

Brannsikkerhet i idrettshaller

Kartlegging av karakteristiske verdier for
brannenergi i flerbrukshaller

Anne Kirstine Berger

Bygg- og miljøteknikk

Innlevert: juni 2018

Hovedveileder: Jon Ivar Knarud, IBM

Medveileder: Bjørn Aas, IBM

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for bygg- og miljøteknikk



Oppgavens tittel: Brannsikkerhet i idrettshaller – Kartlegging av karakteristiske verdier for brannenergi i flerbrukshaller	Dato: 10.juni 2018		
	Antall sider (inkl. vedlegg): 102		
	Master- oppgave	X	Prosjekt- oppgave
Navn: Stud.techn. Anne Kirstine Berger			
Faglærer/veileder: Jon Ivar Belghaug Knarud			
Eventuelle eksterne faglige kontakter/veiledere: Bjørn Aas			

<p>Ekstrakt:</p> <p>Spesifikk brannenergi er et sentralt moment i brannteknisk prosjektering for å bestemme nødvendige branntekniske tiltak. For dimensjonering av idrettsbygg er slike statistiske verdier ikke tilgjengelig i norsk litteratur. Denne oppgaven har derfor tatt for seg en kartlegging og analyse av brannenergien i ti ulike flerbrukshaller i Trondheimsområdet, og vil med dette være et viktig bidrag til norsk litteratur.</p> <p>All innhentet data ble benyttet til å beregne brannenergien i hver av hallene, og deretter til å bestemme en statistisk verdi for brannenergien i denne typen virksomhet. Beregningene ble gjennomført etter prosedyren beskrevet i NS-EN 1991-1-2 tillegg E og Byggforskeren 321.051.</p> <p>Beregningene viser at den variable brannenergien per gulvflate i en flerbrukshall er 98,47 MJ/m², og den totale dimensjonerende spesifikke brannenergien per omhyllingsflate ble beregnet til å være 393,03 MJ/m². Begge verdiene er gitt ved 80 %-fraktil og Gumbel-fordeling. Resultatet viser til verdier betydelig høyere enn 50 MJ/m², som er den verdien den tidligere temaveileder HO 3/2000 om røykventilasjon antydte.</p> <p>Flerbrukshaller benyttes i dag ofte til flere aktiviteter og arrangementer i tillegg til alminnelig idrett. Ved en slik bruk tilføres normalt store mengder brennbart materiale og nye antennelseskilder, og brannenergien kan dermed raskt overstige 400 MJ/m². Gjennom en kvalitativ og en kvantitativ analyse ble det funnet at en slik variasjonen i bruk svekker personsikkerheten i flerbrukshallen.</p>

Stikkord:

1. Spesifikk brannenergi
2. Brann- og evakueringssimulering

Forord

Denne oppgaven er utarbeidet i faget *TBA4905 Bygnings- og materialteknikk, masteroppgave*, ved Institutt for bygg- og miljøteknikk ved NTNU Trondheim, våren 2018. Oppgaven utgjør 30 studiepoeng.

Jeg ønsker å takke mine veiledere ved NTNU, Jon Ivar Knarud Belghaug og Bjørn Aas, for gode råd og innspill underveis i arbeidet med oppgaven. En takk rettes også til alle eierne og driftspersonell ved de studerte flerbrukshallene for den imøtekommenheten de har vist ved å ta meg i mot og gi meg innsyn i den informasjonen som har vært nødvendig for å kunne gjennomføre denne oppgaven. Jeg ønsker også å takke gjengen på Brannsikkerhet hos Norconsult i Sandvika for gode faglige diskusjoner og all hjelp underveis i arbeidet. En ekstra takk til min fremtidige kollega Håkon Sildren Halvorsen for all hjelp og oppmuntring underveis i arbeidet.

Til slutt vil jeg takke min familie, kjæreste og venner som har motivert og støttet meg gjennom hele arbeidet.

Anne Kirstine Berger

Trondheim, juni 2018

Sammendrag

Spesifikk brannenergi er et sentralt moment i brannteknisk prosjektering for å bestemme nødvendige branntekniske tiltak, og kan enten beregnes eller tilpasses ved hjelp av anerkjente statistiske verdier for ulike virksomheter. For dimensjonering av idrettsbygg er slike statistiske verdier ikke tilgjengelig i norsk litteratur. Denne oppgaven har derfor tatt for seg en kartlegging og analyse av brannenergien i ti ulike flerbrukshaller i Trondheimsområdet, og vil med dette være et viktig bidrag til norsk litteratur.

Ved bruk av kombinasjonsmetoden, der gjenstander enten veies, måles eller bestemmes ut fra tabulerte data, ble alt brennbart materiale kartlagt i de ti flerbrukshallene. All innhentet data ble benyttet til å beregne brannenergien i hver av hallene, og deretter til å bestemme en statistisk verdi for brannenergien i denne typen virksomhet. Beregningene ble gjennomført etter den anbefalte prosedyren beskrevet i NS-EN 1991-1-2 tillegg E og Byggforskserien 321.051.

Beregningene viser at den variable brannenergien per gulvflate i en flerbrukshall er $q_{f,k} = 98,47 \text{ MJ/m}^2$, gitt ved 80 %-fraktil og Gumbel-fordeling. Den totale dimensjonerende spesifikke brannenergien per omhyllingsflate basert på de ti hallene ble beregnet til å være $393,03 \text{ MJ/m}^2$, gitt ved 80 %-fraktil og Gumbel-fordeling. Dette er verdier som er betydelig høyere enn hva tidligere temaveileder HO-3/2000 om røykventilasjon antydte. Veilederen viste til en spesifikk brannbelastning per omhyllingsflate mindre enn 50 MJ/m^2 . Den spesifikke brannenergien i flerbrukshallene er med andre ord i den øvre delen av det mye brukte intervallet i regelverket på $50\text{-}400 \text{ MJ/m}^2$.

Ettersom flerbrukshaller i dag ofte benyttes til flere aktiviteter og arrangementer i tillegg til alminnelig idrett, ble det gjennomført en kvalitativ og en kvantitativ analyse av hvordan sikkerhetsnivået i flerbrukshallen påvirkes. Ved en slik bruk tilføres normalt store mengder brennbart materiale og nye antennelseskilder, og brannenergien kan dermed raskt overstige 400 MJ/m^2 . I tillegg er persontallet ofte betydelig høyere enn ved normal driftssituasjon. Ved analysene ble det funnet at en slik bruk svekker sikkerhetsnivået, og at det er nødvendig å innføre tiltak for å opprettholde personsikkerheten ved bruk av en flerbrukshall til andre arrangementer.

Summary

Fire load density is a key element in fire engineering to determine the necessary fire engineering measures and can either be calculated or adjusted using commonly accepted values for different building use. For the purpose of designing indoor sports facilities, such statistical values are not available in the Norwegian research. Therefore this report has conducted a field survey and analysis of the fire loads in ten different indoor sports arenas in Trondheim. For this reason the report will be an contribution to Norwegian research.

When using the combination method, where elements and items were weighed manually, measured or determined from tabulated data, all combustible materials were registered. The data collected was then used to calculate the fire load density in each of the ten sports arenas. From these results a statistical value for the specific fire load density was established. The calculations were carried out according to the recommended procedure described in NS-EN 1991-1-2 Appendix E and Byggforskblad 321.051.

The resultant variable fire load density per floor area in an indoor sports arena was calculated to be 98.47 MJ/m^2 , given by 80 %-fraction and Gumbel distribution. The total specific fire load density per unit volume was calculated to be 393.03 MJ/m^2 , given by 80 %-fraction and Gumbel distribution. These values was significantly higher than stated in the previously used Norwegian HO-3/2000 guideline on smoke ventilation. This paper showed a total fire load per unit volume less than 50 MJ/m^2 . In other words, the specific fire load density in indoor sports arenas was in the upper part of the widely used range in Norwegian regulatory of 50-400 MJ/m^2 .

Since indoor sports arenas are commonly used for a wide range of activities and arrangements in addition to sports. A qualitativ and quantitative analysis was carried out to analyze how this affects the safety level. Due to this use of large amounts of flammable materials and ignition sources, the fire load density can easily exceed 400 MJ/m^2 . As well as the number of persons are substantially higher than everyday use of the building. During analysis it was discovered that such a use weakens the safety level, and therefore it was necessary to implement measures to maintain safety level when using indoor sports arenas to other activities.

Innhold

1 Innledning	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Problemstilling	2
1.3 Målsetting	2
1.4 Omfang og begrensninger	3
1.5 Leserveiledning	4
1.6 Definisjoner	5
2 Metode	6
2.1 Litteraturstudium	6
2.2 Analyse	6
2.2.1 Empirisk analyse av flerbrukshaller	7
2.2.2 Gumbelfordeling og matematisk beregning	7
2.2.3 Kvalitativ og kvantitativ analyse	8
2.3 Metodediskusjon	9
2.3.1 Relevans	9
2.3.2 Validitet og reliabilitet	10
2.3.3 Generaliserbarhet	11
3 Generell teori	12
3.1 Brannforløp	12
3.1.1 Det tidlige brannforløpet	13
3.1.2 Brannforløp i flerbrukshall	14
3.2 Evakuering	15
3.2.1 Nødvendig - og tilgjengelig rømningstid	15
3.2.2 Menneskelig atferd ved evakuering	17
4 Brannenergi	19
4.1 Brannenergiens betydning i regelverket	19
4.1.1 Bestemmelse av brannenergi i henhold til regelverket	20
4.2 Beregning av brannenergi	21
4.3 Metoder for kartlegging av brannenergi	23
4.3.1 Inventarmetoden (Inventory method)	23
4.3.2 Veiningsmetoden (Weighing method)	24
4.3.3 Kombinasjonsmetoden (Combination method)	24
4.3.4 Spørreskjemametoden (Questionnaire method)	24

4.3.5	Nettundersøkelsesmetoden (Website review method)	25
4.3.6	Oppsummering av metodene	25
4.4	Tidligere analyser av brannenergi	26
4.4.1	Kartleggingsmetodens betydning	26
4.4.2	Betydningen av en gjenstands geometri og overflateareal	27
5	Forbrenning av ulike materialer	29
5.1	Tre som brensel	29
5.1.1	Treets egenskaper ved brann	29
5.1.2	Densitet	30
5.1.3	Forbrenningsvarme	30
5.2	Plastmaterialer	31
5.2.1	Vanlige plastmaterialer og deres branntekniske egenskaper	32
5.3	Bruk av flammehemmere	34
6	Kartlegging av idrettshaller	36
6.1	Valg av analyseobjekter og utvalgsstørrelse	36
6.2	Kartleggingsmetode	36
6.3	Prosedyre	37
6.4	Beregning av flerbrukshallenes brannenergi	38
6.5	Antagelser og begrensninger	40
6.6	Beregningsresultat og analyse	40
6.7	Observasjoner i forbindelse med befaringene	46
6.7.1	Plassering av elektriske vaskemaskiner	46
6.7.2	Bruk av sprinkleranlegg	46
6.8	Usikkerheter i kartlegging og beregning	47
7	Kvalitativ analyse	49
7.1	Introduksjon	49
7.2	Fremgangsmåte og metode	49
7.3	Mål for kvalitativ analyse	50
7.3.1	Beskrivelse av analyseobjekt	50
7.4	Identifikasjon av farer og trusler	50
7.4.1	Befaringer i flerbrukshaller	51
7.4.2	Farekilder ved alternative arrangement	52
7.4.3	Farer og trusler identifisert fra statistikk	54
7.5	Mulige brannscenarier i flerbrukshallen	55
7.5.1	Aktuelle brannobjekter	55

7.5.2	Plassering	56
7.6	Valgte brannscenarioer	56
7.6.1	Brann i madrass	57
7.6.2	Brann i bil	58
7.6.3	Oppsummering og vurdering av brannscenarioene	59
7.6.4	Konsekvensvurdering	59
8	Kvantitativ analyse	60
8.1	Brann- og rømningssimulering	60
8.2	Simuleringsmodell	60
8.2.1	Planløsning og geometri	60
8.2.2	Forbrenningsreaksjoner	62
8.2.3	Sensorer og måleinstrumenter	63
8.3	Evakueringssimulering	65
8.3.1	Scenarioer	65
8.3.2	Forsinkelse	66
8.3.3	Ganghastighet	66
8.4	Simuleringsresultater	66
8.4.1	Det tidlige brannforløpet	66
8.4.2	Brannforløpet over tid	68
9	Diskusjon	70
9.1	Kartlegging og analyse av brannenergi	70
9.1.1	Statistisk utvalg	70
9.1.2	Antagelser og forenklinger knyttet til beregningen	70
9.2	Usikkerhet knyttet til den kvalitative og kvantitative analysen	71
9.2.1	Brannforløp og tilgjengelig rømningstid	72
9.3	Konsekvens ved alternativ bruk av flerbrukshaller	73
9.3.1	Hva skal til før brannenergien overstiger 400 MJ/m ² ?	73
9.3.2	Hvordan påvirkes sikkerhetsnivået i flerbrukshallene av endringer i brannenergien?	74
10	Konklusjon	75
	Referanseliste	77
A	Skjema for kartlegging av variabel brannenergi	82
B	Skjema for kartlegging av permanent brannenergi	84

C Brennverdi

86

Figurer

2.1	KS-test sier noe om avstanden mellom punkter i datautvalget og den valgte sannsynlighetsfordelingen (NIST, 2018c)	8
3.1	Temperatur-tid kurve for en fullt utviklet brann	12
3.2	Tenkt temperatur-tid kurve for en idrettshall	15
3.3	Sammenhengen mellom tilgjengelig rømningstid, nødvendig rømningstid og sikkerhetsmargin ved rømning (DIBK, 2017a)	16
4.1	Oversikt over fastsettelse av brannenergi (Fontana <i>et al.</i> , 2016)	22
4.2	Forbrenningshastighet som funksjon av tilgjengelig overflateareal (Yi, Buchanan og Fleischmann, 2006)	27
5.1	Forkullings- og pyrolyselag i en trebjelke (Buchanan, 2017)	30
6.1	Utstyret benyttet på befaringene	37
6.2	Kumulativ Gumbel-fordeling for dimensjonerende spesifikk brannenergi per omhyllingsflate for flerbrukshallene	44
6.3	Kumulativ Gumbel-fordeling for variabel brannenergi per gulvareal for flerbrukshallene	44
6.4	Normalfordeling av total spesifikk brannenergi per omhyllingsflate	45
7.1	Munkvollhallen, med aktivitetsflate, utstyrrom og tribune	51
7.2	Idrettsutstyr plassert i utstyrrom, bilde tatt i Åsheimhallen	52
7.3	Alternativ bruk av flerbrukshall	53
7.4	Brannutvikling for lenestol, gjengitt fra Steen-Hansen, Steinbakk og Storesund (2012)	58
7.5	Brannutvikling for en bil uten ventilasjon (Test 6), gjengitt fra Lemaire og Kenyon (2006)	58
8.1	Modellen benyttet i PyroSim	61
8.2	Rømningsscenario 1 og 2, henholdsvis (a) og (b)	65
8.3	Siktforhold på tribune, 3 meter foran trappeløp	67
8.4	Nødvendig rømningstid i flerbrukshallen. Grønn stiplet linje viser rømning fra tribune, rød linje viser rømning fra aktivitetsflate, grønn solid linje viser total rømningstid	68
8.5	Brannscenario 1 - Temperatur i branncellen etter 1200 sekunder	69
8.6	Brannscenario 2 - indikasjon på overtenning	69

9.1	Bokhyllen Billy fra Ikea (IKEA, 2018)	73
-----	---	----

Tabeller

3.1	Brannutviklingshastighet og tid til varmeavgivelseshastigheten har nådd 1000 kW NFPA (2009)	13
3.2	Brannutviklingshastighet relatert til bruk av bygning	14
3.3	Kriterier for at evakuering kan skje under akseptable forhold, modifisert tabell (Standard Norge, 2014)	16
4.1	Spesifikk brannenergi $q_{f,k}$ [MJ/m ²] for forskjellig bruk av bygninger, gjengitt fra Standard Norge (2008)	20
4.2	Faktorene for fare for brannaktivering, δ_{q1} og δ_{q2} (Standard Norge, 2008)	22
4.3	Oppsummering av metodene, modifisert tabell (Zalok og Eduful, 2013)	26
5.1	Plasttyper og bruksområder, modifisert tabell (Andersen, 2006)	34
6.1	Ulike materialers brennverdi	38
6.2	Ulike materialers densitet	39
6.3	Faktorene for brannaktiveringsrisiko benyttet i hallene, δ_{q1} , δ_{q2} og δ_n	39
6.4	Areal, variabel og permanent brannenergi per gulvareal, karakteristisk spesifikk brannenergi ($q_{f,k}$) og dimensjonerende spesifikk brannenergi ($q_{f,d}$ og $q_{t,d}$) i de 10 hallene	42
6.5	De ulike materialenes bidrag til brannbelastning i Byåsen vgs idrettshall	43
6.6	Beregningsresultat for spesifikk karakteristisk brannenergi ved bruk av Gumbelfordeling i programmet EasyFit	45
7.1	Kilder til brann for næringsgruppen Kulturell virksomhet, underholdning og fritidsaktiviteter i Norge i perioden 1985-2017, modifisert tabell (Finans Norge, 2017)	54
7.2	Aktuelle brannobjekter i en flerbrukshall ved både normalsituasjon og andre arrangementer	56
8.1	Parametre for beregning av sikt	64
8.2	Tillatt røykformørkelse for ulike målelengder	64
9.1	Mengde tilført materiale for å overstige standardintervallet på 50-400 MJ/m ² . .	74

1 | Innledning

1.1 Bakgrunn

Innendørs idrettsanlegg gjør det mulig å drive med idrett uavhengig av vær og vind, året rundt. I dag bedrives alt fra håndball og turn, til fotball og ishockey inne i egne anlegg. Større innendørs idrettsanlegg bygges ofte slik at de kan benyttes til mer enn kun én spesialidrett, og betegnes som flerbruksanlegg. Slike flerbrukshaller kan benyttes til mange ulike aktiviteter uten større omgjøring av hallen, og i de større anleggene kan også flere aktiviteter foregå samtidig (Kultur- og kirkedepartementet, 2005).

Den spesifikke brannenergien er et sentralt moment i brannteknisk prosjektering for å bestemme nødvendige branntekniske tiltak i et byggverk. Generelt kan den spesifikke brannenergien beregnes eller tilpasses ved hjelp av anerkjente statistiske verdier for ulike virksomheter. Slike statistiske verdier kan i norsk litteratur hentes fra Tillegg E i NS-EN 1991-1-2 (Standard Norge, 2008) eller Byggforskblad 321.051 (SINTEF Byggforsk, 2013b), eller i internasjonal litteratur fra eksempelvis SN-INSTA/TS 950:2014 (Standard Norge, 2014). For dimensjonering av idrettsbygg er derimot slike statistiske verdier svært lite utbredt. Tidligere temaveiledning HO-3/2000 om røykventilasjon angir brannbelastningen i idrettshaller til å være mindre enn 50 MJ/m^2 per omhyllingsflate (Statens bygningstekniske etat, 2000). Veiledningen var gyldig før 2010, men er i dag erstattet av en annen standard for å tilfredsstille dagens byggregler (DIBK, 2013). Vanlig praksis er følgelig ofte å anta verdier i det mye anvendte intervallet på $50\text{-}400 \text{ MJ/m}^2$, uten at dette blir drøftet mer detaljert. Det vites derfor ikke i hvilken ende av intervallet byggverket befinner seg, eller om det faktisk er innenfor intervallet.

En flerbrukshall benyttes gjerne til andre formål i tillegg til alminnelig idrett, som for eksempel konserter, messer og utstillinger. Denne formen for variasjon i bruk kan føre til situasjoner der en kommer i konflikt med de sikkerhetsbegrensninger som eksplisitt eller implisitt er underforstått i byggverkets brannsikkerhetskonsept. Eksempelvis vil spilleflaten under en håndballkamp være forholdsvis tom under selve kampen. Dette står i sterk kontrast til en konsert der spilleflaten består av scene, publikum og diverse elektrisk utstyr. Et annet eksempel kan være en messe, der hallflaten fylles med store mengder brennbart materiale. Ved slik alternativ bruk av flerbrukshallen kan brannenergien, antall personer og sannsynligheten for brann øke betydelig i sammenligning med den «normale» driftssituasjonen.

En vesentlig endring i brannenergien vil kunne ha en stor konsekvens for hvor godt de branntekniske tiltakene fungerer. Bjelland *et al.* (2015) understreker viktigheten av fokus på sli-

ke sikkerhetsbegrensninger, og påpeker at designløsninger bør utformes med mulighet for fremtidige endringer. Hvordan brannenergien endres ved variasjon i bruk i en flerbrukshall, er derimot funnet å være utilstrekkelig beskrevet i litteraturen. Det er derfor nødvendig å gjennomføre en mer grundig studie av den faktiske brannenergien i en flerbrukshall og hvordan denne variasjonen ved alternativ bruk av hallen påvirker personsikkerheten.

1.2 Problemstilling

Slik kapittel 1.1 påpeker, er det i dag manglende data for brannenergi i flerbrukshaller og idrettshaller generelt. For å øke bevisstheten vedrørende den faktiske brannenergien i flerbrukshaller, og hvordan denne påvirkes ved bruk av hallen til alternative arrangementer, tar denne oppgaven for seg en kartlegging og analyse av brannenergien i et utvalg flerbrukshaller. Det er flere utfordringer knyttet til en kartlegging av brannenergien i et byggverk, blant annet hvor systemgrensene i en analyse bør settes, hvilke mengder som skal inkluderes og utfordringer knyttet til forbrenning av materialer. Det er derfor nødvendig å forta et grundig litteraturstudium av temaet brannenergi og hvordan dette beregnes i byggverk i dag.

For å konkretisere problemstillingen ytterligere har det blitt utviklet et sett forskningsspørsmål:

1. Ved brannteknisk prosjektering antas brannenergien i flerbrukshaller ofte å ligge i intervallet 50-400 MJ/m². Hva er den faktiske verdien?
2. Hvordan påvirkes sikkerhetsnivået i hallene av endringer i brannenergi?
3. Hvor mye innredning vil potensielt gjøre sikkerhetsnivået sårbart?

1.3 Målsetting

Resultatmål

Oppgaven har til hensikt å komme frem til karakteristiske verdier for brannenergi i flerbrukshaller ved «normal» bruk, samt belyse hvilken konsekvens en økt brannlast ved spesielle arrangementer vil kunne ha.

Effektmål

Generelt er det et ønske at oppgaven skal bidra til økt kunnskap om brannenergien i flerbrukshaller og et økt fokus i fremtiden på temaet brannenergi i bygninger. I tillegg er det ønskelig at oppgaven skal bidra til en økt bevissthet på risikoen ved det å benytte byggverk til spesielle arrangementer som går utover byggverkets brannsikkerhetsstrategi.

Suksesskriterier

For å nå oppgavens målsetting er følgende suksessfaktorer definert:

- Et litteraturstudium skal gi god og relevant bakgrunnsteori og bidra til forståelse av de aktuelle temaene i oppgaven.
- Gjennomføring av kartlegging og analyse av brannenergien i minst ti ulike flerbrukshaller.
- Belyse risikoforskjellene mellom normal driftssituasjon og bruk av en flerbrukshall til alternative arrangementer.

1.4 Omfang og begrensninger

Generelt

Denne oppgaven er begrenset til å omhandle brannsikkerhet knyttet til brannenergi i flerbrukshaller i Norge. Andre typer byggverk hvor brannsikkerhet ved alternativ bruk av et byggverk er viktig, slik som i ulike forsamlingslokaler og andre publikumsbygg, vil ikke bli behandlet.

Kartlegging av et byggverks brannenergi kan være svært tidkrevende, både ved planlegging og utførelse. Det ble derfor bestemt at kartleggingen og analysen av brannenergi skulle begrenses til et utvalg på ti ulike flerbrukshaller i Trondheimsområdet. I tillegg har det fra forfatterens side vært et ønske om å vie litt tid til å lære seg det grunnleggende ved brann- og evakueringsanalyser. Dette er analyser som en rådgivende branningeniør kan benytte i forbindelse med prosjekter, og kunnskap om dette temaet vil være nyttig som nyutdannet.

Den kvalitative og kvantitative analysen i kapittel 8 og 9 er gjennomført for å illustrere hvordan sikkerhetsnivået i en flerbrukshall påvirkes av brannbelastningen. Denne delen av oppgaven var ikke opprinnelig en del av problemstillingen, men ble implementert i midten av april for å kunne si noe om risikoforskjellene mellom normal driftssituasjon og bruk av en

flerbrukshall til alternative arrangementer. Tiden til rådighet for analysene har vært en begrensende faktor. Av den grunn er analysene presentert i en forenklet form. De forenklete analysene vil ikke svekke oppgavens kredibilitet, men heller fungere som et viktig tillegg som belyser utfordringene knyttet til alternativ bruk av en flerbrukshall.

Simuleringsverktøy

Til brann- og evakueringssimuleringene ble programmene PyroSim 2018 og Pathfinder 2018 benyttet. Programmene er utviklet av Thunderhead Engineering, og er fri tilgjengelig programvare for en begrenset periode på 30 dager. Andre simuleringsverktøy er ikke benyttet i oppgaven, og det er derfor ikke foretatt noen vurdering eller sammenligning av programmene mot andre lignende verktøy.

1.5 Leserveiledning

Oppgaven er rettet mot branntekniske rådgivere, arkitekter, entreprenører, byggherrer og annet fagpersonell som arbeider med brannsikkerhet i byggverk. Det forventes derfor en viss grunnleggende kunnskap om brannteknikk av leser, samtidig som det er verdt å nevne at enkelte av kapitlene er inkludert i oppgaven for å gjøre den mest mulig tilgjengelig for også andre lesere med ulik faglig bakgrunn.

Innledningsvis i rapporten er temaet og problemstillingen i oppgaven introdusert, i tillegg til hvilke avgrensninger som er gjort. Videre følger en beskrivelse av hvilke metoder som er benyttet i oppgaven, samt en kort diskusjon av de valgte metodene relatert til validitet, reliabilitet og generaliserbarhet.

Etter introduksjonsdelen følger oppgavens hoveddel. Denne er delt inn i tre mindre deler. Disse er som følger:

- Del 1: Gjennomgang av litteratur og teoretisk grunnlag (kapittel 3 til 5)
- Del 2: Analysedel med en presentasjon av den gjennomførte kartleggingen og beregningen av brannenergi i ulike flerbrukshaller, samt konsekvensen av å øke brannlasten ved bruk av en flerbrukshall til alternative arrangementer (kapittel 6 til 8)
- Del 3: Diskusjon og konklusjon (kapittel 9 og 10)

Del 1 inneholder først en oversikt over litt generell brann- og evakueringsteori, etterfulgt av en mer grundig studie vedrørende begrepet brannenergi. Avslutningsvis følger en kort innføring av forbrenning av ulike materialer. Alt som er skrevet i disse kapitlene er hentet fra litteraturen, og er ikke forfatterens personlige meninger eller synspunkter. Mye av litteraturen benyttet i oppgaven er hentet fra utenlandske kilder. Så langt det har vært mulig har det blitt

forsøkt å omformulere og benytte litteraturen på en egen måte, men deler kan óg fremstå som nærmest direkte sitater. Dette fordi det ved en oversettelse fra engelsk til norsk kan være flere måter å tolke teksten på, og det har vært viktig å ikke miste betydningen i oversettelsen.

Det er forsøkt å referere til kilder på en god måte slik at det tydelig fremkommer hvor informasjonen er hentet fra. Kildene er i hovedsak gitt etter første setning i et avsnitt, og vil gjelde frem til en ny kilde refereres eller ut avsnittet.

