

Malin Salvesen

## Brannsikkerhet i idrettshaller

Kartlegging av brannenergi i flerbrukshaller i Oslo-området

Juni 2019



# Brannsikkerhet i idrettshaller

Kartlegging av brannenergi i flerbrukshaller i Oslo-området

**Malin Salvesen**

Bygg- og miljøteknikk

Innlevert: Juni 2019

Hovedveileder: Knarud, Jon Ivar Belghaug

Medveileder: Aas, Bjørn

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Institutt for bygg - og miljøteknikk



## **Forord**

Denne masteroppgaven er det avsluttende arbeidet på den 5-årige sivilingeniørutdanningen Bygg- og miljøteknikk ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet. Oppgaven er skrevet på vårsemesteret 2019, og tilsvarer 30 studiepoeng i faget TBA4905 Bygnings- og materialteknikk.

Oppgavens tema er Brannsikkerhet i idrettshaller. Gjennom arbeidet med oppgaven blir karakteristiske verdier for brannenergien i ti eksisterende flerbrukshaller i Oslo-området kartlagt. Dette for å fremskaffe statistiske verdier for spesifikk variabel brannenergi for bygningstypen da dette er manglende i NS-EN 1991-1-2. Videre undersøkes også den opptredende dimensjonerende spesifikke brannenergien i byggverkene.

En stor takk rettes til veileder Jon Ivar Knarud for støtte, gode råd og veiledning gjennom hele prosessen. Stor takk også til Bjørn Aas for god hjelp i arbeidet med å finne flerbrukshaller til den empiriske analysen. Videre ønsker jeg å rette en takk til Oslo Undervisningsbygg og Kultur- og idrettsbygg Oslo for god hjelp til å fremskaffe dokumentasjon og tilgang til flerbrukshallene i deres eiendomsportefølje.

Oslo, juni 2019

Malin Salvesen

## Sammendrag

Den faktiske brannenergien i flerbrukshaller er ofte dårlig dokumentert i den branntekniske dokumentasjonen. Den dimensjonerende spesifikke brannenergien per omhyllingsflate er i stor grad kun antatt til å ligge innenfor det preaksepterte intervallet fra VTEK på 50-400 MJ/m<sup>2</sup> uten noen nærmere beregning og dokumentasjon. Dette er et stort intervall og brannutviklingen kan forventes å opptre ulikt ved verdier for brannenergi i intervallets ytterpunkter.

Brannenergi benyttes for å bestemme en rekke ulike branntekniske tiltak, og er derfor et sentralt element ved brannteknisk prosjektering. Brannenergien til et byggverk er summen av varmemengde som kan frigis ved fullstendig forbrenning av alle brennbare materialer. Dette innebærer brennbart innhold inne i bygningen og også brennbare deler av bygningskonstruksjonen. Dette defineres som henholdsvis variabel og permanent brannenergi. Førstnevnte er tilknyttet bruken av bygningen og er forventet å variere over bygningens brukstid. Verdien representeres derfor ved hjelp av statistiske verdier for ulike bruksklasser som tar høyde for denne variasjonen. Slike statistiske verdier er for en rekke bygningskategorier gitt i Eurokode 1 del 1-2. Disse er her representert ved Gumbel-fordelingen, gitt ved 80 %-fraktilen. Verdiene er dermed forventet å ikke bli overskredet i løpet av 80 % av bygningens brukstid. Slike statistiske verdier for den variable brannenergien er imidlertid manglende for bygningstypen flerbrukshall.

Våren 2018 ble karakteristiske verdier for brannenergien i ti flerbrukshaller i Trondheimsområdet kartlagt. Det ble da identifisert at den dimensjonerende spesifikke brannenergien ofte lå i øvre del av intervallet, og to av de kartlagte hallene hadde verdier som overskred intervallet (Berger, 2018).

Denne oppgaven er gjennomført for å styrke det statistiske underlaget for bygningstypen flerbrukshall; ti verdier for den spesifikke variable brannenergien er for få til en god analyse i Gumbel-fordelingen. Denne oppgaven fremskaffer karakteristiske verdier for brannenergien i ytterligere ti flerbrukshaller i Oslo-området. Datasettet med karakteristiske verdier for bygningstypen er dermed bestående av tyve verdier, og en statistisk analyse er forventet å gi mer nøyaktige verdier.

Beregningene viser at den variable brannenergien per gulvareal i flerbrukshall gitt ved 80 %-fraktilen i en Gumbel-fordeling er  $q_{f,k} = 79,65$  MJ/m<sup>2</sup>. For åtte av ti av de kartlagte flerbrukshallene i denne oppgaven var den dimensjonerende spesifikke brannenergien per omhyllingsflate innenfor det oppgitte intervallet i branndokumentasjonen på 50-400 MJ/m<sup>2</sup>. For to av hallene var imidlertid den dimensjonerende spesifikke brannenergien i branndokumentasjonen oppgitt til å være under 50 MJ/m<sup>2</sup> per omhyllingsflate. Dette viste seg ved kartleggingen å ikke være tilfellet, og verdiene ble beregnet til å være henholdsvis 247,04 MJ/m<sup>2</sup> og 131,77 MJ/m<sup>2</sup>.

## Abstract

The occurring fire load density in sport facilities is often poorly documented in the fire safety documentation. The design fire load per surface area of the enclosure is often assumed to be inside the pre-accepted interval from the Norwegian regulations, 50-400 MJ/m<sup>2</sup>, without further calculation and documentation. This is a large interval and the fire development can be expected to progress differently with fire load densities at the extremes of the interval.

Fire load is used for determining a number of different fire engineering measures, and it is a central element for fire safety design. The fire load in a building is the amount of heat that can be released when all the combustible materials go through complete combustion. This includes combustible materials inside the building and also the combustible parts of the building construction. This is defined as variable and permanent fire load respectively. The former is associated with the use of the building and is expected to vary over the building's lifetime. The value is therefore represented with statistical values that are based on different use of the building. Such statistical values are for a number of building categories given in the Eurocode 1 part 1-2. These values are represented as the 80 %-fractile of the Gumbel-distribution and are therefore expected not to be exceeded during 80 % of the building lifetime. Such statistical values for the variable fire load is missing for sport facilities.

In the spring of 2018 characteristic values for the fire load in ten sport facilities in the Trondheim area was surveyed. The design fire load density was then identified to lie in the upper part of the used interval, and for two of the buildings surveyed the calculated values exceeded the interval (Berger, 2018).

This thesis has been conducted to improve the statistical basis for sport facilities, as ten values for the specific variable fire load is not enough for a good analysis with the Gumbel-distribution. This thesis provides characteristic values for fire load for ten additional sport facilities in Oslo. The dataset with characteristic values for the building type is thus composed of twenty values, and a statistical analysis is expected to give more accurate values.

The calculations show that the variable fire load per floor area given by the 80 %-fractile in the Gumbel-distribution is  $q_{f,k} = 79,65 \text{ MJ/m}^2$ . For eight out of the ten surveyed sport facilities in this thesis the design fire loads per surface area of the total enclosure were inside the interval used in the fire documentation of 50-400 MJ/m<sup>2</sup>. For two of the surveyed sport facilities the design fire loads per surface area of the total enclosure were stated to be under 50 MJ/m<sup>2</sup> in the fire documentation. However, the survey revealed that this was not the case, and the design fire loads in these two facilities were calculated to be 247,04 MJ/m<sup>2</sup> and 131,77 MJ/m<sup>2</sup> respectively.

# Innholdsfortegnelse

<b>Forord</b> .....	<b>I</b>
<b>Sammendrag</b> .....	<b>II</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>III</b>
<b>Figurliste</b> .....	<b>VII</b>
<b>Tabelliste</b> .....	<b>VII</b>
<b>1 Introduksjon</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1 Bakgrunn</b> .....	<b>1</b>
1.1.1 Generelt.....	1
1.1.2 Flerbrukshall.....	1
<b>1.2 Problemstilling</b> .....	<b>2</b>
<b>1.3 Målformulering</b> .....	<b>3</b>
<b>1.4 Avgrensninger</b> .....	<b>3</b>
<b>1.5 Oppgavens oppbygging</b> .....	<b>4</b>
<b>2 Metode</b> .....	<b>6</b>
<b>2.1 Overordnet om valgt forskningsmetode</b> .....	<b>6</b>
<b>2.2 Litteraturstudie</b> .....	<b>6</b>
<b>2.3 Empirisk analyse av flerbrukshaller</b> .....	<b>7</b>
<b>3 Brannenergi</b> .....	<b>8</b>
<b>3.1 Generelt</b> .....	<b>8</b>
<b>3.2 Brannenergi i regelverket</b> .....	<b>8</b>
3.2.1 Brannenergi i dagens regelverk.....	8
3.2.2 Historisk utvikling av brannenergi i regelverket.....	9
<b>3.3 Ulike metoder for kartlegging av brannenergi</b> .....	<b>11</b>
3.3.1 Generelt.....	11
3.3.2 Veiningsmetoden.....	11
3.3.3 Inventarmetoden.....	12
3.3.4 Kombinasjonsmetoden.....	13
3.3.5 Spørreundersøkellesmetoden.....	13
3.3.6 Undersøkelse av nettsider med bilder av byggets rom.....	14
3.3.7 Årsaker til ulike resultater i litteraturen.....	14
<b>3.4 Beregning av brannenergi</b> .....	<b>15</b>
3.4.1 Generelt.....	15
3.4.2 Netto brennverdi.....	16
3.4.3 Mengde brennbart materiale.....	16
3.4.4 Beskyttelsesfaktor.....	16
3.4.5 Karakteristisk brannenergi.....	17
3.4.6 Karakteristisk spesifikk brannenergi.....	17
3.4.7 Statistiske verdier for spesifikk brannenergi.....	17
3.4.8 Dimensjonerende spesifikk brannenergi.....	18
<b>3.5 Vurdering av beskyttet brannenergien i litteraturen</b> .....	<b>19</b>
<b>3.6 Statistiske fordelingsfunksjoner for brannenergi</b> .....	<b>21</b>
3.6.1 Generelt.....	21
3.6.2 Ekstremverdifordelinger.....	22
<b>3.7 Faktorer som påvirker brannens utvikling</b> .....	<b>23</b>
3.7.1 Generelt.....	23
3.7.2 Varmedavgivelseshastighet.....	23
3.7.3 Type brensel.....	24
3.7.4 Geometriske faktorer.....	24
3.7.5 Ventilasjonsforhold.....	24



<b>4</b>	<b>Kartlegging av flerbrukshallene .....</b>	<b>25</b>
4.1	Valg av analyseobjekter.....	25
4.2	Kartleggingsmetode .....	27
4.3	Forarbeid før befaringene.....	27
4.4	Kategorisering av materialene.....	28
4.5	Inhomogene elementer.....	28
4.6	Ulike materialers densitet.....	29
4.7	Bidrag fra bygningskonstruksjonen.....	30
4.8	Netto brennverdi .....	31
4.9	Faktorer og verdier brukt i beregningene .....	32
4.9.1	Beskyttet brannenergi i bygningskonstruksjonen.....	32
4.9.2	Faktor for brannaktiveringsrisiko .....	33
4.10	Observasjoner i forbindelse med kartleggingene.....	34
4.10.1	Generelt .....	34
4.10.2	Alternativ bruk av ulike rom .....	34
4.10.3	Lagring av utstyr til innebandy .....	35
4.10.4	Lagring av mengder med toalett- og tørkepapir.....	35
4.10.5	Elektroniske komponenter.....	36
4.11	Forenklinger og antagelser.....	37
4.12	Monte Carlo-simulering .....	37
4.12.1	Generelt .....	37
4.12.2	Fordelingsfunksjoner til de usikre variablene .....	38
<b>5</b>	<b>Beregningsresultater .....</b>	<b>39</b>
5.1	Bidraget fra de ulike materialkategoriene.....	39
5.2	Karakteristiske verdier for brannenergien .....	40
5.3	Sensitivitet.....	42
5.3.1	Generelt .....	42
5.3.2	Variabel brannenergi .....	42
5.3.3	Permanent brannenergi .....	43
5.3.4	Dimensjonerende spesifikk brannenergi .....	44
5.4	Statistisk behandling.....	45
5.4.1	Generelt .....	45
5.4.2	Spesifikk variabel brannenergi og Gumbel-fordeling .....	46
5.4.3	Dimensjonerende spesifikk brannenergi og log-normalfordeling .....	47
<b>6</b>	<b>Diskusjon.....</b>	<b>49</b>
6.1	Usikkerheter i kartleggingen og beregningene.....	49
6.1.1	Usikkerheter knyttet til den variable brannenergien.....	49
6.1.2	Usikkerheter knyttet til den permanente brannenergien.....	51
6.1.3	Konsekvensen på resultatet av forenklinger og antagelser gjort i beregningene.....	52
6.2	Brannenergi som parameter for brannteknisk prosjektering.....	53
6.3	Verdiene for spesifikk brannenergi gitt i Eurokoden.....	54
6.4	Statistisk behandling.....	54
6.5	Variasjonen i den variable brannenergien i to identiske bygninger .....	55
<b>7</b>	<b>Konklusjon og videre arbeid .....</b>	<b>56</b>
7.1	Kartleggingsmetode for kartlegging av brannenergi i flerbrukshaller .....	56
7.2	Dimensjonerende spesifikk brannenergi i de kartlagte hallene.....	56
7.3	80 %-fraktilen for spesifikk variabel brannenergi i flerbrukshaller .....	56
7.4	Faktorer for å predikere brannens utvikling .....	57
7.5	Forslag til videre forskning .....	57
<b>8</b>	<b>Referanseliste .....</b>	<b>58</b>

**Vedlegg:**

**A Brennverdier**

**B Densiteter**

**C Skjema for kartlegging av brannenergi**

**D Fordelingsfunksjoner**

**E Resultater fra Monte Carlo-simuleringen (Bjørnsletta flerbrukshall)**

## Figurliste

Figur 1: Teknikk for veining av skrivebord og kommode (Bryson og Gross, 1968 , s.9). .....	12
Figur 2: Flytskjema for å beregne brannenergi (SINTEF Byggforsk, 2013b) .....	15
Figur 3: Oversikt over effektiv brannenergi (Fontana et al., 2016, s. 1133).....	16
Figur 4: To RHR kurver for samme mengde brannenergi (Schleich, 2005a, s. I-25).....	23
Figur 5: Kart over Oslo med markert lokalisering til analyseobjektene .....	26
Figur 6: Eksempler på inhomogene elementer som er identifisert i noen av hallene, oppvaskmaskin, TV og VHS-spiller og bonemaskin .....	29
Figur 7: Oversiktsbilde over lagerrom, Voksen og Grefsen flerbrukshall .....	34
Figur 8: Kontor brukt som lagerrom, Apalløkka og Teglvirket .....	35
Figur 9: Skilledeler til innebandy, Grefsen og Årvoll.....	35
Figur 10: Lagring av toalettartikler i korridor på Teglvirket og under trapp på Årvoll .....	36
Figur 11: Elektroniske komponenter tett på lagring av brennbart materiale, Årvoll .....	36
Figur 12: Prosentvis bidrag til den variable brannenergien fra de ulike materialkategoriene .	39
Figur 13: Prosentvis bidrag til den permanente brannenergien fra de ulike materialkategoriene .....	40
Figur 14: Prosentvis bidrag fra de ulike materialene til den dimensjonerende spesifikke brannenergien .....	40
Figur 15: Histogram for spesifikk variabel brannenergi per gulvareal og Gumbel-fordelingen .....	46
Figur 16: Kumulativ Gumbel-fordeling for variabel brannenergi per gulvareal i flerbrukshallene .....	47
Figur 17: Dimensjonerende spesifikk brannenergi per omhyllingsflate for flerbrukshallene og en log-normalfordeling.....	48
Figur 18: Låste skap med gitter, Ellingsrud og Teglvirket.....	50

## Tabelliste

Tabell 1: Oversikt over branntekniske valg basert på brannenergien i tidligere byggeforskrifter og tilhørende veiledninger.....	10
Tabell 2: Spesifikk brannenergi per gulvareal for forskjellig bruk av bygningen (NS-EN 1991-1-2, 2002) .....	18
Tabell 3: Brannaktiveringsfaktor basert på størrelse av branncellen (NS-EN 1991-1-2, 2002) .....	19
Tabell 4: Brannaktiveringsfaktor basert på bruk av branncellen (NS-EN 1991-1-2, 2002) ....	19
Tabell 5: Oversikt over analyseobjektene, byggeår og dimensjonerende spesifikk brannenergi per omhyllingsflate gitt i tilhørende branndokumentasjon.....	26
Tabell 6: Oversikt over utstyret brukt til kartlegging av brannenergi.....	27
Tabell 7: Minimum-, gjennomsnitts- og maksimumsverdier for materialdensitetene hentet fra Vedlegg B.....	30
Tabell 8: Minimums-, gjennomsnitts- og maksimumsverdier for netto brennverdi til de ulike materialer hentet fra Vedlegg A .....	32
Tabell 9: Oversikt over fordelingsfunksjonene brukt for de usikre variablene i Monte Carlo-simuleringen .....	38
Tabell 10: Spesifikk variabel, spesifikk permanent og spesifikk total brannenergien per gulvareal, brannaktiveringsfaktoren $\delta_{q2}$ og dimensjonerende spesifikk brannenergi per henholdsvis gulvareal og omhyllingsflate i de ti hallene .....	41
Tabell 11: Faktorer som har størst innvirkning på den variable brannenergien per gulvareal fra Monte Carlo-simuleringen .....	42

Tabell 12: Statistiske verdier for den variable brannenergien per gulvareal fra Monte Carlo-simuleringen .....	43
Tabell 13: Faktorer med størst innvirkning på den permanente brannenergien per gulvareal fra Monte Carlo-simuleringen .....	43
Tabell 14: Statistiske verdier for den permanente brannenergien per gulvareal fra Monte Carlo-simuleringen .....	44
Tabell 15: Faktorer som påvirker den dimensjonerende spesifikke brannenergien per gulvareal mest fra Monte Carlo-simuleringen .....	44
Tabell 16: Statistiske verdier for dimensjonerende spesifikk brannenergi per gulvareal fra Monte Carlo-simuleringen .....	45
Tabell 17: Vertikale avstand mellom fordelingsfunksjon og datasettet, P-verdier og rangering hentet fra EasyFit.....	46
Tabell 18: Beregningsresultat for den spesifikke variable brannenergien per gulvareal med Gumbel-fordeling .....	47
Tabell 19: Beregningseksempel, antagelser for tykkelse på sportsgulv.....	51
Tabell 20: Konsekvens på spesifikk permanent brannenergi per gulvareal ved vurdering av beskyttet brannenergi i konstruksjonen.....	51

# 1 Introduksjon

*Introduksjonskapitlet gir en oversikt over bakgrunn for oppgaven etterfulgt av problemstillingene som er valgt for oppgaven. Videre følger en målformulering og en oversikt over oppgavens avgrensninger. Avslutningsvis blir det gitt en oversikt over oppbygningen av oppgaven.*

## 1.1 Bakgrunn

### 1.1.1 Generelt

Brann er energi ut av kontroll. Ved brann i bygninger er det viktig med barrierer som reduserer og begrenser energien som er kommet ut av kontroll. For å prosjektere slike barrierer er det essensielt å ha oversikt over den tilgjengelige energien som kan slippes løs dersom det oppstår en brann. Denne energien er brannenergien.

Brannenergien er summen av varmemengde som frigis ved forbrenning av alle brennbare materialer i et område (NS-EN 1991-1-2, 2002). Brannenergien er en sentral parameter ved brannteknisk prosjektering og er vesentlig for å kunne beregne størrelse på brannseksjoner og vurdere nødvendig brannmotstand for seksjoneringsvegger (SINTEF Byggforsk, 2013b). Parameteren benyttes også for å dimensjonere bæreevne til konstruksjonen, for å vurdere avstand mellom byggverk, for prosjektering av automatiske sløkkeanlegg og er også en viktig faktor for å kunne drifte byggverket forsvarlig (DIBK, 2017). Ved analytisk prosjektering benyttes dessuten brannenergien for å bestemme designbrannen (Zalok og Eduful, 2013, s. 299).

Proseduren for å beregne dimensjonerende spesifikk brannenergi i Norge og EU-land er å finne i NS-EN 1991-1-2 tillegg E. Summen av permanent og variabel brannenergi utgjør byggets totale brannenergi. Permanent brannenergi er energien fra gjenstander som ikke kan flyttes på og selve bygningskonstruksjonen, mens variabel brannenergi er energien fra flyttbare gjenstander. Sistnevnte varierer gjerne med tid og bruk av bygningen og finnes vanligvis ved bruk av statistiske verdier som tar høyde for denne variasjonen. Slike statistiske verdier kan imidlertid kun brukes dersom slike verdier er tilgjengelige for den aktuelle bygningskategorien i litteraturen. Ved manglende statistiske data må dermed den variable brannenergien beregnes prosjektsesifikt. Dette er naturligvis mer tidkrevende og vil normalt ikke fange opp den forventede variasjonen over bygningens brukstid. En rekke slike statistiske verdier for ulike bygningstyper, slik som skoler, kontorer, boliger og sykehus, er gitt i NS-EN 1991-1-2. Disse er representert med 80 %-fraktilen i Gumbel-fordelingen. Dette innebærer at verdiene er forventet å ikke bli overskredet gjennom 80 % av bygningens brukstid (SINTEF Byggforsk, 2013b). Slike statistiske verdier er manglende for bygningstypen flerbrukshall.

