. 2003. *Predicting Fire Growth Involving Interior Finish Materials Including the Effects of Lateral Flame Spread and Layer Heating* [Online]. Available: <http://fire.nist.gov/bfrlpubs/fire03/PDF/f03141.pdf> [Accessed 24.5.15].
- LEKSIKON, S. N. 2015. *Søk i Store Norske Leksikon* [Online]. Available: <https://snl.no> [Accessed 23.5.15].
- LIU, Z. & KIM, A. 1999. *A Review of Water Mist Fire Suppression Systems - Fundamental Studies* [Online]. Available: <http://fire.nist.gov/bfrlpubs/fire00/PDF/f00180.pdf> [Accessed 28.4.15].
- LIU, Z. & KIM, A. K. 2011. *A Review of Water Mist Fire Suppression Technology: Part II—Application Studies* [Online]. Available: <http://jfe.sagepub.com/content/11/1/16.full.pdf> [Accessed 20.1.15].
- LIU, Z., KIM, A. K. & SU, J. Z. 2001. *Examination of Performance of Water Mist Fire Suppression Systems under Ventilation Conditions* [Online]. Available: <http://jfe.sagepub.com/content/11/3/164.full.pdf> [Accessed 20.3.15].
- LTD, B. A. F. S. A. 2012. *Water Mist Systems - Compliance with Current Fire Safety Guidance* [Online]. Available: [https://www.google.no/search?hl=en&q=Water+Mist+Systems++Compliance+with+Current+Fire+Safety+Guidance&meta=&gws\\_rd=ssl](https://www.google.no/search?hl=en&q=Water+Mist+Systems++Compliance+with+Current+Fire+Safety+Guidance&meta=&gws_rd=ssl) [Accessed 2.2.15].
- MAGNUSSON, B. 2015. F-RAP-01, Moholt 50|50 , Studenttårn A,B,C,D,E , Brannkonsept.
- MAPS, G. 2015. *Veibeskrivelse fra Sluppenvegen 18 (Trondheims Hovedbrannstasjon) til Moholt Studentby* [Online]. Available: <https://www.google.no/maps/dir/Sluppenvegen+18,+7037+Trondheim/Moholt+alle,+7050+Trondheim/@63.4066138,10.3983795,14z/data=!3m1!4b1!4m18!4m17!1m5!1m1!1s0x466d31e12>



- [7b20931:0x562815b4bcd0c47!2m2!1d10.3904315!2d63.3971384!1m5!1m1!1s0x466d31c9848b0ca1:0xdb05e9fba04aa164!2m2!1d10.4333459!2d63.4102302!2m3!6e0!7e2!8j1429961400!3e0](http://www.iafss.org/publications/fss/4/47/view) [Accessed 22.4.15s.
- MAWHINNE, J. R., DLUGOGORSK, B. Z. & KIM, A. K. 1994. *A Closer Look at the Fire Extinguishing Properties of Water Mist* [Online]. Available: <http://www.iafss.org/publications/fss/4/47/view> [Accessed 10.2.15.
- MCGREGOR, C. J. 2013. *Contribution of cross laminated timber panels to room fires* [Online]. Available: <http://newbuildscanada.ca/wp-content/uploads/2013/06/T3-3b-C7-McGregor-C-Thesis-Contribution-of-CLT-panels-to-room-fires.pdf> [Accessed 23.3.15.
- MENGSHOEL, E. 2015. MaiSe Vedlegg 6 - Mail - Erling Mengshoel, Prevent Systems AS. In: RESSHEIM, A. B. (ed.).
- MOINUDDIN, K., THOMAS, I. & CHEA, S. 2008. *Estimating the Reliability of Sprinkler Systems in Australian High-rise Office Buildings* [Online]. Available: <http://www.iafss.org/publications/fss/9/515/view> [Accessed 15.4.15.
- NDLA. 2015. *Hvorfor det oppstår brann – brannteori* [Online]. Available: <http://ndla.no/nb/node/119422> [Accessed 13.4.15.
- NORGE, S. 2010. NS-INSTA 900-2:2010 - Boligsprinkler - Del 2: Krav og prøvingsmetoder for sprinklere med tilhørende rosetter.
- NORGE, S. 2012. NS 3901:2012 - Krav til risikovurdering av brann i byggverk
- NORGE, S. 2013. NS-INSTA 900-1:2013 - Boligsprinkler - Del 1: Dimensjonering, installering og vedlikehold.
- NORGE, S. 2014. NS-INSTA 900-3:2014 - Boligsprinkler - Del 3: Krav og brannprøvingsmetoder for vanntåkedyser.
- NORSK TRETEKNISK INSTITUTT, T. O. T. 2012. *Nr. 37 Fokus på tre - Tre og brann* [Online]. Available: <http://www.trefokus.no/fullstory.aspx?m=1174&amid=15454> 24.5.15].