Del 2 av oppgaven er delt inn i flere analyser. Først en analyse av den faktiske brannenergien i et utvalg flerbrukshaller, deretter en kvalitativ og en kvantitativ analyse av risikoen knyttet til alternativ bruk av flerbrukshaller.

Del 3 avslutter oppgaven med en kort diskusjon av oppgavens resultater og funn, samt en konklusjon av hva som er kommet frem av arbeidet.

1.6 Definisjoner

Enkelte begrep kan skape uklarheter for oppgaven, og er derfor definert i listen under.

Begrep	Definisjon
Brannenergi	Summen av varmemengde som frigis ved forbrenning av alle brennbare materialer i et avgrenset område
Permanent brannenergi	Brannenergien til ikke-flyttbare gjenstander og selve bygningskonstruksjonen
Variabel brannenergi	Brannenergien til flyttbare gjenstander
Spesifikk brannenergi	Totale brannenergien per arealenhet i en branncelle
Karakteristisk brannenergi	Brannenergi justert for beskyttet brannenergi (ψ)
Dimensjonerende spesifikk brannenergi	Total brannenergi korrigert for faktorene for forbrenning, brannaktivering og beskyttelse av materialet

2 | Metode

Oppgaven har i hovedsak bestått av et litteraturstudium og en analysedel. Dette kapittelet inneholder en oversikt over de metoder som er benyttet, samt hvorfor og i hvilket omfang de er benyttet. Videre i kapittelet følger en kort metodediskusjon, med fokus på oppgavens relevans, validitet og generaliserbarhet.

2.1 Litteraturstudium

Hensikten med oppgaven er å undersøke brannenergi i flerbrukshaller. For å gjøre dette på en veloverveid måte, er det nødvendig å legge et solid teori- og faktagrunnlag. Det har derfor vært nødvendig å gjennomføre et utvidet litteraturstudium av aktuelt fagstoff.

Litteraturstudiet har hatt til hensikt å finne relevant litteratur om ulike materialers egenskaper ved brann, generelt om tematikken brannenergi og om hvordan lignende studier av et byggverks brannenergi er utført. Deler av stoffet bygger videre på litteratur benyttet i forfatterens prosjektoppgave *Brannstrategi i idrettsbygg - en studie av faktorer med påvirkning på det branntekniske sikkerhetsnivået i idrettsbygg* høsten 2017. Denne oppgaven tilsvarte 7,5 studiepoeng og har delvis fungert som forberedende arbeid for masteroppgaven.

For å finne relevant litteratur er søkemotorene Google Scholar og Oria benyttet, i tillegg til gjennomgang av tidligere masteroppgaver, SINTEF-rapporter, Byggforskblader, standarder fra Norsk Standard og lov- og forskriftstekster fra blant annet Lovdata og Direktoratet for byggkvalitet. Pensumbøker fra tidligere kurs i studiet har også blitt benyttet.

Kvaliteten på kildene er vurdert fortløpende gjennom arbeidet ved bruk av TONE-prinsippet. Prinsippet bygger på en vurdering av en kildes troverdighet, objektivitet, nøyaktighet og egnethet (NTNU, 2018). Kildene har blant annet blitt vurdert opp mot hvem som er forfatter, hvor de er publisert, om kildene er fagfellevurdert, hvordan dataene er presentert, hvilket år kildene er fra og om de passer med oppgavens problemstilling. Det er i hovedsak benyttet kilder fra kjente forskningsinstitusjoner, universiteter og velrenommerte forfattere anerkjent innenfor fagfeltet brannsikkerhet. Kildene kan derfor anses som troverdige.

2.2 Analyse

I forbindelse med denne oppgaven er det gjennomført en kartlegging av et utvalg flerbrukshaller for å kunne si noe om den faktiske brannenergien i denne typen virksomhet. I tillegg

er det gjennomført en kvalitativ og en kvantitativ analyse for å studere konsekvensen av økt brannlast i flerbrukshaller. Analysene er beskrevet under.

2.2.1 Empirisk analyse av flerbrukshaller

I den empiriske analysen var målet å undersøke den faktiske brannenergien i flerbrukshaller. Analysen er basert på data samlet inn ved befarings i et utvalg flerbrukshaller. Målet med analysen var å kunne si noe om hva den faktiske brannenergien i en flerbrukshall er, basert på erfaringsdata fra andre lignende haller. I kapittel 6 beskrives selve utførelsen av datainn-samlingen og analysen av de empiriske data benyttet i denne oppgaven.

2.2.2 Gumbelfordeling og matematisk beregning

Verdier for spesifikk brannenergi er i litteraturen gitt ved Gumbel-fordeling, også kjent som «ekstremverdi fordeling type 1». Ekstremverdi er generelt definert som den største eller minste verdien som forventes å forekomme i et bestemt antall observasjoner eller i en viss tidsperiode (NIST, 2018b). En slik kumulativ fordelingsfunksjon benyttes for å modellere fordelingen av maksimumsverdier av et gitt utvalg, og på denne måten kunne si noe om sannsynligheten for at en trekning skal være under en gitt verdi.

Ved bruk av Fisher-Tippett teoremet kan ekstremverdi-fordelinger presenteres på en parametriseringsform kalt «Generalized Extreme Value» (GEV) -fordeling (Laycock, Cottis og Scarf, 1990). GEV-fordelingen er gitt ved ligning 2.1:

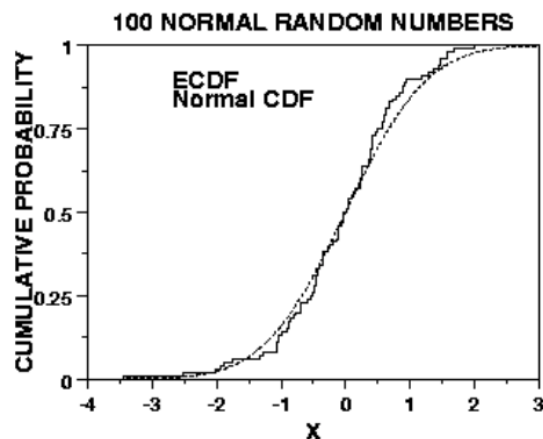
$$G(x) = \exp\left\{-\left(1 + \xi(x - \mu)/\sigma\right)^{\frac{-1}{\xi}}\right\} \quad (2.1)$$

Der $\sigma > 0$, μ og $\xi \in \mathbb{R}$. Ligningen er kun gyldig for $1 + \xi(x - \mu)/\sigma > 0$. Parametrene σ , μ og ξ er henholdsvis skala (scale), lokasjon (location) og form parametre. Fordelingen tar utgangspunkt i normalfordeling, og hvis σ er stor, blir distribusjonen over spredt utover x-aksen. Dersom σ er liten blir fordelingen mer konsentrert. Lokasjonsparameteren forteller hvor på den horisontale aksene et utvalg er sentrert. Verdien av ξ beskriver halen på fordelingen av $G(x)$. Når $\xi = 0$ har man det som betegnes som Gumbel-fordeling. Den kumulative Gumbel-fordelingen blir dermed:

$$G(x) = \exp(-\exp(-z)), \quad z = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (2.2)$$

Kolmogorov-Smirnov testen (KS-test) har blitt benyttet for å kunne si noe om hvor godt

sannsynlighetsfordelingen passer til det spesifikke datautvalget. KS-testen beregner avstanden mellom de empiriske datapunktene og den kumulative distribusjonsfunksjonen, slik som vist i figur 2.1. Ved bruk av KS-testen beregnes en P-verdi. Denne verdien sier noe om hvor stor sannsynlighet det er for at det som observeres i en analyse er en tilfeldig egenkap ved utvalget, heller enn å være en egenkap som representerer hele populasjonen (NIST, 2018a). En P-verdi på 0,1 vil i så fall indikere at det er 10 % sannsynlighet for at det observerte kun er en tilfeldighet. Vanlig praksis ved analyser er å fastsette i forkant hvilken P-verdi som er akseptabel for et resultat. I denne oppgaven er P-verdien derimot benyttet som en indikator på hvor godt grafene er tilpasset det faktiske utvalget.



Figur 2.1: KS-test sier noe om avstanden mellom punkter i datautvalget og den valgte sannsynlighetsfordelingen (NIST, 2018c)

I oppgaven benyttes programmet EasyFit 5.6 Professional, et dataanalyseprogram som beregner ulike statistiske funksjoner (MathWave Technologies, 2018). Programmet tilbyr beregning av alle de mest vanlige sannsynlighetsfordelingene, i tillegg til en beregning av hvor godt grafen er tilpasset de faktiske punktene ved bruk av Kolmogorov-Smirnov test og Anderson Darling test. For beregning av Gumbel-fordeling tar programmet utgangspunkt i teorien beskrevet kort ovenfor, og gir ut grafer og beregnede parametre for de datasett som benyttes.

2.2.3 Kvalitativ og kvantitativ analyse

Hensikten med analysene er å studere konsekvensen av å benytte en flerbrukshall til andre formål enn idrettsarrangement. Analysen er delt i to, en kvalitativ og en kvantitativ del.

Den kvalitative analysen bygger på informasjon funnet fra aktuell statistikk, i tillegg til erfaringer i ulike flerbrukshaller og informasjon funnet gjennom litteraturstudiet. Analysen benyttes til å danne grunnlag for valg av brannscenarier i den kvantitative analysen.

Den kvantitative analysen har tatt utgangspunkt i litteratur for brannsimulering, inkludert

beskrivelse av arbeid andre personer har gjort tidligere. Det ble benyttet hovedsakelig litteratur utgitt av programmenes utviklere, i tillegg til annen anerkjent litteratur innen brannsimulering.

Simuleringsverktøyene PyroSim 2018 og Pathfinder 2018 ble benyttet for simulering av henholdsvis brann og evakuering i den kvantitative analysen. For valget av simuleringsverktøy har en avgjørende faktor vært et ønske om å benytte programvare som er mye brukt innenfor brannfaget og som dermed vil være relevant videre inn i arbeidslivet. I tillegg har det vært fordelaktig at begge programmene, som har vært tilgjengelig for gratis utprøving i en testperiode på 30 dager, har et relativt intuitivt brukergrensesnitt og oppdateres jevnlig.

2.3 Metodediskusjon

I dette underkapittelet diskuteres svakheter og styrker ved metoden og datainnsamlingen som er gjort, med hovedfokus på begrepene relevans, validitet og overførbarhet. Å belyse svakheter og styrker ved ens egen oppgave er en viktig kvalitetssikring for arbeidet. Innledningsvis introduseres litt om kvalitetssikring generelt i forskning, og deretter diskuteres svakheter og styrker ved denne oppgaven.

Ved bruk av kvantitative og kvalitative metoder er det særlig tre begreper som ofte benyttes for å vurdere kvaliteten på forskningen (Olsson, 2011). Dette er begrepene validitet, reliabilitet og generaliserbarhet. Validitet er relatert til gyldigheten i studien, og omhandler i hvilken grad det empiriske materialet er egnet for å svare på oppgavens problemstilling. Reliabilitet er forbundet med etterprøvbarehet, om det er mulig å måle det samme gang på gang, uavhengig av person og kontekst. For å sikre at oppgaven har god reliabilitet, er det viktig å beskrive de valgte måleparametre og målemetodene på en entydig måte. Generaliserbarhet viser til den grad resultatene fra en vitenskapelig undersøkelse kan overføres til andre situasjoner og kontekster.

2.3.1 Relevans

Med relevans mener Forskningsrådet (2001) at forskningen som blir gjort må bidra til å flytte forskningsfronten fremover. Dette betyr ikke at all forskning skal komme med ny, banebrytende viten som aldri før har blitt satt på dagsorden, med det skal tilføre oss noe mer enn akkurat det vi vet fra før av.

I litteraturstudiet ble det søkt etter litteratur på tematikken brannenergi og kartlegging av brannenergi i offentlige bygninger. Mange tidligere studier har tatt for seg undersøkelser av

brannenergien i kontorbygg og boliger, men det ble imidlertid ikke funnet noen tidligere studier av brannenergien i ulike typer idrettsbygg. Jeg vil derfor argumentere for at min oppgave er et viktig og relevant bidrag til litteraturen. Dette fordi materialet i analysene er hentet fra norske flerbrukshaller og statistikk, og fordi det er gjort en kartlegging av brannenergi i flerbrukshaller.

Oppgaven er også samfunnsrelevant ettersom en økt kunnskap om brannenergien i norske flerbrukshaller vil kunne gi et bedre grunnlag for prosjektering av nye haller i fremtiden. En slik utvidet kunnskap om brannenergi i bygninger ble i tillegg etterspurt gjennom en publisasjon i januar 2018 skrevet av SFPE, en internasjonal organisasjon for de som arbeider innenfor brannvernsteknikk (SFPE, 2018).

2.3.2 Validitet og reliabilitet

Validitet omhandler i hvilken grad det empiriske materialet er egnet for å svare på oppgavens problemstilling, og er et uttrykk for om man måler de rette tingene (Olsson, 2011). For å sikre god validitet i arbeidet er det viktig å stille seg noen spørsmål: Er dette en relevant versjon av virkeligheten? Er den tolkningen som er gjort logisk? Svarene på disse spørsmålene blir hele tiden preget av vår forståelse, og det blir derfor svært viktig at en i kvalitativ forskning redegjør for de valgene som er gjort og den forståelsen en innehar.

Som tidligere nevnt har oppgaven til formål å studere brannenergien i norske flerbrukshaller. En gjennomføring av befaringer og datainnsamling i et tilfeldig utvalg flerbrukshaller i Norge, nærmere bestemt Trondheim, anses derfor å ha høy grad av validitet knyttet til oppgavens problemstilling.

Gjennomføring av befaringer og registreringer i de ulike flerbrukshallene er gjort på egenhånd, noe som kan svekke arbeidets troverdighet. Detaljer, både åpenbare og mer komplekse, kan lett unnslippe når denne typen arbeid utføres av kun én person. Derimot vil en kunne anta at de samme type detaljer er fraværende ved alle befaringene, slik at hallene er undersøkt og vurdert på likt grunnlag.

En svakhet ved denne oppgaven er at det kun er meg som forfatter som har kartlagt og analysert materialet. Jeg har imidlertid fått gode innspill fra min veileder ved NTNU og mine fremtidige kolleger i brannavdelingen hos Norconsult i Sandvika. Dette mener jeg er med på å styrke min analyse og tolkningenes validitet.

2.3.3 Generaliserbarhet

Generaliserbarhet er knyttet til overføring av kunnskap fra en situasjon til en annen (Easterby-Smith, Thorpe og Jackson, 2015). En god beskrivelse av datamaterialet og fremgangsmåten blir viktig for at leseren skal kunne avgjøre om dette er overførbart til andre situasjoner som er relevant for leseren. Det er derfor lagt vekt på å gi en grundig beskrivelse av materiale og metode i denne oppgaven, slik at leseren selv kan vurdere overførbarheten til andre arbeid.

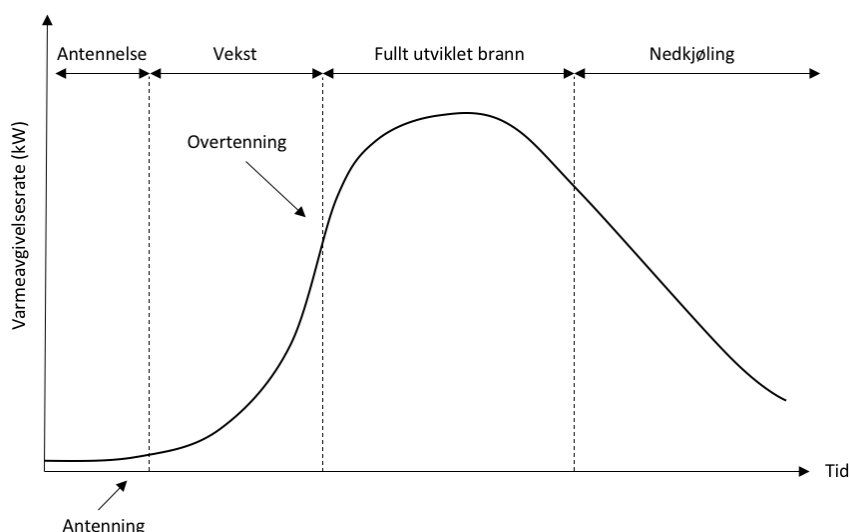
Resultatene i denne oppgaven vil ikke være generaliserende for hele populasjonen i Norge på generell basis, men de kan gi en pekepinn på hva den faktiske brannenergien i flerbruks-haller er og hvordan sikkerheten påvirkes dersom slike haller benyttes til alternative arrangement.

3 | Generell teori

I dette kapitlet beskrives hvordan en brann utvikler seg og hvilke faser en brann består av. Deretter gis det en kort beskrivelse av hvordan et brannforløp i en flerbrukshall kan se ut, før noen viktige begreper i forbindelse med rømningssikkerhet presenteres. Avslutningsvis beskrives menneskelig atferd ved evakuering.

3.1 Brannforløp

Det totale brannforløpet i et rom kan kategoriseres i fire faser, som vist i figur 3.1; antennelse, vekst, fullt utviklet brann og nedkjøling. Rekkefølgen og varigheten av disse er varierende, og styres generelt av tilgjengelig mengde og type brensel, samt oksygentilførsel.



Figur 3.1: Temperatur-tid kurve for en fullt utviklet brann

I antennelsesfasen varmes det potensielle brenset opp og antenning kan inntreffe som følge av en åpen flamme, gnister eller selvantennelse av materialet (Drysdale, 2011). En brann starter gjerne med antennelse av løst inventar, tekniske installasjoner eller utstyr. Selve antennelsen markerer overgangen til vekstfasen. Med nok oksygen og brennstoff vil brannen vokse, og temperaturen i rommet vil stige og spres til andre nærliggende brensel. En brann der tilgangen på brensel og brensets egenskaper er bestemmende for brannens videre utvikling kalles brenselkontrollert. En brenselkontrollert brann vil kunne ha tilstrekkelig tilgang på luft og høy nok temperatur (Drysdale, 2011).

Dersom brannen får utvikle seg fritt med nok oksygen og tilgang på brennbart materiale, vil det kunne oppstå en overtenning i brannrommet. Overtenning er ikke definert som en egen

fase i brannen, men et tidspunkt. Dette er ikke et presist begrep, men beskrives blant annet som det tidspunkt der temperaturen i brannrommet når 500-600°C eller tilbakestrålingen fra røyklaget ved gulvnivå når 20 kW/m² (Drysdale, 2011). Hvor hurtig det oppstår overtenning er avhengig av mange faktorer, eksempelvis type brensel, oppbygging av varmt røykklag under taket og tilgang på oksygen. Ved overtenning er alle brennbare overflater i rommet involvert i brannen, og brannen sies på dette stadiet å være fullt utviklet. Når man har en fullt utviklet brann i et rom vil brannen være ventilasjonskontrollert, med andre ord avhengig av lufttilførselen. Det er på dette punktet at brannen har størst varmeavgivelsesrate.

Dersom brannen får fortsette uten ytre påvirkninger, vil brannraten etterhvert avta og gå inn i nedkjølingsfasen. I denne fasen vil en ventilasjonskontrollert brann gå over til å bli brenselkontrollert, og temperaturen i brannrommet vil avta.

3.1.1 Det tidlige brannforløpet

Det totale brannforløpet beskriver en brann fra antennelse til den er slukket, mens det tidlige brannforløpet beskriver vekstfasen til en brann frem til overtenning. Fra et personsikkerhetsperspektiv er denne fasen den viktigste dersom en skal evakuere fra et byggverk der det brenner.

Vekstfasen kan blant annet beskrives ved bruk av t²-modellen. Denne modellen uttrykker brannens energiproduksjon som funksjon av tiden. Metoden går ut på at energiproduksjonen, Q [kW], i en brann øker med en faktor, α [kW/s²], og kvadratet av tiden, t [s], som følger:

$$Q = \alpha \cdot t^2 \quad [kW] \quad (3.1)$$

Vekstfaktoren kan ha en hvilken som helst positiv verdi, men det benyttes gjerne fire standardiserte verdier. Disse er i NFPA 92B beskrevet som langsom, middels, rask og ultra-rask (NFPA, 2009). Klassifiseringen er relatert til hvor lang tid i sekunder det tar for brannen å nå 1000 kW, og er gjengitt i tabell 3.1.

Tabell 3.1: Brannutviklingshastighet og tid til varmeavgiveshastigheten har nådd 1000 kW NFPA (2009)

Brannutviklingshastighet	Tid til varmeavgiveshastigheten er 1000 kW, t_{α} [s]
Langsom	600
Middels	300
Rask	150
Ultra-rask	75

I følge Kong *et al.* (2013) er det som regel ekspertvurderinger som danner grunnlaget for valget av brannutviklingshastighet ved modellering av brannforløp basert på t^2 -brann. Det er i litteraturen gitt ulike anbefalinger for hvilken vekstfaktor som bør benyttes, relatert til byggverkets virksomhet. I tabell 3.2 er anbefalte verdier for ulike bygningstypers vekstfaktor gjen-gitt. Verdiene er hentet fra standarden NS-EN 1991-1-2 (Standard Norge, 2008), den svenske veiledningen for analytisk prosjektering av bygningers brannsikkerhet (Boverket, 2013) og en rapport utarbeidet av Sintef som omhandler effekten av sprinkling i flerbrukshaller (Mostue, 2004). Sintef-rapporten har hentet sine tall for brannutviklingshastighet fra den britiske standarden PD 7974. Slik tabellen viser, er det ikke fullstendig enighet om hvilken verdi for de ulike virksomhetene som anbefales.

Tabell 3.2: Brannutviklingshastighet relatert til bruk av bygning

Type bygning	Vekstfaktor	Kilde
Kunstgalleri	Langsom	(Mostue, 2004)
Boliger	Middels Rask	(Standard Norge, 2008) (Boverket, 2013)
Hoteller, sykehjem, osv.	Middels Middels Rask	(Standard Norge, 2008) (Mostue, 2004) (Boverket, 2013)
Skoler og kontorer	Middels Middels	(Standard Norge, 2008) (Mostue, 2004)
Forsamlingslokaler	Rask	(Boverket, 2013)
Butikker	Rask	(Standard Norge, 2008)
Lager	Ultra-rask	(Mostue, 2004)

3.1.2 Brannforløp i flerbrukshall

Brannforløpet i en flerbrukshall vil se noe annerledes ut enn det som er illustrert i figur 3.1. Flerbrukshallen har normalt et stort romvolum og romhøyde, og består gjerne av et stort rom som utgjør selve idrettshallen, et antall mindre materialrom/lagre og tribune. Store deler av den variable brannbelastningen i en slik hall lagres i materialrommene.

Ved initiering av en brann i eksempelvis et materialrom, vil brannen her kunne utvikles som en lokal brann før den spres videre innad i branncellen. Et slikt brannforløp vil eksempelvis kunne ligne på brannforløpet skissert i figur 3.2.

En brann i en flerbrukshall vil normalt være brenselskontrollert, ettersom tilgangen på oksygen antas å være tilstrekkelig, og en overtenning i hele branncellen vil være mindre sannsynlig. Røykfyllingen og temperaturutviklingen i rommet vil normal ta lengre tid enn brannceller



Figur 3.2: Tenkt temperatur-tid kurve for en idrettshall

med normal takhøyde (Huang, Zhu og Pan, 2018). Dette resulterer i at det kan ta lengre tid før detektorer registrerer en brann og advarer menneskene i byggverket.

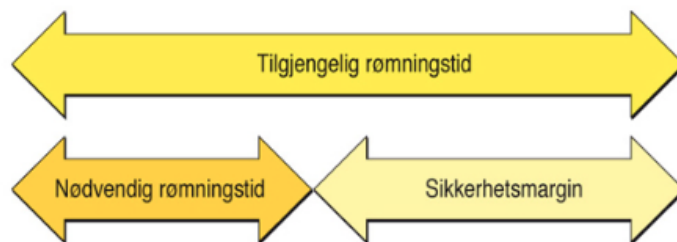
3.2 Evakuering

Dersom en uønsket hendelse inntreffer og det blir nødvendig å evakuere fra et byggverk, er rømningstiden svært viktig for personsikkerheten. I følge TEK17 skal byggverk prosjekteres og utføres slik at det er tilstrekkelig med tid tilgjengelig for rømning og redning, i tillegg til at en tilfredsstillende sikkerhetsmargin skal være inkludert (DIBK, 2017a).

3.2.1 Nødvendig - og tilgjengelig rømningstid

For å kunne beskytte mennesker i en brann, er det nødvendig å kontrollere røyken og hjelpe personer til å evakuere. Ved snakk om rømning er særlig to begreper mye brukt; tilgjengelig og nødvendig rømningstid. Den tilgjengelige rømningstiden er tiden fra en brann oppstår til forholdene blir uutholdelige eller sikten så dårlig at rømning ikke lenger er mulig. Den nødvendige rømningstiden defineres som tiden fra brannstart til samtlige personer i en bygning har nådd sikkert sted. Slik figur 3.3 viser, må den tiden som er tilgjengelig for rømning være større enn summen av den tiden som er nødvendig for rømning, inkludert en sikkerhetsmargin (SINTEF Byggforsk, 2016).

Den tilgjengelige rømningstiden kan fastsettes ved bruk av avanserte beregningsmodeller på bakgrunn av et sett akseptkriterier for menneskelige tålegrenser, se tabell 3.3. Det er synergieffekten eller samvirke mellom disse forholdene som avgjør tålegrensen, men svært ofte



Figur 3.3: Sammenhengen mellom tilgjengelig rømningstid, nødvendig rømningstid og sikkerhetsmargin ved rømning (DIBK, 2017a)

er sikt det dimensjonerende akseptkriteriet når personer må rømme gjennom røyk (SINTEF Byggforsk, 2016).

Tabell 3.3: Kriterier for at evakuering kan skje under akseptable forhold, modifisert tabell (Standard Norge, 2014)

Kriterium		Kommentar
Sikt	3 m	Minst 3 meter sikt i brannceller med areal $\leq 100 \text{ m}^2$
	10 m	Minst 10 meter sikt ved en høyde 2 meter over bakken i rømningsveier og brannceller med areal $> 100 \text{ m}^2$
Røysjikhøyde	3 m	Alternativ til berening av sikt. Røysjikhøyde, dvs avstand fra golv til røysjiktet, må normalt være $1,6 \text{ m} + (0,1 \times H)$
Temperatur	80 °C	Maksimal gasstemperatur 80 °C
Stråling	2,5 kW/m ²	Maksimal strålingsintensitet på 2,5 kW/m ² eller en kortvarig strålingsintensitet på 10 kW/m ² dersom maksimal strålingsdose er $< 60 \text{ kJ/m}^2$
Giftighet	CO	$< 2\,000 \text{ ppm}$
	CO ₂	$< 5 \%$
	O ₂	$> 15 \%$

For å legge til rette for suksessfull evakuering må tilgjengelig rømningstid, som nevnt, være vesentlig lengre enn den nødvendige rømningstiden. Den nødvendige rømningstiden kan beskrives med følgende formel:

$$t_{\text{nødvendig}} = t_{\text{varsling}} + t_{\text{reaksjon}} + t_{\text{forflytning}} \quad [\text{s}] \quad (3.2)$$

der

- **Varslingstid:** tiden fra en brann starter til den detekteres automatisk eller manuelt, og varsling er gitt
- **Reaksjonstid:** tiden fra brannen er varslet og til forflytning starter, inkludert tid til fortolkning og beslutning

- **Forflytningstid:** tiden det tar for personer å forflytte seg til sikkert sted

Varigheten av de to første fasene avhenger av utformingen av byggverket, med andre ord rommets geometri, brannlast, ventilasjon og luftstrømninger, bruk av automatisk brannalarmanlegg og eventuell plassering av detektorer, eller menneskelige faktorer dersom brannen oppstår et sted der det ikke er montert brann-detektorer. Varigheten av den tredje fasen, forflytningsfasen, avhenger av menneskelig atferd, organisatoriske faktorer og utførelsen av rømningsveiene.