### 1.1.2 Flerbrukshall

Brannokumentasjonen for flerbrukshaller er ofte begrenset og muligens mangelfull, og brannenergien i byggverkene er ofte dårlig dokumentert. Brannenergien er normalt kun gitt som et stort intervall uten noen nærmere beregning. Et mye brukt intervall for den dimensjonerende spesifikke brannenergien per omhyllingsflate ved brannteknisk

dimensjonering av flerbrukshaller er det preaksepterte intervallet fra VTEK på 50 – 400 MJ/m<sup>2</sup> (Knarud, 2018).

I tidsperioden 2006-2015 ble det bygget 270 flerbrukshaller i Norge (SIAT, 2016). En flerbrukshall er en hall som kan brukes til flere ulike aktiviteter uten at det må foregå tidkrevende klargjøring og omgjøring (Kultur- og Kirke departementet, 2005). Flerbrukshallene rundt om i Norge blir i dag ofte brukt til utenomsportslige aktiviteter som kulturarrangementer, messer og loppemarkeder. Dette fører til at brannenergien kan variere mye over tid. Slik alternativ bruk er imidlertid ikke tatt høyde for i kartleggingen av brannenergi for standardiserte statistiske verdier, og det er dermed usikkert hvor stor brannenergien er ved slike arrangementer.

Berger (2018) utførte våren 2018 en kartlegging av ti flerbrukshaller i Trondheimsområdet i forbindelse med sin masteroppgave. Resultatene fra denne kartleggingen viser at den dimensjonerende spesifikke brannenergien ofte ligger i den øvre delen av dette intervallet, og verdiene for to av hallene overgikk intervallet.

Denne oppgaven er gjennomført for å fremskaffe flere karakteristiske verdier for den variable brannenergien i bygningstypen flerbrukshaller, da dette er manglende i Eurokode 1 del 1-2. Karakteristiske verdier for kun ti haller er for lite til en god analyse i Gumbel-fordelingen, og denne oppgaven vil bidra med å fremskaffe karakteristiske verdier fra ytterligere ti eksisterende haller. Denne oppgaven vil dermed styrke det statistiske underlaget.

Gjennom arbeidet med denne masteroppgaven er flerbrukshaller i Oslo-området blitt kartlagt. Høsten 2018 ble tre haller kartlagt som del av det innledende arbeid med oppgaven, og våren 2019 er ytterligere syv haller blitt kartlagt. Valg av geografisk område er gjort med bakgrunn i at dette vil styrke det statistiske utvalget, ettersom den tilgjengelige informasjonen fra kartleggingen utført våren 2018 kun er fra flerbrukshaller i Trondheimsområdet (Berger, 2018).

For å kartlegge brannenergien i en bygning må massen til alle brennbare elementer identifiseres og beregnes om til energienheter. Det er en rekke ulike fremgangsmåter for å gjennomføre en slik kartlegging. Den valgte metoden vil ha betydning for den praktiske utførelsen knyttet til selve kartleggingen, men det vil også ha betydning for nøyaktigheten til resultatene.

## **1.2 Problemstilling**

Ved å kun anta at brannenergien i bygningstypen flerbrukshaller ligger innenfor intervallet 50-400 MJ/m<sup>2</sup> per omhyllingsflate uten en nærmere beregning, er det en risiko for at implementerte branntekniske tiltak ikke vil overholde sin funksjon som tiltenkt ved brann. Det er nødvendig med økt kunnskap om hva den faktiske brannenergien i bygningstypen flerbrukshaller er. Flerbruken av byggverkene til arrangementer som messer, konserter og loppemarkeder medfører store variasjoner i den variable brannenergien. Dette kan dermed utgjøre en trussel for brannsikkerhetsstrategien dersom denne variasjonen ikke er tatt høyde

for ved prosjektering. Det forventes at en brann vil kunne utvikle seg ulikt ved brannenergi i øvre eller nedre del av det mye brukte intervallet.

Det er en rekke mulige problemstillinger knyttet til tematikken beskrevet ovenfor som kan være interessant å undersøke. For denne oppgaven er følgende problemstillinger blitt valgt:

1. Hvilke metoder for å kartlegge brannenergi er å finne i litteraturen, og hvilken metode er mest hensiktsmessig å benytte for å kartlegge brannenergien i en flerbrukshall?
2. Er den dimensjonerende spesifikke brannenergien i flerbrukshaller i samsvar med det som er angitt i bygningenes branndokumentasjon?
3. Hva er 80 %-fraktilen for den variable brannenergien for bygningstypen flerbrukshall gitt ved Gumbel-fordelingen?
4. Hvilke andre faktorer har innvirkning på brannens utvikling og temperaturene som vil kunne oppstå i branncellen ved en brann?

### 1.3 Målformulering

Hovedmålet med denne masteroppgaven er å fremskaffe statistiske verdier for den variable brannenergien for bygningstypen flerbrukshall, dette for å styrke det statistiske underlaget. Samtidig vil den dimensjonerende spesifikke brannenergien beregnes for å undersøke om den er innenfor de oppgitte verdiene i byggverkens branndokumentasjon. Videre vil det i korthet undersøkes hvilke andre faktorer som i litteraturen er angitt å være sentrale for å kunne predikere brannens utvikling.

For å kunne oppnå oppgavens hovedmål er følgende delmål viktige:

- Den mest hensiktsmessige metoden for kartlegging av brannenergi i flerbrukshaller må identifiseres i litteraturen gjennom en litteraturstudie.
- Brannenergien i ti eksisterende flerbrukshaller må kartlegges, beregnes og analyseres.
- Verdiene som beregnes for den spesifikke variable brannenergien må analyseres statistisk slik at de kan representeres ved en Gumbel-fordeling.
- Verdiene som beregnes for den dimensjonerende spesifikke brannenergien må sammenlignes med verdiene oppgitt i branndokumentasjonen til byggverkene.
- Viktige faktorer for hvordan en brann vil utvikle seg må identifiseres i litteraturen gjennom en litteraturstudie.

### 1.4 Avgrensninger

Denne oppgaven avgrenser seg til å fremskaffe karakteristiske verdier for brannenergien i ti flerbrukshaller i Oslo-området. Det er kun bygningstypen flerbrukshaller som er blitt undersøkt, og brannsikkerheten i andre typer idrettsbygg er derfor ikke en del av den empiriske analysen. Konsekvensen av å benytte intervallet for dimensjonerende spesifikk brannenergi lik 50-400 MJ/m<sup>2</sup> per omhyllingsflate ved brannteknisk prosjektering blir heller ikke undersøkt i denne oppgaven.

Den empiriske analysen begrenses videre mot å fremskaffe karakteristiske verdier for brannenergien ved normal driftssituasjon i flerbrukshallene. Brannenergien ved «flerbruken» av byggverkene er med andre ord ikke medtatt i denne oppgaven. Tilføring av brennbare

elementer i flerbrukshallene ved alternativ bruk vil imidlertid kunne føre til betydelige høyere verdier for den variable brannenergien, eksempelvis ved messer eller loppemarkeder.

Videre er aspektet knyttet til statistiske fordelingsfunksjoner for brannenergi utenfor oppgavens grenser. Oppgaven er således avgrenset mot å benytte seg av statistiske hjelpemidler for vurdere utvalget i Gumbel-fordelingen, men teorien som ligger bak er ikke gjennomgått grundig. Denne avgrensningen er en konsekvens av manglende ressurser og tilgjengelig kunnskap om emnet.

## **1.5 Oppgavens oppbygging**

Innledningsvis er bakgrunnen for oppgaven blitt introdusert for å gi en oversikt over oppgavens tema. Videre er oppgavens problemstillinger blitt presentert. Deretter er oppgavens målformulering blitt definert, samt en oversikt over oppgavens avgrensninger.

I kapittel 2 vil det redegjøres for forskningsmetodene som er blitt benyttet i denne studien, herunder bakgrunn for valg av forskningsmetode og beskrivelse av hva som er blitt gjort. Det blir her gjort en vurdering av styrker og svakheter ved de benyttede metodene.

I kapittel 3 blir det gitt en oversikt over oppgavens teorigrunnlag. Dette innbefatter teori om brannenergi, herunder brannenergi som parameter i regelverket, ulike kartleggingsmetoder for å kartlegge brannenergien, beregning av brannenergi i henhold til regelverket og avslutningsvis en kort innføring i andre parametere som er sentrale for brannens utvikling. Det vil i korthet bli gjennomgått noe teori om ekstremverdifordelinger, da dette benyttes for å representere statistiske verdier for spesifikk brannenergi i regelverket.

I kapittel 4 vil den analytiske prosessen bli redegjort for og prosedyren for kartleggingen av flerbrukshallen som er gjennomført. Her blir det også gitt en oversikt over forenklinger og antagelser som er gjort i beregningene. Hensikten med dette kapittelet er at arbeidet skal være etterprøvbart ved videre forskning på brannenergi i flerbrukshaller.

I kapittel 5 blir beregningsresultatene presentert sammen med statistisk behandling av resultatene for den spesifikke variable brannenergien per gulvareal. Sensitiviteten til resultatene har blitt undersøkt ved å gjennomføre en Monte Carlo-simulering og resultatene fra denne analysen vil bli presentert i dette kapittelet.

I kapittel 6 diskuteres funnene ved denne studien og usikkerheter knyttet til resultatene.

Avslutningsvis i kapittel 7 gis en konklusjon av arbeidet og det fremsettes noen forslag til videre arbeid på temaet brannsikkerheten i flerbrukshaller.

Opgaven har i tillegg fem vedlegg som inneholder informasjon som er blitt benyttet i arbeidet med oppgaven.

Vedlegg A gir en oversikt over netto brennverdier innhentet i litteraturen og som er benyttet for beregningene av brannenergi. Vedlegg B gir en tilsvarende oversikt over materialdensiteter. Vedlegg C inneholder kartleggingseskjemaet som er benyttet ved



kartleggingene. Dernest er fordelingsfunksjonene for de usikre variablene i beregningen av brannenergi benyttet i Monte Carlo-simuleringen gitt i Vedlegg D. Avslutningsvis gir Vedlegg E en oversikt over resultatene fra Monte Carlo-simulering, eksemplifisert gjennom resultatene fra Bjørnsletta flerbrukshall. Det er også blitt gjennomført tilsvarende analyser som i vedlegg E for de øvrige hallene, men av plasshensyn er kun analysen for én hall vedlagt.

## 2 Metode

*I dette metodekapitlet vil det redegjøres for forskningsmetodene som er blitt benyttet i denne oppgaven.*

### 2.1 Overordnet om valgt forskningsmetode

Det er blitt benyttet to forskningsmetoder i arbeidet med denne masteroppgaven. Den ene metoden er gjennomføringen av en litteraturstudie for å oppnå innsikt om de aktuelle temaene i litteraturen. Den andre forskningsmetoden er en empirisk analyse for å fremskaffe karakteristiske verdier for brannenergien i eksisterende flerbrukshaller.

Prosjektoppgaven som ble gjennomført høsten 2018 har fungert som et viktig innledende arbeid til denne masteroppgaven. Sentrale deler av denne masteroppgaven er utarbeidet gjennom arbeidet høsten 2018 og videre bearbeidet i denne oppgaven, heriblant kapitlene som omhandler beregning av brannenergi, ulike metoder for kartlegging av brannenergi og faktorer som påvirker brannenes utvikling. Gjennom prosjektoppgaven ble det etablert en god innsikt i temaet, og brannenergien i tre flerbrukshaller i Oslo-området ble kartlagt i tidsperioden november og desember 2018. Resultatene fra disse analysene er også medtatt i denne oppgaven. De er imidlertid blitt modifisert med bakgrunn i erfaringer og funn fra arbeidet med masteroppgaven.

### 2.2 Litteraturstudie

Litteratursøket som denne oppgaven bygger på er blitt utført i to omganger. Høsten 2018 ble det utført et litteratursøk i forbindelse med arbeidet med prosjektoppgaven. Dette litteratursøket identifiserte kjernelitteratur på temaene, samt tidligere studier av brannenergi. Formålet med litteraturstudien gjennomført høsten 2018 var å få oversikt over aktuell litteratur på temaene brannenergi og kartlegging av brannenergi. Litteraturstudien var sentral for å få oversikt over fordeler, ulemper ved de ulike metodene for kartlegging av brannenergi i teorien.

I forbindelse med arbeidet med masteroppgaven ble et nytt litteratursøk gjennomført. Fordelen med å gjennomføre litteratursøket i to omganger er at erfaringer fra arbeidet med prosjektoppgaven har vært til hjelp for å videreutvikle søket i arbeidet med masteroppgaven. Ved å gjennomføre et bredere litteratursøk i forbindelse med masteroppgaven har hensikten vært å finne mer litteratur på relevant teori på temaene, og dermed etablere et bedre teoretisk underlag for den empiriske analysen.

For litteratursøket har søkemotorene Google Scholar og Oria blitt benyttet. Søkeord som har blitt brukt i litteratursøket er eksempelvis "fire load", "fire load survey", "fire load density" og "heat of combustion". Eurokode 1 del 1-2 og Byggforskbladet *321.051 Brannenergi i bygninger. Beregninger av statistiske verdier* gir en god innføring på temaet og disse er også blitt brukt flittig i arbeidet med oppgaven.

Det svært mange treff på de ulike søkeordene, og derfor uoverkommelig å skulle undersøke alle treffene. For å filtrere ut aktuell litteratur er derfor søkene blitt finjustert ved å bruke ulike begrensninger på søkene. Dette har eksempelvis vært filtrering basert på utgivelsesår. For å

vurdere relevansen til identifiserte søk har det dessuten vært sentralt å gjennomgå titler, sammendrag og eventuelt konklusjoner. Videre har en rekke litteratur blitt innhentet gjennom å undersøke identifisert litteratur og gjennomgå deres kildeliste for å finne primærkildene.

Kildene har videre blitt vurdert med tanke på hvem som har publisert artiklene. Det er også blitt gjort en vurdering av litteraturen med bakgrunn i når den er blitt publisert. Nyere forskning har blitt prioritert der det har vært mulighet for det.

Styrker ved litteratursøksmetoden som er benyttet er at det er mulig å skaffe seg et raskt og godt overblikk over den tilgjengelige litteraturen som er å finne på aktuelle temaer. Ved å benytte de nevnte metodene for å filtrere søkene har det videre vært mulig å plukke ut relevant litteratur for oppgaven. Svakheter ved metoden – og filtreringen som er benyttet – er at det er muligheter for at viktig litteratur kan falle utenfor søket og dermed ikke blir gjennomgått.

### **2.3 Empirisk analyse av flerbrukshaller**

Det er blitt gjennomført en empirisk analyse av eksisterende flerbrukshaller for å kunne fremskaffe karakteristiske verdier for brannenergien i bygningstypen flerbrukshall. Dette har vært en sentral del av arbeidet i denne oppgaven. Ti flerbrukshaller i Oslo kommune er blitt kartlagt. Av disse ble som nevnt tre av hallene kartlagt høsten 2018 i forbindelse med prosjektoppgaven.

Den empiriske analysen er basert på funnene gjort i litteraturstudien fra tidligere kartlegginger av brannenergi. Dette for å kunne utføre en analyse som vil være overkommelig å gjennomføre i praksis, og samtidig gi pålitelige verdier for brannenergien i byggverkene. Beskrivelse av funnene og metoden som ble benyttet ved kartlegging av flerbrukshaller i Trondheimsområdet av Berger (2018) har også vært til god hjelp.

Alle hallene som er kartlagt i denne oppgaven er hentet fra Undervisningsbygg Oslo og Kultur- og idrettsbygg Oslo sine eiendomsporteføljer. I forkant av befaringene har det vært nødvendig med en innsamling av relevant dokumentasjon. Dette for å kunne få en oversikt over objektene, beregne bidraget fra den permanente bygningskonstruksjonen, og for å kunne verifisere at den tilgjengelige dokumentasjonen stemmer med virkeligheten under befaring.

Den empiriske analysen gjennomført i denne oppgaven har fremskaffet nye, viktige data på brannenergi for bygningstypen flerbrukshall. Det er imidlertid en rekke hensyn ved en empirisk metode som er essensielle for en god analyse. Blant annet må utvalget objekter som analyseres være representativt for bygningstypen, slik at de statistiske verdiene som fremskaffes representerer bygningstypen *flerbrukshall* godt. Videre må analysen gjennomføres på en nøyaktig og hensiktsmessig måte slik at resultatene er pålitelige. En kartlegging og beregning av brannenergi har imidlertid en rekke feilkilder og usikkerhets-elementer. Disse vil diskuteres i kapittel 6. Den analytiske prosessen – dvs. selve metoden som er blitt benyttet ved kartleggingene – vil redegjøres for i kapittel 4.

## 3 Brannenergi

*Dette kapitlet gir en oversikt over viktige aspekter knyttet til parameteren brannenergi. Det vil herunder gis en oversikt over ulike branntekniske valg som baserer seg på parameteren, fremgangsmåte for beregning av brannenergi i henhold til regelverket og metoder for å kartlegge brannenergien identifisert i litteraturen. Det vil avslutningsvis bli gitt en kort oversikt over andre faktorer som er viktige for brannens utvikling, samt noe teori omkring ekstremverdifordelinger som benyttes for å representere den spesifikke variable brannenergien.*

### 3.1 Generelt

Brannenergi er i henhold til NS-EN ISO 13943 (2017) definert som summen av varmemengde som frigis ved forbrenning av alle brennbare materialer i et område, inkludert brennbare overflater som grenser til området. Mengden tilgjengelig brannenergi er en sentral faktor for hvordan brannen vil utvikle seg. Brannenergien er derfor ofte et viktig startpunkt for å estimere potensiell størrelse og alvorlighetsgrad ved en brann (Gross, 1977, s. 72). Den dimensjonerende spesifikke brannenergien er et nyttig verktøy for å kunne bestemme de termiske påvirkningene på bygningskonstruksjonen som vil kunne opptre ved brann (NS-EN 1991-1-2, 2002).

### 3.2 Brannenergi i regelverket

#### 3.2.1 Brannenergi i dagens regelverk

I innledningen til *kapittel 11 Sikkerhet ved brann* i Byggteknisk forskrift (TEK17) er det listet opp en rekke forutsetninger for den branntekniske prosjekteringen som må bestemmes og beskrives for byggverket, heriblant byggverkets brannenergi. Det presiseres videre at det skal foreligge oversiktlig og systematisk dokumentasjon av disse forutsetningene i prosjektet, lett tilgjengelig for uavhengig kontroll og tilsyn (DIBK, 2017).

Det er videre en rekke branntekniske valg i Byggteknisk forskrift (TEK17) som baserer seg på byggverkets brannenergi. Disse blir opplistet i det følgende:

- I kapittel § 11-3. *Brannklasser* baserer vurderingen av oppdelingen i brannceller seg blant annet på byggverkets brannenergi.
- I kapittel § 11-4. *Bæreevne og stabilitet* blir brannenergien sammen med brannforløpet benyttet for å bestemme de termiske påkjenningene på konstruksjonen ved brann for dimensjonering av bæreevne og stabilitet.
- I kapittel § 11-6. *Tiltak mot brannspredning mellom byggverk* benyttes brannenergien for å bestemme brannveggers nødvendige brannmotstand, samt til å vurdere avstanden mellom byggverk.
- I kapittel § 11-7. *Brannseksjoner* gis preaksepterte ytelser for maksimalt bruttoareal per etasje i et byggverk uten å benytte brannseksjonering, samt seksjoneringsveggers brannmotstand. Begge disse baserer seg på byggverkets brannenergi. Her finner man også igjen det preaksepterte intervallet på 50-400 MJ/m<sup>2</sup>, som ofte blir brukt i branndokumentasjonen til flerbrukshaller.
- I innledningen til *kapittel 11* angis det at brannenergien også er en sentral parameter for å kunne drifte byggverket forsvarlig. Byggverkets forutsetninger, betingelser og

begrensninger som den branntekniske dokumentasjonen er basert på er viktige for å kunne ivareta sikkerheten ved brann i bruksfasen, heriblant byggverkets brannenergi.

Ved dimensjonering av automatiske sprinkleranlegg er brannenergi en viktig parameter (NS-EN 12845, 2015). Brannenergien benyttes også som en parameter ved analytisk prosjektering for å bestemme den dimensjonerende brannen (Zalok og Eduful, 2013, s. 299).

### **3.2.2 Historisk utvikling av brannenergi i regelverket**

Brannenergi har lenge vært en del av regelverket for brannteknisk prosjektering. Det er imidlertid blitt gjort noen justeringer fra parameteren ble innført og frem til dagens versjon av regelverket. I veiledningen til Byggeforskrift 1969 skrev Kommunal- og arbeidsdepartementet (1970, s. 38) følgende:

*«Byggeforskriftene har hittil ikke inneholdt bestemmelser som gir utrykk for mengden brennbart materiale i en bygning.»*

Før brannenergien ble innført i regelverket ble brannbelastningen – dvs. brannenergien – beskrevet som antall kg tremateriale per m<sup>2</sup> gulvflate (Kommunal- og arbeidsdepartementet, 1970, s. 39). I *Byggeforskriften 1969* ble imidlertid parameteren videreutviklet til Mcal per m<sup>2</sup> omhyllingsflate, og det ble også tatt høyde for egenskapene til andre brennbare materialer. I veiledningen til Byggeforskrift 1969 skrev Kommunal- og arbeidsdepartementet (1970, s. 39) følgende:

*«Skal en finne brannbelastningen i en branncelle, må en vite mengden av hvert materiale som finnes der og de enkelte materialers varmeverdi.»*

Senere har enheten for brannbelastning på ny blitt justert, og i alle Byggeforskriftene etter 1969 benyttes benevnelsen MJ/m<sup>2</sup> per omhyllingsflate for å beskrive brannbelastningen/brannenergien.