- NYSTEDT, F. 2011. *Verifying Fire Safety Design in Sprinklered Buildings* [Online]. Available: <http://lup.lub.lu.se/luur/download?func=downloadFile&recordId=1832666&fileId=1832676> [Accessed 11.03.15 2015].
- NYSTEDT, F. 2012. Case Studies on the Verification of Fire Safety Design in Sprinklered Buildings.
- ORGANIZATION, I. M. 1995. *IMO Resolution A.800(19) - Revised guidelines for approval of sprinkler systems equivalent to that referred to in Solas Regulation II-2/12* [Online]. Available: [http://www.imo.org/blast/blastDataHelper.asp?data\\_id=22567&filename=A800.pdf](http://www.imo.org/blast/blastDataHelper.asp?data_id=22567&filename=A800.pdf) [Accessed 03.03.15 2015].
- PESAOLA, M. 2014. *Protection of Critical and Innovative Buildings with Water Mist High Pressure Systems* [Online]. Available: [http://iwma.net/fileadmin/user\\_upload/IWMC\\_2014/Eusebi\\_Pesola\\_Marco\\_IWMC\\_2014.pdf](http://iwma.net/fileadmin/user_upload/IWMC_2014/Eusebi_Pesola_Marco_IWMC_2014.pdf) [Accessed 27.3.15.
- PRODUCTS, T. F. S. B. 2014. *Type AM31 AQUAMIST Nozzle Non-Automatic (Open)* [Online]. Available: [https://www.tyco-fire.com/TD\\_TFP/TFP/TFP2202\\_05\\_2014.pdf](https://www.tyco-fire.com/TD_TFP/TFP/TFP2202_05_2014.pdf) [Accessed 3.5.15.
- PROJECT, L. D. V. P. 2005. *Implementation of Eurocodes, Handbook 5, Design of Buildings for the Fire Situation.*
- PROJECT, U. R. 2007. *Engineering Guidance for Water Based Fire Fighting Systems for the Protection of Tunnels and Subsurface Facilities* [Online]. Available: [http://iwma.net/fileadmin/user\\_upload/general/uptun\\_guidance.pdf](http://iwma.net/fileadmin/user_upload/general/uptun_guidance.pdf) [Accessed 13.4.15.
- PROTECTION, F. F. 2011. *Technical Information, High Pressure Water Mist, Fine Water Spray Fire-Fighting Systems* [Online]. Available: [http://www.fogtec-international.com/PDF/Planungsleitfaden\\_en.pdf](http://www.fogtec-international.com/PDF/Planungsleitfaden_en.pdf) [Accessed 8.4.15.

- RAUSAND, M. & UTNE, I. B. 2009. *Risikoanalyse - teori og metoder*.
- ROTHER, R. 2014. *The International Water Mist Association Research Project* [Online]. [Accessed 04.03.15].
- SCHADENVERHÜTUNG, V. 2010. Versuchsaufbau und Anforderungen - OH1 (Büro).
- SCHADENVERHÜTUNG, V. 2011a. Test Assembly and Requirements – OH3 (ST1 and ST5/6).
- SCHADENVERHÜTUNG, V. 2011b. Versuchsaufbau und Anforderungen - OH1 (Hotel).
- SCHADENVERHÜTUNG, V. 2011c. Versuchsaufbau und Anforderungen - OH1 (Zwischenböden und -decken).
- SHI, W. X., LO, S. M., LI, L. J. & YUAN, X. Y. 2012. *Experimental study on influence of stack effect on fire in the compartment adjacent to stairwell of high rise building* [Online]. Available: <http://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.3846/13923730.2013.802729> [Accessed 9.3.15].
- SLOKKEANLEGG, O. F. A. 2015. *Bruksområder* [Online]. Available: <http://www.slokkeanlegg.no/Slokkeanlegg/Vanntake/Bruksomrader> [Accessed 4.3.15].
- SOLLI, K. H. & GLASØ, G. 2011. *Fokus på tre nr. 37 - Trebaserte konstruksjonselementer* [Online]. Available: <http://www.trefokus.no/fullstory.aspx?m=1174&amid=15468> [Accessed 24.02].
- SPYROU, K. 2011. *Probabilistic Framework for Onboard Fire Safety - Reliability and Effectiveness Models of Passive and Active Fire Safety Systems (D1.3)* [Online]. Available: [http://www.transport-research.info/Upload/Documents/201204/20120404\\_125704\\_5905\\_FIREPROOF\\_D-1-3\\_Reliability%20and%20Effectiveness%20of%20Fire%20Safety%20Systems.pdf](http://www.transport-research.info/Upload/Documents/201204/20120404_125704_5905_FIREPROOF_D-1-3_Reliability%20and%20Effectiveness%20of%20Fire%20Safety%20Systems.pdf) [Accessed 21.4.15].