3.2.2 Menneskelig atferd ved evakuering

Menneskelig atferd i en brannsituasjon har hatt et økt fokus de siste tiårene. Hvordan personer reagerer i en evakuerings situasjon er svært varierende, og avhenger i følge Proulx (2001) av tre hovedelementer:

1. Menneskelige/personlige egenskaper
2. Bygningens egenskaper
3. Brannkarakteristikk

Kunnskap om disse tre hovedkarakteristikkene er nødvendig for å kunne forstå menneskelig oppførsel i en situasjon der de er utsatt for brann eller annen fare. De menneskelige egenskapene vil være avgjørende for å kunne forutsi potensiell bevegelsesatferd. Alder og mobilitet spiller særlig stor rolle, i tillegg til sinnstilstand og tidligere erfaringer ved brann. Eksempelvis vil svært unge eller svært gamle mennesker, og også mennesker påvirket av rus eller sterke medisiner, ha behov for lengre tid til både å respondere på en brannalarm og til å bevege seg til et sikkert sted (Proulx, 2001). Kjennskap til byggverket er en annen viktig faktor, da personer som har eller ikke har trening i å evakuere fra et bestemt byggverk vil reagere forskjellig. Likevel ønsker de fleste personer å evakuere gjennom den samme ruten som man kom inn i et byggverk, ettersom dette er den ruten som virker mest kjent. Det betyr at nød-utganger som ikke benyttes i normal drift, ikke nødvendigvis vil bli brukt ved en evakuering.

Engasjement og type aktivitet er et annet viktig fenomen ved snakk om menneskelig oppførsel (Proulx, 2001). På tidspunktet for brannen vil aktivitetene som skjer i bygningen ha stor innvirkning på personers respons og reaksjonstid. For eksempel, dersom brannalarm-signalet går under en konsert og personene på scenen fortsetter å spille, kan det forventes at de fleste tilskuere vil bli værende i håp om at alarmsignalet snart vil slås av. Tilskuerne har kanskje betalt mye for å kunne delta på konserten, og ønsker ikke å forlate midt under arrangementet. Dette vil kunne føre til en forsinket start på evakueringen, og evakueringstiden

blir lengre enn forventet. Tilsvarende kan selve situasjonen og sosiale roller påvirke beslutningstiden positivt dersom personen/situasjonen i sentrum for oppmerksomheten reagerer ved alarmen. Eksempelvis dersom musikken på en konsert opphører raskt etter utløst brannalarm, og personene på scenen informerer om at evakuering må starte.

En annen kjent myte og misforståelse ved menneskelig atferd, er å tro at folk som blir fanget i en brann vil få panikk og ukontrollert forsøke å flykte. Slik irrasjonell oppførsel er atypisk for mennesker som opplever en brannsituasjon. Tvert imot har de fleste mennesker en tendens til å reagere på en svært rasjonell måte med tanke på hvor lite de vet om situasjonen når en alarm utløses, deres begrensede kunnskaper om brann og den begrensede tiden de har til rådighet før de må ta en beslutningen og handle deretter (Proulx, 2001). I følge Kuligowski (2016) har folk en tendens til å være svært medmenneskelige og heller hjelpe enn å konkurrere med andre, slik de ville gjort i ikke-nødssituasjoner. Ved utforming av byggverk bør man derfor være oppmerksom på denne typen sosial atferd, ettersom de kan føre til forsinkelser i evakueringsprosessen.

Blant bygningens egenskaper er selve arkitekturen en viktig faktor. Antall etasjer, rominndeling, visuell og hørbar tilrettelegging, utforming og plassering av nødutganger, trapper og korridorer, er blant de viktigste bygningsfaktorene med innvirkning på menneskers oppførsel ved evakuering, og kan ha betydelig innvirkning på hvor raskt det er mulig å evakuere fra et bygg.

Brannkarakteristikken kan spille en viktig rolle for responstiden. Under en brann oppfatter folk forskjellige tegn fra brannen, og deres tolkning av situasjonen vil påvirke oppførselen. Synlige flammer vil som oftest føre til en annen respons enn kun lukten av røyk (Proulx, 2001). Dersom personene hverken ser eller lukter brannen, vil beslutnings- og reaksjonstiden gjerne være lengre enn om de har slike tydelige tegn på at en brann har inntruffet.

4 | Brannenergi

Brannenergien (MJ) har stor betydning for temperaturutviklingen i et rom, og er et mål på den totale varmemengden som frigis ved forbrenning av alle brennbare materialer i et avgrenset område (Fontana *et al.*, 2016). Jo høyere brannenergien er, desto større er potensialet for en mer alvorlig brann og et økt skadeomfang.

I dette kapitlet presenteres først hvordan brannenergien benyttes som en parameter ved prosjektering i henhold til regelverket. Videre følger en beskrivelse av hvordan brannenergien i byggverk beregnes og kartlegges, i tillegg til en kort presentasjon av noen tidligere analyser av brannenergi.

4.1 Brannenergiens betydning i regelverket

Ved brannteknisk prosjektering etter teknisk forskrift (TEK) stilles det i innledningen til kapitlet om sikkerhet ved brann krav til dokumentasjon av et byggverks brannsikkerhetsstrategi (DIBK, 2017b). Uavhengig av om det benyttes en forenklet eller analytisk prosjekteringsmodell skal enkelte forutsetninger og begrensninger beskrives, blant annet informasjon om byggverkets brannenergi.

Informasjon om et byggverks brannenergi har betydning for en rekke vurderinger som foreligger ved en brannteknisk prosjektering, både implisitt og eksplisitt. I VTEK henvises det blant annet til en bestemmelse av byggverkets brannenergi ved fastsettelse av veggens brannmotstand og maksimalt areal per etasje i et byggverk uten seksjonering (DIBK, 2017a). I tillegg oppfordres det til en vurdering av brannenergi ved oppdeling av et byggverk i brannceller, ved dimensjonering av konstruksjoners bæreevne under brann og ved vurdering av avstand mellom byggverk.

Brannenergien har som tidligere nevnt stor betydning for temperatur- og brannutviklingen i et rom, og vil derfor også være en viktig parameter ved prosjektering av automatiske sløkkeanlegg. Kjennskap til et byggverks brannenergi, både om materialbruk og mengde, har i tillegg stor betydning for røykutviklingen i en brann. Med andre ord benyttes et byggverks brannenergi også implisitt ved prosjektering av automatiske sløkkeanlegg og røykventilering.

Ettersom et byggverks brannenergi inngår som en parameter i prosjekteringen flere steder i brannsikkerhetsstrategien, er informasjon om et byggverks brannenergi også svært viktig i bruksfasen. For at et byggverk skal kunne driftes forsvarlig, er det viktig at det foreligger

nødvendig informasjon om de forutsetninger og begrensninger som er gjeldene for det spesifikke byggverket. Byggforskblad 321.026 om dokumentasjon av brannsikkerhetsstrategi anbefaler derfor en oversettelse av forutsetningene for bygget slik at det er forståelig for andre enn fagfolk, eksempelvis ved å oversette brannvekst (t^2 -brann) til mengde og type reell brannenergi i møbler, inventar, varer osv (SINTEF Byggforsk, 2013a). En slik oversettelse anbefales ettersom annen bruk av bygningen, eventuelt bare midlertidig, kan bryte forutsetningene for den valgte brannsikkerhetsstrategien. Dersom forutsetningene for et byggverk endres, kan krav om omprosjektering og ombygging bli gjeldende, for å sikre at de implementerte sikkerhetstiltakene er i samsvar med den endrede bruken. Slike endringer kan dermed fort bli kostbare.

4.1.1 Bestemmelse av brannenergi i henhold til regelverket

For å bestemme et byggverks brannenergi henviser VTEK til Tillegg E i standard NS-EN 1991-1-2 (DIBK, 2017b). Brannenergien kan bestemmes ut i fra bruken av bygningen og/eller spesielt for et enkelt prosjekt. Dersom brannenergien bestemmes ut i fra bygningens virksomhet, kan aktuelle verdier for den variable brannenergien hentes fra statistikken. Tabell 4.1 viser spesifikk brannenergi for ulike virksomheter, basert på kartlegging av brannenergien i virksomhetens inventar. Tabellen oppgir den variable brannenergien for virksomhetene, slik at den permanente brannenergien fra den spesifikke bygningen bør legges til verdien gitt i tabellen.

Tabell 4.1: Spesifikk brannenergi $q_{f,k}$ [MJ/m^2] for forskjellig bruk av bygninger, gjengitt fra Standard Norge (2008)

Bruk	Gjennomsnitt	80 %-fraktil
Bolig	780	948
Sykehus (rom)	230	280
Hotell (rom)	310	377
Bibliotek	1 500	1 824
Kontor	420	511
Klasserom i skole	285	347
Handlesenter	600	730
Teater (kino)	300	365
Transport (offentlig område)	100	122
MERKNAD Gumbel-fordeling er forutsatt for 80 %-fraktilen.		

Byggforskblad 321.051 omhandler tematikken brannenergi i bygninger, og er skrevet for å tydeliggjøre og eksemplifisere metoden gitt i Eurocoden. Byggforskbladet angir i tillegg til tabell 4.1, en utvidet tabell for statistiske verdier for variabel brannenergi hentet fra CIB W14.

Heller ikke denne tabellen viser til virksomhet som direkte kan overføres til flerbrukshaller.

4.2 Beregning av brannenergi

Spesifikk brannenergi uttrykkes som den totale brannenergien per arealenhet i en branncelle, enten gulvflate (q_f) eller total omhyllingsflate (q_t). Hvilken arealenhet som benyttes avhenger av valgt metode eller standard. Byggteknisk forskrift benytter spesifikk brannenergi for omhyllingsflate, mens Eurokoden og store deler av utenlandsk litteratur benytter gulvflate.

Brannenergien q (q_t eller q_f) per arealenhet i en branncelle er definert som:

$$q = \frac{1}{A} \sum M_i H_{ui} = \sum q_i \quad [MJ/m^2] \quad (4.1)$$

der

- M_i er mengden brennbart materiale [kg]
- H_{ui} er netto brennverdi for materiale i [MJ/kg]
- A er branncellens gulvareal eller omhyllingsflate

Generelt skilles det mellom en branncelles permanente og variable brannenergi. Den permanente brannenergien omfatter alt brennbart materiale som forventes å være tilnærmet upåvirket gjennom et byggverks livsløp. Slik brannenergi omfatter selve bygningskonstruksjonen, overflater og installasjoner festet til vegger, tak og gulv. Til motsetning omfatter den variable brannenergien all brennbar innredning, løst inventar, utstyr og lignende som er tilført av brukerne i bygget.

Deler av brannenergien i en branncelle kan være beskyttet av utenforliggende materialer, eksempelvis der en veggkonstruksjon av treverk er kledd med gipsplater. Stenderverket involveres dermed normalt senere i et brannforløp enn kledningen. Ved en eventuell brann vil det alltid være en viss sjanse for en svikt av beskyttelsen, som følge av at beskyttelsen kan falle av, sprekke opp eller lede store deler varme. Dermed vil det bakenforliggende materialet etter en viss tid kunne bli eksponert for brannen. For å ta høyde for slik beskyttet brannenergi, benyttes såkalte beskyttelsefaktorer, ψ_i (SINTEF Byggforsk, 2013b).

Under naturlige brannforhold er forbrenningen normalt ufullstendig. For å ta hensyn til det reduserte energibidraget benyttes forbrenningsfaktoren m . Forbrenningsfaktoren avhenger blant annet av oksygentilgang, materialets tetthet, overflateareal og orientering. Eksempelvis vil treull brenne raskt og tilnærmet fullstendig, mens en massiv tresøyle kun vil brenne

delvis på overflaten før brannen ebber ut på grunn av det beskyttende forkullingslaget (Fontana *et al.*, 2016). Faktoren har en verdi mellom 0 og 1, der 1 betyr fullstendig forbrenning og 0 betyr at det ikke foregår noen forbrenning av materialet. NS-EN 1991-1-2 Tillegg E (Standard Norge, 2008) forslår en forbrenningsfaktor $m = 0,8$ for materialer som hovedsakelig består av cellulose, utover dette bør forbrenningsegenskapene vurderes i forhold til bruken av bygningen og typen materiale.

Tabell 4.2: Faktorene for fare for brannaktivering, δ_{q1} og δ_{q2} (Standard Norge, 2008)

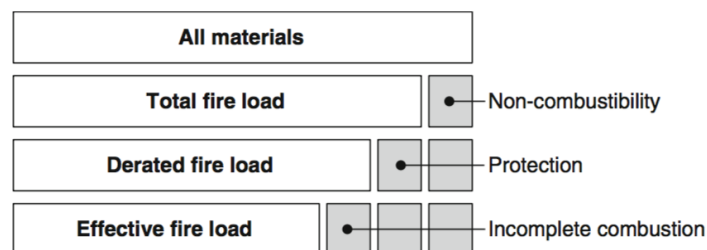
Branncellens gulvareal A_f [m^2]	Fare for brannaktivering δ_{q1}	Fare for brannaktivering δ_{q2}	Eksempler på opphold i bygningen
25	1,10	0,78	Kunstgalleri, museum svømmebasseng
250	1,50	1,00	Kontor, bolig, hotell, papirindustri
2 500	1,90	1,22	Fabrikk for maskiner og motorer
5 000	2,00	1,44	Kjemisk laboratorium, maleverksted
10 000	2,13	1,66	Fabrikk for fyrverkeri eller maling

(a) Faktor δ_{q1}

(b) Faktor δ_{q2}

I henhold til NS-EN 1991-1-2 Tillegg E, skal det ved beregning av brannenergi inkluderes faktorer for brannaktiveringsrisiko. Faktorene tar hensyn til sannsynligheten for antennelse knyttet til størrelsen på branncellen (δ_{q1}) og bruk av branncellen (δ_{q2}), se tabell 4.2. I tillegg oppgis en faktor for aktive brannbekjempelsestiltak, δ_n . Den sistnevnte faktoren tar hensyn til ulike tiltak implementert for å bekjempe en brann, eksempelvis sprinkleranlegg eller brannalarmanlegg. I det norske tillegget til standarden er det derimot angitt at δ_n skal settes lik 1,0.

Ved å skille mellom brennbare og ubrennbare materialer, i tillegg til å ta hensyn til de ulike faktorene for forbrenning, beskyttelse og brannaktivering, kan man beregne den dimen-



Figur 4.1: Oversikt over fastsettelse av brannenergi (Fontana *et al.*, 2016)

sjonerende spesifikke brannenergien i en branncelle (som vist i fig. 4.1). Dimensjonerende spesifikk brannenergi (q_d) blir dermed:

$$q_d = \frac{1}{A} \sum (M_i \cdot H_{ui} \cdot \psi_i) \cdot m \cdot \delta_{q1} \cdot \delta_{q2} \cdot \delta_n \quad [MJ/m^2] \quad (4.2)$$

der

- A er branncellens gulvareal eller omhyllingsflate
- M_i er mengden brennbart materiale [kg]
- H_{ui} er netto brennverdi for materiale i [MJ/kg]
- ψ_i er beskyttelsesfaktor med hensyn til beskyttet brannenergi
- δ_{q1} er faktor for brannaktiveringsrisiko knyttet til branncellens areal
- δ_{q2} er faktor for brannaktiveringsrisiko knyttet til branncellens virksomhet
- δ_n er en funksjon for aktive brannaktiveringstiltak. I Norge settes $\delta_n = 1,0$.

4.3 Metoder for kartlegging av brannenergi

Kartlegging av brannenergien i et byggverk innebærer å identifisere massen og varmeavgivelsen til alle brennbare materialer innenfor de valgte systemgrensene. Brannenergien i et byggverk kan kartlegges ved bruk av ulike metoder. Gjennom litteraturstudiet er følgende metoder identifisert: inventarmetoden, veiningsmetoden, en kombinasjon av inventar- og veiningsmetoden, spørreskjemametoden og nettundersøkelsesmetoden. De fem metodene er beskrevet av blant annet Zalok og Eduful (2013) og Fontana *et al.* (2016).

4.3.1 Inventarmetoden (Inventory method)

Inventarmetoden benytter en visuell registrering og måling av alt brennbart materiale i branncellen som kartlegges. Et elements masse beregnes deretter ut fra volum og identifisert tetthet, eller ved bruk av tabulerte verdier for forhåndsveide gjenstander. Metoden bygger på antagelsen om at det eksisterer et forhold mellom et elements visuelle egenskaper og vekt.

Det er identifisert flere ulemper knyttet til bruk av metoden:

- Bruk av transformeringsfunksjoner som antar at elementer er standardiserte i form av størrelse og materiale

- Ukonsekvent bruk av beskyttelsesfaktor (ψ)
- Bruk av feil tilnærming av ulike og uregelmessig formede gjenstander
- Krever fysisk kartlegging i branncellen

4.3.2 Veiningsmetoden (Weighing method)

Veiningsmetoden innebærer en direkte veiing av alle brennbare elementer i den aktuelle branncellen, og krever derfor en fysisk dokumentering av det brennbare materialet.

Metoden har flere ulemper:

- Tar ikke hensyn til immobile elementer
- Vanskelig å beregne vekten av elementer bestående av både brennbare og ikke-brennbare materialer
- Metoden kan ofte føre til avbrudd/forstyrrelser for brukerne av bygget
- Tidkrevende metode
- Krever utstyr og kan være fysisk krevende for kartleggeren

4.3.3 Kombinasjonsmetoden (Combination method)

Metoden kombinerer bruken av veinings- og inventarmetoden. Veiningsmetoden benyttes på elementer som enkelt kan veies, og inventarmetoden benyttes på immobile og tunge elementer, og på standardiserte gjenstander oppført med forhåndsveide data.

Det er knyttet flere ulemper ved bruk av både veinings- og inventarmetoden isolert sett. Ved å kombinere metodene reduseres enkelte av disse ulempene, men det er fremdeles noen ulemper knyttet til kombinasjonsmetoden:

- Bruken av forhåndsveide data kan føre til unøyaktigheter i resultatene, ettersom gjenstandene ikke nødvendigvis er standardiserte
- Metoden medfører avbrudd i virksomheten og kan være tidkrevende

4.3.4 Spørreskjemametoden (Questionnaire method)

Spørreskjemametoden er basert på indirekte målinger fra brukere i den spesifikke virksomheten. Brukerne registrerer type og mengde brennbart materiale, og fyller det inn i et spørre-

skjema. Brannenergien beregnes deretter basert på tabulerte brennverdier.

Metoden reduserer arbeidsmengden for den som utfører undersøkelsen, i tillegg til å unngå avbrudd i virksomheten som kartlegges. Derimot følger det flere andre ulemper ved metoden:

- Innsamlede data fra spørreskjemaene er vanligvis kvalitative og problematiske å verifisere
- Metoden benytter gjerne standardiserte eller forenklete gjenstander. Dette kan medføre usikkerheter i resultatene

4.3.5 Nettundersøkellesmetoden (Website review method)

Metoden innebærer en gjennomgang av nettstedet for å bestemme brannenergien basert på arkitekttegninger og fotografier. Brannenergien estimeres ut fra visuell bestemmelse av masse og tabulert brennverdi for lignende materialer.

Metoden krever ingen fysisk tilstedeværelse for den som kartlegger, og påvirker i liten grad den virksomheten i bygget som kartlegges. På den annen side medfører metoden noen ulemper:

- Vanskelig å dokumentere den totale brannenergien ettersom bildene kun gir et begrenset innsyn i branncellen
- Usikkerhet tilknyttet resultatene ettersom vekten av alle gjenstandene i branncellen er basert på estimer og antagelser

4.3.6 Oppsummering av metodene

De fem metodene for kartlegging bygger alle på en konvertering av masse til energienheter ved å multiplisere materialenes masse med tilhørende brennverdi. Tabell 4.3 viser en kort oversikt over de fem metodene.

Tabell 4.3: Oppsummering av metodene, modifisert tabell (Zalok og Eduful, 2013)

Metode	Inventar	Veining	Kombinasjon	Spørreskjema	Nettundersøkelse
Tidsbruk	Medium	Lang	Lang	Relativt kort	Kort
Hensyn til permanent brannenergi	Presise verdier fra målte størrelser	Basert på estimater og forutsetninger	Ja	Lite aktuelt	Avhengig av tilgang på prosjekterings-tegninger og spesifikasjoner
Kartleggers verifisering av undersøkelsens resultater	Ja	Ja	Ja	Nei	Nei
Forstyrrelse/ avbrudd i drift	Ja	Ja	Ja	Nei	Nei

4.4 Tidligere analyser av brannenergi

Det siste århundret har det vært gjennomført en rekke analyser av brannenergien i byggverk for ulike typer virksomhet. Særlig fokus har det vært på analyser av boliger, industri og ulike kommersielle virksomheter. I dette litteraturstudiet er det derimot ikke identifisert noen liknende studier av idrettshaller eller hvordan brannenergien varierer med bruken av et byggverk. Videre i kapittelet beskrives derfor to analyser som tar for seg viktige aspekter ved kartlegging av et byggverks brannenergi.

4.4.1 Kartleggingsmetodens betydning

Zalok og Eduful (2013) studerte forskjellen i resultat ved bruk av fire av de fem metodene for kartlegging av brannenergi; spørreskjemametoden, veiningsmetoden, inventarmetoden og kombinasjonsmetoden. For å øke nøyaktigheten i resultatet, sammenlignet med tidligere lignende studier, ble materialene delt inn i fire grupper; papir, tre, plastikk og tekstil. Deretter ble brannenergien beregnet ved å konvertere materialenes masse til energienheter. Studien konkluderte med at kombinasjonsmetoden er den best egnede metoden for kartlegging av brannenergi i kontorbygninger. Ved å benytte kombinasjonsmetoden reduseres usikkerhetene knyttet til bruk av veinings- og inventarmetodene alene. En slik anbefaling samsvarer med prosedyren anbefalt i NFPA Standard 557 (NFPA, 2016).

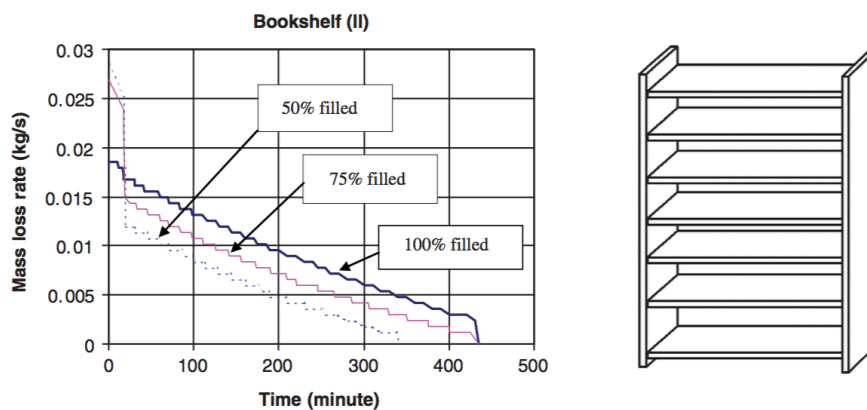
I selve analysen av brannenergien ble resultatene i denne studien tilpasset ved bruk av teorien for ekstremverdi. For beregning og plotting av grafer ble programmet Easy Fit benyttet. Resultatene ble tilpasset ved bruk av Gumbel-, Weibull- og Log-normal fordeling. Statistisk sett gav Gumbel-fordelingen den mest nøyaktige tilpasningen til objektene i datasettet, ba-

sert på Kolmogorov-Smirnov testen.

4.4.2 Betydningen av en gjenstands geometri og overflateareal

H. W. Yii (2000) studerte hvilken effekt en gjenstands overflateareal og tykkelse har på brannlasten. Studien tok for seg en kartlegging av brennbart materiale og analyse av et utvalg arbeidsrom på universitet, kontor, rom på hotell og soverom i leiligheter.

I den innledende litteraturstudien av lignende studier ble det funnet at de aller fleste tidligere analyser benyttet antagelsen om treekvivalenter. En slik antagelse gikk ut på at total brannbelastning ble uttrykket i massen av treekvivalenter med en brennverdi mellom 15 og 20 MJ/kg. Dersom det var andre typer brensel i det analyserte området, slik som ulike termoplaster, ble deres masse konvertert til en tilsvarende masse av tre. Dette resulterte i en analysemetode som åpenbart er veldig grov, og ikke tar hensyn til de ulike materialenes atferd i en brann. H. W. Yii (2000) differensierte derfor mellom følgende grupper av materialer: tre, plast, glass, metall og elektriske komponenter. Videre ble det antatt at plastmaterialet enten var av polyuretan eller polypropylen, og det ble kun benyttet spesifikke brennverdier og densiteter for disse to typene plastmaterialer, i tillegg til en gjennomsnittlig verdi for materialer av tre.



Figur 4.2: Forbrenningshastighet som funksjon av tilgjengelig overflateareal (Yii, Buchanan og Fleischmann, 2006)

Som nevnt studerte H. W. Yii (2000) hvilken betydning overflateareal og geometri har på brannlasten. Figur 4.2 viser hvordan variasjon av overflateareal påvirker forbrenningshastigheten til en bokhylle. Slik figuren viser, er massetapshastigheten størst for bokhyllen som kun er 50 % fylt. Dette kan forklares med at en halvfylt bokhylle har mer eksponert overflateareal enn en bokhylle som er 75 % eller 100 % fylt. Fallet ved omtrent 18 minutter i figuren skyldes at de tynnere delene av bokhyllen brenner raskere enn de tykke, ettersom treet varmes

opp hurtigere ved små tverrsnitt. Den lavere hastigheten etter fallet skyldes lengre utbrenningsrate for de tykkere delene av tverrsnittet, der bøkene plassert i hyllen bidrar til å gjøre tverrsnittet tykkere.

Studien konkluderte med at det er en tydelig korrelasjon mellom varmeavgivelsesrate og overflateareal. I tillegg ble det lagt vekt på at det i større grad er nødvendig å skille mellom ulike plastmaterialer og deres densitet og brennverdi, for å øke nøyaktigheten i resultatene.

5 | Forbrenning av ulike materialer

Med hensyn til brannsikkerhet deles gjerne materialer og produkter inn etter om de er ubrennbare eller brennbare, i tillegg til grad av brennbarhet. Brennbare produkter defineres som i stand til å bli antent og brenne, mens ubrennbare produkter ikke er i stand til å brenne under gitte forhold (Standard Norge, 2017). Typiske eksempler på slike materialer og produkter er:

- **Ubrennbare:** betong, stål, stein, glass, aluminium, gips, mineralull
- **Brennbare:** plast, tre og trebaserte produkter, cellulosefiber, naturfiber

De fleste branner involverer brennbare faste stoffer, men også væsker og gasser kan være brennbare under passende forhold (Drysdale, 2011). Den delen av en flamme som er synlig for det menneskelige øyet, er et fenomen knyttet til selve gassfasen av et materiale. For at materialer i væskefase og faste stoffer skal kunne brenne, må de gjennomgå en omdanning til gassfase. For brennende væsker vil dette i hovedsak innebære en fordamping av væsken til gassfase. Faste stoffer må derimot gjennomgå en kjemisk nedbryting eller pyrolyse, slik at flyktige gasser frigitt fra materialets overflate kan brenne. Brensler i disse tre fasene vil kunne brenne under passende forhold, reagere med oksygen fra luften, generere forbrenningsprodukter og frigjøre varme. Hvordan de ulike materialene i et byggverk oppfører seg i en brann, avhenger i stor grad av materialets oppbygging. Videre i dette kapitlet gis en presentasjon av hvordan cellulosebaserte materialer og plastmaterialer oppfører seg i brann.