Siden parameteren ble innført i regelverket, er den blitt benyttet til å bestemme en rekke ulike branntekniske valg i byggeforskriftene og tilhørende veiledninger. En oversikt over slike valg som er identifisert i byggeforskriftene og tilhørende veiledninger blir gitt i Tabell 1.

Tabell 1: Oversikt over branntekniske valg basert på brannenergien i tidligere byggeforskrifter og tilhørende veiledninger

Byggeforskrift	Branntekniske valg basert på parameteren	Kilde
Byggeforskrift 1969	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Brannseksjonering</li> <li>- Nødvendige rømningsveier</li> </ul>	(Kommunal- og arbeidsdepartementet, 1969, 1970)
Byggeforskrift 1985	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bygningsbrannklasse</li> <li>- Største bruttoareal uten oppdeling med brannvegg</li> <li>- Brannventilasjon og sprinkleranlegg</li> <li>- Motstandskrav til brannvegg og branndekke</li> </ul>	(Kommunal- og arbeidsdepartementet, 1985b, 1985a)
Byggeforskrift 1987	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bygningsbrannklasse</li> <li>- Største bruttoareal per etasje uten oppdeling med brannvegg</li> <li>- Brannventilasjon og sprinkleranlegg</li> <li>- Motstandskrav til brannvegg og branndekke</li> </ul>	(Kommunal- og arbeidsdepartementet, 1987; Statens Bygningstekniske Etat, 1990)
Forskrift om krav til byggverk og produkter til byggverk (1997)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bestemmelse av risikoklasse</li> <li>- Tilrettelegging for rednings- og slokkemannskap</li> <li>- Bæreevne og stabilitet</li> <li>- Inndeling i brannceller</li> <li>- Bestemmelse av brannveggers brannmotstand</li> <li>- Slokkeanlegg og røykventilasjon</li> </ul>	(Kommunal- og regionaldepartementet, 1997, 1999)
TEK10	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bestemmelse av brannveggers brannmotstand</li> <li>- Avstand mellom byggverk</li> <li>- Bæreevne og stabilitet</li> <li>- Størrelse på brannseksjon og brannmotstand til seksjoneringsvegger</li> <li>- Brannklasse</li> <li>- Dimensjonering av automatiske slokkeanlegg</li> </ul>	(DIBK, 2010)

Regelverket har videre inneholdt ulike intervaller for spesifikk brannenergi per omhyllingsflate til bruk for brannseksjonering. I *Byggeforskriften 1985* blir det benyttet fire slike intervaller for spesifikk brannenergi per omhyllingsflate ved bestemmelse av størrelse på seksjonering uten oppdeling med brannvegg (Kommunal- og arbeidsdepartementet, 1985b, s. 25). Disse intervallene er følgende:

- Under 50 MJ/m<sup>2</sup>
- 50-200 MJ/m<sup>2</sup>
- 200-400 MJ/m<sup>2</sup>
- Over 400 MJ/m<sup>2</sup>

En slik inndeling ble imidlertid ikke medtatt i nyere Byggeforskrifter. Fra overgangen til byggeforskriften av 1987 er intervallene 50-200 MJ/m<sup>2</sup> og 200-400 MJ/m<sup>2</sup> blitt slått sammen til ett stort intervall på 50-400 MJ/m<sup>2</sup>. Dette er intervallet som brukes i dagens regelverk. Som tidligere nevnt benyttes gjerne dette intervallet i brann dokumentasjonen for bygningstypen *flerbrukshaller*.

Det blir i TEK10 beskrevet et eksempel med spesifikk brannenergi per omhyllingsflate lik 400 MJ/m<sup>2</sup> som vurderingskriterium for brannklasse 4 (DIBK, 2010). Dette eksempelet ble imidlertid fjernet i overgangen til TEK17 (DIBK, 2017).

### **3.3 Ulike metoder for kartlegging av brannenergi**

#### **3.3.1 Generelt**

Kartlegging av brannenergi innebærer å identifisere massene til de brennbare elementene i branncellen samt elementenes tilhørende brennverdi. Valg av metode for å kartlegge massene vil ha stor påvirkning på nøyaktigheten av resultatene fra kartleggingen (Zalok og Eduful, 2013). Spredning i resultatene er en konsekvens av at de ulike metodene identifiserer massene på ulike måter, og dette fører med seg ulike usikkerheter til resultatene.

En kartlegging av brannenergi er som oftest svært omfattende og tidkrevende. I litteraturen finner man i hovedsak fem ulike metoder for å kartlegge den variable brannenergien. Det er imidlertid varierende grad av tid og ressurser som vil medgå avhengig av kartleggingsmetoden som benyttes. Det vil i det følgende redegjøres for hvordan man utfører de ulike metodene, samt erfaringer knyttet til spredning av resultatene funnet i litteraturen.

#### **3.3.2 Veiningsmetoden**

*Veiningsmetoden* utføres ved at man veier alle de brennbare elementene i den aktuelle branncellen (Zalok, 2011, s. 9). Videre multipliseres massen med elementets brennverdi. Dette utføres for alle elementer i branncellen. Metoden gir et nøyaktig tall på massen til de ulike elementene, og dermed et nokså nøyaktig resultat i teorien. Det er derimot utfordringer knyttet til gjennomføring av metoden i praksis som kan føre til unøyaktigheter.

Mange av elementene man finner i en branncelle er ofte inhomogene, slik at de kan være sammensatt av både brennbart og ubrennbart materiale. For å få et nøyaktig tall på massen til de delene av materialet som er brennbart, vil man være avhengig av å kunne dele opp elementet. Dette lar seg ofte ikke gjøre uten å ødelegge elementet, og det er da nødvendig å gjøre anslag. Disse anslagene bringer med seg usikkerheter til resultatet. Det vil for eksempel være utfordrende å estimere hvor mye av massen til en stol som er metall og hvor stor andel som er plastikk og tekstil.

Videre er det ofte en rekke elementer i en branncelle som vil være for store, tunge eller på annen måte vanskelig å få veid. I noen tilfeller vil det da være nødvendig med to eller flere personer for å veie disse elementene eller bruk av spesialutstyr, og i andre tilfeller kan det være praktisk umulig å få gjennomført. Det må derfor gjøres antagelser også her. Figur 1 illustrerer hvordan Bryson og Gross (1968, s. 9) identifiserte massene til tunge elementer som skrivebord og kommode ved kartlegging av to kontorbygninger.



Figur 1: Teknikk for veining av skrivebord og kommode (Bryson og Gross, 1968 , s.9).

Metoden krever dessuten en del planlegging og koordinering for å kunne gjennomføres. Man er for eksempel avhengig av fysisk tilgang til bygget, og at kartleggingen kan gjennomføres uten å skape vanskeligheter for normal drift. Tilgang til byggets skap og alle rom er dessuten nødvendig for å få gjennomført en god kartlegging. Dersom det viser seg at enkelte rom eller skap i branncellen er utilgjengelige, vil dette føre til at man også her må gjøre antagelser som kan føre til usikkerhet. Det sier seg selv at veiningsmetoden er svært tidkrevende da alle elementene i branncellen må veies for å identifisere massen.

En annen klar ulempe med metoden er vanskelighetene med å beregne bidraget av brannenergi fra den permanente konstruksjonen. En konsekvens av dette er at den permanente brannenergien ofte blir utelatt fra kartleggingene (Zalok, 2011, s. 10).

### 3.3.3 Inventarmetoden

Ved bruk av *inventarmetoden* identifiseres elementenes masse ved å måle dimensjoner og multiplisere med tilhørende densitet (NFPA 577, 2016). En fordel med inventarmetoden slik den er gjennomført av Xie *et al.* (2018) og Zalok (2011) er at det blir mulig å få identifisert massene til store og uhåndterlige elementer som ville vært vanskelig å finne massen til ved bruk av veiningsmetoden.

En ulempe med metoden er at også denne metoden er avhengig av at man har fysisk tilgang til bygget og mulighet til å gjennomføre undersøkelsen uten å forstyrre normal drift. Metoden krever derfor også god planlegging og koordinering i forkant av undersøkelsen. En utfordring man kan møte på i felten med inventarmetoden er at det er problematisk å måle volum til elementer med komplisert form. Man må da gjøre antagelser og estimere volumet, som igjen kan føre til usikkerhet ved resultatene. Også inventarmetoden er svært tidkrevende å utføre i praksis. Det er tidkrevende å måle høyde, bredde og dybde på alle elementene og loggføre dette under kartleggingen.

Det er også identifisert en annen fremgangsmåte for metoden i litteraturen, denne versjonen av metoden er blitt brukt ved eldre kartlegginger (Zalok og Eduful, 2013). Metoden ble gjennomført ved å anta en sammenheng mellom elementenes visuelle karakteristikk og massen. Massene ble så identifisert ved å benytte transformeringsfunksjoner basert på



lignende elementer eller massene veid i forkant av kartleggingen og oppført som tabulerte data. En slik versjon av metoden ble eksempelvis benyttet av (Culver, 1976) ved kartlegging av kontorer i USA, og av Issen (1980) ved kartlegging av boliger i USA.

En ulempe med sistnevnte versjon av metoden er at bruk av transformeringsfunksjoner fører med seg usikkerhet til resultatene. Slike transformeringsfunksjoner baserer seg på en antagelse om middelveidier og standardiserte dimensjoner og materialer (Culver, 1976, s. 4). Culver (1976) registrerte at den relative feilen var 10 % ved bruk av inventarmetoden med transformeringsfunksjoner i forhold til veiningsmetoden ved kartlegging av kontorer. Issen (1980) påpeker at denne feilen vil kunne være større ved kartlegging av eksempelvis boliger hvor det er mindre tilgjengelige standardiserte mål på møblene enn på det er på møbler som vanligvis brukes i et kontorbygg.

### **3.3.4 Kombinasjonsmetoden**

*Kombinasjonsmetoden* innebærer at man bruker både veiningsmetoden og inventarmetoden (Zalok, 2011, s. 11). Man veier da massene til elementene hvor dette er lett å gjennomføre, og finner volumet til elementer som er store, tunge og uhåndterlige å få veid.

Ved å kombinere disse to metodene sitter man igjen med en metode som er langt lettere å få utført i felten. Det blir mindre ressurskrevende, da man i møte med elementer man ville hatt problemer med å veie alene, heller finner volumet. Kombinasjonsmetoden fører til mer nøyaktige resultater og gjør også undersøkelsen lettere (Zalok og Eduful, 2013, s. 309).

Noen av usikkerhetsmomentene og ulempene fra veining- og inventarmetoden vil fortsatt være gjeldende når man kombinerer metodene. Det kreves fortsatt at man kan få fysisk tilgang til bygget man skal undersøke. Usikkerheten som følger med å beregne volumet til elementer med komplisert form vil ikke bli noe mindre, og det er fortsatt usikkerheter knyttet til det å bestemme mengden brennbart materiale i inhomogene elementer.

NFPA 577 (2016) – som er gjeldende regelverk i USA – angir at en kartlegging av brannenergi skal gjennomføres ved bruk av enten veiningsmetoden, inventarmetoden eller kombinasjonen av disse to, altså kombinasjonsmetoden.

### **3.3.5 Spørreundersøkelsesmetoden**

*Spørreundersøkelsesmetoden* går ut på at man får andre til å kartlegge objekter ved å svare på spørreundersøkelser. Dette er indirekte målinger gjennom tabulerte oppslag og tabeller hvor vedkommende kan velge verdier for ulike typer elementer (Zalok, 2011, s. 16). Metoden gjør det mulig å undersøke mange objekter på kort tid, og man slipper å være fysisk tilstede. Metoden er mindre tidkrevende for én person, men krever heller litt tid som må brukes av mange. Det kan imidlertid medgå en del tid til utarbeidelse av spørreundersøkelsen og bearbeiding av resultatene.

Metoden innebærer at man publiserer og sender skjemaer for utfyllelse til representanter for objektene som skal undersøkes. Dette kan være beboere i leiligheter, eller ansatte i et kontorbygg osv. Representantene som skal utføre spørreundersøkelsen får tilgang til et spørreskjema, samt ofte et skriv som gir utfyllende informasjon om hvordan metoden skal utføres

(Xie *et al.*, 2018). Dersom man får mange til å utføre undersøkelsen har man mulighet til å få kartlagt brannenergien i mange objekter.

Ulemper med metoden er at den er kvalitativ og vanskelig å verifisere (Bwalya *et al.*, 2004, s. 2). Det er ikke mulighet til å kontrollere at inputdataen er korrekt, hvilket utgjør en stor usikkerhetskilde. Det kan også være et problem at de som utfører spørreundersøkelsen foretar ulike antagelser og forenklinger som vil påvirke resultatene.

### **3.3.6 Undersøkelse av nettsider med bilder av byggets rom**

Den siste metoden som er å finne i litteraturen innebærer at man finner brannenergien ved å studere bilder man finner på ulike nettsider (Zalok, 2011, s. 18). Dette er ofte snakk om bilder som viser oversikt over rommet og innredningen, gjerne fra nettsider som brukes for å selge undersøkelsesobjektene.

Det er en klar ulempe ved metoden at den baserer seg på bilder hvor situasjonen ofte er unaturlig og konstruert. Det er få rom som til vanlig er så ryddige som de er når de skal bli tatt bilde av til salgsannonser. Bildene viser også ofte kun en liten del av rommet. Ved å bruke slike idealiserte tilfeller vil man få resultater som ikke vil stemme med den hverdagslige situasjonen.

Massen av elementene i rommet baserer seg dessuten kun på estimater. Det er eksempelvis vanskelig å estimere innholdet i et skap fra et bilde av skapets fremside med døren lukket. Slike antagelser fører til betydelige feilkilder i resultatene.

### **3.3.7 Årsaker til ulike resultater i litteraturen**

Opp gjennom årene har det blitt utført en rekke kartlegginger av brannenergi i mange ulike bygningstyper. Litteraturen viser at brannenergien varierer med tid, land, region, kartleggingsmetode som er brukt og antall personer bygget er beregnet for.

Det er store variasjoner i resultatene og det er mange faktorer som kan ha hatt innvirkning på dette. En utstrakt bruk av både gulvareal som arealenhet og omhyllingsflate som arealenhet fører til at mange av resultatene ikke kan sammenlignes med hverandre.

Fontana *et al.* (2016, s. 1139) identifiserte blant annet følgende årsaker til ulike resultater fra kartlegginger funnet i litteraturen:

- Mange av kartleggingene som finnes i litteraturen har kun identifisert og beregnet den *variable* brannenergien. Resultatene fra disse kan derfor ikke sammenlignes med kartlegginger hvor også bidraget fra den *permanente* brannenergien er medtatt.
- Det er i stor grad gjort en rekke ulike antagelser for faktorer som reduserer bidraget fra beskyttet brannenergi, samt faktorer for forbrenningseffektivitet som tar høyde for objekter som antas å forbrenne ufullstendig. Andre kartlegginger tar ikke med slike reduserende faktorer og estimerer i stedet den *totale* brannenergien, uten noen form for reduksjon. Dette medfører naturligvis variasjoner i resultatene.
- Det er benyttet ulike kartleggingsmetoder for kartleggingene og dette fører naturligvis med seg ulike resultater da metodene har ulike feil- og usikkerhetskilder.

- Ved de enkelte kartleggingene er det benyttet forenklerende antagelser for å forenkle kartleggingen. Slike antagelser er ikke universale og bringer med seg feilkilder til resultatene.

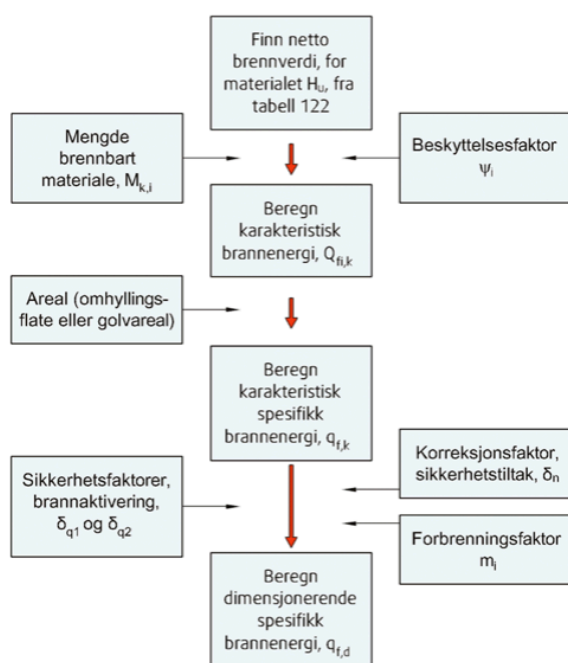
Et eksempel på en forenklerende antagelse som er benyttet av Green (1977) og Bryson og Gross (1968), er å anta at alle brennbare elementer har samme brennverdi som trevirke. En slik forenkling tar ikke høyde for økt bidrag fra andre brennbare materialer som plastikk (Zalok, 2011, s. 9).

Zalok og Edfuful (2013) forsøkte å kvantifisere og undersøke påvirkningen på resultatene av å benytte ulike kartleggingsmetoder. I tidsperioden 2010-2011 ble 103 kontorer i Canada kartlagt. Inventarmetoden, veiningsmetoden, kombinasjonsmetoden og spørreskjemametoden ble benyttet. På grunn av manglende svar på spørreskjemametoden hadde vurderingen av denne metoden mindre å basere seg på. Den kartlagte brannenergien var høyest ved bruk av inventarmetoden, og lavest ved bruk av veiningsmetoden. Kombinasjonsmetoden ble anbefalt da denne metoden kombinerer best praksis fra de to andre og dermed reduserer feilkildene.

### 3.4 Beregning av brannenergi

#### 3.4.1 Generelt

Fremgangsmåten for beregning av brannenergi er gitt i Eurokoden NS-EN 1991-1-2 tillegg E og en overordnet innføring i fremgangsmåten er presentert i Byggforskserien 321.051 *Brannenergi i bygninger - Beregning av statistiske verdier*. Det vil i dette delkapitlet gis en innføring i denne fremgangsmåten. Arbeidsgangen for å beregne brannenergien er illustrert i flytskjemaet illustrert i Figur 2 hentet fra byggforskbladet (SINTEF Byggforsk, 2013b).



Figur 2: Flytskjema for å beregne brannenergi (SINTEF Byggforsk, 2013b)

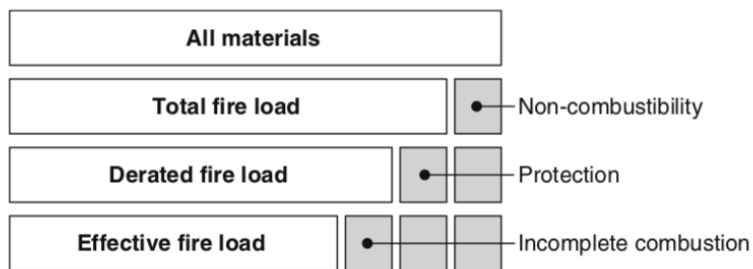
### 3.4.2 Netto brennverdi

For å kunne beregne brannenergien må *brennverdien* til de ulike materialene identifiseres. Brennverdi er også kalt forbrenningsvarme og er et tall for varmemengden som avgis når en masseenheter av materialet gjennomgår fullstendig forbrenning (SINTEF Byggforsk, 2013b). Netto brennverdi er mest brukt. Dette er en verdi beregnet ved prøving av materialer i henhold til NS-EN ISO 1716 (2018).

Materialer som har mye fuktighet vil ha en lavere brennverdi da det vil kreve mer energi for å varme opp og forbrenne vannet i materialet sammenlignet med om materialet hadde vært helt tørt (SINTEF Byggforsk, 2013b). Deler av den totale varmemengden går med til oppvarming og fordampning av vann i materialet, og den netto brennverdien er varmemengden som blir frigitt. Den netto brennverdien har enheten MJ/kg.

### 3.4.3 Mengde brennbart materiale

Videre må massen til alt brennbart materiale ( $M_{k,i}$ ) i branncellen identifiseres. Dette kan utføres ved å benytte en av de beskrevne metodene i kapittel 3.3. Bidraget til den totale brannenergien blir, som nevnt i kapittel 1.1.1, delt opp i permanent og variabel brannenergi. Av alt materiale som befinner seg i et rom er det kun en andel som bidrar som effektiv brannenergi og som dermed skal tas med i beregningen av dimensjonerende spesifikk brannenergi. Figur 3 illustrerer denne inndelingen.