- STANDARD, N. 2010. NS-INSTA 900-2:2010 - Boligsprinkler - Del 2: Krav og prøvingsmetoder for sprinklere med tilhørende rosetter.
- STANDARDIZATION, I. O. F. 2006. ISO/TS 16733.
- STANDARDORGANISASJONEN, D. E. 2008. NS-EN 1991-1-2:2002+NA:2008 - Eurokode 1: Laster på konstruksjoner - Del 1-2: Allmenne laster - Laster på konstruksjoner ved brann.
- STANDARDORGANISASJONEN, D. E. 2009a. NS-EN 12845:2004+A2:2009 - Faste brannsløkkesystemer Automatiske sprinklersystemer Dimensjonering, installering og vedlikehold.
- STANDARDORGANISASJONEN, D. E. 2009b. NS-EN 13501-1:2007+A1:2009 - Brannklassifisering av byggevarer og bygningsdeler - Del 1: Klassifisering ved bruk av resultater fra prøving av materialers egenskaper ved brannpåvirkning.
- STANDARDORGANISASJONEN, D. E. 2010a. NS-EN 1995-1-2:2004+NA:2010 - Eurokode 5: Prosjektering av trekonstruksjoner - Del 1-2: Brannteknisk dimensjonering.
- STANDARDORGANISASJONEN, D. E. 2010b. NS-EN ISO 12952-2:2010 - Tekstiler - Vurdering av antenneligheten til sengetøy - Del 2: Antenningskilde: fyrstikk eller tilsvarende.
- STANDARDORGANISASJONEN, D. E. 2011. CEN/TS 14972:2011 - Faste Brannsløkkesystemer Vanntåkesystemer Dimensjonering og Installering.
- STANDARDORGANISASJONEN, D. E. 2013. NS-EN 45545-2:2013 - Jernbane - Brannsikring av jernbanevogner - Del 2: Krav til materialers og komponenters virkemåte ved brann.
- STANDARDORGANISASJONEN, D. E. 2014a. NS-EN 2:1992+A1 - Klassifisering av branner (innbefattet endringsblad A1:2004).
- STANDARDORGANISASJONEN, D. E. 2014b. NS-EN 13823:2010+A1:2014 - Prøving av byggevarers egenskaper ved brannpåvirkning - Byggeprodukter (unntatt gulvbelegg) som utsettes for termisk påkjenning fra en brennende gjenstand.
- SUNDSTRÖM, B. 2007. *The Development of a European Fire Classification System for Building Products Test Methods and Mathematical Modelling* [Online]. Available: <http://lup.lub.lu.se/luur/download?func=downloadFile&recordId=548962&fileId=598792> [Accessed 17.4.15].
- SWEDEN, S. T. R. I. O. 2010. *Fire safety in timber buildings - Technical guideline for Europe*.

- SYSTEMS, P. 2015. *About Water Mist* [Online]. Available: <http://www.prevent-systems.no/en/om-vanntake/om-vanntake> [Accessed 12.5.15].
- TREINDUSTRIEN, T., SKOGEIERFORBUNDET, TREFOKUS. 2013. *Treindustriens Lille Grønne* [Online]. Available: <http://www.treteknisk.no/fullstory.aspx?m=1170&amid=11574> [Accessed 13.5.15].
- TRETEKNISK 2006. *Bygge med massivtreelementer*.
- TRÄ, N. B. 2015. *About Fire Retardant Wood - Questions & Answers* [Online]. Available: <http://www.nordbt.se/en/about-fire-retardant-wood/questions-answers> [Accessed 6.5.15].
- WENG, W. G. & FAN, W. C. 2003. *Critical condition of backdraft in compartment fires: a reduced-scale experimental study* [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950423002000888> [Accessed 8.3.15].
- WIGHUS, R. 2015. Se Vedlegg 6 - Mail - Ragnar Wighus, SP Fire Research AS In: RESSHEIM, A. B. (ed.).
- WILLIAMS, D. C. & JACKMAN, D. L. 2006. *An independent guide on water mist systems for residential buildings* [Online]. Available: [https://www.bre.co.uk/filelibrary/pdf/rpts/partb/Water\\_Mist\\_Guide\\_v2.pdf](https://www.bre.co.uk/filelibrary/pdf/rpts/partb/Water_Mist_Guide_v2.pdf) [Accessed 19.3.15].
- XU, S. & FULLER, D. 2013. *Water Mist Fire Protection Reliability Analysis*.
- YUAN, L. & LAZZARA, C. P. 2004. *The Effects of Ventilation and Preburn Time on Water Mist Extinguishing of Diesel Fuel Pool Fires* [Online]. Available: <http://jfs.sagepub.com/content/22/5/379.full.pdf+html> [Accessed 20.3.15 2015].