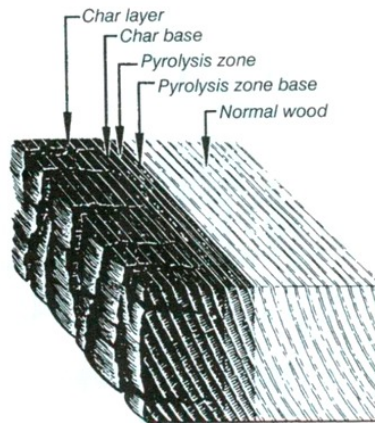
5.1 Tre som brensel

Tre har lenge vært et foretrukket konstruksjonsmateriale på grunn av dets gode stivhet, styrke i forhold til vekt, enkelhet ved bruk og tilgjengelighet i markedet (Östman, 2010). Tre er som kjent et brennbart materiale, og det er derfor viktig å ha kjennskap til hvordan materialet oppfører seg i en brann.

5.1.1 Treets egenskaper ved brann

Tre er et inhomogent og anisotrop materiale, og består primært av cellulose, hemicellulose og lignin (Drysdale, 2011). Treverk gjennomgår en termisk nedbrytning, pyrolyse, når det blir utsatt for høye temperaturer. Pyrolyse er en irreversibel dekomposisjon av et organisk materiale, og under pyrolysen brytes treverket ned til kull, tjære og flyktige gasser som forbrennes ved å reagere med oksygen. De flyktige gassene og tjæren brenner med synlige flammer mens kullaget gjennomgår en ulmebrann.

Ved en temperaturøkning vil først vanninnholdet i treverket fordampe ved temperatur lik 100 °C. Ved temperaturer rundt 160-180 °C starter nedbrytingen av treverket, pyrolysen. Overgangen mellom friskt og forkullet trevirke er relativt markant (se fig. 5.1), og har en temperatur på ca 300 °C. Forkullingslaget består i hovedsak av karbonrike forbindelser, og er rester etter forbrenningen av cellulose. Selve forkullingslaget er porøst, og innehar tilnærmet ingen mekanisk styrke. Forkullingslaget har lavere varmekonduktivitet enn friskt treverk, og fungerer som et isolerende beskyttelseslag mellom den eksponerte overflaten og pyrolysesonen.



Figur 5.1: Forkullings- og pyrolyselag i en trebjelke (Buchanan, 2017)

5.1.2 Densitet

Trevirke er bygd opp av langstrakte celler, der celleveggene består av cellulose og lignin. Celleveggene gir trevirket styrke, og cellenes utforming har stor betydning for trevirkets egenskaper (SINTEF Byggforsk, 2015). Cellestrukturen og forholdet mellom celleveggandel og hulromandel varierer mye mellom forskjellige treslag, og medfører stor spredning i densitet blant de ulike treslagene. Blant annet har eik en densitet på 690 kg/m³, mens gran har en densitet på 520 kg/m³.

5.1.3 Forbrenningsvarme

Et materiales forbrenningsvarme er som tidligere nevnt den varmemengden som frigis ved fullstendig forbrenning av en masseenhet, med benevnelse MJ/kg. Ved beregning av bran-energi benyttes materialenes netto forbrenningsvarme. Denne verdien tar hensyn til energien som går med til oppvarming og fordamping av vannet i materialet. Verdien blir lavere enn brennverdien for et helt tørt materiale, ettersom den varmemengden som er nødvendig til å fordampe vannet, er trukket fra (SINTEF Byggforsk, 2013b).

Brennverdien for tre varierer med omdannelsen av karbon til kull gjennom hele pyrolyseperioden. I tidlig fase av en brann, når flammene er synlige, er netto brennverdi typisk i området 17-20 MJ/kg (H. W. Yii, 2000). Etter at flammene opphører, øker brennverdien til ca 30 MJ/kg, som er brennverdien til kull (Standard Norge, 2008).

Selv om brennverdien for treverk varierer, er det vanlig å benytte konstante verdier ved beregninger. Ved brannsikkerhetsbetraktninger er fokuset normalt på tidlig fase og flammeprioden. Netto brennverdi antas derfor som en konstant verdi i området 17-20 MJ/kg, avhengig av typen treslag.

5.2 Plastmaterialer

I *Store norske leksikon* defineres plast som syntetiske materialer bestående av en eller flere polymerer og forskjellige tilsetningsstoffer (Ore og Stori, 2018). Plast er ikke bare ett materiale, men en samlebetegnelse for mange forskjellige materialer med ulike oppbygninger og egenskaper. Plast er lett å forme, og benyttes derfor til en rekke ulike formål. Eksempelvis tekstiler, leker, emballasje og bygningsmaterialer.

Generelt klassifiserer polymerer og plasmaterialer etter bindingsstruktur, og deles i hovedsak inn tre klasser; herdeplast, termoplast og elastomerer (Drysdale, 2011). Termoplast kjennetegnes ved at den gjentatte ganger kan omformes ved å varmes opp, og har en tendens til å smelte eller mykne under en brann. Herdeplast får derimot endelig form når plasten er herdet, og brenner ved at materialet pyrolyseres og genererer flyktige gasser. Den siste gruppen, elastomerer, er svært elastiske og skiller seg tydelig fra de to andre hovedtypene plast.

Herdeplast er støpt i en prosess kalt kjemisk herding, der polymerkjedene blir hengende sammen i en fast, kryssbundet struktur. Graden av kryssbindinger har stor effekt på materialets egenskaper, og gjør at herdeplasten ikke kan mykes opp ved varme eller smeltes om. Denne typen plast har generelt høy tetthet, og er stive og skjøre. Herdeplast smelter ikke før den dekomponerer, og drypper generelt ikke. Polyestere er et eksempel på herdeplast.

Termoplast består av lineære eller forgreinede polymerer. Denne typen plast stivner når de avkjøles, men har den egenskapen at de kan varmes opp og formes på nytt. Termoplastiske brensler skiller seg fra brensler av tre og herdeplaster, ettersom de generelt ikke forkulles ved brann, men heller har en tendens til å smelte og brenne som en væskedam. Termoplast kan generelt deles inn etter om de har amorfe eller krystallinske egenskaper (Witkowski, Stec og Hull, 2016). Amorfe materialer smelter ikke, men blir gradvis mykere ved oppvarming. I tillegg kan amorfe termoplaster gjenkjennes ved at de generelt er transparente. Eksempler på amorfe termoplaster er blant annet PMMA (polymetylmetakrylat), PVC (polyvinylklorid)

og PC (polykarbonat). Krystallinske termoplaster har derimot en tendens til å smelte og flyte ved smeltepunktet. Denne typen plast kan eksempelvis være PA (polyamid/nylon) eller PE (polyetylen). Termoplast brukes blant annet til å produsere drikkeholdere, bæreposer, bøtter etc.

Elastomerer kan lages av både termoplast og herdeplast. Dette er svært elastiske materialer, som for eksempel gummi eller polyuretan. I likhet med herdeplast er elastomerer kryssbundet, men med en lav tetthet av kryssbindinger. De branntekniske egenskapene til elastomerer avhenger av den kjemiske strukturen. Når de eksponeres for en tennkilde vil de generelt mykne og smelte, produsere svart røyk og forkulle. De termiske og branntekniske egenskapene kan derimot forbedres ved tilsetning av ulike flammehemmere.

5.2.1 Vanlige plastmaterialer og deres branntekniske egenskaper

Under følger en oversikt over noen vanlige polymerer og deres egenskaper, brukt mye til idrettsutstyr og byggevarer. Informasjonen om de ulike plastmaterialenes egenskaper ved brann er i stor grad hentet fra en rapport om brannsikkerhet ved plast i byggvarer, utarbeidet av Sintef (Steen-Hansen, Reitan og Andersson, 2013). Det er viktig å understreke at egenskapene til et materiale i stor grad kan variere ut fra sammensetning og eventuelle tilsetningsstoffer. Med hensyn til brannsikkerhet er det derfor viktig å vurdere det ferdige produktet som helhet, og ikke bare egenskapene til basismaterialet.

Polyetylen (PE)

Polyetylen (PE) er en svært anvendelig krystallinsk termoplast. Polymeren finnes med både lav tetthet (LDPE), medium tetthet (MDPE) og høy tetthet (HDPE), og har dermed et stort bruksområde både til innendørs- og utendørs bruk. LDPE er mykt, fleksibelt og transparent, og benyttes blant annet til plastfolier og plastposer. HDPE er fastere, og benyttes blant annet mye i rør, plastflasker og leker.

PE er antenneelig og fortsetter å brenne med en lysende gul flamme med blå kjerne etter at tennkilden er fjernet. Brennende PE lukter stearin/parafin, og materialet svulmer opp og drypper.

Polypropylen (PP)

Polypropylen (PP) likner HDPE, men er noe hardere. Polymeren har lave produksjonskostnader og er lett å bearbeide. PP benyttes blant annet til rør i hus, gulvbelegg, og i tekstiler.

PP er antenkelig, og forsetter å brenne med en lys gul flamme med blå kjerne etter at tennkilden er fjernet. Materialet brenner godt i luft, svulmer opp, smelter og drypper, og produserer lite sot.

Polystyren (PS)

Polystyren (PS) er en amorf termoplast, og har ingen definert smeltepunkt. PS brukes blant annet i bygningsisolasjon til å produsere ekspandert PS (EPS) og ekstrudert PS (XPS).

Materialet fortsetter å brenne med en sterkt sotende, gul flamme, etter at tennkilden fjernes. PS smelter, drypper og renner ved brann.

Polyvinylklorid (PVC)

Polyvinylklorid (PVC) er en svært allsidig termoplast, og produseres med stor variasjon i mykhet. Ved bruk av ulike tilsetningsstoffer kan materialet benyttes både i myk, fast og skummet tilstand. Fleksibel PVC (vinyl) er mye anvendt i bygninger, og brukes for eksempel i tapet og kabelisolasjon, mens fast PVC brukes i vannrør, gulvmaterialer, utendørs kledning osv. PVC-skum er mye brukt til termisk isolering, og benyttes blant annet i møbler.

Både fast og fleksibel PVC har flammehemmende egenskaper, brenner dårlig ved eksponering for små flammer, og forkuller. I tillegg produserer brennende PVC giftige gasser og røyk.

Polyester

Polyester er en termoplast med stor variasjon i bruk. Den benyttes i alt fra forskjellige elektriske og tekniske installasjoner, til tekstilfiber. Blant polyesterfamilien er særlig polyetylenetereftalat (PET) kjent, og er ofte benyttet i elektriske installasjoner og brusflasker.

Polyester er lettantenkelig og avgir mye røyk, men kan tilsettes flammehemmere. PET brenner med en gul, rykende flamme, men slukner når tennkilden fjernes.

Polyuretan (PU)

Polyuretan (PU) representerer en viktig klasse av polymerer og elastomerer med et bredt spekter av anvendelsesområder og egenskaper. Som faste stoffer har de blitt benyttet i alt fra hjul på rulleskøyer, til plastslanger og overflatebelegg. I varmeisolasjonsprodukter i bygninger benyttes ofte PU som stivt skum, PUR. Som fleksible skum (PUF) er de veldig mye brukt i polstrede møbler og teppeunderlag.

PU er lett antennelig og brenner med en klar, gul flamme etter at tennkilden fjernes. Materialet avgir en stikkende lukt når det brenner, og kan dryppe med brennende dråper.

Oppsummering av vanlige plastmaterialers branntekniske egenskaper og bruksområder

Som vist ovenfor ligner flere av de vanlige plastmaterialene på hverandre, både i bruksområde og i branntekniske egenskaper. Det kan med andre ord være utfordrende å bestemme nøyaktig hvilke plastmateriale en gjenstand er laget av. Tabell 5.1 viser en oppsummering av de ovennevnte plastmaterialens bruksområder og gruppetilhørighet.

Tabell 5.1: Plasttyper og bruksområder, modifisert tabell (Andersen, 2006)

Navn	Bruksområde	Gruppe-tilhørighet
Polyetylentereftalat (PET)	Klær, drikkeembalasje,	Termoplast Polyester
Polyetylen - høy tetthet (HDPE)	Flasker, kanner, bøtter, kasser, leker, bæreposer, rør, ledningsisolasjon	Termoplast Polyester Polyolefin
Polyetylen - lav tetthet (LDPE)	Bæreposer, plastfolie, krympefolie, landbruksfolie	Termoplast Polyester Polyolefin
Polyvinylklorid (PVC)	Rør, profiler, plastslanger, gulvbelegg, regntøy, leker, vinduskarmer, ledninger, skillevegger i idrettshaller	Termoplast Vinylklorid
Polypropylen (PP)	Bokser, spann, lokk/kapsler, vevde storsekker til gjødsel og lignende, tepper og tauverk, bildeler, engangsbestikk og -glass, isolerende tekstiler, møbler, leker	Termoplast Polyester Polyolefin
Polystyren (PS)	Rømmebegre, plantebrett, elektriske produkter, leker, isopor, engangskopper, bygningsisolasjon	Termoplast
Polyester	Tekstiler, elektriske installasjoner	Termoplast

5.3 Bruk av flammehemmere

For å hindre eller begrense omfanget av brann, er det i dag vanlig å benytte flammehemmere som tilsetningsstoff i flere ulike materialer og produkter. Blant annet benyttes flammehemmere i stor grad i ulike typer polymermaterialer, i tillegg til ulike tekstiler og produkter av tre. Flammehemmere er kjemikalier som tilsettes for å redusere risikoen for antennelse, og videre hindre eller forsinke brannutvikling (Steen-Hansen, Steinbakk og Storesund, 2012).

Flammehemmingen virker fysisk som en barriere mellom flamme og brennbart materiale, eller kjemisk ved å begrense oksygentilgangen til brannen.

Egenskapene som kan forbedres ved å tilsette brannhemmende midler er antennelighet, flammespredningshastighet, røykavgivelse, varmeavgivelse og termoplasters evne til å dryppe. Selve brannenergien påvirkes ikke av å tilsette flammehemmende kjemikalier. Materialet vil fremdeles ha potensiale til å frigjøre like mye energi. Det vil derfor ikke tas videre hensyn til flammehemmere i analysedelen av denne oppgaven, ettersom analysen forutsetter en fullt utviklet brann.

6 | Kartlegging av idrettshaller

Det har blitt gjennomført en kartlegging av ti ulike flerbrukshaller for å kunne si noe om brannenergien i denne typen byggverk. Dette kapittelet omhandler metoden og prosedyren som er benyttet, hvordan analyseobjektene har blitt valgt ut, hvilke begrensninger og antagelser som har vært nødvendig å definere, beregningsresultat og en diskusjon av usikkerhetene knyttet til kartlegging og beregningen.

6.1 Valg av analyseobjekter og utvalgsstørrelse

Idrettshallene benyttet i analysen ble tilfeldig valgt, men er alle lokalisert i Trondheimsområdet. To av hallene er privateid. De resterende ni hallene er eid av enten kommune eller fylkeskommune, og er tilknyttet skoler i Trøndelag. Befaringene i idrettshallene ble gjennomført i perioden februar-april 2018.

Til sammen ble elleve haller befart. Av disse var det én idrettshall som ikke tilfredsstilte mine krav/kravene til dokumentasjon for byggverket. Denne ble derfor utelatt fra analysen. Datagrunnlaget i analysen består derfor av innhentet data fra de ti hallene som tilfredsstilte kravene til dokumentasjon.

Hvor stort et utvalg bør være for at et resultat skal kunne generaliseres, avhenger av hvor stor usikkerhet som tillates. Utvalgsstørrelse og usikkerhet har en negativ sammenheng, og i sannsynlighetsteorien er en mye brukt tommelfingerregel et utvalg på 32. Dette basert på basert på antallet forsøk som er nødvendig før man med rimelighet kan forvente at en analyse basert på normalfordeling skal være gyldig (Belle, 1998). Som følge av begrenset tid og ressurser, har utvalget benyttet i denne oppgaven blitt begrenset til data innhentet fra ti tilfeldige haller i Trondheimsområdet.

6.2 Kartleggingsmetode

Kartleggingen av brennbart materiale i idrettshallene ble utført ved bruk av kombinasjonsmetoden. Denne metoden kombinerer veinings- og inventarmetoden, der elementenes masse enten veies, beregnes ut fra dets volum og materialeegenskaper, eller ved bruk av produktkataloger (se kap. 4.3.3). Ved å benytte kombinasjonsmetoden kan de fleste gjenstander og elementers masse identifiseres, både permanente og variable. Metoden kombinerer best praksis fra både veinings- og inventarmetoden ved at antall antagelser ved hver av de to me-

todene kan reduseres. Kombinasjonsmetoden er tidkrevende, men vil føre til mer nøyaktige resultater sammenlignet med enklere metoder slik som spørreskjemametoden eller nettundersøkelsesmetoden (se kap. 4.3).



Figur 6.1: Utstyret benyttet på befaringene

I praksis ble veiningsmetoden benyttet på mindre og lettere gjenstander som var mulig å veie ved bruk av en enkel bad- eller kjøkkenvekt. Inventarmetoden ble benyttet på tyngre og/eller immobile elementer, både ved bruk av informasjon fra produktdatablader og ved å måle gjenstandenes dimensjoner med meterstokk. Figur 6.1 viser utstyret som ble benyttet ved befaringene. Flere gjenstander bestod av både brennbare og ikke-brennbare materialer. For denne typen gjenstander ble det gjort et individuelt anslag av hvor stor andel av elementet som var brennbart.

6.3 Prosedyre

Befaringene ble gjennomført i to steg:

1. **Innhenting av nødvendig informasjon.** Ut fra byggverkens FDV-dokumentasjon ble det innhentet nødvendig informasjon om byggverkens inndeling i brannceller, oppbygning av gulv-, tak- og veggkonstruksjoner, produktspesifikasjoner for ulike immobile elementer som for eksempel heisevegger, og branncellens utforming og dimensjoner. All FDV-dokumentasjon ble hentet inn med tillatelse fra driftspersonalet ved de respektive byggverkene.
2. **Kartlegging av brennbart materiale ved bruk av kombinasjonsmetoden.** All data ble registrert i egne skjema i Microsoft Excel (som vist i vedleggene A og B), og utarbeidet i forkant av befaringene. Under datainnsamlingen ble det skilt mellom permanente og variable elementer. Veiing av gjenstander ble utført ved bruk av kjøkken- eller bade-

vekt. Små og lette gjenstander ble veid på kjøkkenvekt ved å direkte lese av vekten, eksempelvis erteposer. Større gjenstander ble veid ved først å veie meg selv med gjenstanden i armene, deretter veie kun meg selv, og til slutt trekke fra min egen vekt. Gjenstander som var for store, tunge eller for u håndterlige til å bli veid, ble målt ved bruk av meterstokk for å finne gjenstandens volum, eksempelvis tjukkaser eller ribbevegger.

6.4 Beregning av flerbrukshallenes brannenergi

Brannenergien ble beregnet i Microsoft Excel ut fra de innsamlede data fra befaringsene i flerbrukshallene. Beregningen av brannenergi ble utført etter prosedyren beskrevet i kapittel 4.2, og er basert på en konvertering av masse (kg) til energienheter (MJ) ved bruk av materialets tilhørende brennverdi.

Som vist i kapittel 5 er det krevende å skille mellom de ulike typende treverk, plast, tekstiler osv. Som en forenkling ble gjenstandene derfor kategorisert som enten cellulosebaserte materialer (papir, papp og treverk), tekstiler (ull, bomull, nylon, polyester), skumprodukter, hard plast og myk plast. I denne sammenheng anses myk plast som gjenstander med en elastisk eller myk form, eksempelvis plastikkposer eller idrettsgulv av polyuretan. Hard plast er derimot stiv og uelastisk i romtemperatur, eksempelvis plastkasser eller innebandykøller. Tabell 6.1 viser brennverdiene for de ulike kategoriene, og er hentet fra vedlegg C. Verdiene i tabellen er basert på verdier hentet fra følgende kilder; Standard Norge (2008), Drysdale (2011), Khan, Tewarson og Chaos (2016), Walters, Hackett og Lyon (2000), Thomas (1986) og Zalok (2011). Som et konservativt anslag ble maksimumsverdiene benyttet i beregningene.

Tabell 6.1: Ulike materials brennverdi

Materiale	Minimum MJ/kg	Gjennomsnitt MJ/kg	Maksimum MJ/kg
Tre	17,0	18,5	20,0
Tekstiler	17,0	25,0	32,0
Skumprodukter	22,2	25,6	28,0
Myk plast	16,4	20,0	23,2
Hard plast	39,2	42,1	46,5

Inventarmetoden ble, som nevnt ovenfor, benyttet på de gjenstander og elementer som ikke enkelt kunne veies. Gjenstandenes vekt ble beregnet ved å multiplisere gjenstandens volum med dens densitet. Som en forenkling ble gjenstandene gruppert på samme måte som beskrevet ovenfor for brennverdier. I tillegg ble det benyttet verdier for tetthet av papir og papp, ettersom tettheten for disse er noe lavere enn den gjennomsnittlige tettheten antatt for materiale av tre. Tabell 6.2 viser en oversikt over densiteten til de ulike materialene.

Tabell 6.2: Ulike materialers densitet

Materialer	Tetthet
Papir	450 kg/m ³ eller 0,5 kg/m ²
Tre	500 kg/m ³
Plastikk	Polyuretan - 1200 kg/m ³ PVC i heisevegger - 0,7 kg/m ²
Tekstiler	Nylonnett (stormasket) - 0,4 kg/m ²

I samsvar med anbefalinger gitt i NS-EN 1991-1-2, Tillegg E, er forbrenningsfaktoren m satt til 0,8 for materialer som hovedsakelig består av cellulose. For resterende materialer er det valgt å benytte $m = 1,0$, som er en konservativ antagelse.

Brannaktiveringsfaktorene, δ_{q1} og δ_{q2} , er bestemt i samsvar med de verdier gitt i tabell 4.2. Faktoren δ_{q1} er basert på branncellens størrelse. I beregningene er det valgt å interpolere mellom de oppgitte verdiene i tabell 4.2, og faktoren varierer derfor for de ti kartlagte hallene. Faktoren er angitt i en logaritmisk skala, og interpoleringen er derfor også foretatt logaritmisk. Brannaktiveringsfaktoren δ_{q2} tar hensyn til typen bruk av en branncelle. I beregningene er det valgt å benytte $\delta_{q2} = 0,78$ for alle flerbrukshallene, tilsvarende som for eksempel kunstgallerier, museum og svømmebasseng. Faktorene benyttet i de respektive hallene er vist i tabell 6.3.

I beregningene er det valgt å sette faktoren for beskyttet brannenergi, ψ , lik 1,0 i alle tilfeller. Dette er et konservativt anslag valgt for å gjøre beregningene enklere å gjennomføre. I praksis vil en individuell vurdering i hvert tilfelle føre til mer eksakte verdier, og i dette tilfellet til lavere verdier for branncellenes brannenergi.

Tabell 6.3: Faktorene for brannaktiveringsrisiko benyttet i hallene, δ_{q1} , δ_{q2} og δ_n

Idrettshall	Gulvareal	Faktor δ_{q1}	Faktor δ_{q2}	Faktor δ_n
Byåsenhallen	1824	1,839	0,78	1,0
Charlottenlund vgs idrettshall	1285	1,775	0,78	1,0
Heimdalshallen	1309	1,778	0,78	1,0
Munkvollhallen	1535	1,807	0,78	1,0
Rosenborghallen	1205	1,763	0,78	1,0
Strindahallen	1325	1,780	0,78	1,0
Thora Storm idrettshall	907	1,712	0,78	1,0
Utleirahallen	2457	1,897	0,78	1,0
Åsheimhallen	1176	1,758	0,78	1,0
Åsveihallen	1500	1,803	0,78	1,0

Resultatene fra beregningen av brannenergien for de ulike hallene er vist i kapittel 6.6. Den spesifikke karakteristiske brannenergien for flerbrukshallene følger Gumbel-fordeling, og ble beregnet ved bruk av programmet EasyFit 5.6 Professional.

6.5 Antagelser og begrensninger

Undersøkelsen er begrenset til å omfatte den branncellen selve idrettshallen er en del av. Denne branncellen består i hovedsak av selve aktivitetsflaten, tribune og sekretariat, i tillegg til materialrom/lager, garderober og renholdsrom.

For å gjennomføre brannenergiberegningene har det vært nødvendig å gjøre følgende for-
enklinger og antagelser:

- De brennbare materialene er uniformt fordelt i branncellen.
- Alle brennbare materialer i branncellen er involvert i brannen, og vil gjennomgå en fullstendig forbrenning. Med unntagelse av cellulosebaserte materialer, der m er satt til 0,8 etter anbefalinger gitt i NS-EN 1991-1-2.
- Alle cellulosebaserte materialer antas å ha lik tetthet og brennverdi, med andre ord ingen skille mellom ulike typer trematerialer.
- Materialenes brennverdi er konstant gjennom hele flammeperioden. Beregningene tar ikke hensyn til effekter som skyldes forkulling, altså isolerende effekter.
- Plastmaterialene har blitt kategorisert som enten myk eller hard plast, med unntak av plastmaterialer som benyttes i tekstiler. Brennverdien for de tre kategoriene er basert på faktiske brennverdier for de plastmaterialer som tilhører hver av kategoriene.
- Beregningene er for enkelhets skyld basert på at overtenning i branncellen inntreffer.

6.6 Beregningsresultat og analyse

De innhentede data om variabel og permanent brannlast i flerbrukshallene har blitt benyttet til å beregne brannenergien i de ti hallene. Resultatet av beregningene er vist i tabell 6.1. Tabellen gir en oversikt over variabel, permanent og karakteristisk spesifikk brannenergi gitt per gulvareal, slik at de kan sammenlignes med verdiene gitt for andre virksomheter i byggforskblad 321.051 om brannenergi i bygninger og NS-EN 1991-1-2 Tillegg E. I tillegg er den dimensjonerende spesifikke brannenergien gitt både per gulvareal og per omhyllingsflate.

Forskjellen mellom karakteristisk og dimensjonerende spesifikk brannenergi er at den sistnevnte er korrigert for faktorene for forbrenning, brannaktivering og beskyttelse av materialet. Verdiene for dimensjonerende spesifikk brannenergi er derfor høyere enn de for karakteristisk brannenergi.

Slik tabell 6.4 viser, utgjør den permanente brannlasten det største bidraget til brannenergien i samtlige av de ti hallene. Det er imidlertid stor spredning i resultatet, der den permanente brannenergien per gulvareal varierer fra 418,96 MJ/m² i Thora Storm Idrettshall til 1211,35 MJ/m² i Åsveihallen. Åsveihallen er óg den flerbrukshallen med høyest dimensjonerende spesifikk brannenergi. Dette skyldes at hallen delvis var oppført med tunge trekonstruksjoner i vegger og tak, som i denne sammenhengen utgjør et stort bidrag til den permanente brannenergien.

Ved en sammenligning av variabel og permanent brannenergi, ble det ikke identifisert noen sammenheng mellom disse to verdiene. Derimot er det en tydelig sammenheng mellom bruken av tre og brennbare materialer i vegger og tak, og den permanente brannenergien. Samtlige flerbrukshaller var oppført med spilepanel på en eller flere innvendige vegger. I tillegg var både Utleirahallen og Heimdalshallen oppført med tribune i treverk, som utgjør en betydelig andel av den permanente brannenergien i hallene.