Figur 3: Oversikt over effektiv brannenergi (Fontana et al., 2016, s. 1133)

Som illustrert kan alle materialene i et rom deles inn i fire kategorier. Først skilles det mellom brennbart og ubrennbart materiale; det er kun brennbart materiale som bidrar med brannenergi. Videre er en andel av brennbart materiale ofte beskyttet eller bygget inne i konstruksjonen. Dersom dette materialet ikke eksponeres for brannen i løpet av den forventede branntiden, kan bidraget fra disse materialene reduseres eller ikke medtas i beregningen av brannenergi. En slik reduksjon i bidraget kan gjøres gjennom bruk av beskyttelsesfaktorer, ref. punkt 3.4.4 nedenfor. Til slutt tar man høyde for andelen materiale som ikke forbrennes fullstendig ved en brann og som dermed skal trekkes fra. Resultatet av alt dette er den andelen av materialene i byggverket (eller branncellen) som regnes å bidra til den effektive brannenergien.

### 3.4.4 Beskyttelsesfaktor

For å vurdere bidraget til den effektive brannenergien fra brennbart materiale som er beskyttet eller bygget inne i konstruksjonen, tas det hensyn til en *beskyttelsesfaktor* ( $\psi_{k,i}$ ).

Denne beskyttelsesfaktoren tar høyde for at enkelte materialer er beskyttet og ikke vil forbrenne. Faktoren reduserer dermed bidraget til brannenergien. Tilfeller hvor det kan være aktuelt å ta høyde for beskyttelsesfaktoren er når man ser på elementer inne i konstruksjonen som for eksempel er beskyttet av plater, eller elementer inne i et lukket rom eller skap hvor elementene forblir intakt under branneksporingen.

I Eurokode 1 del 1-2 er det gitt retningslinjer for hvordan beskyttelsesfaktoren skal vurderes. Dersom et lukket rom er dimensjonert for å tåle branneksporingen, skal ikke brannenergien i rommet regnes med i den totale brannenergien. Beskyttelsesfaktoren settes da lik 0. For et lukket rom, konstruert i ubrennbart materiale som vil holde seg intakt under branndimensjoneringen (men som ikke er spesifikt dimensjonert for branneksporingen) er følgende anbefalinger gitt ved vurdering av beskyttelsesfaktoren (NS-EN 1991-1-2, 2002):

- Beskyttelsesfaktoren  $\psi = 1$  skal gis til den største brannenergien i det lukkede rommet, eller minst 10 % av den beskyttede brannenergien.
- Dersom denne brannenergien sammen med den ubeskyttede brannenergien ikke kan gi nok varme for å antenne den resterende beskyttede brannenergien, skal beskyttelsesfaktoren  $\psi = 0$  brukes på resten av det beskyttede materialet.
- Dersom resten av materialene som er beskyttet kan bli antent, er det nødvendig med en individuell vurdering av beskyttelsesfaktoren.

### 3.4.5 Karakteristisk brannenergi

Når både materialenes netto brennverdi ( $H_{ui}$ ), massene ( $M_{k,i}$ ) og beskyttelsesfaktoren ( $\psi_{k,i}$ ) er identifisert, kan den karakteristiske brannenergien ( $Q_{fi,k}$ ) til materialene i branncellen beregnes. Dette gjøres ved å benytte formel (2):

$$Q_{fi,k} = \sum M_{k,i} \cdot H_{ui} \cdot \psi_i = \sum Q_{fi,k,i} \text{ (MJ)} \quad (2)$$

### 3.4.6 Karakteristisk spesifikk brannenergi

Neste steg er å bruke den karakteristiske brannenergien for å finne karakteristisk spesifikk brannenergi ( $q_{f,k}$ ) ved hjelp av formel (3).

$$q_{f,k} = Q_{fi,k} / A \text{ (MJ/m}^2\text{)} \quad (3)$$

Karakteristisk spesifikk brannenergi er brannenergien per arealenhet (A) i en branncelle – enten per arealenhet gulvareal eller omhyllingsflaten til branncellen. Valg av arealenhet avhenger av metode og hvilken standard man legger til grunn for beregningene. TEK17 bruker arealenheten omhyllingsflate (DIBK, 2017). Dersom arealet av omhyllingsflaten blir brukt er verdien inklusive åpninger (SINTEF Byggforsk, 2013b). Omhyllingsflaten utgjør alle flatene i branncellen som grenser mot andre brannceller eller mot det fri.

### 3.4.7 Statistiske verdier for spesifikk brannenergi

Som nevnt er en beregning og kartlegging av brannenergi i byggverk en veldig tid- og ressurskrevende prosess. En kartlegging tar heller ikke høyde for forventede variasjoner i brannenergien over bygningens levetid. Det blir derfor brukt statistiske verdier for den

spesifikke variable brannenergien som fanger opp denne usikkerheten i variasjonen og som forenkler brannenergi beregningen (Maslak, 2016).

I NS-EN 1991-1-2 er det gitt slike statistiske verdier for en rekke bygningstyper. Verdiene i Tabell 2 er hentet fra Tillegg E og er en oversikt over verdier for den spesifikke brannenergien per gulvareal for forskjellig bruk av bygningen. Verdiene er representert ved 80 %-fraktilen i Gumbel-fordelingen. Dette er dermed verdier som forventes å ikke bli overskredet i løpet av 80 % av bygningens brukstid (NS-EN 1991-1-2, 2002). Verdiene tar ikke høyde for bidraget av brannenergi fra permanente elementer i bygningskonstruksjonen. Dette må dermed beregnes i tillegg.

Tabell 2: Spesifikk brannenergi per gulvareal for forskjellig bruk av bygningen (NS-EN 1991-1-2, 2002)

<b>Bruk</b>	<b>Gjennomsnitt</b>	<b>80 %- fraktil</b>
Bolig	780	948
Sykehus (rom)	230	280
Hotell (rom)	310	377
Bibliotek	1500	1824
Kontor	420	511
Klasserom i skole	285	347
Handlesenter	600	730
Teater (kino)	300	365
Transport (offentlig område)	100	122

### 3.4.8 Dimensjonerende spesifikk brannenergi

Det siste steget innebærer å beregne den dimensjonerende spesifikke brannenergien ( $q_{f,d}$ ). Denne brukes til å bestemme de termiske påvirkningene ved branndimensjonering. Verdien beregnes ved bruk av formel (4):

$$q_{f,d} = q_{f,k} \cdot m \cdot \delta_{q1} \cdot \delta_{q2} \cdot \delta_n \quad (\text{MJ/m}^2) \quad (4)$$

Som formelen angir, skal den karakteristiske spesifikke brannenergien multipliseres med følgende faktorer:

- *Forbrenningsfaktoren ( $m$ )* er basert på en vurdering av bruken av bygningen og den tilgjengelige typen brannenergi. For materialer som hovedsakelig er bestående av cellulose settes faktoren til 0,8 (NS-EN 1991-1-2, 2002).
- *Brannaktiveringsfaktoren ( $\delta_{q1}$ )* er basert på størrelsen til den aktuelle branncellen. Tabell 3 gir verdiene for faktoren hentet i NS-EN 1991-1-2.
- *Brannaktiveringsfaktoren ( $\delta_{q2}$ )* er knyttet til risikoen basert på typen aktivitet i branncellen. Tabell 4 gir verdiene for faktorene hentet fra NS-EN 1991-1-2.
- *Korreksjonsfaktoren ( $\delta_n$ )* tar hensyn til ulike brannsikringstiltak, som eksempelvis automatisk brannslukkingstiltak eller automatisk brannalarmanlegg. Det er i det nasjonale tillegget til standarden angitt at faktoren  $\delta_n$  skal settes lik 1,0 (NS-EN 1991-1-2, 2002)

Tabell 3: Brannaktiveringsfaktor basert på størrelse av branncellen (NS-EN 1991-1-2, 2002)

Branncellens gulvareal $A_f$ (m <sup>2</sup> )	Fare for brannaktivering $\delta_{q1}$
25	1,10
250	1,50
2 500	1,90
5 000	2,00
10 000	2,13

Tabell 4: Brannaktiveringsfaktor basert på bruk av branncellen (NS-EN 1991-1-2, 2002)

Fare for brannaktivering $\delta_{q2}$	Eksempler på opphold i bygningen
0,78	Kunstgalleri, museum, svømmebasseng
1,00	Kontor, bolig, hotell, papirindustri
1,22	Fabrikk for maskiner og motorer
1,44	Kjemisk laboratorium, malerverksted
1,66	Fabrikk for fyrverkeri eller maling

### 3.5 Vurdering av beskyttet brannenergien i litteraturen

I henhold til NS-EN 1991-1-2 (2002) skal brannenergien inneholde bidraget fra alle aktuelle brennbare deler av konstruksjonen som kledninger og innredninger. Det er imidlertid spesifisert at det ikke er nødvendig å ta hensyn til deler som ikke forkulles under brannen. Det er derfor nødvendig med en individuell vurdering av hvor langt ut i brannforløpet beskyttede deler av konstruksjonen vil fortsette å være beskyttet, slik at faktoren kan fastsettes deretter.

Det er imidlertid mangel på en generelt akseptert fremgangsmåte for å sette verdier for denne reduksjonsfaktoren (Thomas, 1986, s. 102). Det er heller ikke brukt konsekvente fremgangsmåter for vurdering av faktoren i litteraturen (Fontana *et al.*, 2016, s. 1139). Vanskelighetene med å bestemme bidraget fra den permanente brannenergien fører til at den ofte ikke inngår i beregningen, eller at den kun er basert på antagelser fra den som utfører kartleggingen (Zalok og Ediful, 2013, s. 300). Bruk av ulike verdier for beskyttelsesfaktoren, og dermed hvor mye av brannenergien som blir medtatt i beregningen, vil kunne ha stor innvirkning på resultatene for den dimensjonerende spesifikke brannenergien i et byggverk.

I det gjeldende Byggforskladet 321.051 *Brannenergi i bygninger, beregninger og statistiske verdier* er det gitt et beregningseksempel for beregning av brannenergi. I dette eksempelet er det medtatt 10 % av brannenergibidraget fra trekonstruksjonen (vegg og tak) for beregning av den dimensjonerende spesifikke brannenergien. Det er ikke spesifisert ytterligere vurderinger av dette bidraget. I dette eksempelet er trekonstruksjonen beskyttet av to lag gips (SINTEF, 2013).

De to foregående Byggforskladene på tematikken gir imidlertid beregningseksempler for vurdering av brannenergi fra konstruksjonen litt mer inngående. Dette er utgåtte

Byggforskblad som bygger på eldre regelverk, men en kort gjennomgang er medtatt her for å illustrere hvordan bidraget fra den permanente konstruksjonen tidligere ble vurdert.

Byggforskbladet 520.333 – *Brannbelastning i bygninger. Beregninger og statistiske verdier* ble utgitt i 1999 og erstattet i september 2009. I dette bladet benyttes iterasjonsberegning for å beregne omtrentlig branntid som videre brukes for å vurdere varigheten av beskyttelse fra platekledninger. Videre vurderes bidraget fra brennbare deler av konstruksjonen som forkuller etter «svikt» i beskyttelsen. Det blir gjort en forenkling om konstant forkullingshastighet og branntiden i minutter blir beregnet omtrentlig ved å benytte enten formel (5) eller formel (6) fra NS 3478 (SINTEF Byggforsk, 1999). Det blir oppgitt at et lag med 13 mm gips erfaringsmessig gir en beskyttelse på 15 minutter.

$$t = 0,3 * q_b \text{ for } q_b \leq 840 \text{ MJ/m}^2 \quad (5)$$

$$t = 0,6 * (q_b - 420) \text{ for } q_b > 840 \text{ MJ/m}^2 \quad (6)$$

Iterasjonsberegningen starter med å benytte den variable brannenergien i den aktuelle branncellen, og størrelsen på den variable brannenergien avgjør om formel (5) eller (6) skal benyttes for å beregne branntiden.

Når branntiden er beregnet benyttes denne til å vurdere om konstruksjonen er beskyttet eller om det vil forekomme forkulling i løpet av den aktuelle branntiden. Varigheten til beskyttelsen trekkes fra den beregnede branntiden, og videre beregnes andelen som vil forkulle. Dersom forkulling vil inntreffe gjennomføres en ny iterasjon. Da beregnes branntiden ved å benytte bidraget fra den variable brannenergien og bidraget fra konstruksjonen som forkuller. Det presiseres at det i praksis er sjeldent nødvendig med mer enn tre iterasjoner, da videre iterering vanligvis ikke vil gi betydelig bidrag til den spesifikke brannenergien.

Byggforskbladet 520.333 - *Brannenergi i bygninger. Beregninger og statistiske verdier* ble utgitt i september 2009 og var gyldig frem til desember 2013. Her blir ekvivalent branneksponeeringstid beregnet for å vurdere varigheten til beskyttelsen av konstruksjonsdeler. Den ekvivalente branneksponeeringstiden beregnes ved å benytte formel (7) eller (8), avhengig om det er henholdsvis gulvarealet eller omhyllingsflaten som er arealenheten i den spesifikke brannenergien (SINTEF Byggforsk, 2009).

$$t_{e,d} = q_{f,i,d} * k_b * w_{fi} \quad (7)$$

$$t_{e,d} = q_{t,d} * k_b * w_t \quad (8)$$

I beregningseksempelet blir 10 % av bidraget fra bygningskonstruksjonen benyttet sammen med den variable brannenergien for å beregne ekvivalent branneksponeeringstid. Første beregning gir en ekvivalent branneksponeeringstid som er kortere enn vurdert beskyttelse av to gipsplater som trekonstruksjonen er beskyttet med, og en videre beregning blir dermed ikke nødvendig. Det oppgis at beskyttelse av to lag gipsplater er tilnærmet 30 minutter. Faktoren



$w_{fi}$  er en ventilasjonsfaktor, og faktoren  $k_b$  er relatert til omsluttende bygningsdelers termiske egenskaper.

### 3.6 Statistiske fordelingsfunksjoner for brannenergi

#### 3.6.1 Generelt

For å ta høyde for variasjonene i brannenergi over tid blir det som nevnt brukt statistiske verdier for den spesifikke variable brannenergien. Slike verdier representeres ved hjelp av spesifiserte fraktiler fra tilhørende statistiske fordelingsfunksjoner (Thomas, 1986, s. 101). Verdiene gitt i regelverket gjeldende for Norge og EU-land (NS-EN 1991-1-2, 2002), og i regelverket gjeldende i USA (NFPA 577, 2016) blir representert ved *Gumbel-fordelingen*.

Det er også registrert bruk av log-normalfordeling for brannenergi i litteraturen. Hall og Joglar (2016, s. 2838) mener at en log-normalfordeling også er et godt valg for å estimere tilhørende sannsynligheter til ekstremtilfeller, eksempelvis for brannenergi. Fontana *et al.* (2016, s. 1133) foreslår på tilsvarende vis en log-normalfordeling for brannenergi og skriver følgende om å bruke Gumbel-fordelingen:

*«From a theoretical point of view the Gumbel distribution belongs to the family of extreme value distributions while the fire load is considered as a point in time realization of a random process. However, due to the usually large coefficient of variation of the fire load, it is acceptable to use a Gumbel distribution instead of a Lognormal distribution»*

Ifølge Fontana *et al.* (2016) er altså egentlig en log-normalfordeling mer passende for brannenergiverdier, men Gumbel-fordelingen er også akseptabel på grunn av den vanligvis store variasjonskoeffisienten. Variasjonskoeffisienten er forholdet mellom standardavviket og gjennomsnittsverdien. For verdiene gitt i eurokoden er det benyttet en variasjonskoeffisient lik 0,3 (Schleich, 2005a, s. I-24).

En log-normalfordeling brukes ofte for å representere skjeve datasett (Hall og Joglar, 2016, s. 2838). Dette vil si at tyngdepunktet i datasettet ikke er sentrert i midten slik som for en normalfordeling. I en log-normalfordeling er logaritmen til variablene normalfordelt, og fordelingen har en lang hale mot høyre (Aarnes, 2014, s. 23)

I CIB W14 blir det foreslått at verdier for brannenergi kan representeres ved normalfordeling eller log-normalfordeling (Thomas, 1986, s. 101). Melinek (1993) fant at brannenergien for kontorer passet best til en log-normalfordeling fremfor en normalfordeling. Thauvoye *et al.* (2008) fant at en log-normalfordeling passet bedre enn Gumbel-fordeling for brannenergien for industrielle og kommersielle bygninger i Sveits, men for offentlige bygninger som kjøpesenter, hoteller og sykehus var ikke forskjellen mellom en log-normalfordeling og en Gumbel-fordeling stor. Dette begrunnes med at for sistnevnte type bygninger ble variasjonskoeffisienten lav og dette medførte at en log-normal fordeling og Gumbel-fordelingene da blir like. Thauvoye *et al.* (2008, s. 1001) skriver følgende i sin konklusjon:

*«The lognormal gives always satisfactory results while Gumbel law can be used if the coefficient of variation is low (less than 1.0).»*

Det er utenfor denne oppgavens rammer å gå inn i det teoretiske som ligger bak de ulike statistiske fordelingene som er identifisert brukt for brannenergi i litteraturen. Det er imidlertid interessant at Thauvoye *et al.* (2008) skriver at en Gumbel-fordeling kan brukes ved lave verdier for variasjonskoeffisienten, mens Fontana *et al.* (2016) kan oppfattes som motstridende ved å skrive at Gumbel-fordelingen er passende for brannenergi på grunn av stor variasjonskoeffisient. Da variasjonskoeffisienten for verdiene gitt i NS-EN 1991-1-2 er lik 0,3, og Thauvoye *et al.* (2008, s. 1001) definerer lave verdier til å være mindre enn 1, antas utsagnene likevel å sammenfalle.

Denne oppgaven begrenser seg til å benytte Gumbel-fordelingen, som er en ekstremverdifordeling, slik det er gjort i NS-EN 1991-1-2. I det følgende vil det i korte trekk redegjøres for teori om ekstremverdifordelinger.

### 3.6.2 Ekstremverdifordelinger

Ekstremverdifordelinger benyttes for å finne statistiske modeller som representerer sjeldne hendelser i et datasett (Hall og Joglar, 2016, s. 2844). Det er et verktøy for å modellere verdier som utgjør øvre eller nedre hale til en fordelingsfunksjon. Dette kan også være verdier som ikke er observert enda, men som ekstrapoleres ut fra observerte verdier (Coles, 2001, s. vii).

Coles (2001) gir to ulike metoder for å se på slike ekstremhendelser. Første metode benyttes ved å dele datasettet inn i blokker, hvor en blokk eksempelvis representerer observasjoner innenfor en definert tidsperiode som eksempelvis et døgn eller et år. Datasettet med ekstremverdier utgjør da ekstremverdiene som er hentet fra hver blokk. Den andre metoden for å se på slike ekstremhendelser er å definere en terskelgrense i datasettet. Datasettet for ekstremverdiene utgjør da alle verdiene som overskrider denne terskelen.

Ekstremverdiene funnet ved førstnevnte metode kan videre tilpasses en passende ekstremverdifordeling ved bruk av en generalisert ekstremverdifordeling, også kalt *GEV* (Coles, 2001, s. 48). Generalisert ekstremverdifordeling har tre ulike fordelingsfunksjoner. Hvilken av fordelingene som passer til datasettet med ekstremverdier avhenger av oppførselen til fordelingsfunksjonen er Gumbel-fordeling (Type I), Fréchet-fordeling (Type II) og Weibull-fordeling (type III). Alle disse fordelingsfunksjonene har en lokasjonsparameter ( $\mu$ ) og en skalaparameter ( $\sigma$ ). Fréchet- og Weibull-fordelingene har også en formparameter ( $\xi$ ). Formelen for generalisert ekstremverdifordeling er gitt nedenfor i formel (9), hentet fra Coles (2001, s. 48).

$$G(z) = \exp\left\{-\left[1 + \xi \left(\frac{z-\mu}{\sigma}\right)^{-\frac{1}{\xi}}\right]\right\} \quad (9)$$

Når formparameteren  $\xi$  er lik 0, er fordelingsfunksjonen en Gumbel-fordeling gitt ved formel (10) nedenfor, hentet fra Coles (2001, s. 48):

$$G(z) = \exp\left(-\exp\left\{-\frac{z-\mu}{\sigma}\right\}\right) \quad \text{hvor } -\infty < z < \infty \quad (10)$$

For en Gumbel-fordeling og en Fréchet-fordeling er høyre ende uendelig og ikke-definert, mens en Weibull-fordeling har et bestemt punkt for høyre ende.

### 3.7 Faktorer som påvirker brannens utvikling

#### 3.7.1 Generelt

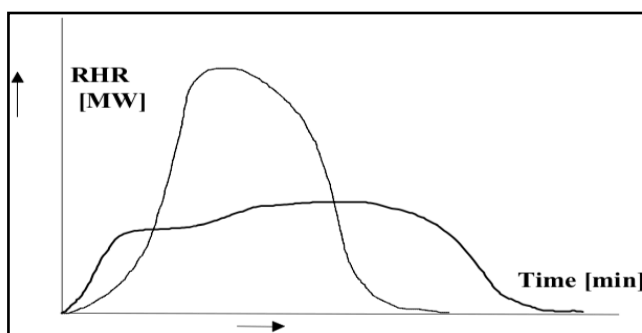
Brannenergi alene gir lite grunnlag for å kunne predikere hvordan en brann vil utvikle seg og temperaturene konstruksjonen vil bli eksponert for. Brann er et veldig komplekst fenomen, og det er en rekke ulike faktorer som har stor innvirkning på hvordan en brann vil kunne utvikle seg i en bygning. Utviklingshastigheten er avhengig av hvor fort brannen kan spre seg fra der den starter og til å involvere resten av det brennbare materialet i rommet (Drysdale, 2011, s. 276). Det er i litteraturen identifisert en rekke forhold som vil ha innvirkning på utviklingen av brannen og temperaturen i rommet der brannen finner sted. Disse blir gjennomgått i korthet i dette delkapittelet.

Brannens utvikling er ofte beskrevet med fire ulike faser: 1) antenning, 2) vekstfase, 3) fullt utviklet brann og 4) en avkjølingsfase (Yii *et al.*, 2006, s. 62). Antenningen er det som starter hele brannen – noe tar fyr. I vekstfasen vil flere tilgjengelige brennbare elementer i rommet ta fyr og bidra til utvikling av brannen. I overgangen til en fullt utviklet brann vil alt tilgjengelig brennbart materiale i rommet vært antent. Videre utvikling er da enten brenselkontrollert eller ventilasjonskontrollert. Det at en brann er brenselkontrollert vil si at det er tilgangen på brensel som kontrollerer utviklingen, mens en ventilasjonskontrollert brann derimot er styrt av tilgangen på oksygen. I avkjølingsfasen går temperaturen ned og brannen avtar.

#### 3.7.2 Varmeavgivelseshastighet

Varmeavgivelseshastigheten er varmen som et produkt avgir i forhold til tid, det er en verdi for raten brenselet vil brenne med (NS-EN 1991-1-2, 2002). I tillegg E er det gitt en fremgangsmåte for å beregne varmeavgivelseshastigheten. Varmeavgivelseshastigheten blir også kalt forbrenningshastigheten. Dette er en viktig parameter som har innvirkning på temperaturene som vil kunne forekomme i rommet ved en brann.

Figur 4 illustrerer hvordan to like mengder med brannenergi vil kunne gi helt ulike temperaturer på grunn av ulik varmeavgivelsehastighet. De to temperaturkurvene representerer samme mengde brannenergi, men hvor den ene kurven representerer en hurtig brann og den andre en mer ulmende brann (Schleich, 2005a, s. I-25).



Figur 4: To RHR kurver for samme mengde brannenergi (Schleich, 2005a, s. I-25)

### **3.7.3 Type brensel**

Type brensel vil ha stor innvirkning på utviklingen av brannen, ettersom ulike materialer har ulike forbrenningsegenskaper. Et rom består ofte av mange ulike brennbare materialer, og materialene som er tilgjengelig som brensel er både de brennbare materialene i selve bygningskonstruksjonen og de brennbare elementene tilgjengelig der brannen utvikler seg.

Ved forbrenning av trematerialer dannes det et forkullingslag på overflaten materialene. Dette forkullingslaget bremser forbrenningsprosessen da det fungerer som et isolerende lag som beskytter resten av treverket. Forkullingshastigheten til trematerialer er avhengig av elementets densitet, fuktighetsinnhold, permeabiliteten, den kjemiske sammensetningen som utgjør forholdet mellom cellulose, hemicellulose og lignin samt tykkelsen på objektet (Friquin, 2011, s. 324).

Plastikkmaterialer har en annen oppførsel ved brann enn trematerialer. Andersson (2013, s. 10) beskriver at plast ofte har brannegenskaper som avviker mye fra de tradisjonelle materialene av cellulose og som påvirker brannutviklingen. Eksempler på slike egenskaper er at mange plaster smelter ved brann og dette kan føre brannfronten forover. Plast har ofte en høyere antennelsestemperatur enn cellulosebaserte materialer, men noen plaster antenner også lettere. Noen plaster kan også forbrenne mye raskere enn tre.

### **3.7.4 Geometriske faktorer**

Videre har de geometriske faktorene til brenselet en innvirkning på brannutviklingen. Tykke treobjekter brenner eksempelvis ofte saktere enn tynne treobjekter (Yii *et al.*, 2006, s. 63). Dette er fordi tynne treobjekter har en større tilgjengelig andel overflateareal som blir eksponert for brannen i forhold til brenselets volum. Dette påvirker hvor fort brenselet blir brent opp og varigheten til avkjølingsfasen i rommet.

En annen geometrisk faktor som kan påvirke brannutviklingen er overflatens helning. Brann sprer seg raskere opp en vertikal overflate enn langs en horisontal flate (Drysdale, 2011, s. 285). Dette er en konsekvens av at brannens utvikling da skjer i samme retning som oppdriften av de varme gassene produsert fra brannen.

### **3.7.5 Ventilasjonsforhold**

Tilgangen på oksygen er sentralt for hvor fort brannen kan utvikle seg. Dette styres ofte av antall og størrelse på åpningene i rommet. Vinduer knuser ofte under brannen og dette er en viktig kilde til oksygen. Som nevnt ovenfor, er ventilasjonskontrollerte branner kontrollert av tilgangen på oksygen. I en ventilasjonskontrollert brann vil derfor brannen være raskest i nærheten av åpningene der det er tilgang på oksygen, før den beveger seg innover i rommet når brenselet der er brukt opp (Yii *et al.*, 2006, s. 64).

Dersom det er god tilgang på oksygen i rommet vil de brennbare materialene antennes fortere, brenne kraftigere og spredningen vil være raskere enn ved lave oksygenkonsentrasjoner (Drysdale, 2011, s. 297).

## 4 Kartlegging av flerbrukshallene

*Dette kapittelet redegjør for den analytiske prosessen som er benyttet for å kartlegge og beregne karakteristiske verdier for brannenergi i de ti kartlagte flerbrukshallene. Herunder hvordan analyseobjekter er blitt valgt ut, valgt kartleggingsmetode, valg gjort for beregningene, viktige funn fra kartleggingene samt begrensninger og antagelser som er blitt gjort. Avslutningsvis vil det bli gitt en oversikt over metoden for sensitivitetsanalysen benyttet på resultatene.*

### 4.1 Valg av analyseobjekter

Alle objektene som er blitt kartlagt i denne oppgaven er hentet fra eiendomsporteføljen til *Undervisningsbygg Oslo* og *Kultur- og idrettsbygg*. Disse er begge kommunale foretak som har ansvar for å drifte, bygge og eie henholdsvis undervisningsbygg og kultur- og idrettsbygg i Oslo. Private haller er ikke blitt kartlagt i denne oppgaven.

Ved valg av analyseobjekter har tilgang på relevant dokumentasjon for flerbrukshallene vært en avgjørende faktor. I utstrakt grad er ofte dokumentasjonen og tegningsunderlaget på eldre haller mangelfull og inneholder ikke nok informasjon til å kunne utføre en god brannenergi-beregning. Nyere haller har derfor blitt prioritert fra eiendomsporteføljen da god, dokumentasjon er avgjørende for å kunne utføre analysen.

Et tilfeldig utvalg defineres av Hall og Joglar (2016, s. 2870) som et utvalg hvor alle objekter i populasjonen har lik sannsynlighet for å bli utvalgt. For at utvalget av flerbrukshaller til den empiriske analysen i denne oppgaven skulle vært tilfeldig, måtte alle flerbrukshaller i Oslo kommune hatt lik sannsynlighet for å bli utvalgt. Dette er ikke tilfelle da utvelgelsen av analyseobjekter diskriminerer på både eier/operatør og alder.

Videre er det to begrensninger som ytterligere fører til at utvalget analyseobjekter ikke kan sies å være tilfeldig. Disse er følgende:

- To av flerbrukshallene som er blitt kartlagt i denne oppgaven har identiske bygningskonstruksjoner – Ellingsrud og Voksen flerbrukshall. Dette medfører at den permanente brannenergien er tilnærmet lik. Begge flerbrukshallene er imidlertid ansett som to selvstendige objekter i denne oppgaven. Valget ble gjort med bakgrunn i at det gav en mulighet til å se på variasjonen i den variable brannenergien i to identiske byggverk. Sannsynligheten for at begge hallene hadde blitt utvalgt dersom ti flerbrukshaller tilfeldig ble valgt ut fra alle flerbrukshallene i Oslo er imidlertid ikke blitt vurdert.
- Apalløkka flerbrukshall består av to haller som er avgrenset i hver sin branncelle. Hall 1 ble bygget i 2003 og Hall 2 ble bygget i 2009. Disse to branncellene er blitt kartlagt og behandlet som to selvstendige haller i denne oppgaven. I et statistisk perspektiv vil nok ikke disse hallene kunne antas å være uavhengige. Materialvalget og designet av Hall 2 er tilsynelatende inspirert og tilpasset Hall 1.

De ti flerbrukshallene kartlagt i denne oppgaven befinner seg alle i Oslo-området. Berger (2018) gjennomførte våren 2018 en kartlegging av ti flerbrukshaller i Trondheims-området.

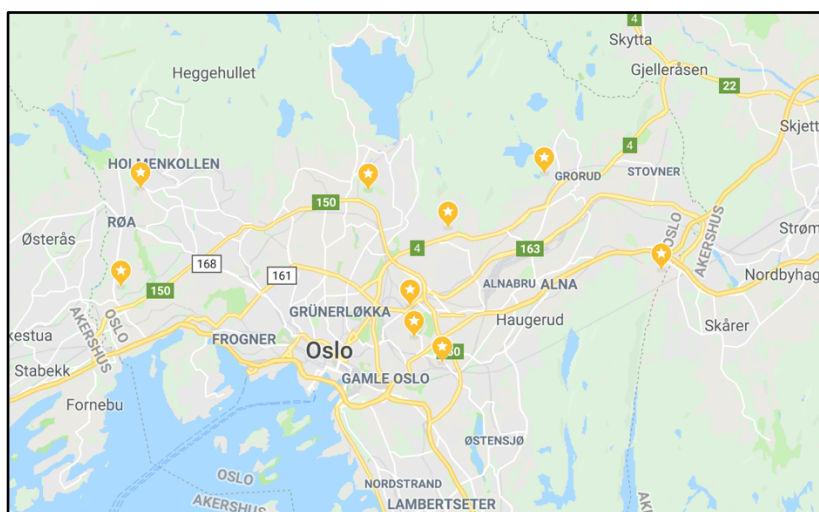
Valg av geografisk område for objektene kartlagt i denne oppgaven styrker dermed det statistiske utvalget, da det representerer byggverk i en annen del av landet.

Tabell 5 gir en oversikt over flerbrukshallene som er blitt kartlagt i denne oppgaven, sammen med byggeår og verdier for den dimensjonerende spesifikke brannenergien per omhyllingsflate oppgitt i branndokumentasjonen til alle de respektive byggverkene. Syv av hallene i denne oppgaven har blitt kartlagt i februar og starten av mars i 2019, mens tre haller ble kartlagt i forbindelse med prosjektoppgaven i november og starten av desember 2018.

Tabell 5: Oversikt over analyseobjektene, byggeår og dimensjonerende spesifikk brannenergi per omhyllingsflate gitt i tilhørende branndokumentasjon

Flerbrukshall	Byggeår	Dimensjonerende spesifikk brannenergi per omhyllingsflate oppgitt i brannkonseptet
Bjørnsletta	2014	50-400 MJ/m <sup>2</sup>
Fyrstikkalleen	2010	50-400 MJ/m <sup>2</sup>
Grefsen	2015	50-400 MJ/m <sup>2</sup>
Brynseng	2017	50-400 MJ/m <sup>2</sup>
Teglverket	2015	50-400 MJ/m <sup>2</sup>
Årvoll	2019	50-400 MJ/m <sup>2</sup>
Ellingsrud	2010	50-400 MJ/m <sup>2</sup>
Voksen	2011	50-400 MJ/m <sup>2</sup>
Apalløkka, ny del	2009	Under 50 MJ/m <sup>2</sup>
Apalløkka, gammel del	2003	Under 50 MJ/m <sup>2</sup>

Figur 5 er en skjermdump av et kart over Oslo som illustrerer den geografiske lokaliseringen til alle analyseobjektene kartlagt i denne oppgaven. Som illustrert er objektene spredt utover hele kommunen og de anses dermed å representere flerbrukshallene i kommunen godt. Byggeårene sprer seg også fra 2003 til 2019 og utvalget består dermed av både helt nye haller, men også haller som er litt eldre. Utvalget vurderes derfor til å være representativt for bygningstypen.



Figur 5: Kart over Oslo med markert lokalisering til analyseobjektene

## 4.2 Kartleggingsmetode

For å identifisere massene til det brennbare materialet i de kartlagt flerbrukshallen ble kombinasjonsmetoden benyttet. Denne metoden gjennomføres ved å kombinere veiningsmetoden og inventarmetoden (se kapittel 3.3.4).

Kombinasjonsmetoden er kartleggingsmetoden som anbefales i litteraturen da metoden fører til at kartleggingene blir lettere å utføre i praksis, samtidig som den gir mer nøyaktige og realistiske resultater (Zalok og Eduful, 2013, s. 309). Metoden gjorde det mulig å kartlegge flerbrukshallene uten assistanse, og reduserer også en rekke antagelser som må bli gjort ved bruk av veinings- eller inventarmetodene alene. Kartleggingen av flerbrukshallene som ble utført av Berger (2018) er også gjennomført ved bruk av kombinasjonsmetoden. Alle objektene som er analysert i den statistiske behandlingen er dermed blitt kartlagt med utgangspunkt i samme metode.

Metoden krever fysisk tilgang til flerbrukshallene og er avhengig av god planlegging og koordinering. Flerbrukshallene som er kartlagt i denne oppgaven hadde alle veldig full timeplan, både på dag- og kveldstid. Det lot seg derfor ikke gjøre å utføre befaringene utenfor driftstid. Alle hallene er blitt kartlagt ved normal driftssituasjon. Dette medfører at det ofte har vært parallell aktivitet i hallene. Tilgang på byggverkene er fremskaffet ved å kontakte relevant driftspersonell ved hallene.

Tabell 6 gir en oversikt over utstyret som er blitt benyttet ved kartleggingene. For å identifisere massene ble alle brennbare elementer i hallens branncelle talt opp. Deretter ble elementene veid eller dimensjonene målt. Små elementer ble veid på en liten husholdningsvekt, og større elementer ble veid på en større baderomsvekt. For elementer som var for store til å veies ble dimensjonene målt ved hjelp av et målebånd.

Tabell 6: Oversikt over utstyret brukt til kartlegging av brannenergi

Utstyr	Detaljer
Husholdningsvekt	Måleområde = 3-5 000 g
Baderomsvekt	Maksvekt = 150 kg Gradering = 100 g
Målebånd	Bladlengde = 5 m

Kartleggingen har vært begrenset til selve branncellen som spilleflaten i hallen er en del av. Dette inkluderer ofte rom som ulike utstyrslagerrom, garderober, galleri/tribuner og andre rom som renholdsrom, kjøkken, danserom, trimrom, kontorer og ulike korridorer. Det varierer mellom de ulike byggverkene hva som er inkludert i hallens branncelle. Antall rom inkludert har hatt stor innvirkning på tiden som har medgått til kartlegging av hallen.

## 4.3 Forarbeid før befaringene

Dokumentasjon til de aktuelle flerbrukshallene ble samlet inn i forkant av befaringene. Dokumenter som *branndokumentasjon* og *arkitekttegninger* var nødvendig for å få oversikt over oppbygging av konstruksjonen i hallene, slik at den permanente brannenergien kunne

beregnes. Tilgjengelig brann dokumentasjon ble brukt for å få oversikt over aktuelle rom innenfor samme branncelle som selve hallen. Godt forarbeid var et viktig element for smidig gjennomføring av kartleggingene, samt for å kunne verifisere informasjon som ble gitt i dokumentasjonen på befaringdagen.

Det ble i forkant av befaringene utarbeidet regneark i Excel som ble brukt for å registrere alle elementene i branncellen. Disse er å finne i Vedlegg C. Det var her sentralt å notere ned antagelser som ble gjort og notater om eventuelle objekter hvor andelen brennbart materiale var vanskelig å identifisere. Det ble tatt en rekke bilder av slike objekter, slik at en ytterligere evaluering av nødvendige antagelser kunne vurderes i ettertid.

#### 4.4 Kategorisering av materialene

Identifisering av massene til alle de brennbare elementene er en tidkrevende prosess. Å skulle identifisere og skille mellom ulike typer trevirke, tekstiler og ulike plasttyper under kartleggingen ville både vært veldig ressurskrevende, men også veldig vanskelig. For å forenkle kartleggingene er det ofte gjort forenklinger ved å kategorisere materialene inn i ulike kategorier. Zalok og Eduful (2013) kategoriserte materialer i gruppene cellulosematerialer (papir og trevirke), plastikk og tekstil ved kartlegging av kontorer i Canada. Kumar og Rao (1997) benyttet på sin side materialkategoriene trevirke, papir, plastikk og «annet» ved kartlegging av kontorer i India.

Berger (2018) benyttet følgende kategorier ved kartlegging av flerbrukshaller i Trondheimsområdet: Cellulosebaserte materialer, tekstiler, skumprodukter, hard plast og myk plast. Disse materialkategoriene er også blitt benyttet ved kartleggingene i denne oppgaven. Dette med bakgrunn i at kategoriene på en god måte representerer materialene som er å finne i en flerbrukshall.

Kategorien *cellulosebaserte materialer* omfatter materialene papir, papp og trevirke. Innenfor kategorien *tekstiler* er materialene ull, bomull, nylon og polyester. Elementer som har blitt kategorisert som *myk plast* er elementer som har en elastisk eller myk form, eksempelvis idrettsgulv og beskyttelsestrekk på nedsprangsmatte (også kalt *tjukkas*). I kategorien *hard plast* er elementer som er stive og uelastiske ved romtemperatur, som innebandykøller og ulike oppbevaringsbokser.

#### 4.5 Inhomogene elementer

Svært mange elementer i hallene er inhomogene og består av flere ulike typer materialer. Dette vil ofte være både ubrennbare deler og brennbare deler. Det er som nevnt i kapittel 3.3.2 vanskelig å skille disse delene fra hverandre uten å ødelegge elementene. Massene til de ulike delene er derfor basert på antagelser.

Det ble i forbindelse med kartleggingene utført i denne oppgaven gjort grove antagelser på massen av brennbare deler i inhomogene elementer. Der produktdatablad for elementene har vært mulig å fremskaffe på internett har vurderingene blitt basert på informasjon gitt der. Men antagelsene er i utstrakt grad grove og forsøkt gjort konservative. Det har vært store variasjoner i mengden inhomogene elementer som har vært i de ulike hallene, og disse



varierer i stor grad med antall og type rom som inngår i branncellen. Eksempler på inhomogene elementer som ble funnet i hallene er illustrert nedenfor i Figur 6.



Figur 6: Eksempler på inhomogene elementer som er identifisert i noen av hallene, oppvaskmaskin, TV og VHS-spiller og bonemaskin

#### 4.6 Ulike materialers densitet

For å finne tilhørende masse på elementene hvor volumet ble målt, er elementenes volum blitt multiplisert med materialdensiteten.

Tabell 7 viser minimums-, gjennomsnitts- og maksimumsverdiene for densitetene til de ulike materialene. Disse verdiene er hentet fra Vedlegg B, som gir en oversikt over materialdensiteter funnet i litteraturen. I beregningene er gjennomsnittsverdiene for densitetene blitt benyttet.

Densiteten for trevirke varierer både mellom ulike treslag, men også mellom ulike trær av samme slag (Buchanan og Abu, 2017, s. 263). Trevirkets densitet varierer med fuktighetsinnholdet da både massen og volum endres om materialet tar opp eller avgir vann. Volumet sveller eller krymper deretter (Kucera og Næss, 1999, s. 225).

Verdiene for densitet som er benyttet for beregningene i denne oppgaven er for tørt trevirke. Der verdiene som er innhentet har oppgitt %-fuktighetsinnhold, er disse blitt omregnet til å gjelde for tørt trevirke. Det er imidlertid antatt neglisjerbare volumendringer i beregningene, og endringer i volumet som følge av svelling og krymping er ikke tatt høyde for i beregningene av tørr-densitet.

Det er i beregningene blitt benyttet to forskjellige verdier for densitet til trevirke. Det skilles mellom treslag som vanligvis er å finne i bygningskonstruksjonen og treslag som benyttes til inventar og utstyr. Verdiene er basert på verdier hentet fra følgende kilder: Mäkinen *et al.* (2002, s. 189), SINTEF Byggforsk (2015), Hurley *et al.* (2016, s. 3436), Stokke *et al.* (2014, s. 80) og Fangrat *et al.* (1998, s. 2).

Densitetene for fast inventar som heisevegger av PVC og stormasket nylonnett er basert på produktdatablad fra lignende produkter, hentet fra følgende kilder: (Saxi, u.å) og (Unisport, u.å). Disse er ikke identiske produkter med de som befinner seg i hallene, men det er gjort en

forenkling som anses som tilstrekkelig konservativ. Verdiene for enkel PVC-duk er benyttet på skilleveggene der øvre del består av stormasket nylonnett, og verdiene for lydisolerende PVC-duk er brukt på tykkere heisvegger av kun PVC-duk. Det er videre antatt lik densitet på heisveggene brukt i de ulike hallene.