Brannlasten innenfor en branncelle består som oftest av flere ulike typer materialer. Tabell 6.5 viser fordelingen av de ulike materialenes bidrag til brannbelastning i flerbrukshallen på Byåsen videregående skole. Cellulosebaserte materialer (tre og papir) utgjør den største andelen av brennbart materiale med hele 77,3 % av det totalte bidraget. Plast utgjør til sammen 20,4 %, hvorav 13,2 % er hard plast og 7,2 % er myk plast. Tekstiler (bager, klær, sikkerhetsnett, klatretau, osv.) utgjør 1,6 % av materialenes totale bidrag til brannbelastning i flerbrukshallen. Tabellen viser i tillegg fordelingen mellom permanent og variabel brannlast for de ulike materialene. Den variable brannlasten domineres av hard plast, mens den permanente brannlasten i hovedsak består av tre.

Tabell 6.4: Areal, variabel og permanent brannenergi per gulvareal, karakteristisk spesifikk brannenergi ($q_{f,k}$) og dimensjonerende spesifikk brannenergi ($q_{f,d}$ og $q_{t,d}$) i de 10 hallene

Idrettshall	Gulvareal (m ²)	Omhyllingsflate (m ²)	Variabel brannenergi per gulvareal (MJ/m ²)	Permanent brannenergi per gulvareal (MJ/m ²)	Karakteristisk		Dimensjonerende	
					spesifikk brannenergi, $q_{f,k}$ (MJ/m ²)	spesifikk brannenergi, $q_{f,d}$ (MJ/m ²)	spesifikk brannenergi, $q_{t,d}$ (MJ/m ²)	spesifikk brannenergi, $q_{t,d}$ (MJ/m ²)
Byåsenhallen	1824	4341	133,49	464,26	597,75	724,85	304,57	
Charlottenlund vgs idrettshall	1285	3731	83,22	496,33	579,55	682,69	235,12	
Heimdalshallen	1309	2984	22,37	895,27	917,64	1101,07	483,27	
Munkvollhallen	1535	4075	62,49	438,51	501,00	581,13	218,92	
Rosenborghallen	1205	3419	9,27	431,84	441,11	481,67	169,85	
Strindahallen	1325	4008	65,09	724,78	789,87	987,08	326,44	
Thora Storm Idrettshall	907	2818	123,12	418,96	542,08	647,45	208,50	
Utleirahallen	2457	6625	48,05	529,29	577,34	715,40	265,39	
Åsheimhallen	1176	3419	63,16	653,06	716,22	866,44	305,14	
Åsveihallen	1500	4140	72,17	1211,35	1283,52	1502,22	544,71	

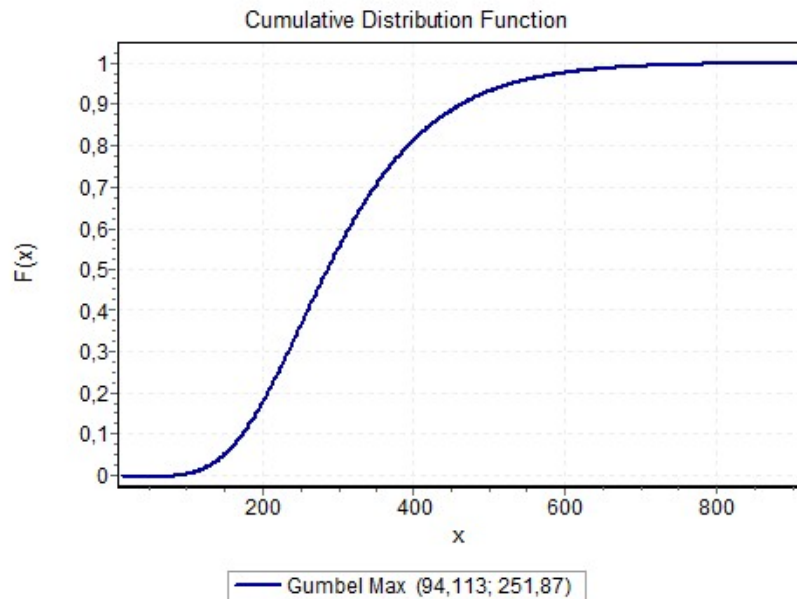
Tabell 6.5: De ulike materialenes bidrag til brannbelastning i Byåsen vgs idrettshall

Materiale	Enhet	Gjennomsnitt			Prosentandel
		V *	P *	T *	
Tre	kg	3710,0	38427,5	42137,5	77,3 %
	MJ	74316,0	768550,6	842866,6	
	MJ/m ²	19,6	203,2	222,2	
Tekstil	kg	533,9		533,9	1,6 %
	MJ	17084,8		17084,8	
	MJ/m ²	5,6		5,6	
Myk plast	kg	20,8	3369,9	3390,7	7,2 %
	MJ	483,0	78249,1	78732,1	
	MJ/m ²	0,2	25,9	26,0	
Hard plast	kg	3089,1		3089,1	13,2
	MJ	143643,2		143643,2	
	MJ/m ²	47,5		47,5	
Skum	kg	284,4		284,4	0,7 %
	MJ	7963,2		7963,2	
	MJ/m ²	2,6		2,6	
Total brensel- og brannbelastning	kg	7638,2	41797,4	49435,6	100 %
	MJ	243490,2	846799,7	1090289,8	
	MJ/m ²	75,6	229,0	304,6	

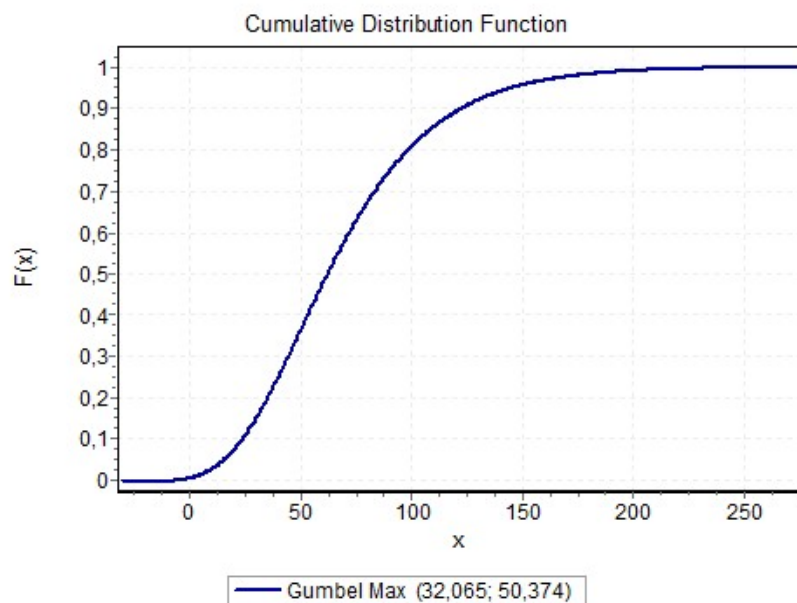
V = variabel brannlast, P* = permanent brannlast, T* = total brannlast*

Verdier for spesifikk brannenergi oppgis i NS-EN 1991-1-2 Tillegg E som 80 %-fraktiler ved Gumbel-fordeling. Gumbel-fordeling er en type ekstremverdifordeling, og en 80 %-fraktil betyr dermed at verdiene forventes å ikke bli overskredet i løpet av 80% av bygningens eller lokalets brukstid (SINTEF Byggforsk, 2013b). For mer informasjon om det matematiske aspektet, se kapittel 2.2.2. Gumbel-fordelingen ble i denne oppgaven beregnet ved bruk av programmet EasyFit, og resultatet er vist i figur 6.2 og 6.3, for henholdsvis spesifikk karakteristisk brannenergi og variabel karakteristisk brannenergi for flerbrukshallene.

Tabell 6.6 viser minimums, maksimums, gjennomsnitt, standardavvik og 80 %-fraktil for både den variable brannenergien og den totale brannenergien beregnet i analysen. Slik tabellen viser er den dimensjonerende spesifikke brannenergien for flerbrukshaller ved bruk av 80 %-fraktilen beregnet til 393,030 MJ/m² per omhyllingsflate. Denne verdien inkluderer både variabel og permanent brannenergi. Den variable brannenergien er gitt per gulvareal, og er ved Gumbel-fordeling beregnet til 96,176 MJ/m². Til sammenligning er den variable brannenergien relatert til gulvareal betydelig mindre enn de virksomheter oppgitt i tabell 4.1 hentet fra NS-EN 1991-1-2. Her er eksempelvis kino oppgitt med en variabel brannenergi lik 365 MJ/m² ved 80 %-fraktilen, og transport (offentlig område) oppgitt til 122 MJ/m².



Figur 6.2: Kumulativ Gumbel-fordeling for dimensjonerende spesifikk brannenergi per omhyllingsflate for flerbrukshallene



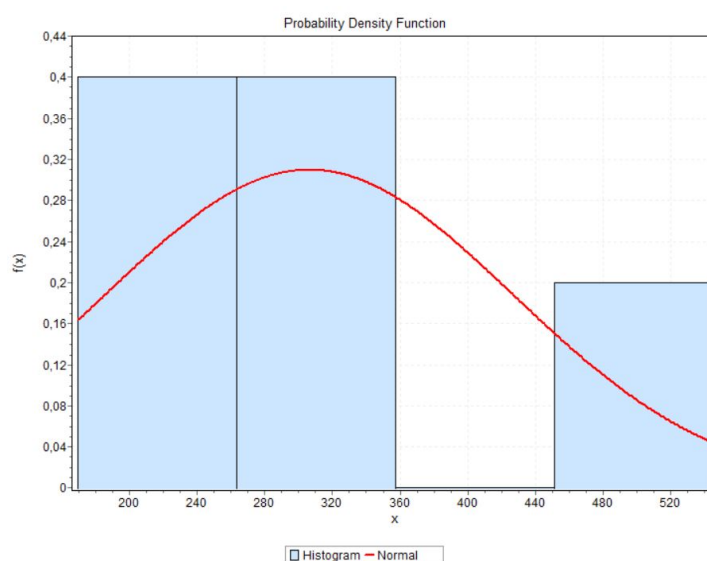
Figur 6.3: Kumulativ Gumbel-fordeling for variabel brannenergi per gulvareal for flerbrukshallene

For å kunne si noe om hvor godt sannsynlighetsfordelingen passer til det spesifikke datautvalget, beregner programmet en P-verdi ved bruk av Kolmogorov-Smirnov testen. P-verdien for de to grafene er gitt i tabell 6.6, og tar verdiene 0,71149 og 0,91185 for henholdsvis den variable og totale brannenergien. Ved å sammenligne med mye brukte signifikansnivå på 0,05 og 0,1, er de beregnede P-verdiene i dette tilfellet svært høye. Dette betyr en 91,185 % sannsynlighet for at en gitt verdi langs kurven for den totale brannenergien kun er en tilfeldighet.

Tabell 6.6: Beregningsresultat for spesifikk karakteristisk brannenergi ved bruk av Gumbel-fordeling i programmet EasyFit

	Variabel brannenergi per gulvareal (MJ/m ²)	Dimensjonerende spesifikk brannenergi (MJ/m ²)
Minimum	9,27	208,50
Maksimum	133,49	544,71
Gjennomsnitt	68,243	306,19
Standardavvik	38,826	120,70
80 %-fraktil	96,176	393,03
P-verdi	0,71149	0,91185

Som nevnt i kapittel 2.2.2, tar Gumbel-fordelingen utgangspunkt i normalfordeling. Ved å plote objektresultatene sammen med normalfordelingen, kan man lettere se om objektene utgjør en samling eller om de er jevnt fordelt på intervallet sannsynlighetsfordelingen spenner. Som vist i figur 6.4, har normalfordelingen sin tyngde på den venstre siden. Slik grafen viser, er den resulterende brannenergien i intervallet 170-355 MJ/m² for 8 av de 10 hallene. De siste to hallene har en brannenergi i intervallet 450-545 MJ/m², og medfører en samling på den høyre siden i normalfordelingen. Dette er en indikasjon på at det er nødvendig å foreta en kartlegging av et større antall haller for å med sikkerhet kunne si noe mer om hva den faktiske brannenergien i flerbrukshallene er.



Figur 6.4: Normalfordeling av total spesifikk brannenergi per omhyllingsflate

6.7 Observasjoner i forbindelse med befaringene

I forbindelse med befaringene ble det gjort enkelte observasjoner med betydning for brann-sikkerheten i flerbrukshallene. Særlig to observasjoner anses av forfatteren som interessante, og blir beskrevet under.

6.7.1 Plassering av elektriske vaskemaskiner

I 5 av de 10 flerbrukshallene som ble kartlagt, var vaskerom en del av idrettshallens brann-celle. Vaskerommene bestod typisk av en klesvaskemaskin og vaskemaskiner til bruk på gulv. Gulvvaskemaskinene benyttet i de kartlagte flerbrukshallene var alle elektriske, og ble ladet i et av utstysrommene eller et eget vaskerom i branncellen. Det er knyttet en viss risiko for brann ved bruk av elektriske kjøretøy, i hovedsak til batteriet. En batteribrann kan oppstå ved oppvarming fra utsiden av batteriet, men også internt i batteriet, eksempelvis ved kortslutning som følge av mekanisk skade eller kollisjon (Reitan, Bøe og Stensaas, 2016). I tillegg er det en viss sjanse for at brann i et litiumbatteri blusser opp igjen dersom den ikke er tilstrekkelig nedkjølt ved slukking.

Det er ikke funnet noen informasjon om branner i gulvvaskemaskiner, men det er i dag registrert flere branner i elektriske kjøretøy. I desember 2015 begynte en elbil å brenne to timer etter at den ble påkjørt av et tog i Råde i Østfold (Bolstad og Urstad, 2015). Et annet kjent tilfelle fra april 2017 er brannen i en elektrisk truck som sto i et lagerbygg i Vestby. Trucken lot seg ikke fjerne, og brannen utartet seg til å bli en stor brann (Solem, 2017). I dagene etter brannen ble det bedrevet etterslokking, men fire dager etter brannen startet, blusset den opp igjen.

Det er med andre ord knyttet en viss risiko til å ha elektriske kjøretøy lagret i utstysrom eller vaskerom som en del av den store branncellen en flerbrukshall består av, ettersom en brann kan initieres her og raskt spre seg videre til andre brennbare materialer lagret i samme rom.

6.7.2 Bruk av sprinkleranlegg

Hvilken effekt tradisjonelle sprinkleranlegg har ved bruk i rom med store takhøyder, slik som i idrettshaller, er et viktig aspekt ved prosjektering av slike bygninger. I følge Mostue (2004) er det knyttet store usikkerheter til et sprinkleranleggs pålitelighet og slokkeevne ved bruk i rom med store takhøyder, slik at denne typen brannsikringstiltak ikke er anbefalt i rom med store takhøyder. Derimot økes brannsikkerheten i flerbrukshaller dersom rom med normal

takhøyde sprinkles. Sprinkling av tilstøtende rom til idrettshall, med normal takhøyde, vil være gunstig for å kontrollere branner som oppstår i disse områdene. Sprinklene vil da ikke ha effekt på branner som oppstår i selve idrettshallen.

Ingen av de kartlagte flerbrukshallene hadde installert sprinkleranlegg i samme rom som aktivitetsflaten. Derimot var det installert sprinkleranlegg i utstysrommene i 4 av de 10 inispiserte flerbrukshallene. Utstysrommene inneholder normalt mye brennbart materiale, og en brann i et slikt rom vil kunne utvikles raskt. Er utstysrommet plassert under eksempelvis en tribune av brennbart materiale, kan en brann her potensielt vokse seg kraftig før den blir oppdaget.

6.8 Usikkerheter i kartlegging og beregning

Det er knyttet flere usikkerhetsfaktorer til kartleggingen av flerbrukshallene og beregningene utført i etterkant. Særlig er det forbundet usikkerhet til de registrerte mengdene, både ved direkte veiing av gjenstander og ved transformasjon fra målte dimensjoner til beregnet masse.

Ved veiingen av de ulike gjenstandene ble det benyttet to enkle vekter som i utgangspunktet er beregnet for veiing av personer og matvarer. Vektene i seg selv har en viss feilmargin. I tillegg tilkommer usikkerhet i avlesning, med andre ord menneskelige feil. Denne typen målefeil er vurdert til å ha et begrenset utslag på det endelige resultatet ettersom den totale veide massen er mye mindre enn den beregnede massen for de permanente elementene.

Enkelte rom/skap var av ulike årsaker utilgjengelig for inspeksjon, det har derfor vært nødvendig å gjøre fornuftige antagelser av innholdet i disse, basert på kjennskap til hva som har befunnet seg i liknende arealer og ved samtale med driftspersonellet i de respektive flerbrukshallene. Denne kunnskapen har vært mulig å tilegne seg gjennom befaringene i de ti hallene. Det er imidlertid knyttet stor usikkerhet til hvor korrekte gjetningene er. Som vist i tabell 6.5, er den variable brannenergien betydelig mindre enn den permanente, og en feilgjetting vil derfor ha et begrenset utslag i det totale regnestykket.

Ved beregning av bidrag fra permanent brannenergi er det store usikkerheter knyttet til informasjonen om hvordan konstruksjonene er bygd opp. Slik informasjon ble hentet fra hallenes FDV-dokumentasjon, i hovedsak fra ARK-tegninger, og kvaliteten på disse har vært svært varierende. Det har derfor vært nødvendig å gjøre enkelte antagelser og forenklinger knyttet til hvordan vegger, gulv og tak er bygd opp. Eksempelvis har det ikke vært mulig å kunne bestemme nøyaktig hvor mye treverk en vegg har bestått av. I slike tilfeller har veggene blitt

forenklet til å bestå av stendere med senteravstand 600 mm, og topp- og bunnsvill. Spiker-slag, hjørnestolper, ekstra stendere, losholter o.l. er ikke medregnet.

Som vist i kapittel 5.2, er det krevende å skille mellom ulike plastmaterialer dersom man ikke har tilstrekkelig dokumentasjon på eller om de ulike produktene. Plastmaterialene ble derfor gruppert inn i myke eller harde materialer. En slik antagelse medfører at man ikke kan skille mellom eksempelvis PE og PP. Kategoriseringen ble gjort på bakgrunn av identifiserte brennverdier for de ulike materialene. Ved en sammenligning av brennverdier for ulike plastmaterialer viste det seg at de plastmaterialene som her betegnes som harde, alle har en brennverdi på omtrentlig 40 MJ/kg, se vedlegg C. For de myke plastmaterialene ble brennverdien observert å ligge i området 20 MJ/kg. En slik antagelse medfører usikkerhet i beregningsresultatet, men anses som tilstrekkelig.

7 | Kvalitativ analyse

I dette kapitlet analyseres konsekvensen av å øke brannbelastningen i en flerbrukshall. Analysen er utført for å avdekke hvilken risiko for brann som er forbundet med flerbrukshaller, i tillegg til å vurdere og fastsette de brannscenarioer som er hensiktsmessig å benytte videre i en kvantitativ analyse.

7.1 Introduksjon

Virksomheten *idrettshall* er i henhold til Statistisk sentralbyrås *Standard for næringsgrupperinger* en del av grupperingen Kulturell virksomhet, underholdning og fritidsaktiviteter (SSB, 2008). I perioden 2009-2015 ble det registrert totalt 5944 næringsbranner i Norge (DSB, 2018). 238 av disse var i byggverk med virksomhet som faller innenfor den aktuelle kategorien. Dette er en liten andel sammenlignet med alle næringsbranner i denne perioden, men utgjør allikevel et merkbart antall branner i løpet av 6 år.

Virksomheten i flerbrukshaller er sjelden brannfarlig. Dersom det likevel oppstår en brann kan det føre til store konsekvenser for personene som oppholder seg i bygget, særlig dersom flerbrukshallen benyttes til andre aktiviteter der store menneskemengder er samlet, slik som ved messer eller konserter.

Det er utført en kvalitativ analyse av typiske flerbrukshaller for å kartlegge mulige brannscenarioer. Bakgrunnen for analysen er å studere hvordan personsikkerheten i en flerbrukshall påvirkes når hallen benyttes til andre formål enn idrettsarrangement. Den kvalitative analysen inneholder en verbal beskrivelse av utfordringene vedrørende brann i en flerbrukshall, og inkluderer blant annet de forutsetninger og antakelser som er lagt til grunn, og identifiserer brannfarer og forhold av betydning for personsikkerheten.

7.2 Fremgangsmåte og metode

En risikoanalyse er en systematisk fremgangsmåte for å beskrive eller beregne risiko, og benyttes til å fastsette sannsynlighet for uønskede hendelser og konsekvenser av disse (SINTEF Byggforsk, 2013a). Standarden NS 3901 *Risikoanalyse av brann i byggverk* ser spesielt på risiko i forhold til brann og er benyttet som et overordnet rammeverk for denne analysen. Analysen har som formål å identifisere farer og trusler i tilknytning til brann. Disse farene blir deretter vurdert, og vil danne et utgangspunkt for antakelser om aktuelle brannobjekter og

brannscenarier. Analysen er delvis forenkelt, og tar ikke for seg alle de steg som kan inngå i en risikoanalyse i en risikoanalyse.

7.3 Mål for kvalitativ analyse

Målet med den kvalitative analysen er å vurdere risikobildet ved bruk av en flerbrukshall til andre aktiviteter enn kun idrett. Analysen skal danne grunnlag for beslutning av hvilke brannscenarier som skal brukes ved simulering av brannbelastning i flerbrukshaller. Dette omfatter følgende:

- Kartlegging av farer og trusler
- Kartlegging av aktuelle brannscenarier for flerbrukshaller
- Vurdering av de valgte brannscenariene

7.3.1 Beskrivelse av analyseobjekt

Det er valgt å utføre en analyse generelt av flerbrukshaller i Norge, ut fra de erfaringer og den kunnskap ervervet ved befaringer i ulike flerbrukshaller (se kap. 6).

En typisk flerbrukshall består av en aktivitetsflate med tilhørende utstysrom, tribune, garderobes, inngangsparti med kiosk eller lignende, møterom, osv. I denne analysen betraktes kun den branncellen som selve idrettshallen er en del av, som typisk består av aktivitetsflaten, tribune og utstysrom. For å kunne benytte en flerbrukshall til alle de tradisjonelle innendørsidrettene kreves et minstemål på 23 x 44 meter med fri høyde minimum 7 meter (Kultur- og kirke departementet, 2005). Analysen tar derfor for seg en fiktiv flerbrukshall utformet som en rektangulær boks med målene 30 x 45 x 8 meter (b x l x h). Branncellen er forenklet til å bestå av selve aktivitetsflaten, en tribune med tilhørende trapperom og et utstysrom. Figur 7.1 viser et bilde tatt i en av de befarte hallene fra kapittel 6, og viser hvordan en slik hall kan se ut.

7.4 Identifikasjon av farer og trusler

NS 3901 definerer en fare som en handling eller et forhold som kan føre til en uønsket hendelse, i denne sammenheng en brann (Standard Norge, 2012). Den uønskede hendelsen kan i sin tur medføre tap av verdier, slik som liv/helse, miljø, materielle verdier, samfunnsverdier,



Figur 7.1: Munkvollhallen, med aktivitetsflate, utstysrom og tribune

funksjoner eller omdømme. Trusler er nært relatert til farer. En trussel er noe som kan utnytte en sårbarhet, og som gjerne utføres med vilje for å gjøre skade på og/eller ødelegge verdier (Rausand, 2011).

Farekildene i flerbrukshaller ble identifisert basert på observasjoner gjort på befaringene i de ti flerbrukshallene omtalt i kapittel 6, samt erfaringer fra tidligere messer og arrangementer der store folkmengder er samlet. I tillegg er en rekke farekilder identifisert fra statistikk hentet fra *Finans Norge* og *Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap (DSB)*.

7.4.1 Befaringer i flerbrukshaller

Under kartleggingen av brannlaster i flerbrukshallene ble det observert følgende potensielle farer:

- Store mengder brennbart materiale i form av diverse idrettsutstyr, både i treverk og ulike plastmaterialer
- Elektrisk utstyr slik som blant annet musikkanlegg og resultatavler montert på vegg
- Lagerrom med maskin for vasking av hall og andre vaske- og tørkemaskiner
- Møbler av ulike typer, eksempelvis trestoler, stoppede møbler, plasmøbler, tunge bokhyller, skap, diverse kontormøblement
- Tekstiler, eksempelvis overtrekksvester, vaskekluter, volleyballnett, treningsklær, osv
- Diverse: bøker, papirbunker, søppelkasser, pynt på vegger

Gjenstandene ovenfor er ikke nødvendigvis en fare i seg selv, men i kombinasjon med en antenneskilde vil de kunne utgjøre en fare for brann. En antenneskilde vil eksempelvis her

kunne være selvantennelse i elektrisk utstyr eller at en brann blir påsatt. Sannsynligheten for at slike antennelseskilder er til stede i en flerbrukshall studeres ut i fra statistikken presentert i kapittel 7.4.3.

Idrettsutstyret i flerbrukshallene består for det meste av brennbare materialer, men ubrennbare materialer som stål er også representert. Utstyret er normalt plassert i egne utstysrom i tilknytning til selve aktivitetsflaten. Type og mengde utstyr varierer i stor grad i de studerte hallene, men kan bestå av alt fra hoppetau og rockeringer til sprangkasser og tjukkaser av ulike størrelser. Bildene i figur 7.2 ble tatt på befaring i Åsheimhallen, og viser hvordan det kan se ut i et typisk utstysrom i en flerbrukshall.



Figur 7.2: Idrettsutstyr plassert i utstysrom, bilde tatt i Åsheimhallen

7.4.2 Farekilder ved alternative arrangement

Ved bruk av en flerbrukshall til andre arrangementer enn idrett, tilføres det normalt nye antennelseskilder. I anledning en typisk messe eller loppemarked tilføres normalt mye brennbart materiale, og brannbelastningen kan raskt bli mer enn hva byggverket er dimensjonert for. Kombinasjonen økt brannbelastning og tilførsel av antennelseskilder oppfattes her som en økt fare for brann, og er med andre ord en utfordring for brannsikkerheten.

Ved nettsøk er det funnet eksempler på hvordan en idrettshall kan fremstå ved bruk til andre arrangementer enn idrett. Figur 7.3 viser bilder fra loppermarked i to ulike idrettshaller.

Slik bildene viser tilføres det mye brennbart materiale på hallflaten i form av alt fra polstrede møbler og koffertar til bøker, tv-skjermer og høye utstillingsvegger. I tillegg til å tilføre store mengder brennbart materiale og nye antennelseskilder, medfører en slik bruk av flerbrukshallen ofte at rømningsveier blir mer uoversiktlige eller at alternative rømningsveier blokkeres.



(a) Loppemarked før publikum slippes inn (rb.no, 2018)



(b) Yrkes- og utdanningsmesse i en idrettshall (Odalsportalen.no, 2014)

Figur 7.3: Alternativ bruk av flerbrukshall

Det er vanskelig å si noe sikkert om hyppigheten av slike arrangement, ettersom det vil variere fra sted til sted. Bjørn Aas forteller at det som et utgangspunkt kan tenkes en forekomst på 6-8 arrangement per år, fordelt på kulturarrangement og kommersielle arrangement som loppemarked, messer osv¹. Varigheten av arrangementene kan også variere mye. Et kulturarrangement kan ha en varighet på 3-6 timer, mens messer og lignende ofte går over to hele dager, det vil si 8-10 timer per dag.

7.4.3 Farer og trusler identifisert fra statistikk

I følge statistikken hentet fra Finans Norge var *elektroniske apparater og fastmontert elektrisk utstyr* de mest vanlige brannkildene for næringsgruppen *Kulturell virksomhet, underholdning og fritidsaktiviteter* i perioden 1985-2017 i Norge, slik som vist i tabell 7.1.