Det skilles videre mellom sportsgulv av polyuretan på spilleflatene og gulvbelegg benyttet i omliggende rom. Densiteten som benyttes i beregningene for polyuretan er hentet fra følgende kilder: Lechner (2006, s. 477-522), Hurley *et al.* (2016, s. 3436) og Braun (2010, s. 110). Densiteten for resterende gulvbelegg i bygningen er basert på gjennomsnittsverdier for følgende gulvbeleggstyper: PVC-gulvbelegg, gummi-gulvbelegg og linoleum. Verdiene er hentet fra Byggforsksbladet 471.031: *Egenlaster for bygningsmaterialer, byggevarer og bygningsdeler* (SINTEF Byggforsk, 2013a).

Tabell 7: Minimum-, gjennomsnitt- og maksimumsverdier for materialdensitetene hentet fra Vedlegg B

Materiale	Minimum	Gjennomsnitt	Maksimum
PVC-duk, enkel [ $kg/m^2$ ]	0,7	0,725	0,75
PVC-duk, lydisolerende [ $kg/m^2$ ]	1,2	1,2	1,2
Nylonnett, stormasket [ $kg/m^2$ ]	0,4	0,45	0,5
Trevirke, konstruksjonen [ $kg/m^3$ ]	308	398,6	457,6
Trevirke, inventar og utstyr [ $kg/m^3$ ]	413,6	573,8	633,6
Polyuretan [ $kg/m^3$ ]	1050	1150	1270
Gulvbelegg [ $kg/m^3$ ]	1200	1500	1800

#### 4.7 Bidrag fra bygningskonstruksjonen

Den permanente brannenergien er beregnet med utgangspunkt i dokumentasjonen til hallene. Kvaliteten på dokumentasjonen har vært varierende, og det har vært nødvendig med en rekke antagelser for å få utført beregningene. Usikkerhetene er knyttet til at det er vanskelig å vite nøyaktige mengder for materialene som er benyttet under oppføring, samt at dokumentasjonen på byggverkene i enkelte tilfeller er mangelfull og antagelser må tas på dimensjoner og oppbygging.

Der det har vært manglende detaljering av oppbyggingen av gulvkonstruksjonen er antagelsene basert på oppbyggingen i de andre flerbrukshallene samt informasjon gitt i Byggforsksbladet 541.810: *Golv i idrettshaller for flerbruk*, som gir en oversikt over oppbyggingen og materialbruken i idrettsgulv. Der topplaget har bestått av parkett er det antatt en flateelastisk gulvkonstruksjon, og i haller hvor topplaget er av plastikk er det antatt en kombielastisk oppbygningskonstruksjon med et topplag av polyuretan og et underlag av kryssfiner (SINTEF Byggforsk, 2010).

Det har videre vært vanskelig å beregne nøyaktige mengder av trevirke i lettvegger og bærevegger som skiller enkelte av de kartlagte branncellenes ulike rom og mot andre brannceller. Det er her blitt gjort en forenkling om at veggene består av stendere med senteravstand på 0,6 m samt en topp- og bunnsvill. Forenklingen medtar derfor ikke

elementer som losholter, hjørnestolper og spikerslag i beregningene. En slik forenkling medfører et noe lavere bidrag til den totale brannenergien, men er ansett som tilstrekkelig nøyaktig.

Årvoll flerbrukshall er oppført som en stor branncelle. Dette innebærer at teknisk rom er en del av den kartlagte branncellen. Det er imidlertid blitt gjort en forenkling ved å ikke medta bidraget fra utstyret i teknisk rom ved beregning av brannenergien i Årvoll flerbrukshall. Denne forenklingen er gjort på grunn av vanskelighetene med å estimere brannenergien fra dette utstyret. Konsekvensen av dette er at brannenergien beregnet for Årvoll flerbrukshall er mindre enn hva den reelt er. Veggene til teknisk rom er imidlertid oppført med strengere ytelse enn minstekravet på grunn av den høye brannbelastningen som kan befinne seg i slik rom.

#### 4.8 Netto brennverdi

Som nevnt i kapittel 3.4.2 er *netto brennverdi* ( $H_u$ ) til et materiale varmemengden som avgis når en masseenheter av materialet forbrennes fullstendig (Buchanan og Abu, 2017, s. 36). Den spesifikke forbrenningsvarmen for ulike materialer kan finnes ved å måle den frigitte energien som forekommer ved å forbrenne et lite stykke av et materiale i et kalorimeter. Det er imidlertid viktig å være klar over at verdiene målemetoden gir ikke representerer nøyaktig hva som vil skje i et virkelig tilfelle. I et kalorimeter forutsettes forbrenningen å være fullstendig, noe som normalt ikke er tilfellet i virkelige branner (Liebe, 1998, s. 76).

Man kan multiplisere en reduksjonsfaktor med netto brennverdi for å ta høyde for at resultatene for brennverdi er hentet fra tester utført i kalorimeter og ikke kan identifiseres nøyaktig med hva som vil være tilfelle i virkeligheten. Denne faktoren er ikke medtatt i beregning av brannenergi i NS-EN 1991-1-2. Valget om å neglisjere faktoren i beregning av brannenergi er nok en konsekvens av vanskelighetene med å bestemme en slik verdi (Maslak, 2016). Konsekvensen av å neglisjere faktoren fører imidlertid til konservative verdier da resultatene blir et overestimat.

Netto brennverdi er som nevnt i kapittel 3.4.2 også avhengig av fuktighetsinnholdet i materialet (Thrane, 1981, s. 25). Konsekvensen av dette er at situasjoner med lavt fuktinnhold i materialene kan forårsake økt brannutvikling sammenlignet med materialer med mye fuktighet. Dette da mindre varme trengs til å varme opp og fordampe fukten. Det er *ikke* blitt gjort en vurdering av fuktinnholdet i materialene ved beregninger i denne oppgaven.

Ved kartlegging av flerbrukshallene som ble utført våren 2018 av Berger (2018) er verdiene for netto brennverdi basert på følgende kilder: NS-EN 1991-1-2 (2002), Drysdale (2011, s. 4), Khan *et al.* (2016), Walters *et al.* (2000, s. 247), Thomas (1986, s. 103) og Zalok (2011).

For å verifisere disse verdiene som ble benyttet av Berger (2018) er alle verdiene som ble innhentet kontrollert ved å undersøke de oppgitte kildene. I tillegg er følgende kilder undersøkt: Babrauskas (1995, s. 210-217) og Lechner (2006, s. 477-522).

Tabell 8 gir en oversikt over minimums-, gjennomsnitts- og maksimumsverdiene som er identifisert i den undersøkte litteraturen. Disse verdiene er hentet fra Vedlegg A. I

beregningene er gjennomsnittsverdiene for netto brennverdi benyttet. Den gjennomsnittlige netto brennverdien benyttet for cellulosebaserte materialer er en forenkling. Dette innebærer at det ikke skilles mellom brennverdien til ulike typer trevirke og andre cellulosebaserte materialer. Dette er en forenkling som naturligvis fører med seg usikkerhet til resultatet, men er ansett som tilstrekkelig på den sikre siden. For plastikkmaterialer blir det som nevnt skillet mellom objekter av hard plast, myk plast og skumprodukter. Brennverdiene er beregnet fra verdier innhentet for typiske plastmaterialer innenfor de ulike kategoriene. Dette er også en forenkling, men er ansett som nødvendig for å kunne ta høyde for de ulike forbrennings-egenskapene til ulike typer plastikk.

Tabell 8: Minimums-, gjennomsnitts- og maksimumsverdier for netto brennverdi til de ulike materialer hentet fra Vedlegg A

<b>Materiale</b>	<b>Minimum MJ/kg</b>	<b>Gjennomsnitt MJ/kg</b>	<b>Maksimum MJ/kg</b>
Cellulosebaserte materialer	13,0	18,6	20,0
Tekstiler	15,6	25,4	33,1
Skumprodukter	22,0	25,6	28,0
Myk plast	16,0	19,9	23,22
Hard plast	39,2	42,4	46,5

## 4.9 Faktorer og verdier brukt i beregningene

### 4.9.1 Beskyttet brannenergi i bygningskonstruksjonen

Som beskrevet i kapittel 3.4.4 benyttes beskyttelsesfaktoren ( $\psi$ ) for vurdering av brannenergi som er beskyttet. Deler av det brennbare materialet i en branncelle er ofte beskyttet slik at det ikke blir eksponert for brannen før langt ut i brannforløpet. Dette er eksempelvis hvor brennbart materiale er beskyttet av platekledninger eller bygd inne i konstruksjonen, eller hvor deler av den variable brannenergien er innelåst i arkivskap eller lignende rom som er konstruert for å tåle brannekspansjonen. Beskyttelsesfaktoren tar derfor hensyn til at deler av materialet ikke vil avgi brannenergi, da det er beskyttet mot antennelse og med stor sannsynlighet ikke vil delta i forbrenningen. Det er beskrevet i NS-EN 1991-1-2 at beskyttelsesfaktoren er en valgfri faktor.

Vurderinger knyttet til verdier brukt for beskyttelsesfaktoren i beregningene av brannenergien vil kunne ha store innvirkninger på resultatet. Denne faktoren er i beregningene av karakteristiske verdier for brannenergi i flerbrukshaller i Trondheim-området gjennomført av Berger (2018) satt lik 1 i alle tilfeller. Dette er et konservativt valg, ettersom dette innebærer at det ikke tas hensyn til en eventuell redusering av brannenergien ved beskyttelse.

I beregningene utført i denne oppgaven er bidraget fra beskyttede deler av bygningskonstruksjonen medtatt med 10 % dersom beskyttelsen har vært bestående av to lag gips. Der beskyttelsen kun har vært ett lag med gips er bidraget medtatt med 20 %. Denne vurderingen er gjort med bakgrunn i beregningseksempelet i Byggforskbladet 321.051 *Brannenergi i bygninger, beregninger og statistiske verdier*. For å vurdere valget ble metoden for å beregne omtrentlig branntid presentert i det utgåtte Byggforskbladet 520.333 – *Brannbelastning i bygninger. Beregninger og statistiske verdier* (utgått 2009) undersøkt. Det var i hovedsak tre

av flerbrukshallene som hadde beskyttet brannenergi i bygningskonstruksjonen. De omtrentlige branntidene for disse flerbrukshallene beregnet ved formel (5) ble følgende:

- Grefsen flerbrukshall:  $t=15,7$  min
- Brynseng flerbrukshall:  $t= 16,2$  min
- Teglverket flerbrukshall:  $t= 18,5$  min

Det ble videre dermed anslått at det var tilstrekkelig konservativt å benytte valgene for beskyttelse som beskrevet over. Ved beregning av den variable brannenergien ble imidlertid beskyttelsesfaktoren satt lik 1 i alle tilfeller, og det ble antatt at alle brennbare elementer vil forbrenne. Dette er med bakgrunn i at man ikke med full sikkerhet kan anta at eventuelle skap er lukket ved brann. Denne forenklingen medfører en høyere brannenergi enn hva som ville vært tilfelle dersom faktoren ble vurdert i hvert enkelt tilfelle og er dermed et konservativt valg.

#### **4.9.2 Faktor for brannaktiveringsrisiko**

Den karakteristiske spesifikke brannenergien multipliseres med faktorene  $\delta_{q1}$  og  $\delta_{q2}$  som tar høyde for den ulike risikoen for brann basert på henholdsvis branncellens areal og den tilhørende risikoen for brann knyttet til bruken av bygningen.

Faktoren  $\delta_{q1}$  tar høyde for brannaktiveringsrisikoen som er relatert til arealet av branncellen. Jo større gulvareal i branncellen, jo større er den tilhørende risikofaktoren. Verdiene for faktoren er gitt i logaritmisk skala, og verdiene brukt i beregningene i denne oppgaven er funnet ved bruk av logaritmisk interpolering av verdiene gitt i Tabell 3, som er hentet fra NS-EN 1991-1-2 Tillegg E.

Faktoren  $\delta_{q2}$  tar høyde for at ulik bruk av bygninger medfører en ulik risiko for brannaktivering. Det er naturligvis større risiko for brannaktivering i en fabrikk som produserer fyrverkeri enn i et byggverk som benyttes som kunstgalleri (Schleich, 2005b, s. III-22). Eurokode 1 del 1-2 klassifiserer i fem ulike bygningstypekategorier og oppgir en tilhørende verdi for faren for brannaktivering. Verdiene hentet fra Eurokode 1 del 1-2 er gitt i Tabell 4. Kategoriseringen av bruksgruppene er følgende:

- Kategori 1: Kunstgalleri, museum og svømmebasseng
- Kategori 2: Kontor, bolig, hotell og papirindustri
- Kategori 3: Fabrikk for maskiner og motorer
- Kategori 4: Kjemisk laboratorium, maleverksted
- Kategori 5: Fabrikk for fyrverkeri eller maling

Bygningstypen flerbrukshall er ikke en av de oppgitte bygningstypene i Eurokoden. Det er derfor nødvendig å gjøre en vurdering for fastsettelse av faktoren. Denne faktoren ble for beregningen utført av Berger (2018) satt til å være 0,78, likt som for bygningstypene kunstgalleri, museum og svømmehall.

I beregningene i denne oppgaven blir faktoren satt til å være 0,89. Dette er middelveien mellom kategori 1 og kategori 2. Med bakgrunn i flerbruken av byggverkene er dette ansett som en hensiktsmessig verdi for faktoren. Flere av de kartlagte byggverkene huser en rekke aktiviteter som ikke sammenfaller med bruken av kunstgalleri, museum og svømmebasseng.

Som navnet *flerbrukshall* tilsier er byggverkene tenkt å benyttes til en rekke ulike aktiviteter, herunder alt fra konserter, loppemarked, midlertidig overnattingslokale og lignende. Rom som kjøkken og kontorer er i utstrakt grad en del av branncellene som er blitt kartlagt i denne oppgaven. Sensitiviteten til resultatet for ulike verdier for faktoren er vurdert ved Monte Carlo-simuleringen som er gjennomført (se kapittel 5.3.4 nedenfor).

## 4.10 Observasjoner i forbindelse med kartleggingene

### 4.10.1 Generelt

En idrettshall betraktes ofte som en stor, tom spilleflate, med tilhørende garderobeanlegg og et par lagerrom. Disse lagerrommene er i utgangspunktet tiltenkt for lagring av tradisjonelt idrettsteknisk utstyr som baller, springbrett, innebandykøller, matter og lignende slik som illustrert i Figur 7.



Figur 7: Oversiktsbilde over lagerrom, Voksen og Grefsen flerbrukshall

I forbindelse med kartleggingene er det imidlertid blitt gjort en rekke observasjoner av lagring og bruk som fraviker fra det tradisjonelle idrettstekniske utstyret. Dette er eksempelvis lagring av store gummidekk, trepaller og store mengder dokumenter og papirer. En flerbrukshall har mange ulike brukere og rommer mange ulike aktiviteter. Eierne av byggverkene har ofte liten kontroll på den daglige bruken og lagring av objekter utenfor det som er tiltenkt. Det vil i det følgende bli presentert noen av observasjonene som er gjort, og som har hatt betydelige bidrag på brannenergien som er beregnet.

### 4.10.2 Alternativ bruk av ulike rom

Det var i flere av flerbrukshallene en rekke rom som var planlagt brukt som kontor, møterom og lignende på plantegningene. Flere av disse rommene ble imidlertid i utstrakt grad brukt til diverse lagerrom. En slik bruksendring vil naturligvis medføre en økning i brennbart materiale i rommet og dermed et større bidrag til den variable brannenergien. Disse rommene hadde møblering tilsvarende kontorrom, men i tillegg tettpakket lagring av elementer som permer, tekstiler og utstyr. Eksempel på slik endret bruk av kontorrom er illustrert i Figur 8.



Figur 8: Kontor brukt som lagerrom, Apalløkka og Teghverket

#### 4.10.3 Lagring av utstyr til innebandy

Flerbrukshallene har ulikt idrettsteknisk utstyr avhengig av hvilke idretter som byggverket brukes til. Lagerrommene er i utstrakt grad delt inn i lagerrom for skole, og egne lagerrom/skap som tilhører idrettslagene som disponerer hallene på kveldstid og i helgene. Idrettsutstyret som var å finne i skolenes lagerrom var i stor grad likt i de ulike hallene. Innholdet i lagerrom og skap disponert av ulike idrettslag varierte imidlertid mer. Eksempelvis ble en rekke av flerbrukshallene som er kartlagt i den oppgaven brukt av idrettslag som drev med innebandy. Ved omgjøring av spilleflaten tilpasset for innebandy avgrenses ofte flaten ved bruk av skilledeler, lik slike som er illustrert i Figur 9. Dette er tunge elementer av plastikk. Lagring av slike elementer bidrar med mye brannenergi.



Figur 9: Skilledeler til innebandy, Grefsen og Årvoll

#### 4.10.4 Lagring av mengder med toalett- og tørkepapir

I flere av de kartlagte hallene ble det observert store mengder med artikler til garderobes og toalettrom. Dette innebar kasser pakket med toalettpapir og tørkepapir. Disse artiklene er blitt observert lagret i områder som korridorer og under trapper. Dette utgjør dermed naturligvis en fare for rømmingssikkerheten. Dersom det blir initiert en brann vil tilgangen på brennbart materiale i disse områdene medføre at rømningsveiene ikke er mulige å bruke på grunn av flammer og røyk. Slik lagring er illustrert i Figur 10.



Figur 10: Lagring av toalettartikler i korridor på Teglverket og under trapp på Årvoll

Lagring av slike artikler er også blitt observert stablet på kontorrom, renholdsrom og over diverse skap i ulike lagerrom. Det er naturligvis en ulempe å bestille inn så mye av slike artikler at det må lagres på alle tilgjengelige areal. Slik lagring kan medføre en fare for brann sikkerheten.

Alle byggverkene som er kartlagt i denne oppgaven blir brukt av skoleelever på dagtid. Dersom områder/rom med mye brennbare elementer ikke holdes låst, kan dette utgjøre en fare for antenning og lignende. Det vil derfor være hensiktsmessig å unngå store mengder brennbare materialer i rømningsveier, oppholdsområder og korridorer. Videre er det viktig at områder med brennbart materiale hvor antenning vil kunne skje uten at det blir oppdaget holdes låst for elevene.

#### 4.10.5 Elektroniske komponenter

Det ble i flere av flerbrukshallene observert lagring av brennbart materiale tett på elektronisk utstyr som var i bruk eller koblet til lagring. Elektronisk utstyr tilkoblet strøm er en potensiell kilde til brann, ved brennbare elementer tett på vil dette kunne medføre uheldige konsekvenser dersom en brann blir initiert. Brannen vil da ha tilgang på mye brennbart materiale fort, og brannene vil kunne utvikle seg raskt og involvere andre brennbare materialer i rommet. Slik lagring av brennbare elementer er illustrert i Figur 11.



Figur 11: Elektroniske komponenter tett på lagring av brennbart materiale, Årvoll



I flere av hallene var kjøkken en del av rommene i spilleflatens branncelle. Kjøkkenet inneholder en rekke elektroniske komponenter som kjøleskap, komfyr, oppvaskmaskin og lignende. Slike elementer er også en potensiell kilde til initiering av en brann.

#### **4.11 Forenklinger og antagelser**

Det er i forbindelse med beregningene av brannenergi vært nødvendig å gjøre en rekke forenklinger og antagelser. Forenklingene og antagelsene gjort er som følger:

- Det er gjort en forenkling som innebærer at alle de brennbare elementene i branncellen vil være involvert i brannen, og det er benyttet en forbrenningsfaktor ( $m$ ) lik 1 på alle materialene utenom de cellulosebaserte materialene hvor forbrenningsfaktoren er satt lik 0,8 i henhold til NS-EN 1991-1-2.
- Alle cellulosebaserte materialer er blitt tildelt lik brennverdi og det er ikke skilt mellom ulike trematerialer. Ved vurdering av tetthet til ulike trematerialer er inndelingen forenklet til å skille mellom treslag som vanligvis benyttes i bygningskonstruksjonen, og treslag vanligvis benyttet i inventar og utstyr.
- Brennverdien til materialene er forenklet til å være konstant gjennom hele brannen.
- Alle plastmaterialene identifisert i branncellen er kun blitt kategorisert som skumprodukter, myk plast eller hard plast.
- Beregningene er basert på en antagelse om at overtenning vil inntreffe.
- Beskyttelsesfaktoren er ved beregning av variabel brannenergi blitt satt lik 1 i alle tilfeller. Ved beregning av permanent brannenergi beskyttet av platekledninger av gips er bidraget medtatt med 10 % ved beskyttelse av to gipsplater, og 20 % ved beskyttelse av en gipsplate.

#### **4.12 Monte Carlo-simulering**

##### **4.12.1 Generelt**

En rekke av input-variablene brukt i beregning av brannenergi er usikre variabler. Det er gjennomført en Monte Carlo-simulering for å vurdere hvordan usikkerheten i variablene påvirker resultatet. En Monte Carlo-simulering er et nyttig verktøy for å undersøke hvilke av de usikre variablene som har henholdsvis størst og minst innvirkning på resultatet og for å identifisere viktige kilder til usikkerhet. Simuleringen genererer tusenvis av scenarier for hver av de usikre input-verdiene og tildeler videre de ulike resultatene som inntreffer en sannsynlighet (Palisade, u.å-b).

Programvaren @Risk er benyttet for å gjennomføre Monte Carlo-simuleringen. Programmet fungerer som en tilleggsfunksjon i Excel (Palisade, u.å-a). De gjennomførte simuleringene hadde 10000 iterasjoner. For hver iterasjon trekkes tilfeldige verdier ut fra hver av sannsynlighetsfordelingene til de usikre variablene og benyttes i beregningene av resultatet. Det er benyttet en prøveversjon av programvaren, ettersom NTNU har ikke lisens på programvaren – og en lisens ville kostet ca. 30 000 kroner. Konsekvensen ved bruk av en slik prøveversjon er imidlertid at alle grafer og figurer hentet ut fra simuleringen er markert med en «@Risk Trial-version» midt på figurene. I Vedlegg E er det gitt en oversikt over slike grafer hentet fra simuleringen fra Bjørnsletta flerbrukshall. For de resterende hallene er

grafene av plasshensyn ikke medtatt i vedlegget, men kvalitative og kvantitative resultater hentet fra analysen er gitt i resultatkapittelet (se kapittel 5.3).

#### 4.12.2 Fordelingsfunksjoner til de usikre variablene

For å kunne gjennomføre Monte Carlo-simuleringen må de usikre variablene tildeles en fordelingsfunksjon som representerer den tilhørende usikkerhet. For å finne fordelingsfunksjoner til variablene brukt i denne oppgaven er programvaren *EasyFit* benyttet. Dette er en programvare som finner de statistiske fordelingsfunksjonene som passer best til de respektive datasettene (Beshore, u.å.).

De innsamlede verdiene gitt i Vedlegg A og Vedlegg B for henholdsvis materialenes brennverdier og densiteter er plottet inn i programmet. For små datasett som var bestående av fem eller færre verdier har kun gjennomsnittsverdiene blitt benyttet, da dette ikke er nok data til å tildele en passende fordelingsfunksjon med EasyFit. For de kartlagte verdiene for masse- og volumenheter er det anslått at resultatene innhentet fra kartlegging er tilknyttet en usikkerhet på  $\pm 5\%$ .

Det er i Tabell 9 gitt en oversikt over fordelingsfunksjonen til variablene. I Vedlegg D presenteres datasettene som histogram og tilpasningen til fordelingsfunksjon illustreres. Disse figurene er hentet fra EasyFit. Fordelingsfunksjonene som ble benyttet var i hovedsak uniformfordelinger, med unntak av én triangulærfordeling og to PERT-fordelinger.

En uniform fordelingsfunksjon tildeler alle verdiene lik sannsynlighet for å inntreffe (Hall og Joglar, 2016, s. 2834). En triangulær fordelingsfunksjon baserer seg på minimums- og maksimumsverdiene og verdien som er mest sannsynlig å forekomme. En PERT-fordeling benytter de samme parameterne som en triangulær fordeling, men her er verdiene mellom mest sannsynlig verdi og ekstremverdier mer sannsynlig å inntreffe (Palisade, u.å-b).

Tabell 9: Oversikt over fordelingsfunksjonene brukt for de usikre variablene i Monte Carlo-simuleringen

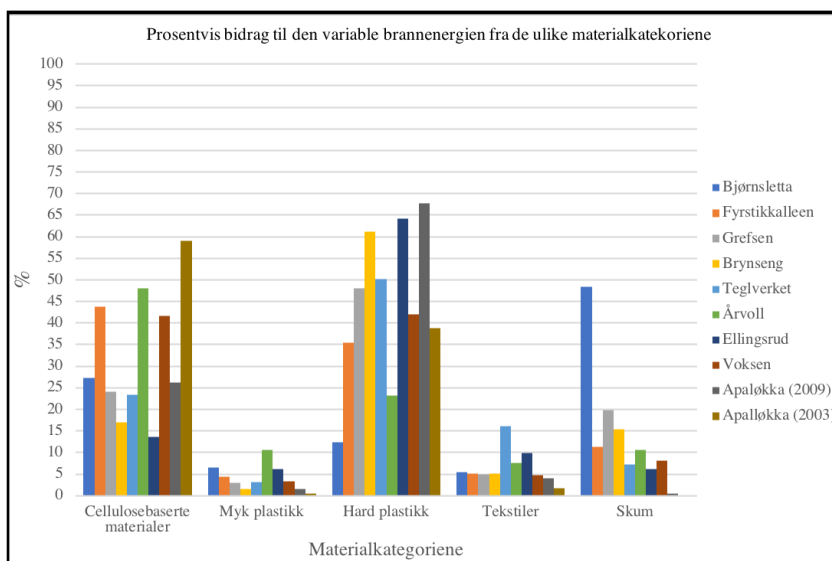
Usikker variabel i beregningen av brannenergi	Tilhørende fordelingsfunksjon brukt i Monte Carlo-simuleringen	Antall verdier i datasettet
Densitet til trevirke brukt i bygningskonstruksjonen	PERT-fordeling	7
Densitet til trevirke brukt i inventar og utstyr	Triangulær-fordeling	13
Densitet til polyuretan brukt i sportsgulv	Uniform-fordeling	6
Netto brennverdi til cellulosebaserte materialer	PERT-fordeling	20
Netto brennverdi til myk plast	Uniform-fordeling	12
Netto brennverdi til hard plast	Uniform-fordeling	21
Netto brennverdi til tekstiler	Uniform-fordeling	31
Netto brennverdi til skumprodukter	Uniform-fordeling	11

## 5 Beregningsresultater

I dette kapitlet blir resultatene som er beregnet for brannenergien i de kartlagte flerbrukshallene presentert. Først vil det bli gitt en oversikt over bidraget til den variable, den permanente og den dimensjonerende spesifikke brannenergien fra de ulike materialkategoriene. Videre presenteres karakteristiske verdier for brannenergien, deretter presenteres resultatene fra sensitivitetsanalysen. Avslutningsvis i dette kapitlet vil det bli gitt en oversikt over resultatene for spesifikk variabel brannenergi per gulvareal ved å benytte Gumbel-fordelingen, og den dimensjonerende spesifikke brannenergien per omhyllingsflate ved en log-normalfordeling.

### 5.1 Bidraget fra de ulike materialkategoriene

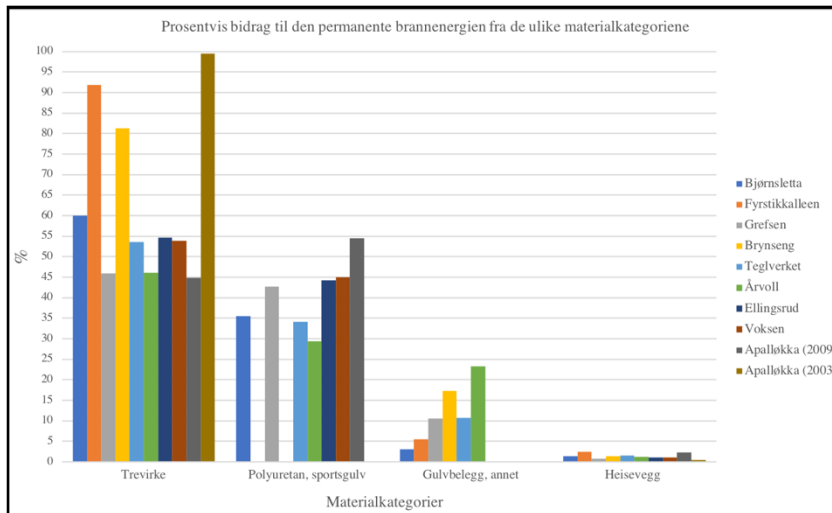
Ved kartlegging av brannenergi er som nevnt følgende materialkategorier blitt benyttet: cellulosebaserte materialer, myk plastikk, hard plastikk, tekstiler og skumprodukter. Figur 12 illustrerer det prosentvise bidraget fra de ulike materialkategoriene til den variable brannenergien i alle de kartlagte hallene. Slik figuren viser er det materialer av hard plastikk og cellulosebaserte materialer som gir størst bidrag til den variable brannenergien. De fleste brennbare variable elementene var å finne i lagerrom og andre tilhørende rom til spilleflaten. Cellulosebaserte materialer som gav stort bidrag var typisk tunge benker av tre i hallene, møbler i de ulike rommene og store skap av tre som brukes til oppbevaring i lagerrommene. Banedelere som illustrert i Figur 9 utgjorde et stort bidrag til materialene av hard plast. Mye av det idrettstekniske utstyret og diverse kasser som utstyret lagres i var også laget av hard plastikk.



Figur 12: Prosentvis bidrag til den variable brannenergien fra de ulike materialkategoriene

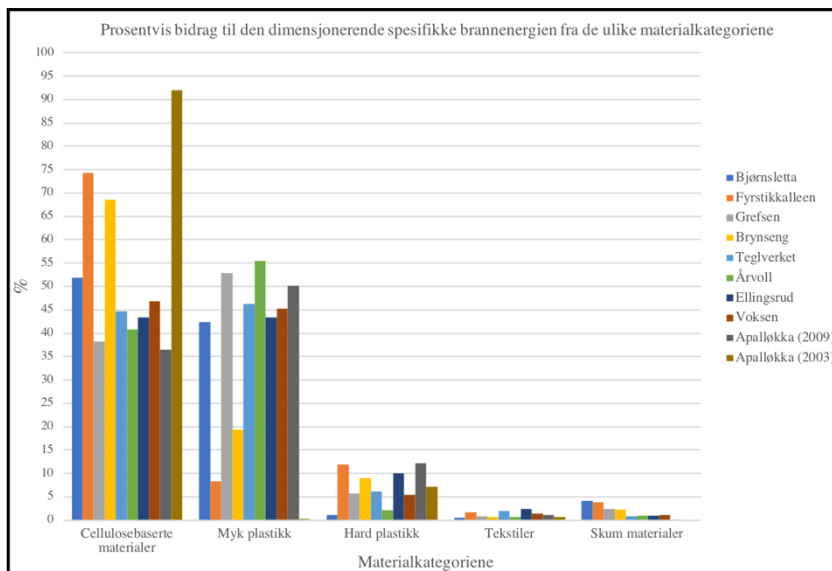
Bidraget til den permanente brannenergien er i Figur 13 inndelt i følgende kategorier: trevirke, polyuretan i sportsgulv, gulvbelegg i omliggende rom og heisevegger. Dette er gjort for å illustrere det prosentvise bidraget fra de ulike komponentene i hallene. Sistnevnte innebærer dermed både PVC og stormasket nylonnett i heiseveggen. Slik figuren viser er det bidraget fra trevirke og sportsgulv av polyuretan som er størst. Det var syv av ti haller som

hadde sportsgulv av polyuretan, mens de resterende haller hadde en gulvkonstruksjon med parkett som topplag.



Figur 13: Prosentvis bidrag til den permanente brannenergien fra de ulike materialkategoriene

Figur 14 gir en oversikt over det prosentvise bidraget fra de ulike materialkategoriene til den dimensjonerende spesifikke brannenergien. Verdiene for cellulosebaserte materialer er her multiplisert med forbrenningsfaktoren  $m = 0,8$ . Som figuren illustrerer er det cellulosebaserte materialer og materialer av myk plastikk (i hovedsak fra sportsgulvet) som bidrar med det største bidraget til den dimensjonerende spesifikke brannenergien.



Figur 14: Prosentvis bidrag fra de ulike materialene til den dimensjonerende spesifikke brannenergien

## 5.2 Karakteristiske verdier for brannenergien

I Tabell 10 er det gitt en oversikt over resultatene beregnet for variabel brannenergi per gulvareal, permanent brannenergi per gulvareal, spesifikk brannenergi ( $q_{f,k}$ ) per gulvareal og den dimensjonerende spesifikke brannenergien for de ti kartlagte flerbrukshallene. Den dimensjonerende spesifikke brannenergien er oppgitt med henholdsvis gulvareal ( $q_{f,d}$ ) og

omhyllingsflate ( $q_{t,d}$ ) som arealenhet. Tabellen gir også en oversikt over verdiene for brannaktiveringsfaktorene ( $\delta_{q2}$ ) basert på branncellens størrelse som er benyttet i beregningene.

Tabell 10: Spesifikk variabel, spesifikk permanent og spesifikk total brannenergien per gulvareal, brannaktiveringsfaktoren  $\delta_{q2}$  og dimensjonerende spesifikk brannenergi per henholdsvis gulvareal og omhyllingsflate i de ti hallene

Flerbrukshall	Variabel	Permanent	$q_{f,k}^{1)}$ (MJ/m <sup>2</sup> )	$\delta_{q2}$	$q_{f,d}^{2)}$ (MJ/m <sup>2</sup> )	$q_{t,d}^{3)}$ (MJ/m <sup>2</sup> )
	brannenergi per gulvareal (MJ/m <sup>2</sup> )	brannenergi per gulvareal (MJ/m <sup>2</sup> )				
Bjørnsletta	28,68	345,41	374,09	1,728	509,28	226,40
Fyrstikkallen	51,92	131,90	183,82	1,848	254,93	103,75
Grefsen	49,88	408,78	458,66	1,794	668,53	273,12
Brynseng	50,76	350,10	400,86	1,749	532,51	187,14
Teglverket	58,81	473,51	532,32	1,813	772,57	221,45
Årvoll	27,06	304,20	331,26	1,894	506,78	237,74
Ellingsrud	56,25	344,15	400,40	1,801	578,93	181,73
Voksen	44,05	339,25	338,30	1,801	548,37	172,13
Apalløkka (2009)	72,15	363,89	436,04	1,799	639,87	247,04
Apalløkka (2003)	33,08	190,61	223,69	1,874	303,72	131,77

<sup>1)</sup>  $q_{f,k}$  er karakteristisk spesifikk brannenergi med gulvareal som arealenhet

<sup>2)</sup>  $q_{f,d}$  er dimensjonerende spesifikk brannenergi med gulvareal som arealenhet

<sup>3)</sup>  $q_{t,d}$  er dimensjonerende spesifikk brannenergi med omhyllingsflate som arealenhet

Slik tabellen viser er det bidraget fra den permanente bygningskonstruksjonen og fastmonterte elementer som har hatt størst bidrag til den totale brannenergien, og dermed størst påvirkning på den dimensjonerende spesifikke brannenergien.

De tre flerbrukshallene med trevirke i vegg konstruksjonen – Grefsen, Brynseng og Teglverket – er blant de fire hallene med størst spesifikk permanent brannenergi per gulvareal. Apalløkka (2009) er også blant disse fire med høyest spesifikk permanent brannenergi per gulvareal. Dette er en konsekvens av at hallen inneholder en tribune av trevirke.

Voksen og Ellingsrud har som tabellen viser nesten identisk permanent brannenergi. Dette skyldes identiske bygningskonstruksjoner. Den eneste forskjellen var at Ellingsrud hadde en platekledning på utsiden av spilekledningen på to av kortsidene i hallen, som ikke Voksen flerbrukshall hadde. Verdiene for den spesifikke *variable* brannenergien er imidlertid ikke identisk. Slik tabellen viser har Ellingsrud en høyere spesifikk variabel brannenergi enn Voksen. Dette skyldes ulik lagring i hallene.

## 5.3 Sensitivitet

### 5.3.1 Generelt

Som nevnt er en rekke av verdiene som benyttes for å beregne brannenergi usikre variabler. Det er blitt benyttet gjennomsnittsverdier i beregningen av resultatene gitt i Tabell 10. For å undersøke sensitiviteten til resultatet – og for å identifisere hvilke av de usikre variablene som har størst innvirkning – er det gjennomført en Monte Carlo-simulering. Simuleringen er gjennomført for beregningene av den variable brannenergien per gulvareal, den permanente brannenergien per gulvareal og den dimensjonerende spesifikke brannenergien per gulvareal for alle de ti hallene.

### 5.3.2 Variabel brannenergi

I beregningen av den variable brannenergien er materialenes nettobrennverdi ( $H_{ui}$ ), materialenes densitet og de kartlagte massene usikre input-variabler. Tabell 11 gir en oversikt over hvilke variabler hentet fra analysen som har størst innvirkning på beregningsresultatene for den variable brannenergien. Faktorene i kolonne 1 har størst innvirkning, og i kolonne 3 mindre. Forkortelsene for materialkategoriene er som følger: cellulosebaserte materialer (T), myke plastikkmaterialer (MP), harde plastikkmaterialer (HP), tekstiler (TE) og skumprodukter (S).

Tabell 11: Faktorer som har størst innvirkning på den variable brannenergien per gulvareal fra Monte Carlo-simuleringen

Flerbrukshall	Faktorer med størst innvirkning på resultatet		
	1.	2.	3.
Bjørnsletta	$H_{ui}$ S	$H_{ui}$ T	$H_{ui}$ TE
Fyrstikkalleen	$H_{ui}$ T	Densitet T	$H_{ui}$ HP
Grefsen	$H_{ui}$ HP	$H_{ui}$ T	$H_{ui}$ S
Brynseng	$H_{ui}$ HP	$H_{ui}$ T	Masse HP
Teglverket	$H_{ui}$ TE	$H_{ui}$ HP	$H_{ui}$ T
Årvoll	$H_{ui}$ T	Densitet T	$H_{ui}$ TE
Ellingsrud	$H_{ui}$ HP	$H_{ui}$ TE	Masse HP
Voksen	$H_{ui}$ T	$H_{ui}$ HP	Densitet T
Apalløkka (2009)	$H_{ui}$ HP	$H_{ui}$ T	Masse HP
Apalløkka (2003)	$H_{ui}$ T	Densitet T	$H_{ui}$ HP

Slik Tabell 11 viser er netto brennverdi til hard plast den faktoren som har størst innvirkning på fire av de ti hallene. Videre har netto brennverdi til cellulosebaserte materialer størst innvirkning på fire av de andre ti hallene.

Tabell 12 gir en oversikt over statistiske verdier hentet ut fra Monte Carlo-simuleringen: minimums-, maksimums- og gjennomsnittsverdier, standardavvik og 95 %-fraktilen.

Tabell 12: Statistiske verdier for den variable brannenergien per gulvareal fra Monte Carlo-simuleringen

Flerbrukshall	Statistiske verdier				
	Min. (MJ/m <sup>2</sup> )	Maks (MJ/m <sup>2</sup> )	Gj.snitt (MJ/m <sup>2</sup> )	$\sigma$ (MJ/m <sup>2</sup> )	P95 (MJ/m <sup>2</sup> )
Bjørnsletta	23,93	31,65	28,04	1,23	30,07
Fyrstikkalleen	41,41	58,63	50,64	2,69	55,00
Grefsen	43,09	55,42	49,30	1,86	52,36
Brynseng	44,59	56,26	50,51	1,95	53,74
Teglverket	49,59	67,08	58,12	2,77	62,71
Årvoll	21,74	30,24	26,40	1,28	28,49
Ellingsrud	48,50	62,84	56,03	2,35	59,89
Voksen	37,12	49,12	43,27	1,91	46,39
Apalløkka (2009)	61,99	81,01	71,83	3,07	76,89
Apalløkka (2003)	24,30	39,28	32,06	2,30	35,76

Verdiene for den variable brannenergien per gulvareal gitt i Tabell 10 er beregnet ved bruk av gjennomsnittsverdier. Disse verdiene er for alle hallene høyere enn forventningsverdiene funnet ved Monte Carlo-simuleringen gitt i Tabell 12. Resultatene beregnet ved å benytte gjennomsnittsverdiene er derfor vurdert til å være på den trygge siden og det er disse resultatene som benyttes i den statistiske analysen.

### 5.3.3 Permanent brannenergi

De usikre variablene i beregningen av bidraget til brannenergien fra den permanente bygningskonstruksjonen og fastmonterte elementer er de samme som for beregningen av den variable brannenergien; netto brennverdier, materialdensiteter og kartlagte volum. Tabell 13 gir en oversikt over faktorene som er identifisert ved hjelp av Monte Carlo-simuleringen til å ha størst innvirkning på den permanente brannenergien per gulvareal. Slik tabellen viser er det netto brennverdi for cellulosebaserte materialer som har størst innvirkning i syv av ti haller. I de resterende tre hallene er det netto brennverdi til myk plastikk (i hovedsak fra sportsgulvet) som har størst innvirkning.

Tabell 13: Faktorer med størst innvirkning på den permanente brannenergien per gulvareal fra Monte Carlo-simuleringen

Flerbrukshall	Faktorer med størst innvirkning på resultatet			
	Permanent	1.	2.	3.
Bjørnsletta	H <sub>ui</sub> T	Densitet T	H <sub>ui</sub> MP	
Fyrstikkalleen	H <sub>ui</sub> T	Densitet T	Volum T	
Grefsen	H <sub>ui</sub> MP	H <sub>ui</sub> T	Densitet T	
Brynseng	H <sub>ui</sub> T	Densitet T	H <sub>ui</sub> MP	
Teglverket	H <sub>ui</sub> T	H <sub>ui</sub> MP	Densitet T	
Årvoll	H <sub>ui</sub> MP	H <sub>ui</sub> T	Densitet T	
Ellingsrud	H <sub>ui</sub> T	H <sub>ui</sub> MP	Densitet T	
Voksen	H <sub>ui</sub> T	H <sub>ui</sub> MP	Densitet T	
Apalløkka (2009)	H <sub>ui</sub> MP	H <sub>ui</sub> T	Densitet T	
Apalløkka (2003)	H <sub>ui</sub> T	Densitet T	Volum T	

De statistiske verdiene gitt i Tabell 14 er hentet fra analysen av den permanente brannenergien per gulvareal for alle hallene. Forventningsverdiene fra Monte Carlo-simuleringen er for alle hallene lavere enn de beregnede resultatene for den permanente brannenergien per gulvareal gitt i Tabell 10 beregnet ved bruk av gjennomsnittsverdiene. Med bakgrunn i dette benyttes resultatene gitt i Tabell 10 videre i oppgaven, da de anses å være på den trygge siden.