Tabell 7.1: Kilder til brann for næringsgruppen *Kulturell virksomhet, underholdning og fritidsaktiviteter* i Norge i perioden 1985-2017, modifisert tabell (Finans Norge, 2017)

Kilde til brann	Antall tilfeller
Ildsted (ovn, peis, gasspeis)	69
Varme arbeider (sveising, skjæring av stål, lodding etc.)	8
Åpen ild og varme (fyrstikker, røyking, stearinlys, grill)	227
Elektroniske apparater	242
Elektriske husholdningsapparater	101
Fastmontert elektrisk utstyr	237
Annet eller ukjent	827
SUM	1711

Elektroniske apparater og fastmontert elektrisk utstyr utgjør til sammen 28 % av de totale brannkildene i tabellen, og kan medføre en fare dersom de eksempelvis overopphetes, slår gnister, kortslutter eller svikter på grunn av menneskelige feil. Slike feil i fastmontert utstyr kan eksempelvis føre til brann i vegger eller i sjakter/kanaler, og kan være vanskelig å oppdage i en tidlig fase av en brann. Denne typen brannkilde er aktuell i flerbrukshaller, der elektriske apparater som belysning, høyttalere og resultatklodder gjerne utgjør en stor andel av det elektriske anlegget. I tillegg til tilførsel av ekstra elektroniske artikler ved alternativ bruk av flerbrukshallen, slik som tv-skjermer, ekstra høyttalerutstyr, lyskastere og lignende.

Åpen ild og varme inkluderer fyrstikker, sigaretter, stearinlys, grill og lignende. Fyrstikker og sigaretter er aktuelle brannkilder, men utgjør trolig en liten andel av de totale brannkildene. Inne i hallen er fare i forbindelse med røyking ansett som svært liten som følge av det nasjonale forbudet mot å røyke inne på offentlige steder. Fyrstikker og sigaretter kan allikevel utgjøre en fare dersom personer røyker i inngangspartier, og fyrstikker eller sigaretter ikke

¹Bjørn Aas, Overingeniør NTNU-SIAT, epostkorrespondanse 31.mai 2018

slukkes fullstendig. Utover dette anses ikke denne kategorien brannkilde å utgjøre noen fare for flerbrukshallen.

Varme arbeider som sveising, skjæring av stål, lodding etc., kan være aktuelt ved vedlikeholdsarbeid i flerbrukshallen. Slike arbeider vil trolig foregå utenfor brukstiden i hallen, og vil derfor ikke utgjøre stor fare for publikums personsikkerheten. Det forutsettes at det utøves ekstra varsomhet i forbindelse med slike arbeider, og at en brann vil kunne oppdages raskt. Som vist i tabell 7.1 utgjør denne farekilden en svært liten andel av alle brannkildene, og vil derfor ikke vurderes videre.

Ildsted som ovner, peis og gasspeis, utgjør ca 4 % av de totale brannkildene. Denne typen brannkilde er i utgangspunktet ikke aktuell for flerbrukshallen, men dersom hallen benyttes til en spesiell type messe, eksempelvis hagemesse, kan det tenkes at slike brannkilder kan bli plassert i hallen i en kort periode. Sannsynligheten for at slike antenneskilder tilføres en flerbrukshall anses som svært liten. Imidlertid er det nærliggende å tro at gasstanker til griller eller ovner kan bringes inn på en messe, noe som medfører en viss eksplosjonsfare. Det forutsettes at det utøves ekstra varsomhet dersom slike brannkilder tilføres flerbrukshallen, og at en brann vil kunne oppdages raskt.

Av de totalt 1711 registrerte brannskadetilfellene i tabell 7.1, ble 141 antatt påsatt (Finans Norge, 2017). Dette utgjør ca 8,2 % av totalt antall branner i bygg for kulturell virksomhet, underholdning og fritidsaktiviteter. Det anses derfor som sannsynlig at påsatt brann er en reell trussel i flerbrukshaller.

7.5 Mulige brannscenarier i flerbrukshallen

7.5.1 Aktuelle brannobjekter

Ved normal driftssituasjon der flerbrukshallen benyttes til idrett og lek, er det mest hensiktsmessig å anta brann i idrettsutstyr eller elektriske komponenter. Ved bruk av flerbrukshallen til arrangementer som konserter eller messer, vil en brann kunne starte i det brennbare materialet tilført for det spesifikke arrangementet, i tillegg til de brannobjekter som er tilstede ved normalsituasjonen. Etter befaring i ulike flerbrukshaller og relevante litteratursøk, samt vurderinger av farer og trusler, kan det antas at en rekke ulike objekter involvert i en brann, disse er listet opp i tabell 7.2. Det er viktig å være klar over at alle brannobjektene i tabellen vil kunne være aktuelle ved alternativ bruk av flerbrukshallen, ikke kun de som står oppført under brannobjekter tilført ved andre arrangementer.

Tabell 7.2: Aktuelle brannobjekter i en flerbrukshall ved både normalsituasjon og andre arrangementer

Brannobjekter ved normal driftssituasjon	Brannobjekter tilført ved andre arrangementer
Idrettsrelevant utstyr (tjukkaser, sprangbrett, kjepler, håndballer, krakker, innebandykøller, osv)	Diverse brennbart materiale tilført ved messer eller loppemarked, eks. sofaer, skap, bøker, produktprøver, tv-skjermer, osv.
Elektriske artikler (høytalere, musikkanlegg, lyskastere, resultat klokke, osv)	Ekstra elektriske artikler (høytalere, musikkanlegg, lyskastere, osv)
Tekstiler	Ekstra gulv for å beskytte idrettsgulvet
Stoppede møbler og enklere møblement	Ekstra møblement som stoler og bord

7.5.2 Plassering

Store deler av idrettsutstyret er til vanlig lagret i ulike utstyrsrom i flerbrukshallen. Mengden brennbart materiale varierer fra hall til hall, men er normalt sett av betydelig mengde, slik som vist i figur 7.2. Materialene er generelt plassert i hele rommet.

Ved en messe er det tilførte materialet oftest plassert inntil yttervegg og frittstående i rommet. Materialene kan ofte være plassert på en slik måte at det dannes naturlige gangbaner mellom dem, noe som gjerne bidrar til å gjøre rommet mer uoversiktlig. En brann vil kunne starte hvor som helst i branncellen, men det kan antas et verst tenkelig branntilfelle dersom det begynner å brenne i nærheten av en av nødutgangene, ettersom dette vil kunne hindre evakuering.

7.6 Valgte brannscenarier

Det er valgt å gå videre med to brannscenarier, en liten- og en stor flammibrann. To ulike størrelser er valgt for å kunne studere hvilken effekt økt brannbelastning har for flerbrukshallen. Scenariene tar utgangspunkt i en brann i et utstyrsrom og en brann under en messe.

Brann i utstyrsrom: Som følge av at utstyrsrom i flerbrukshallene er fylt med store mengder brennbart materiale, vil en brann her kunne utvikle seg raskt og ha en høy branneffekt. Materialene består gjerne av en blanding av gjenstander av tre og plast, og vil potensielt kunne medføre stor røykutvikling. Det er normalt ingen personer tilstede i selve utstyrsrommet, men røyken fra brannen vil kunne strømme inn i idrettshallen og true de personer som oppholder seg her. Det er i dette scenarioet valgt å se på en brann i madrasser og møbler, da dette vil kunne representere brann i en tjukkase. Relevante antennelseskilder kan her eksempelvis

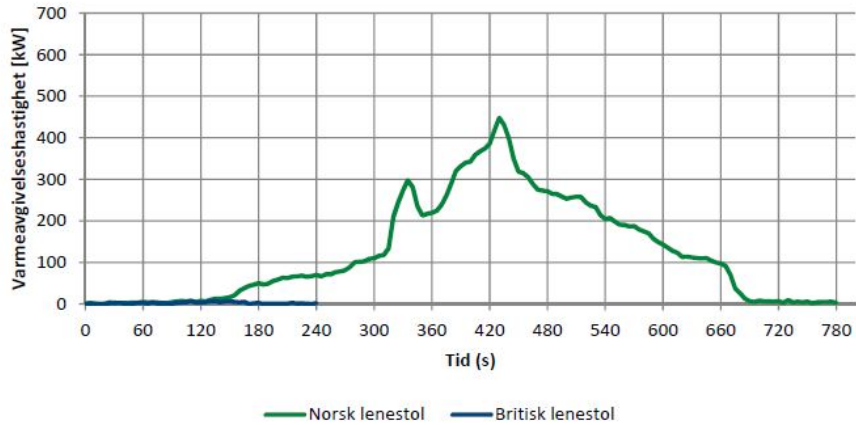
være varmgang i elektrisk utstyr med spredning til nærliggende materiale, eller en påsatt brann.

Brann under en messe: En messe innebærer at det tilføres store mengder brennbar materiale som potensielt kan gi en stor brann. Sannsynligheten for at en brann oppstår øker ved at nye antennelseskilder tilføres. Plassering av materiale i hallen og store mengder mennesker medfører at rømningsveiene ofte blir uoversiktlige. I tillegg er gjerne personene som oppholder seg på messen lite kjent i bygningen og dens rømningsveier. Dersom brannen i tillegg har arnested i forbindelse med en av rømningsveiene i hallen, vil en brann under en messe potensielt utgjøre en stor fare for et stort antall mennesker. Det er i dette scenarioet ønskelig å se på en større flammebrann der effekten av tilført brannbelastning studeres. Den store brannen ved et slikt scenario vil eksempelvis være en brann i tilført messeinventar, og kan være alt fra mengder av bøker og møbler til båt eller bil. For å illustrere en stor flammebrann er det derfor valgt å se på brann i en bil. Hyppigheten av denne typen messe inne i en flerbrukshall er varierende. Sannsynligheten for at nettopp en slik messe skal finnes sted er derfor ikke fastsatt. Et mer realistisk scenario vil kunne være en brann i en stor gulvvaskemaskin, slik som nevnt i kapittel 6.7.1. Det er derimot ikke funnet noen relevante branntester av av denne typen maskiner. Til sammenligning er det foretatt en rekke branntester av biler, og det er derfor valgt å illustrere en stor flammebrann ved se på brann i en bil.

7.6.1 Brann i madrass

Trekket til madrasser vil være avgjørende for antenneligheten ved eksponering for en varmekilde. Trekket på en tjukkas kan bestå av forskjellige plastmaterialer, eksempelvis polyester. Stoppingen i en madrass kan bestå av skum (for eksempel polyuretan- eller polyesterskum) eller fiber (natur- og kunstfiber), og i en tidlig fase i brannforløpet vil dette laget ha stor betydning for varme- og røykutviklingen.

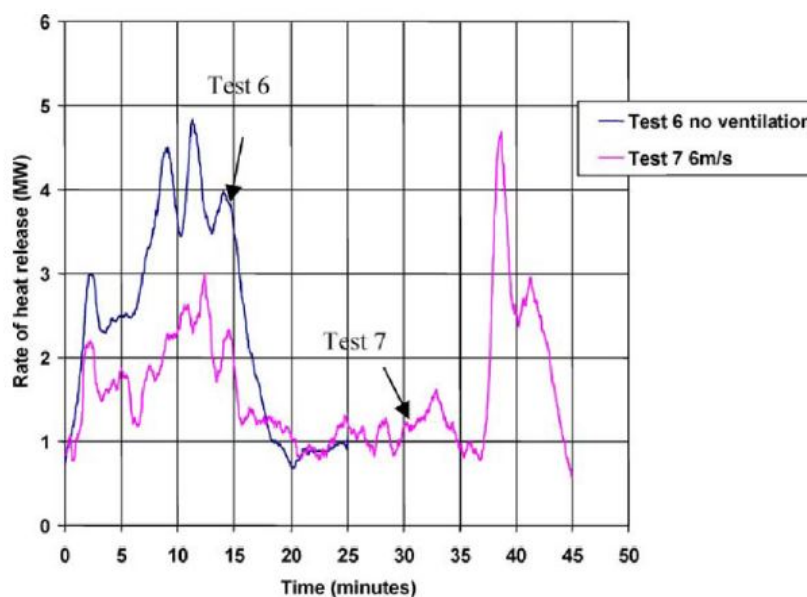
En studie utført av SINTEF i 2012 gir parameterverdier for ulike brennende stoppede møbler, madrasser og innredningstekstiler (Steen-Hansen, Steinbakk og Storesund, 2012). Testene ble gjennomført for å demonstrere forskjellen i brannsikkerhet mellom britiske og europeiske stoppede møbler. Røyk og varmeavgivelse ble registrert under testingen, og figur 7.4 viser varmeavgivelsen for en norsk og en britisk lenestol. For den norske stolen varte testen i ca 13 minutter før den ble slokket. Slik figuren viser ble det registrert en HRR_{maks} på 448 kW etter 420 sekunder, og en total varmeavgivelse på 97,1 MJ etter 780 sekunder.



Figur 7.4: Brannutvikling for lenestol, gjengitt fra Steen-Hansen, Steinbakk og Storesund (2012)

7.6.2 Brann i bil

I Nederland ble det i år 2000/2001 utført 14 fullskalaforsøk av brennende kjøretøy utført i en tunnel (Lemaire og Kenyon, 2006). Hensikten med forsøkene var å studere evakueringsforholdene ved en eventuell tunnelbrann. Forsøkene ble gjennomført i en underjordisk tunnel med rektangulært tverrsnitt med følgende mål: 840 x 9,8 x 5,1 meter (l x b x h). Det er valgt å se på resultatene til en brennende bil av typen Opel Kadett, 1990-modell, med målene 4,0 x 1,6 x 1,4 meter (l x b x h). I testen ble det registrert en HRR_{maks} på 4,9 MW etter 11 minutter, se figur 7.5.



Figur 7.5: Brannutvikling for en bil uten ventilasjon (Test 6), gjengitt fra Lemaire og Kenyon (2006)

7.6.3 Oppsummering og vurdering av brannscenariene

For å illustrere betydningen av økt brannbelastning er det i den kvalitative analysen kommet frem til at følgende scenarier er aktuelle for videre kvantitativ analyse:

- Brannscenario 1: brann i utstyrsrom med HRR_{maks} lik 500 kW
- Brannscenario 2: brann i bil med HRR_{maks} lik 5,0 MW

Ved brannscenario 1 er det tatt utgangspunkt i en brann som starter inne i et utstyrsrom, eksempelvis i elektrisk anlegg. Som nevnt lagres det normalt mye brennbart i slike rom, og en brann her vil kunne spres til omkringliggende brennbart materiale. Brann- og røykutviklingen antas å være rask, og dersom brannen får utvikle seg uten inngripen er det forventet at en lokal overtenning vil kunne inntreffe i utstyrsrommet. Derimot vil brannen trolig ikke kunne utvikle seg til en fullstendig utviklet brann i hele branncellen på grunn av flerbrukshallens store volum, og dermed høye tilgang på oksygen (se kap. 3.1.2).

Brannscenario 2 illustrerer en messe i en flerbrukshall. Dette medfører både en økt brannlast og et økt antall nye antennelseskilder. En brann i materiale plassert på aktivitetsflaten vil her kunne spre seg videre til annet brennbart materiale i nærheten, og brannutviklingshastigheten er antatt å være rask. Uavhengig av brannens plassering er det i dette scenarioet ikke forventet at overtenning i branncellen vil kunne inntreffe, som beskrevet for brannscenario 1.

7.6.4 Konsekvensvurdering

Personbelastning og personenes kjennskap til flerbrukshallen vil variere med bruken. Ved normal driftssituasjon er det forventet et lite antall mennesker i hallen, normalt under 50 personer. Disse menneskene er trolig godt kjent i hallen, og vil ved en evakuerings situasjon være i stand til å kunne ta seg ut av hallen via flere rømningsveier.

En brann som oppstår under et arrangement der mange mennesker er samlet, slik som ved en messe, vil kunne gi et litt annerledes risikobilde. Ved en slik messe vil lokalet potensielt være uoversiktlig på grunn av tilført materiale i den spesifikke anledningen. Persontallet vil i tillegg etter all sannsynlighet være langt større enn ved normal drift, og det er ikke forventet at personene skal ha den samme typen kjennskap til byggverket sammenlignet med personer som ofte benytter seg av flerbrukshallen. Ved brann i en slik situasjon vil de personer som ikke er kjent i byggverket normalt ha et ønske om å evakuere samme vei som de kom inn, som vist i kapittel 3.2.2. Dersom brannen i tillegg er orientert i nærheten av en rømningsvei, vil dette kunne medføre stor risiko for et stort antall mennesker i byggverket.

8 | Kvantitativ analyse

Den kvantitative analysen har til hensikt å gi et bilde av risikoforskjellene mellom normal driftssituasjon i en flerbrukshall og et alternativt arrangement der store mengder brennbart materiale tilføres flerbrukshallen. Verdiene som fremkommer av analysen vil derfor kun være gjeldende for dette spesifikke scenarioet, men trenden vil trolig kunne representere flere lignende scenarier.

8.1 Brann- og rømningsmodellering

Brann- og rømningsforholdene er modellert ved hjelp av programmet PyroSim (2018.1.0417x64) og Pathfinder (2018.2.0417x64), utviklet av Thunderhead Engineering. Valget av metode er beskrevet i kapittel 2.2.3.

Det kan være krevende å simulere en brann som gir troverdige resultater, både i form av nødvendig tid og kunnskap. Parametrene som påvirker et brannforløp er både komplekse og mange, noe som resulterer i at det er nødvendig å gjøre forenklinger. Slike forenklinger kan ha stor innvirkning på resultatet, og kan i verste fall medføre uriktige resultater. Det er derfor viktig å ikke stole blindt på simuleringsresultatene alene, men se de i sammenheng med de forenklinger og de scenarier de er basert på.

8.2 Simuleringsmodell

I dette underkapittelet er modellens oppbygging og egenskaper beskrevet, samt en redegjørelse for valgte inndataparametre. Teori knyttet til programmene er inkludert der dette bidrar til å belyse begrunnelsen for valg i modellen.

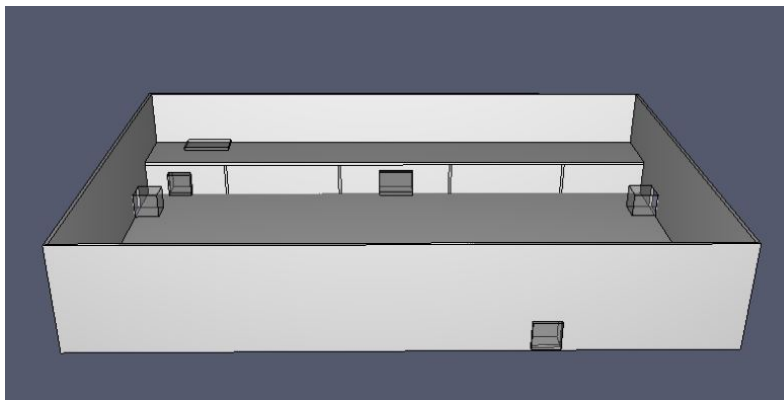
Det gjøres oppmerksom på at simuleringene i denne oppgaven er gjort svært forenklet, etter som hensikten kun er å illustrere hvordan økt brannbelastning påvirker personsikkerheten i en flerbrukshall. Variablene er derfor begrenset til mengde brennbart materiale og plassering av brann.

8.2.1 Planløsning og geometri

Det er valgt å benytte en relativt enkel analysemodell, der bygningsdelenes geometri og fysiske egenskaper forenkles. Fordelen med en slik modell er blant annet redusert modellerings-

og simuleringstid, samtidig som resultatet vil gi en pekepinn på hvordan sikkerhetsnivået påvirkes. Resultatet fra simuleringen vil i tillegg kunne overføres i større grad til lignende flerbrukshaller sammenlignet med en detaljert modell der resultatet kun vil være representativt for den ene hallen.

Selve flerbrukshallen som modelleres er en fiktiv modell, basert på erfaringer fra befaringer i flerbrukshallene studert i denne oppgaven. Modellen forestiller den branncellen selve aktivitetsflaten som oftest er en del av, og er valgt utformet som en rektangulær boks med målene 45 x 30 x 8 meter (l x b x h). Branncellen består av selve aktivitetsflaten, en tribune med et tilhørende trapperom og utstyrrom, se figur 8.1.



Figur 8.1: Modellen benyttet i PyroSim

Tribune, trapperom og materialrom er plassert langs hele den ene langsiden. Tribunen er forenklet til et horisontalt plan 3 meter over idrettshallens flate og er 5 meter bred. Materialrommet er plassert midt på den ene langsiden under tribunen, og er forenklet til et rektangulært rom med dimensjonene 10 x 5 x 3 meter (l x b x h). På langsiden av materialrommet er det plassert en åpning på 3 x 2 meter (b x h).

Omhyllingsflatene er forenklet satt til en tykkelse på 0,25 meter. Det er plassert tre dører i ytterveggene på modellen, hver på 2 x 2 meter (b x h). Dørene er jevnt fordelt i hallen med en dør på den ene langsiden og en på hver av kortsidene. Rømningsveier skal i følge veiledningen til TEK 17 ha en minimumsbredde på 1,16 meter for byggverk i risikoklasse 3, 5 og 6 (DIBK, 2017a). I tillegg skal samlet fri bredde være minimum 1 centimeter per person. Total dørbredde i modellen er 6 meter, som preakseptert tillater et persontall på 600 personer.

De termiske grensebetingelsene i modellen er fastsatt for alle flater og på de ytre grensene til beregningsdomenet. PyroSim har et sett predefinerte grensebetingelser som kan benyttes dersom en ikke ønsker å bruke materialspesifikke betingelser. I modellen er det valgt å sette alle konstruksjonsdeler til adiabatisk. At grensebetingelsene er satt til adiabatisk medfører at det ikke vil forekomme endringer i varmeenergien, og grensen vil dermed ikke utveksle varmeenergi med omgivelsene.

Mesh

Et mesh består av rektangulære celler, eller kontrollvolum, og utformingen av disse har stor betydning ved simulering i FDS (Pettersen, 2002). Cellene i meshet er ideelt sett kubiske, dvs. at de bør ha lik bredde, lengde og høyde. Antallet celler avhenger av ønsket oppløsning, og har stor innflytelse på graden av nøyaktighet i beregningene. Samtidig er det ønskelig å ikke benytte en for fin meshoppløsning ettersom dette vil medføre tyngre prosessering ved simuleringen. Resulterende meshoppløsning må derfor være et kompromiss mellom nøyaktighet og tidsbruk.

I modellen er det valgt å benytte en meshoppløsning på 0,25 x 0,25 x 0,25 meter. Alle mål på rom, vegger og inventar i hallen er satt til å gå opp i heltall dersom de divideres på celledstørrelsen i meshet som er benyttet i modellen. Det er ikke gjennomført noen sensitivitetsanalyse av celledstørrelsen, men det er antatt at størrelsen vil gi tilstrekkelig nøyaktighet i forhold til simuleringenes hensikt.

8.2.2 Forbrenningsreaksjoner

Det er i hovedsak to forbrenningsmodeller som benyttes i FDS, enten ved å spesifisere varmeavgivelsesrate per arealenhet (HRRPUA) eller ved å definere forbrenningsvarme fra forbrenningsreaksjoner til de ulike brennbare materialene involvert (Thunderhead Enigneering, 2014). Modellen med varmeavgivelsesrate er den enkleste måten å angi en brann på. Ved bruk av denne metoden defineres det en brenner med et visst areal og varmeavgivelsesrate. Det er denne metoden som er benyttet i simuleringens modellen for flerbrukshallen.

Brannscenario 1

Scenariet tar for seg en brann med arnested inne i den ene enden av utstysrommet. I tillegg er det plassert tre brennere i en avstand 2 meter fra den første, for å kunne simulere en eventuell spredning. Disse tre brennerene aktiveres dersom temperaturen når 250 grader 1 meter over gulvnivået. Brennerene er alle modellert med dimensjonene 1 x 1 meter (1 x b). Basert på resultatene fra forsøket med brann i madrasser (se kap. 7.6.1) er HRR_{maks} satt til 500 kW per brenner. HRRPUA blir dermed:

$$HRRPUA = \frac{500 \text{ kW}}{1 \text{ m}^2} = 500 \text{ kW/m}^2$$

Brannutviklingshastigheten ble satt til rask/hurtig med $t_{\alpha} = 150$ sekunder, som tilsvarer has-

tigheten angitt for handlesenter, teater, og bibliotek i tillegg E i NS-EN 1991-1-2 (Standard Norge, 2008). Brannutviklingshastigheten ble simulert ved en omregning til brannspredningshastighet, beregnet til å være 0,00532 m/s.

Brannscenario 2

Data fra fullskalaforsøket av biler i Nederland er valgt som grunnlag for brannen i scenarioet, som omtalt i kapittel 7.6.2. For å simulere en eventuell spredning ble det plassert ut fire identiske brennere i et kvadratisk mønster med 5 meter mellomrom. Den første brenneren ble satt til å starte umiddelbart, og de tre ekstra brennerne ble aktivert på det tidspunkt der temperaturen 2 meter over brenneren var 250 °C. Brennerene er modellert som en rektangulær flate med dimensjonene 3,0 x 3,333 meter (l x b). HRR_{maks} er 5000 kW, og HRR_{PUA} blir dermed:

$$HRR_{PUA} = \frac{5000 \text{ kW}}{10 \text{ m}^2} = 500 \text{ kW/m}^2$$

Brannutviklingshastigheten ble satt til rask med $t_{\alpha} = 150$ sekunder, samme som for brannscenario 1. En slik hastighet er benyttet ettersom brannscenarioet med en messe – der aktivitetsflaten er fylt opp med en mengde brennbart materiale – antas å være noe tilsvarende som for et handlesenter. Brannutviklingshastigheten ble simulert ved en omregning til brannspredningshastighet. Den første brenneren ble plassert i nærheten av den ene rømningsveien for å simulere et verst tenkelig scenario for personene i flerbrukshallen, som nevnt i kapittel 7.6.

8.2.3 Sensorer og måleinstrumenter

Som tidligere nevnt er en utfordring ved bruk av FDS at detaljnivået på resultatene praktisk talt er ubegrenset. Ved bruk av ulike sensorer og måleinstrumenter er det mulig å foreta en rekke ulike målinger.

I de innledende simuleringene ble det benyttet såkalte «slices» til å vurdere temperatur og siktforhold. Ved de endelige simuleringene ble det deretter plassert ut sensorer for måling av røyktetthet (Beam Detectors) i de områder identifisert som utfordrende for personsikkerheten i flerbrukshallen. Sensorene ble plassert 2 meter over gulvet på aktivitetsflaten og 3 meter over gulvet på tribunen. Som nevnt ovenfor er tribunen simulert som en horisontal flate. I virkeligheten vil en slik tribune bestå av flere nivåer, her antatt fra 3 til 4 meter over aktivitetsflaten. For å ta hensyn til nivåforskjellene på tribunen er det derfor valgt å plassere sensoren 3 meter over den simulerte tribuneflaten.

Resultater fra «Beam Detector»-målingene er gitt i prosentvis røykformørkelse per meter målelengde. For å vurdere om personsikkerheten er ivaretatt må røykformørkelsen regnes om til sikt, gitt i meter, slik at kravet til rømningsforhold kan kontrolleres. Drysdale (2011) angir følgende korrelasjoner mellom sikt og optisk tetthet, gitt i likning (8.1), (8.2) og (8.3). Parameterne i likningene er gitt i tabell 8.1.

$$Visibilitet = \frac{10}{\left(\frac{D_{10}}{L}\right)} \quad [m] \quad (8.1)$$

$$D_{10} = -10 \log_{10} \left(\frac{I}{I_0} \right) \quad [dB] \quad (8.2)$$

$$Prosent formørkelse = \frac{I_0 - I}{I_0} \times 100\% \quad [\%] \quad (8.3)$$

Likning (8.4) er utledet fra likningene over, og gir en omregning fra visibilitet til prosent formørkelse avhengig av ønsket siktkrav:

$$Prosent formørkelse = \left(1 - 10^{-\frac{L}{V}} \right) \times 100\% \quad [\%] \quad (8.4)$$

Tabell 8.1: Parametre for beregning av sikt

D ₁₀	Optisk tetthet [dB]
I ₀	Lysintensiteten som treffer sensoren dersom det ikke er røyk til stede
I	Lysintensiteten som treffer sensoren (ved tilstedeværelse av røyk)
L	Målt lengde [m]
V	Sikt (visibilitet) [m]

Siktkravet aktuelt for simuleringene er hentet fra verdier gitt i SN-INSTA/TS 950, som nevnt i kapittel 3.2.1, og er minst 10 meter ved en høyde 2 meter over bakken i rømningsveier og brannceller med areal > 100 m². Tabell 8.2 viser tillatt røykformørkelse ved det aktuelle siktkravet for ulike målelengder.

Tabell 8.2: Tillatt røykformørkelse for ulike målelengder

Siktkrav [m]	L [m]	Formørkelse [%]	L [m]	Formørkelse [%]	L [m]	Formørkelse [%]
10	1	20,57	5	68,38	10	90,00

8.3 Evakueringssimulering

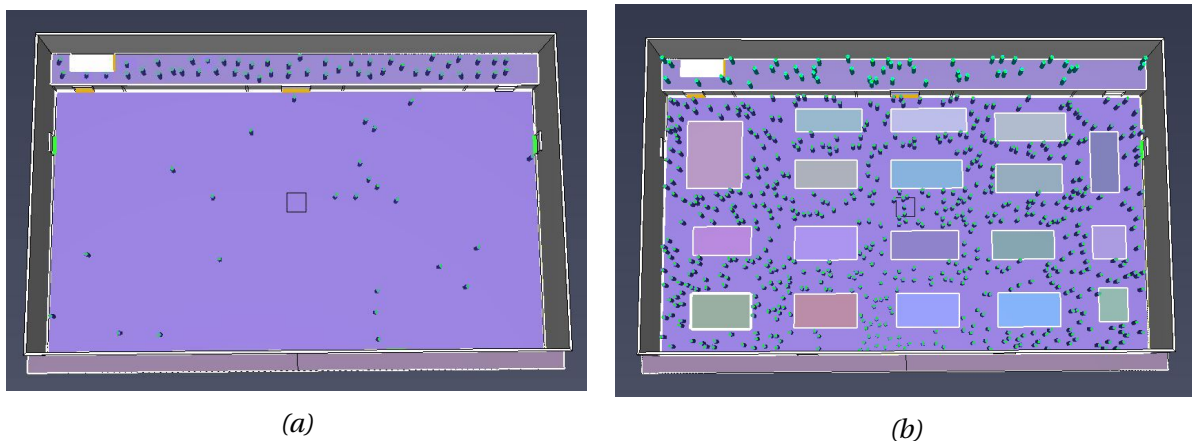
I Pathfinder ble modellen fra brannsimuleringen importert, og modellens geometri i de to programmene er identiske. Evakueringssimuleringene ble gjennomført både med og uten rektangulære rom spredd utover aktivitetsflaten i branncellen, i henholdsvis brannscenario 2 og 1. Rommene vil fungere som hindringer og er ment å tilsvare objekter plassert på aktivitetsflaten, slik som ved en messe. Hindringene medfører en økt gangavstand til utgangsdørene i tillegg til å gjøre aktivitetsflaten mer uoversiktlig, slik den gjerne fremstår ved en messe der store mengder materiale er fordelt utover gulvflaten.

8.3.1 Scenarier

Det er valgt å gjennomføre simuleringer på to ulike brannscenarioer, slik som beskrevet i kapittel 7.5. I begge scenariene ble personene fordelt tilfeldig på hallflaten og tribunen ved bruk av programmets «random» funksjon. Scenariene er vist i figur 8.2.

Brannscenario 1: Tenkt normalsituasjon der flerbrukshallen benyttes til eksempelvis en håndballkamp. Det er tatt utgangspunkt i totalt 30 personer på aktivitetsflaten og 50 personer på tribune, som vist i figur 8.2a.

Brannscenario 2: Flerbrukshallen benyttes til messelokale. Scenariet tar utgangspunkt i at 550 personer oppholder seg i hallen og 50 personer på tribunen. Som vist i figur 8.2b, er personene på aktivitetsflaten spredt blant hindringer som skal etterligne en messe.



Figur 8.2: Rømningsscenario 1 og 2, henholdsvis (a) og (b)

8.3.2 Forsinkelse

Tiden fra en brann blir oppdaget til mennesker begynner å evakuere er i programmet Pathfinder definert som forsinkelse (initial delay) (Thunderhead Enigneering, 2018). Denne tiden er svært person- og situasjonsavhengig, og kan bli lang dersom personene ikke oppfatter situasjonen som farlig. SN-INSTA/TS 950 angir forslag til reaksjonstider for noen virksomheter (Standard Norge, 2014). I dette tilfellet antas det at brannen vil være synlig for mennesker i hallen i begge brannscenariene, og forsinkelsen er derfor satt til å være 1 minutt, som anbefalt i standarden. Derimot vil ikke alle mennesker starte evakueringen på samme tidspunkt, og evakueringsstart er derfor satt til å være mellom 60 og 90 sekunder etter brannen har brutt ut. Evakueringsstarten er uniformt fordelt mellom personene i hallen.

8.3.3 Ganghastighet

Ganghastigheten avhenger av persontetthet, menneskelige forusetninger og om det er flatt gulv eller trapper. Ganghastigheten er satt til 1,20 m/s for personene som oppholder seg på aktivitetsflaten og 1,0 m/s for personene på tribunen. Personene på tribunen er simulert med en lavere hastighet for å ta hensyn til nivåforskjellene på tribunen, ettersom tribunen er simulert som kun én horisontal flate. Dette vil derimot føre til et litt uriktig bilde av hvordan disse personene evakuerer gjennom aktivitetsflaten der gulvet er flatt. Det er valgt å ikke ta hensyn til redusert ganghastighet på grunn av eventuelle funksjonsnedsettelse.

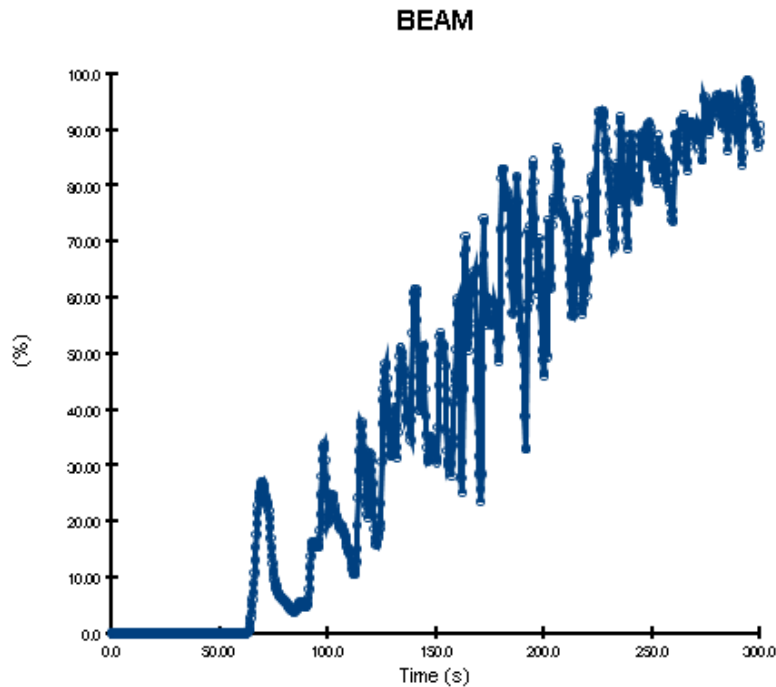
8.4 Simuleringsresultater

8.4.1 Det tidlige brannforløpet

For å legge til rette for sikker rømning er det forutsatt at tilgjengelig rømningstid er betydelig lengre enn nødvendig rømningstid. Som vist i kapittel 3.2 er nødvendig rømningstid den tiden det tar å rømme et byggverk, mens tilgjengelig rømningstid er den tiden det tar fra brannen har startet til forholdene i rømningsveiene har blitt kritiske. Med kritiske forhold menes at tålegrensene for varmepåkjenning, sikt, giftighet, røykirritasjon eller oksygenmangel er oversteget. I denne oppgaven vil det si at den tilgjengelige rømningstiden funnet ved brannsimuleringer må være høyere enn den nødvendige rømningstiden funnet ved evakueringsmodellering.

I denne analysen ble det valgt å kun fokusere på kriteriet for sikt, ettersom dette kriteriet ofte

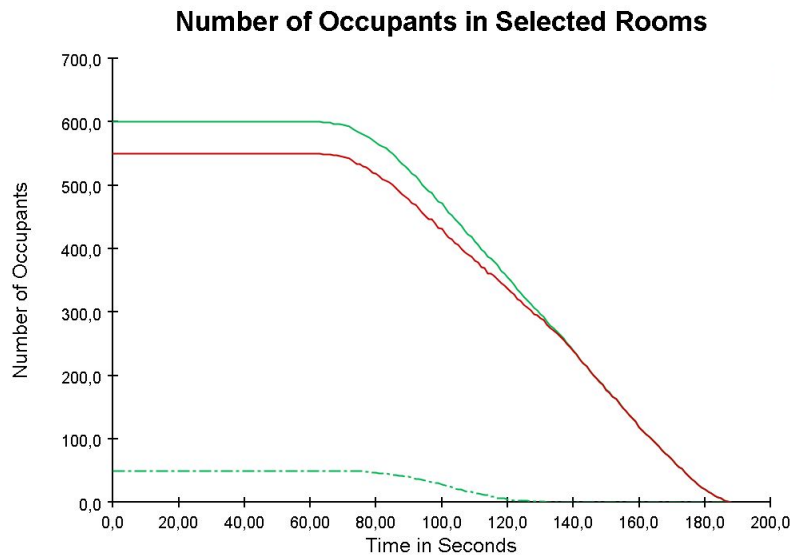
er det som raskest blir utfordret (SINTEF Byggforsk, 2016) Det ble i de innledende analysene funnet at kriteriet for sikt i rømningsvei på tribunen er det som først medfører kritiske forhold. Det er derfor valgt å kun vise hvordan sikten på tribunen påvirkes i de to scenariene.



Figur 8.3: Siktforhold på tribune, 3 meter foran trappeløp

I brannscenario 1, med brann i utstyrskom, viser verdiene for røykformørkelse at minst ti meter sikt opprettholdes i ca 140 sekunder på tribunen. I brannscenario 2, med brann i messe, inntreffer det kritiske siktforhold med sikt mindre enn 10 meter foran trappeløp på tribunen etter ca 70 sekunder som vist i figur 8.3. Den tilgjengelige rømningstiden er med dette betydelig redusert i forhold til situasjonen i brannscenario 1.

Ved evakueringssimuleringene ble det benyttet 50 personer spredt tilfeldig utover tribunen i begge scenariene. I scenario 1 ble det simulert 30 personer på aktivitetsflaten og i scenario 2 ble det simulert med 550 personer på aktivitetsflaten. Ved en sammenligning av evakueringstid og tid inntil kritiske forhold inntreffer, ble det funnet at personene på aktivitetsflaten kan evakuere i tilstrekkelige forhold. Derimot vil personene på tribunen ikke kunne evakueres før forholdene blir kritiske i brannscenarioet med en messe. Den nødvendige rømningstiden for personene på tribunen ble funnet å være ca 125 sekunder, som vist i figur 8.4.



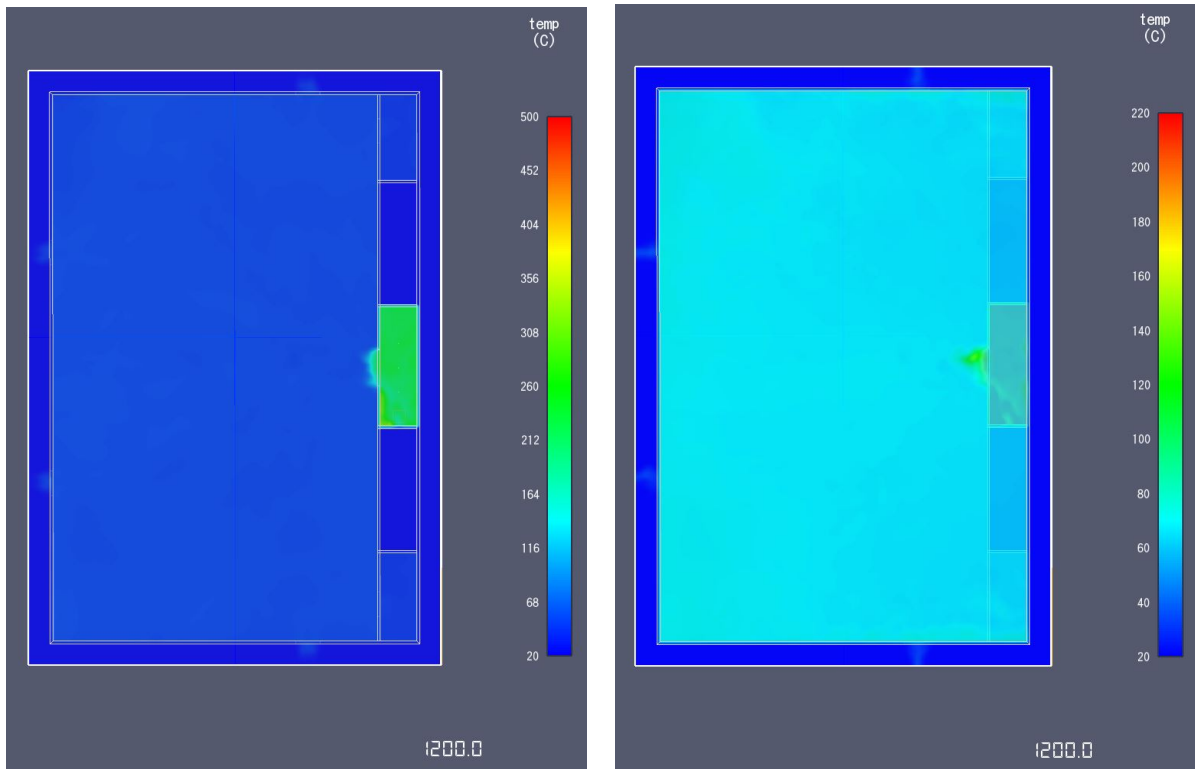
Figur 8.4: Nødvendig rømningstid i flerbrukshallen. Grønn stiptet linje viser rømning fra tribune, rød linje viser rømning fra aktivitetsflate, grønn solid linje viser total rømningstid

8.4.2 Brannforløpet over tid

Som beskrevet i kapittel 7.6.3, var det i forkant av simuleringene forventet at en brann i flerbrukshallen, uavhengig av scenario, ikke vil kunne utvikle seg slik at en overtenning i branncellen vil kunne inntreffe. Dette på grunn av flerbrukshallens store volum og høye tilgang på oksygen. Derimot ble det antatt at en lokal overtenning vil kunne inntreffe ved brann i utstysrommet.

Fra brannsimuleringene ble det funnet at overtenning ikke inntreffer i brannscenario 1 med brann i utstysrommet. Rommet ble simulert med en stor port på 3 x 2 meter (l x b), og røyken fra brannen spredte seg fra brannrommet og ut i selve hallen. Dette medførte at røyklaget inne i utstysrommet ble maksimalt 220 °C etter 1200 sekunder, se figur 8.5. Temperaturen i rommet nådde dermed ikke aktiveringstemperaturen som var satt til 250 °C for de tre ekstra brennerne plassert i utstysrommet.

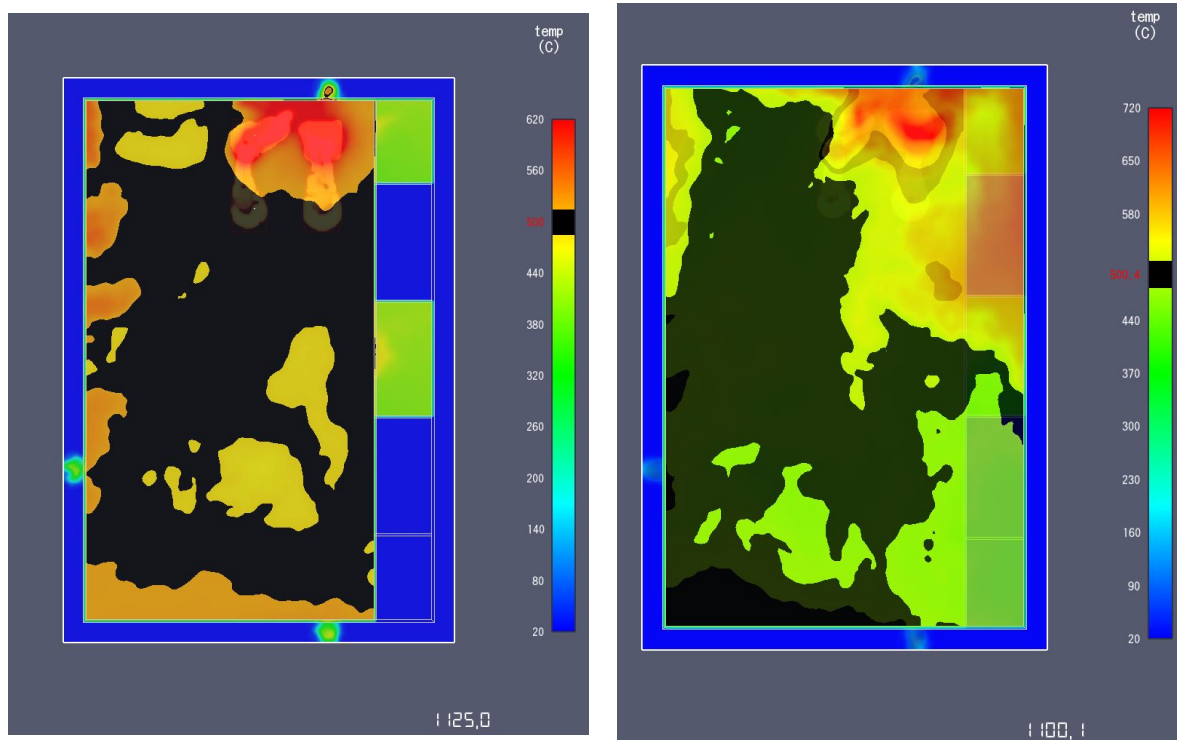
Ved brannscenario 2 med brann i tilført materiale ved en messe, ble det registrert 500 °C i store deler av røyklaget etter 1100 sekunder i en avstand 5 meter fra gulv, og etter 1125 sekunder i en avstand 2,5 meter over gulv, se figur 8.6. Ved 1200 sekunder var temperaturen på røyklaget i hele branncellen over 500 °C. Dette er en indikasjon på en overtenning i flerbrukshallen ved brann under en messe, som følge av økt brannbelastning.



(a) Temperatur i røyklag 2,5 meter over gulvflate

(b) Temperatur i røyklag 5 meter over gulvflate

Figur 8.5: Brannscenario 1 - Temperatur i branncellen etter 1200 sekunder



(a) Temperatur i røyklag 2,5 meter over gulvflate etter 1125 sekunder

(b) Temperatur i røyklag 5 meter over gulvflate etter 1100 sekunder

Figur 8.6: Brannscenario 2 - indikasjon på overtenning

9 | Diskusjon

9.1 Kartlegging og analyse av brannenergi

Etter endt kartlegging og analyse av brannenergien i de ti flerbrukshallene var det nødvendig å gjøre flere antagelser og forenklinger, som vist i kapittel 6.5. Usikkerhetene ved kartleggingen og beregningen ble kort diskutert i kapittel 6.8, og gjentas derfor ikke her. I diskusjonskapitlet vil jeg drøfte betydningen av et begrenset statistisk utvalg, hvordan ulike antagelser og forenklinger har hatt påvirkning på resultatet, og hvordan alternativ bruk påvirker sikkerhetsnivået i en flerbrukshall.

9.1.1 Statistisk utvalg

Hvor stort et utvalg bør være for at et resultat skal kunne generaliseres avhenger av hvor stor grad av usikkerhet som tillates i resultatet. Slik Belle (1998) påpeker, bør et utvalg være av så stor størrelse at man med rimelighet kan forvente at en analyse basert på normalfordeling skal være gyldig.

Analysen av brannenergi i denne oppgaven bygger på data hentet inn fra ti haller i Trondheimsområdet. Slik beregningene og analysen i kapittel 6.6 viser, medfører størrelsen på utvalget utfordringer knyttet til nøyaktigheten ved Gumbel-fordelingen. For den totale brannenergien ble det funnet en P-verdi på 0,91185. Dette betyr en 91,185 % sannsynlighet for at en gitt verdi langs kurven ved Gumbel-fordelingen kun er en tilfeldighet. Studerer man normalfordelingen i figur 6.4, er det tydelig at datasettet ikke er tilstrekkelig stort til at kurven kan bli optimalt tilpasset. Beregningsresultatet vil dermed kun fungere som en indikasjon på hvordan brannenergien i en flerbrukshall faktisk er.

Det er vanskelig å si noe om hvor mange kartlagte flerbrukshaller som skal til for å kunne sikre tilstrekkelig nøyaktighet i resultatene. Det er derimot helt tydelig at utvalget må utvides for å kunne øke nøyaktigheten, og på denne måten redusere P-verdien ved Gumbel-fordeling kraftig.

9.1.2 Antagelser og forenklinger knyttet til beregningen

For å kunne beregne den potensielt største brannenergien i branncellen ble det antatt at alle brennbare materialer er involvert i en brann. Alt fra rockeringer og håndballmål, til stenderverk og gulvkonstruksjoner ble dermed inkludert i beregningene. I tillegg ble det antatt at

alt brennbart materiale vil gjennomgå en fullstendig forbrenning. Dette er ikke nødvendigvis tilfellet, ettersom en slik antagelse krever at brannen har tilstrekkelig oksygen og høy nok temperatur til at alle materialer skal kunne involveres. Med andre ord er dette en svært konservativ antagelse, og medfører betydelig høyere verdier for den endelige brannenergien enn hva som er realistisk i et naturlig brannforløp.

Ved beregning av brannenergi oppgir standarden NS-EN 1991-1-2 at det skal foreligge en vurdering av andel beskyttet brannenergi. Standarden viser til at verdien av brannenergien kan reduseres i ubrennbare lukkede rom uten noen spesifikk brannteknisk dimensjonering dersom de holdes inntakt under branneksplosjon. I flere av de kartlagte hallene bestod de innvendige veggene og tak i utstysrommene av ubrennbare materialer uten noen gitt brannmotstand. Ettersom de var en del av selve aktivitetsflatens branncelle ble alt det brennbare materialet i rommene inkludert i beregningene. Dette er en urealistisk antagelse som medfører et høyere beregningsresultat enn dersom slik beskyttet brannenergi hadde blitt vurdert mer grundig. Antagelsen ble gjort på bakgrunn av at dørene/portene inn til utstysrommene ikke selv hadde noen kjent brannmotstand, og det derfor ikke var sikkert om de ville beholde sin integritet gjennom et brannforløp. Utslaget på den totale brannenergien ville derimot ikke blitt særlig stor ettersom den variable brannenergien i utstysrommene kun utgjør en mindre andel av den totale brannenergien i en flerbrukshall, slik som vist i kapittel 6.6.

Ved bruk av konservative antagelser vil et design kunne ende opp med løsninger som er sikrere og dyrere enn nødvendig. På den annen side, dersom ikke-konservative parametre er valgt, vil løsningene være usikre. Ideelt sett burde det derfor vært utført sannsynlighets- og sensitivitetsanalyser av resultatet for å oppnå mer nøyaktige resultater. Dette er ikke gjort i denne oppgaven, og svarene vil derfor kun fungere som en pekepinn, og vil ha behov for en senere verifikasjon.

9.2 Usikkerhet knyttet til den kvalitative og kvantitative analysen

Brannenergien i flerbrukshallene ble beregnet til å være betydelig høyere enn hva som var forventet ut fra de anbefalinger gitt i den tidligere HO-meldingen for røykventilasjon. En kvalitativ og kvantitativ analyse ble derfor gjennomført for å illustrere hvordan personsikkerheten påvirkes dersom brannlasten økes utover normal driftssituasjon i en flerbrukshall. Resultatene fra analysen viste at det sikkerhetsnivået svekkes dersom store mengder brennbart materiale tilføres et byggverk som i utgangspunktet ikke er dimensjonert for slik bruk.

En vurdering av ulike brannsikringstiltak har vært utenfor omfanget i denne oppgaven, men

tiltakene sprinkleranlegg og røykventilasjon nevnes her kort som eksempler på tiltak som vil kunne påvirke simuleringsresultatet. Slik Mostue (2004) påpekte er det store usikkerheter knyttet til et sprinkleranleggs pålitelighet og slokkeevne ved bruk i rom med stor takhøyde. Derimot ble det vist til at brannsikkerheten i flerbrukshaller forbedres dersom rom med normal takhøyde sprinkler. Ved å benytte sprinkler i utstysrommet i brannsimuleringen, vil den tilgjengelige rømningstiden i scenario 1 kunne forbedres. Røykventilasjonsanlegg er konstruert for å ventilere ut røyk og branngasser på et tidlig stadium, slik at mennesker som oppholder seg i bygningen skal få lengre tid til å rømme (Statens bygningstekniske etat, 2000). I brannscenario 2 vil implementering av denne typen tiltak over aktivitetsflaten trolig bedre rømningsforholdene inne i hallen og bidra til økt tilgjengelig rømningstid.

9.2.1 Brannforløp og tilgjengelig rømningstid

Et framtidig brannforløp er aldri kjent på det tidspunkt en analyse av brannsikkerheten utføres. Brannforløpet avhenger av en rekke faktorer, slik at det er vanskelig å kunne si noe helt sikkert om hvordan brannforløpet vil kunne utvikles. Ettersom det predikerte brannforløpet legges til grunn for å bestemme den tilgjengelige rømningstiden er det også knyttet usikkerhet til hvor lang denne tiden vil være.

Slik resultatene i kapittel 8.4 viser, oppstår det kritiske forhold for personer som oppholder seg på tribunen dersom det begynner å brenne på aktivitetsflaten under en messe. Plasse- ringen av brannen i startbrannrommet hadde betydning for tiden til kritiske forhold i rommet hvor brannen startet. Den tilgjengelige rømningstiden var kortest i det tilfellet der brannen startet i tilknytning til rømningsveien i nærheten av trapperommet til tribunen. Det ble imidlertid ikke forsøkt å simulere en brann med arnested på selve tribunen, ettersom det ble antatt mer sannsynlig at en brann ville oppstå i det tilførte brennbare materialet på selve aktivitetsflaten under en messe.

Et annet interessant funn ved simuleringene var det faktum at overtenning kan forekomme i flerbrukshallen ved simulering av brann i scenarioet med messe. Dette var på analysetidspunktet ikke forventet, ettersom det i teorien er vist til at slik overtenning ikke normalt inn- treffer i brannceller med stort romvolum og takhøyde. I simuleringene bygget røyklaget seg opp under taket, og etter ca 1125 sekunder nådde røyklaget en forholdsvis jevn temperatur over 500 °C i store deler av rommet.

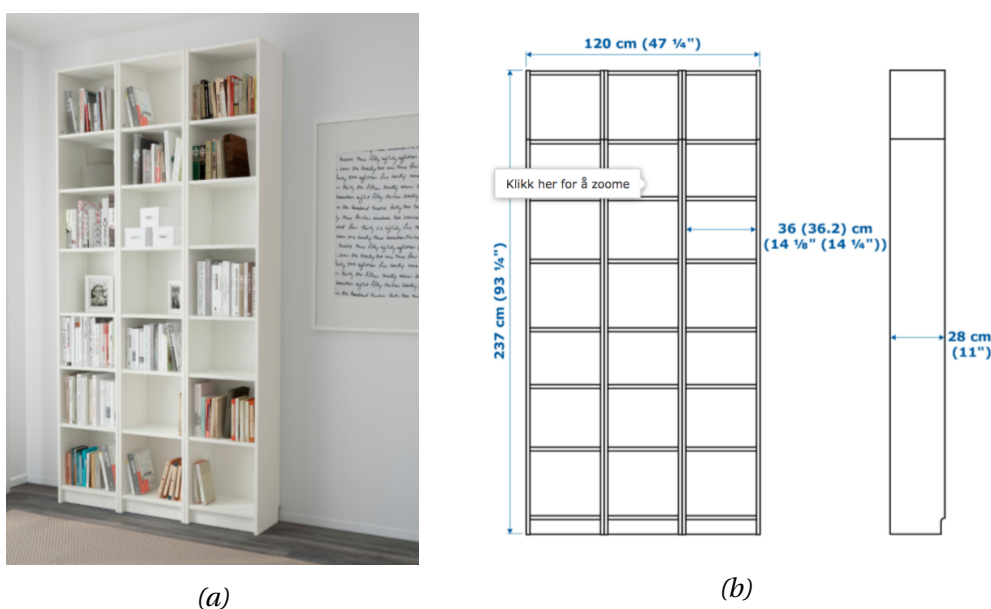
9.3 Konsekvens ved alternativ bruk av flerbrukshaller

Som vist i kapittel 6.6 er den spesifikke brannenergien i flerbrukshallene beregnet til å være $393,03 \text{ MJ/m}^2$, gitt ved 80 %-fraktil og Gumbel-fordeling. Dette er like innenfor det mye benyttede intervallet i regelverket på $50\text{--}400 \text{ MJ/m}^2$ som vanligvis blir lagt til grunn ved prosjektering av slike haller. Dersom flerbrukshallen benyttes til arrangementer utover den idrett de er tilrettelagt for, vil det dermed være en reell mulighet for at brannenergien overstiger den øvre verdien i dette intervallet.

9.3.1 Hva skal til før brannenergien overstiger 400 MJ/m^2 ?

For å tydeliggjøre hvilken mengde brennbart materiale som skal til før brannenergien overstiger 400 MJ/m^2 , kan man se på følgende eksempel der man sammenligner med bokhyller fylt med bøker eller fritidsbåter.

Figur 9.1 viser en Billy bokhylle fra Ikea. Ved beregninger tilsvarende de som er gjort for de ulike flerbrukshallene i kapittel 6, antas bokhyllen å ha en vekt på 80 kg. I tillegg antas det at hver hylle i bokhyllen er fylt med 10 bøker á 0,5 kg. For enkelthetsskyld antas bokhyllen med bøker å utgjøre til sammen 185 kg tre.



Figur 9.1: Bokhyllen Billy fra Ikea (IKEA, 2018)

En fritidsbåt kan være bygd opp på mange forskjellige måter og av ulike materialer. I dette eksemplet tas det utgangspunkt i et liten plastbåt uten motor som tilsammen veier 300 kg.

I eksemplet tas det utgangspunkt i en flerbrukshall med målene 45 x 30 x 8 meter (l x b x

h). Flerbrukshallen har dermed et omhyllingsareal på 3900 m². For å overstige 400 MJ/m² må det dermed tilføres materiale med en total energimengde på 27300 MJ. Som vist i tabell 9.1 tilsvarer dette kun 7,37 bokhyller eller 2,9 fritidsbåter. For å overstige 500 MJ/m² må det tilføres materiale med total energimengde på 417300 MJ, noe som tilsvarer 112,7 bokhyller fylt med bøker eller 44,87 båter.

Tabell 9.1: Mengde tilført materiale for å overstige standardintervallet på 50-400 MJ/m²

Materiale	Total brannenergi	Ekstra brannenergi	Netto brennverdi	Mengde tilført materiale	Illustrasjon
Tre	400 MJ/m ²	7 MJ/m ²	20 MJ/kg	1365 kg	7,37 bokhyller
Hard plast	400 MJ/m ²	7 MJ/m ²	46,5 MJ/kg	587 kg	2,9 båter
Tre	500 MJ/m ²	107 MJ/m ²	20 MJ/kg	20 865 kg	112,7 bokhyller
Hard plast	500 MJ/m ²	107 MJ/m ²	46,5 MJ/kg	8974 kg	44,87 båter

Ved bruk av en flerbrukshall til et loppemarked er det normalt et ønske om å kunne tillate flest mulig mennesker tilstede i hallen og flest mulig gjenstander som kan selges. Det er derfor nærliggende å tro at brannenergien ved slike tilfeller faktisk overskrider 400 MJ/m² dersom det tas utgangspunkt i at den totale spesifikke brannenergien i en flerbrukshall er 393,03 MJ/m².

9.3.2 Hvordan påvirkes sikkerhetsnivået i flerbrukshallene av endringer i brannenergien?

Slik eksemplet i kapittelet ovenfor viser, er det en reell mulighet for at brannenergien i en flerbrukshall overskrider den dimensjonerende verdien på 400 MJ/m² dersom hallen benyttes til andre arrangement. Men hva har dette egentlig å si for sikkerhetsnivået?

Brannenergi inngår som en viktig parameter i flere branntekniske tiltak som ofte implementeres i byggverk, blant annet ved prosjektering av bygningskonstruksjoners brannmotstand, maksimal tillatt areal uten seksjonering, og ved dimensjonering av sprinkleranlegg og røykventilasjon. Dersom en flerbrukshall er dimensjonert ut i fra verdien gitt i HO-melding 3/2000 som viste til at brannenergien trolig var under 50 MJ/m² (per omhyllingsflate), vil brannenergien ved en messe være betydelig høyere enn den verdien byggverket er dimensjonert for. Dette vil kunne medføre at brannsikringstiltakene ikke lenger er pålitelige.

10 | Konklusjon

Spesifikk brannenergi er et sentralt moment i brannteknisk prosjektering for å bestemme nødvendige branntekniske tiltak, og kan enten beregnes eller tilpasses ved hjelp av anerkjente statistiske verdier for ulike virksomheter. For dimensjonering av idrettsbygg er slike statistiske verdier ikke tilgjengelig i norsk litteratur. Denne oppgaven har derfor tatt for seg en kartlegging og analyse av brannenergien i ti ulike flerbrukshaller i Trondheimsområdet.

Ved bruk av kombinasjonsmetoden ble alt brennbart materiale kartlagt i de ti flerbrukshallene. Den innhentede dataen ble benyttet til å beregne brannenergien i hver av hallene, og deretter til å bestemme en statistisk verdi for brannenergi i denne typen virksomhet. Beregningene ble gjennomført etter den anbefalte prosedyren beskrevet i NS-EN 1992-1-2 tillegg E og Byggforskserien 321.051.

Beregningene viser at den variable brannenergien per gulvflate i en flerbrukshall er $q_{f,k} = 98,47 \text{ MJ/m}^2$, gitt ved 80 %-fraktil og Gumbel-fordeling. Den totale dimensjonerende spesifikke brannenergien per omhyllingsflate basert på de ti hallene ble beregnet til å være $393,03 \text{ MJ/m}^2$, gitt ved 80 %-fraktil og Gumbel-fordeling. Gumbel-fordelingen for de to resultatene viste seg å ikke være tilstrekkelig tilpasset det statistiske utvalget. Resultatet er derfor ikke tilstrekkelig nøyaktig, men vil kunne fungere som en pekepinn på hva den faktiske brannenergien i en flerbrukshall er. Dette er verdier som er betydelig høyere enn hva den tidligere temaveilederen HO 3/2000 om røykventilasjon antydte. Veilederen viste til en spesifikk brannbelastning per omhyllingsflate mindre enn 50 MJ/m^2 . Den spesifikke brannenergien i flerbrukshallene er med andre ord i den øvre delen av det mye brukte preaksepterte intervallet fra VTEK på $50\text{-}400 \text{ MJ/m}^2$.

Flerbrukshaller benyttes i dag ofte til flere aktiviteter og arrangementer i tillegg til alminnelig idrett. Ved bruk av en slik hall til eksempelvis en konsert, loppemarked eller en messe, tilføres det normalt store mengder brennbart materiale og nye antennelseskilder. Det ble analysen av brannenergi funnet en total dimensjonerende brannenergi på $393,03 \text{ MJ/m}^2$ for flerbrukshallene. Som vist i kapittel 9.3.1 er det dermed ikke store mengder brennbart materiale som skal til før brannenergien overstiger 400 MJ/m^3 . I tillegg vil persontallet være betydelig høyere enn hva som er vanlig ved normal driftssituasjon. I denne oppgaven har det derfor blitt forsøkt å illustrere den risikoen alternativ bruk medfører for personsikkerheten. Som et resultat av den kvalitative og kvantitative analysen er det funnet en indikasjon på at personsikkerheten påvirkes negativt ved slik bruk dersom ikke andre tiltak implementeres.

Videre arbeid

Resultatene fra analysen av brannenergi viser at det er helt nødvendig å foreta kartlegging av flere flerbrukshaller for å kunne oppnå et mer nøyaktig estimat av den statistiske distribusjonen av brannenergien i flerbrukshaller. Det anbefales i tillegg en verifikasjon av metoden benyttet i oppgaven, ettersom det i litteratursøket ikke ble funnet noen tidligere analyser av brannenergien i andre idrettsbygg.

Resultatene fra de tre analysene viser i tillegg at det er behov for en grundigere analyse av hvordan personsikkerheten og de branntekniske tiltakene implementert i et byggverk påvirkes av økt brannenergi, slik som ved en messe. Ved å studere kostnad-nytte for ulike tiltak, vil dette kunne skape et bedre beslutningsgrunnlag ved prosjektering av fremtidige flerbrukshaller.

Referanseliste

- Andersen, E. K. (2006). *Hva gjør vi med plasten?* Oslo: Norges Naturvernforbund. Tilgjengelig fra: https://naturvernforbundet.no/getfile.php/133639/Dokumenter/Rapporter%20og%20faktaark/2006%20og%202005/1_Hva_gjor_vi_med_plasten.pdf (Hentet: 11.04.2018).
- Belle, G. van (1998). *STRUTS: Statistical Rules of Thumb*. Tilgjengelig fra: <http://www.nrcse.washington.edu/research/struts/chapter2.pdf> (Hentet: 05.05.2018).
- Bjelland, H. *et al.* (2015). «The Concepts of Safety Level and Safety Margin: Framework for Fire Safety Design of Novel Buildings». I: *Fire Technology* 51.2, s. 409–441.
- Bolstad, K. og Urstad, T. (2015). *Personbil påkjørt av toget i Råde*. Tilgjengelig fra: <https://www.moss-avis.no/nyheter/rade/togulykker/personbil-pakjort-av-toget-i-rade/s/5-67-193113> (Hentet: 04.05.2018).
- Boverket (2013). *Boverkets ändring av verkets allmänna råd (2011:27) om analytisk dimensio-nering av byggnaders brandskydd*. Tilgjengelig fra: <https://rinfo.boverket.se/bbrad/pdf/bfs2013-12-bbrad3.pdf> (Hentet: 19.05.2018).
- Buchanan, A. H. (2017). *Structural Design for Fire Safety*. Second Edition. New Zealand: Wiley.
- DIBK (2013). *Eldre temaveiledninger*. Tilgjengelig fra: <https://dibk.no/byggereglene/liste-over-tidligere-regelverk/Eldre-temaveiledninger/>.
- (2017a). *Byggteknisk forskrift (TEK17)*. Tilgjengelig fra: <https://dibk.no/byggereglene/byggteknisk-forskrift-tek17/> (Hentet: 13.02.2018).
- (2017b). *Veiledning til kapittel 11 - Sikkerhet ved brann*. Tilgjengelig fra: https://dibk.no/globalassets/byggteknisk-forskrift-tek17/11-vtek-kapittel-11_01.12.17.pdf (Hentet: 05.05.2018).
- Drysdale, D. (2011). *An Introduction to Fire Dynamics*. 3rd ed. Chichester: Wiley.
- DSB (2018). *Antall branner i næringsbygg. Næringsgruppe. 2009-2015*. Tilgjengelig fra: http://stat.dsb.no/Dialog/varval.asp?ma=010214&ti=Antall+branner+i+n%E6ringsbygg%2E+N%E6ringsgruppe%2E+2009%2D2015&path=../Database/DSB/1_Brann/2_Bygning/2_Fom%202009/&lang=5 (Hentet: 30.04.2018).
- Easterby-Smith, M., Thorpe, R. og Jackson, P. R. (2015). *Management and Business Research*. 5th. Los Angeles: Sage.
- Finans Norge (2017). *BRASK - Brannskadestatistikk*. Tilgjengelig fra: <https://brask.finansnorge.no/default.aspx> (Hentet: 30.04.2018).
- Fontana, M. *et al.* (2016). «Fire Load Density». I: *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. Red. av M. J. Hurley *et al.* Fifth Edition. New York, NY: Springer New York, s. 1131–1142. DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0_35.
- Forskningsrådet (2001). *Kvalitet og/eller relevans?* Tilgjengelig fra: https://www.forskningsradet.no/bladetforskning/Nyheter/Kvalitet_ogeller_relevans/1250813612404 (Hentet: 11.05.2018).

- Huang, D., Zhu, G.-Q. og Pan, R.-L. (2018). «Probabilistic Model of Smoke Filling in Large Spaces». I: *Procedia Engineering* 211, s. 271–279. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.12.013.
- IKEA (2018). *BILLY*. Tilgjengelig fra: <https://www.ikea.com/no/no/catalog/products/S39017839/> (Hentet: 06.05.2018).
- Khan, M. M., Tewarson, A. og Chaos, M. (2016). «Combustion Characteristics of Materials and Generation of Fire Products». I: *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. Red. av M. J. Hurley *et al.* Fifth Edition. New York, NY: Springer New York, s. 1143–1232. DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0_36.
- Kong, D. *et al.* (2013). «A Monte Carlo analysis of the effect of heat release rate uncertainty on available safe egress time». I: *Journal of Fire Protection Engineering* 23.1, s. 5–29. DOI: 10.1177/1042391512452676.
- Kuligowski, E. D. (2016). «Human Behavior in Fire». I: *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. Red. av M. J. Hurley *et al.* Fifth Edition. New York, NY: Springer New York, s. 2070–2114. DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0_58.
- Kultur- og kirke departementet (2005). *Flerbrukshaller. Planlegging, bygging, drift og vedlikehold*. Tilgjengelig fra: https://www.regjeringen.no/globalassets/upload/KKD/Idrett/flerbruk_web.2005pdf.pdf (Hentet: 05.05.2018).
- Laycock, P., Cottis, R. og Scarf, P. (1990). «Extrapolation of Extreme Pit Depths in Space and Time». I: *Journal of the Electrochemical Society* 137.1, s. 64–69. DOI: 10.1149/1.2086440.
- Lemaire, T. og Kenyon, Y. (2006). «Large Scale Fire Tests in the Second Benelux Tunnel». I: *Fire Technology* 42, s. 329–350. DOI: 10.1007/s10694-006-8434-4.
- MathWave Technologies (2018). *EasyFit - Distribution Fitting Software*. Tilgjengelig fra: <http://www.mathwave.com/en/home.html> (Hentet: 25.04.2018).
- Mostue, B. A. (2004). *Effekt av sprinkler i flerbrukshaller og sykehjem*. (NBL A04101). Trondheim: SINTEF. Tilgjengelig fra: <http://www.risefr.no/media/publikasjoner/upload/nbl-a04101.pdf> (Hentet: 20.03.2018).
- NFPA (2009). *NFPA 92B: Standard for Smoke Management Systems in Malls, Atria, and Large Spaces*. Tilgjengelig fra: <https://www.nfpa.org/codes-and-standards/all-codes-and-standards/list-of-codes-and-standards/detail?code=92B> (Hentet: 18.05.2018).
- (2016). *NFPA 557: Standard for Determination of Fire Loads for Use in Structural Fire Protection Design*. Tilgjengelig fra: <https://www.nfpa.org/codes-and-standards/all-codes-and-standards/list-of-codes-and-standards/detail?code=557> (Hentet: 16.05.2018).
- NIST (2018a). *Critical values and p values*. Tilgjengelig fra: <https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/prc/section1/prc131.htm> (Hentet: 30.05.2018).
- (2018b). *Extreme Value Distribution*. Tilgjengelig fra: <https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/apr/section1/apr163.htm> (Hentet: 30.05.2018).

- (2018c). *Kolmogorov-Smirnov Goodness-of-Fit Test*. Tilgjengelig fra: <https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/eda/section3/eda35g.htm> (Hentet: 30.05.2018).
- NTNU (2018). *Finne kilder*. Tilgjengelig fra: <https://innsida.ntnu.no/wiki/-/wiki/Norsk/Finne+kilder> (Hentet: 20.01.2018).
- Odalsportalen.no (2014). *Idrettshallen fylt opp av muligheter*. Tilgjengelig fra: <http://www.odalsportalen.no/Nyheter/2014/10/27/Yrkesmessa> (Hentet: 30.04.2018).
- Olsson, N. (2011). *Praktisk rapportskrivning*. Trondheim: Tapir akademisk.
- Ore, S. og Stori, A. (2018). «Plast». I: Store Norkse Leksikon. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/plast> (Hentet: 09.04.2018).
- Petterson, N. M. (2002). «Assessing the Feasibility of Reducing the Grid Resolution in FDS Field Modelling». Masteroppg. Christchurch, New Zealand: University of Canterbury. Tilgjengelig fra: https://ir.canterbury.ac.nz/bitstream/handle/10092/8288/patterson_fire_research_02-12.pdf?sequence=1&isAllowed=y (Hentet: 07.05.2018).
- Proulx, G. (2001). «Occupant Behaviour and Evacuation». I: *9th International Fire Protection Symposium*. Munich, s. 219–232. Tilgjengelig fra: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.11.202&rep=rep1&type=pdf> (Hentet: 23.04.2018).
- Rausand, M. (2011). *Risk Assessment - Theory, Methods and Applications*. New Jersey: Wiley.
- rb.no (2018). *Loppemarked i Fjellhamarhallen*. Tilgjengelig fra: <https://www.rb.no/vis/kalender/events/31312380> (Hentet: 30.04.2018).
- Reitan, N. K., Bøe, A. G. og Stensaas, J. P. (2016). *Brannsikkerhet og alternative energibærere: El- og gasskjøretøy i innelukkede rom*. (A16 20096-1:1). Trondheim: SP Fire Research AS. Tilgjengelig fra: <http://risefr.no/media/publikasjoner/upload/2016/spfrapport-a16-20096-1.pdf> (Hentet: 04.05.2018).
- SFPE (2018). *Research Needs for the Fire Safety Engineering Profession: The SFPE Roadmap*. Tilgjengelig fra: http://c.ymcdn.com/sites/www.sfpe.org/resource/resmgr/Roadmap/180117_Roadmap_Report_Final.pdf (Hentet: 05.05.2018).
- SINTEF Byggforsk (2013a). *321.026 Brannsikkerhet. Dokumentasjon av prosjektering, utførelse og kontroll - oversikt*. Tilgjengelig fra: https://byggforsk.no/dokument/3114/brannsikkerhet_dokumentasjon_av_brannsikkerhetsstrategi (Hentet: 12.04.2018).
- (2013b). *321.051 Brannenergi i bygninger. Beregninger og statistiske verdier*. Tilgjengelig fra: https://www.byggforsk.no/dokument/4096/brannenergi_i_bygninger_beregninger_og_statistiske_verdier (Hentet: 20.01.2018).
- (2015). *571.523 Trevirke. Treslag og materialeegenskaper*. Tilgjengelig fra: https://byggforsk.no/dokument/578/trevirke_treslag_og_materialeegenskaper (Hentet: 04.04.2018).
- (2016). *520.387 Tilgjengelig rømningstid ved brann*. Tilgjengelig fra: https://www.byggforsk.no/dokument/2955/tilgjengelig_roemningstid_ved_brann (Hentet: 20.01.2018).

- Solem, L. K. (2017). *Truck forårsaket skader for 200 millioner*. Tilgjengelig fra: <https://www.dn.no/nyheter/2017/04/20/1948/Handel/truck-forarsaket-skader-for-200-millioner> (Hentet: 04.05.2018).
- SSB (2008). *Standard for næringsgruppering*. Tilgjengelig fra: https://www.ssb.no/a/publikasjoner/pdf/nos_d383/nos_d383.pdf (Hentet: 30.04.2018).
- Standard Norge (2008). *NS-EN 1991-1-2: 2002+NA:2008 Eurokode 1: laster på konstruksjoner. Del 1-2: Allmenne laster. Laster på konstruksjoner ved brann*. Tilgjengelig fra: <http://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=324904> (Hentet: 23.01.2018).
- (2012). *NS 3901:2012 Krav til risikovurdering av brann i byggverk*. Tilgjengelig fra: <http://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=532801> (Hentet: 05.05.2018).
 - (2014). *SN-INSTA/TS 950:2014. Analytisk brannteknisk prosjektering. Komparativ metode for verifikasjon av brannsikkerhet i byggverk*. Tilgjengelig fra: <http://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=692000> (Hentet: 22.04.2018).
 - (2017). *NS-EN ISO 13943:2017 Brannsikkerhet - Terminologi (ISO 13943:2017)*. Tilgjengelig fra: <http://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=946158> (Hentet: 17.04.2018).
- Statens bygningstekniske etat (2000). *Melding HO-3/2000 Røykventilasjon Temaveiledning*. Tilgjengelig fra: https://dibk.no/globalassets/byggeregler/tidligere_regelverk/eldre_temaveiledere_og_rundskriv/2000ho-3-roykventilasjon.pdf (Hentet: 05.05.2018).
- Steen-Hansen, A., Reitan, N. K. og Andersson, E. (2013). *Plast i byggevarer og brannsikkerhet*. (NBL A13134). Trondheim: SINTEF NBL as. Tilgjengelig fra: <http://www.risefr.no/media/publikasjoner/upload/nbl-a13134.pdf> (Hentet: 11.04.2018).
- Steen-Hansen, A., Steinbakk, S. H. og Storesund, K. (2012). *Brannsikkerhet og helse- og miljøeffekter i forbindelse med stoppete møbler, madrasser og innredningstekstiler*. (NBL A12106). Trondheim: Sintef NBL as. Tilgjengelig fra: <http://www.risefr.no/media/publikasjoner/upload/nbl-a12106.pdf> (Hentet: 25.04.2018).
- Thomas, P. (1986). «Design guide: Structure fire safety CIB W14 Workshop report». I: *Fire Safety Journal* 10.2, s. 77–137. DOI: 10.1016/0379-7112(86)90041-X.
- Thunderhead Enigneering (2014). *PyroSim User Manual*. Tilgjengelig fra: <https://www.thunderheadeng.com/wp-content/uploads/downloads/2014/02/PyroSimManual.pdf> (Hentet: 07.05.2018).
- (2018). *User manual*. Tilgjengelig fra: https://www.thunderheadeng.com/wp-content/uploads/dlm_uploads/2011/07/users_guide-2.pdf (Hentet: 07.05.2018).

- Walters, R., Hackett, S. og Lyon, R. (2000). «Heats of combustion of high temperature polymers». I: *Fire And Materials* 24.5, s. 245–252. DOI: 10.1002/1099-1018(200009/10)24:5<245::AID-FAM744>3.0.CO;2-7.
- Witkowski, A., Stec, A. A. og Hull, T. R. (2016). «Thermal Decomposition of Polymeric Materials». I: *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. Red. av M. J. Hurley *et al.* Fifth Edition. New York, NY: Springer New York, s. 167–254. DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0_7.
- Yii, H. W. (2000). «Effect of Surface Area and Thickness on Fire Loads». Ph.d.-avh. University of Canterbury. Tilgjengelig fra: <http://hdl.handle.net/10092/8304> (Hentet: 20.02.2018).
- Yii, Buchanan, A. H. og Fleischmann, C. M. (2006). «Simulating the effects of fuel type and geometry on post-flashover fire temperatures». I: *Fire Safety Journal* 41.1, s. 62–75. DOI: 10.1016/j.firesaf.2005.09.001.
- Zalok, E. (2011). «Validation of Methodologies to Determine Fire Load for Use in Structural Fire Protection». Ph.d.-avh. Tilgjengelig fra: <https://www.nfpa.org/-/media/Files/News-and-Research/Resources/Research-Foundation/rffireloadsurveymethodologies.ashx?la=en&hash=A81006BE55CCE37EF84E244E8D635AECCDE025F6> (Hentet: 06.02.2018).
- Zalok, E. og Eduful, J. (2013). «Assessment of fuel load survey methodologies and its impact on fire load data». I: *Fire Safety Journal* 62, s. 299–310. DOI: 10.1016/j.firesaf.2013.08.011.
- Östman, B. (2010). *Fire safety in timber buildings : technical guideline for Europe*. Version 3. Stockholm: SP Technical Research Institute of Sweden SP Träteknik.

A | Skjema for kartlegging av variabel brann- energi

B | Skjema for kartlegging av permanent brannenergi

Permanent brannenergi

Navn på hall:

Dato:

Gulvareal:
Omhyllingsflate:

	Selve hallen	Sekretariat	Tribune
	L = m B = m H = m A = m ² A (fra tegning) m ²	L = m B = m H = m A = m ² A (fra tegning) m ²	L = m B = m H = m A = m ² A (fra tegning) m ²
Gulvkonstruksjon	Selve hallen	Sekretariat	Tribune
Veggkonstruksjoner	Selve hallen	Sekretariat	Tribune
Takkonstruksjoner	Selve hallen	Sekretariat	Tribune

C | Brennverdier

Brennverdi for et utvalg ulike plastikkmaterialer [MJ/kg]

Materiale	Standard Norge, 2008	Drysdale, 2011	Khan, Tewarson og Chaos, 2016	Walters, Hackett og Lyon, 2000	Thomas, 1986
Polyamid (Nylon)		31,9	30,8	28,76	
Polyester	30		32,5		30-31
Polyetylen (PE)	40	46,5	43,6	44,6	43-44
Polyetylentereftalat (PET)		22	22	23,22	
Polymetylmetakralat (PMMA)		26,2	25,2	25	
Polypropylen (PP)	40	46	39,2	42,66	42-43
Polystyren (PS)	40	41,6	39,2	41,96	39-40
Polyuretan (PU)	25				22-24
Polyuretanskum (PUR)		24,4	23,2-27,2		23-28
Polyvinylklorid (PVC)	20	19,9	26,4		16-17
Gummi	30				31-33

Brennverdi for et utvalg ulike cellulosematerialer [MJ/kg]

Materiale	Standard Norge, 2008	Khan, Tewarson og Chaos, 2016	Zalok, 2011	Thomas, 1986
Papir	20		16,3	13-21
Eik (oak)		17,1	17,1-18,7	
Furu (pine)		17,9	19,11	
Bjørk (birch)			18,7	
Bøk (beech)			18,7	
Lønn (maple)			17,8	
Trevirke	17,5		17-20	15-18

Brennverdi for et utvalg ulike tekstiler [MJ/kg]

Materiale	Standard Norge, 2008	Khan, Tewarson og Chaos, 2016	Zalok, 2011	Thomas, 1986
Bomull	20		15,6-20	16-20
Ull	20		20,5-26	21-26
Nylon		30,8	23,2-33,1	
Polyester	30	32,5	23,2-32,5	30-31
Klær	20		17-21	17-21