Tabell 14: Statistiske verdier for den permanente brannenergien per gulvareal fra Monte Carlo-simuleringen

Flerbrukshall	Statistiske verdier				
	Min. (MJ/m <sup>2</sup> )	Maks (MJ/m <sup>2</sup> )	Gj.snitt (MJ/m <sup>2</sup> )	$\sigma$ (MJ/m <sup>2</sup> )	P95 (MJ/m <sup>2</sup> )
Bjørnsletta	252,46	427,52	339,90	26,87	384,44
Fyrstikkalleen	85,48	167,49	128,32	12,78	149,31
Grefsen	306,63	506,93	402,22	31,03	453,72
Brynseng	242,85	438,96	346,50	31,41	397,13
Teglverket	344,39	585,83	464,75	35,77	523,51
Årvoll	229,82	369,67	297,06	22,37	333,99
Ellingsrud	256,25	427,52	339,80	26,76	383,62
Voksen	249,41	425,00	334,07	26,27	377,28
Apalløkka (2009)	267,11	458,16	360,42	28,65	408,08
Apalløkka (2003)	118,43	243,95	185,68	19,85	217,90

### 5.3.4 Dimensjonerende spesifikk brannenergi

Sensitiviteten i beregningen av den dimensjonerende spesifikke brannenergien per gulvareal er også undersøkt. Her er de usikre variablene netto brennverdier, materialdensiteter, kartlagte mengder samt brannaktiveringsfaktoren basert på bruk av branncellen. Slik Tabell 15 viser er det brennverdi for cellulosebaserte materialer og mykplast, brannaktiveringsfaktoren og densiteten til cellulosebaserte materialer som har størst innvirkning på resultatene.

Tabell 15: Faktorer som påvirker den dimensjonerende spesifikke brannenergien per gulvareal mest fra Monte Carlo-simuleringen

Flerbrukshall	Faktorer med størst innvirkning på resultatet		
	1.	2.	3.
Permanent			
Bjørnsletta	$\delta_{q2}$	$H_{ui}$ T	$H_{ui}$ MP
Fyrstikkalleen	$H_{ui}$ T	$\delta_{q2}$	Densitet T
Grefsen	$H_{ui}$ MP	$\delta_{q2}$	$H_{ui}$ T
Brynseng	$H_{ui}$ T	$\delta_{q2}$	Densitet T
Teglverket	$\delta_{q2}$	$H_{ui}$ MP	$H_{ui}$ T
Årvoll	$H_{ui}$ MP	$\delta_{q2}$	$H_{ui}$ T
Ellingsrud	$\delta_{q2}$	$H_{ui}$ MP	$H_{ui}$ T
Voksen	$\delta_{q2}$	$H_{ui}$ MP	$H_{ui}$ T
Apalløkka (2009)	$\delta_{q2}$	$H_{ui}$ MP	$H_{ui}$ T
Apalløkka (2003)	$H_{ui}$ T	Densitet T	$\delta_{q2}$



Tabell 16 gir en oversikt over de statistiske verdiene som er hentet fra analysen av den dimensjonerende spesifikke brannenergien per gulvareal. Forventningsverdiene som er funnet ved analysen er lavere for alle hallene enn verdiene beregnet ved bruk av variablenes gjennomsnittsverdi gitt i Tabell 10, og resultatene i Tabell 10 vurderes derfor til å ligge på den trygge siden.

Tabell 16: Statistiske verdier for dimensjonerende spesifikk brannenergi per gulvareal fra Monte Carlo-simuleringen

Flerbrukshall	Min. (MJ/m <sup>2</sup> )	Maks (MJ/m <sup>2</sup> )	Gj.snitt (MJ/m <sup>2</sup> )	$\sigma$ (MJ/m <sup>2</sup> )	P95 (MJ/m <sup>2</sup> )
Bjørnsletta	359,50	658,60	501,60	43,32	573,93
Fyrstikkalleen	185,52	325,12	248,38	20,77	283,56
Grefsen	489,95	861,79	658,89	55,39	752,08
Brynseng	376,84	707,97	526,76	46,54	604,80
Teglverket	551,49	1000,5	759,75	63,08	866,53
Årvoll	369,16	640,27	495,08	42,16	566,37
Ellingsrud	421,34	750,86	573,27	46,55	650,87
Voksen	401,08	710,46	542,12	44,91	618,72
Apalløkka (2009)	467,96	817,09	635,41	52,71	724,83
Apalløkka (2003)	198,86	391,79	295,63	30,27	346,20

## 5.4 Statistisk behandling

### 5.4.1 Generelt

Den statistiske behandlingen i denne oppgaven tar for seg verdiene beregnet for den spesifikke variable brannenergien per gulvareal. Verdiene som ble beregnet av Berger (2018) for de ti kartlagte flerbrukshallene i Trondheims-området er også medtatt i analysen. Dette medfører at datasettet for spesifikk variabel brannenergi per gulvareal for bygningstypen flerbrukshaller består av tyve verdier. Videre er det undersøkt hvilken fordelingsfunksjon som representerer datasettet med verdier for den dimensjonerende spesifikke brannenergien per omhyllingsflate beregnet for de tyve hallene.

For å undersøke hvor godt et utvalg fordelingsfunksjoner passer til det empiriske datasettet, gjennomfører programvaren EasyFit en *Kolmogorov-Smirnov-test* (Mathwawe, u.å.). En slik test kvantifiserer avstanden mellom datasettet og fordelingsfunksjonen man ser på, og oppgir en verdi for den største vertikale avstanden. Programmet rangerer så de ulike fordelingsfunksjonene avhengig av hvilken som passer best til det empiriske datasettet.

Programmet beregner også en P-verdi. P-verdien er sannsynligheten for det som observeres ved å anta at nullhypotesen er sann. I dette tilfellet er nullhypotesen at fordelingen følger en spesifisert fordelingsfunksjon (Mathwawe, u.å.). Det er vanlig å definere et signifikansnivå før man gjennomfører en slik test. Signifikansnivået er sannsynligheten man godtar for at det skal være en Type I-feil. En type I-feil innebærer at nullhypotesen forkastes, selv om den er sann (Hall og Joglar, 2016, s. 2861). Et mye brukt valg for signifikansnivå er 0,05 (Selle, 2018).

Det er ikke blitt definert signifikansnivå ved den statistiske behandlingen i denne oppgaven, og P-verdien benyttes kun for å vurdere hvor godt fordelingene passer til datasettet. P-verdien

beregnet for Gumbel-fordelingen ved Kolmogorov-Smirnov-test var lik 0,8484. Med slike høye verdier for P-verdien gir det ikke grunnlag for å skulle forkaste nullhypotesen om at datasettet følger en Gumbel-fordeling.

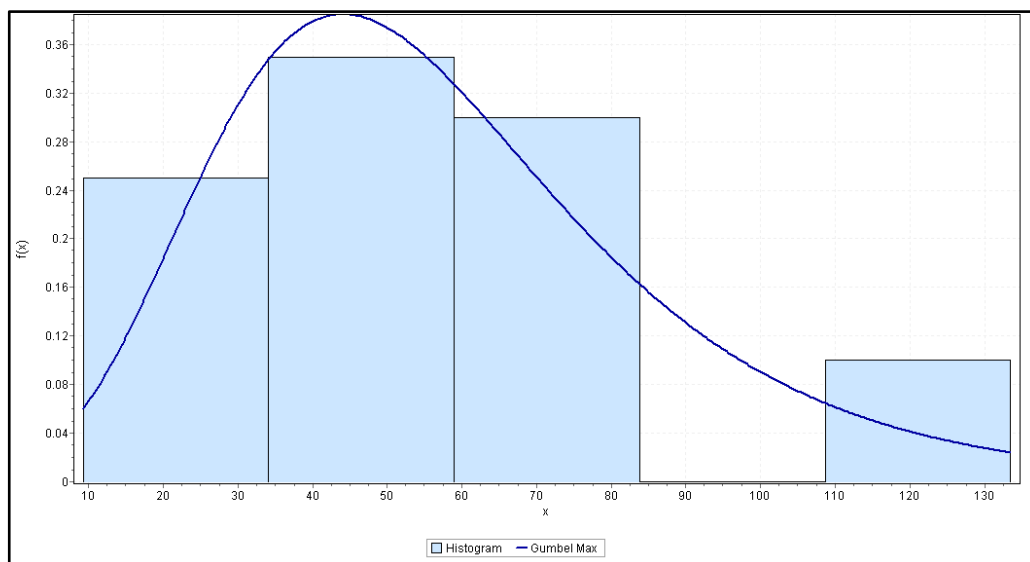
I denne oppgaven ble fordelingsfunksjonene som er identifisert brukt på brannenergi i litteraturen testet for datasettet. Dette innebærer: Log-normalfordeling, Gumbel-fordeling og normalfordeling. Tabell 17 gir en oversikt over største avstand mellom det empiriske datasettet og fordelingsfunksjonen, P-verdier og rangering av fordelingsfunksjonene ved en Kolmogorov-Smirnov-test gjennomført ved bruk av programmet EasyFit. Slik tabellen viser er det en log-normal (3P) fordeling som passer best til datasettet.

Tabell 17: Vertikale avstand mellom fordelingsfunksjon og datasettet, P-verdier og rangering hentet fra EasyFit

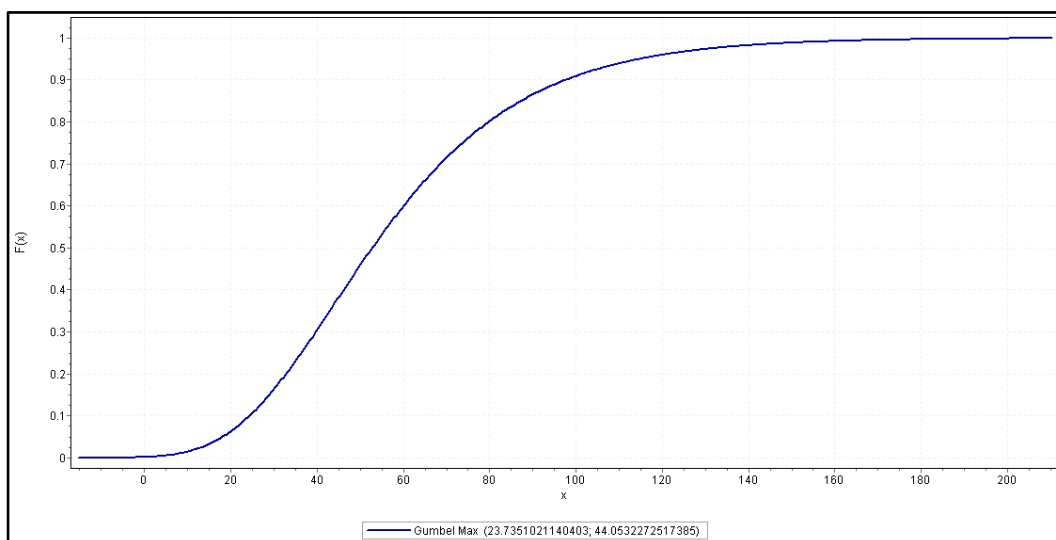
Forordelingsfunksjon	Største vertikale avstand mellom fordelingsfunksjonen og datasettet	P-verdi	Rangering
Log-normal (3P)	0,1202	0,9020	1
Gumbel	0,1295	0,8484	2
Normal	0,1679	0,5689	3
Log-normal	0,1751	0,5163	4

#### 5.4.2 Spesifikk variabel brannenergi og Gumbel-fordeling

Verdiene for den spesifikke variable brannenergien per gulvareal for andre bygningstyper er representert ved Gumbel-fordelingen i NS-EN 1991-1-2. En Gumbel-fordelingen blir dermed også brukt videre i denne oppgaven for å representere verdiene for den spesifikke variable brannenergien per gulvareal. Figur 15 viser datasettet for spesifikk variabel brannenergi per gulvareal presentert ved hjelp av et histogram sammen med Gumbel-fordelingen. Den kumulative fordelingsfunksjonen for datasettet er gitt i Figur 16.



Figur 15: Histogram for spesifikk variabel brannenergi per gulvareal og Gumbel-fordelingen



Figur 16: Kumulativ Gumbel-fordeling for variabel brannenergi per gulvareal i flerbrukshallene

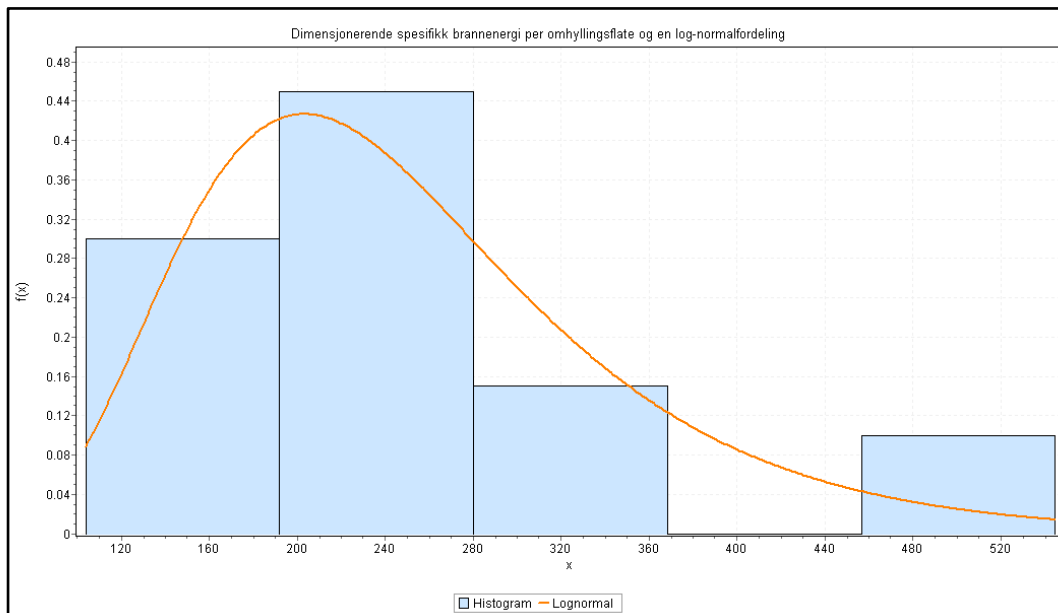
Tabell 18 gir en oversikt over statistiske verdier funnet for den spesifikke variable brannenergien per gulvareal ved bruk av Gumbel-fordelingen. Slik tabellen viser er 80 %-fraktilen for spesifikk variabel brannenergi per gulvareal for bygningstypen flerbrukshaller lik 79,65 MJ/m<sup>2</sup>.

Tabell 18: Beregningsresultat for den spesifikke variable brannenergien per gulvareal med Gumbel-fordeling

	Variabel brannenergi per gulvareal (MJ/m <sup>2</sup> )
Minimumsverdi	9,27
Maksimumsverdi	133,49
Gjennomsnittsverdi	57,75
Standardavvik	30,44
80 %-fraktil	79,65
Skalaparameteren ( $\sigma$ )	23,74
Lokasjonsparameteren ( $\mu$ )	44,05

### 5.4.3 Dimensjonerende spesifikk brannenergi og log-normalfordeling

Datasettet med dimensjonerende spesifikk brannenergi per omhyllingsflate for alle de kartlagte flerbrukshallene beregnet i denne oppgaven, og verdiene beregnet av Berger (2018) ble også plottet inn i EasyFit. Det var en log-normalfordeling som passet best til datasettet. Et histogram sammen med en log-normalfordeling er illustrert i Figur 17. Kolmogorov-smirnov-testen beregnet avstanden mellom datasettet og en log-normalfordeling til å være 0,097, og en tilhørende P-verdi lik 0,9816. Den dimensjonerende spesifikke brannenergien per omhyllingsflate gitt ved 80 %-fraktilen i en log-normalfordeling er lik 323,06 MJ/m<sup>2</sup>.



Figur 17: Dimensjonerende spesifikk brannenergi per omhyllingsflate for flerbrukshallene og en log-normalfordeling

## 6 Diskusjon

*I forbindelse med kartleggingene og beregningene av brannenergien for byggverkene gjennomført i denne oppgaven er det en rekke tilhørende usikkerhetsfaktorer, og det er blitt gjort antagelser som medfører usikkerhet i resultatene. Disse faktorene vil bli diskutert i det følgende. Videre diskuteres parameteren brannenergi ved brannteknisk prosjektering, verdiene oppgitt i regelverket for spesifikk variabel brannenergi i andre bygningstyper, den statistiske behandlingen av verdiene og variasjonen i brannenergi i to identiske byggverk.*

### 6.1 Usikkerheter i kartleggingen og beregningene

#### 6.1.1 Usikkerheter knyttet til den variable brannenergien

Identifiseringen av massene og dimensjonene til alle de variable elementene er gjort ved hjelp av enkelt utstyr; en husholdningsvekt, en baderomsvekt og et målebånd. Dette medfører naturligvis en usikkerhet til resultatet. Baderomsvekten som er benyttet oppgir massene i kilo med gradering på hundre gram. Massene blir dermed ikke så nøyaktige som for de mindre elementene som er målt på husholdningsvekten med verdier oppgitt i gram. Effekten denne unøyaktigheten har på det totale resultatet er anslått til å være liten, og måleutstyret vurdert til å være tilstrekkelig nøyaktig. Denne vurderingen er gjort med bakgrunn i at en negativ effekt av usikkerhetskilden er forsøkt kompensert ved å runde verdiene opp. Resultatet av registrerte masser er derfor ansett som konservativt.

Ved kartlegging av det idrettstekniske utstyret har det vært mange identiske elementer. Eksempelvis har det ofte vært 30-40 kjepler eller 100 baller. Ved kartlegging er ofte kun ett av objektene målt, og antallet av like elementer talt opp og registrert. En målefeil av massen vil dermed bli forstørret med den valgte metoden, da den multipliseres opp. En slik forenkling er imidlertid veldig nyttig for å redusere tiden som medgår i en kartlegging. Det er ikke ansett som hensiktsmessig å skulle veie eksempelvis 50 ulike innebandykøller og 100 ulike baller. For å illustrere størrelsesorden av denne forenklingen: I Fyrstikkalleen flerbrukshall ble det talt 1110 ulike variable elementer. Massen er imidlertid kun registrert for 190 ulike elementer ved å benytte forenklingen beskrevet ovenfor. Det er med andre ord langt færre elementer som faktisk er blitt veid i forhold til hvor mange elementer som finnes i hallen.

Alle kartleggingene er gjennomført av kun én person. Menneskelige feil er dermed også en aktuell usikkerhetsfaktor. Dette er knyttet til avlesningsfeil og mulige bias hos kartlegger, slik som antakelser og forenklinger som gjøres under selve kartleggingen. Konsekvensen av avlesningsfeil på resultatene er imidlertid ansett som liten, ettersom det er blitt gjort en vurdering av avleste verdier før disse er blitt registrert. Eventuelle menneskelige feil ved avlesingen er dermed blitt søkt kompensert gjennom å være bevisst på denne feilkilden. Bias hos kartlegger er lik for alle kartleggingene gjennomført i denne oppgaven, da de er utført av samme person. En eventuell bias anses dermed å være gjeldende for alle veiningene og kartleggingene gjennomført i denne oppgaven. Eventuelle bias ved gjennomføring og kartlegging i denne oppgaven er imidlertid sannsynligvis *ikke* like som for kartleggingene gjennomført av Berger (2018). Dette bringer med seg en feilkilde ved den statistiske behandlingen av de tilhørende datasettene, ettersom det ikke er blitt foretatt en vurdering av eventuelle biasers effekt når datasettene er blitt sammenstilt i analysen.

Som nevnt tidligere er en rekke av de brennbare elementene inhomogene. Det må dermed gjøres antagelser på andelen av de ulike materialkategoriene samt hvor store deler av massen som er brennbare materialer. Disse antagelsen har vært grove, men forsøkt gjort konservative slik at resultatene blir på den sikre siden.

Alle elementene har som nevnt blitt registrert innenfor kategoriene; cellulosebaserte materialer, myk plast, hardplast, tekstiler og skumprodukter. En slik forenkling generaliserer de ulike materialene og tar ikke høyde for individuelle forskjeller innenfor de ulike gruppene. Eksempelvis er kategoriseringen av plastikkmaterialer grov. Det finnes veldig mange forskjellige typer plastikk med ulike egenskaper, tilsetningsstoffer og materialer. Forenklingen som er gjort er imidlertid ansett som helt nødvendig for å få gjennomført kartleggingen, da det er svært vanskelig å identifisere de ulike plastikkmaterialene mer detaljert.

Det har på noen av kartleggingene vært enkelte skap som har vært utilgjengelige. Innholdet i slike låste skap er derfor ikke vært mulig å identifisere nøyaktig og mengdene bygger på antagelser. Disse antagelsene er imidlertid basert på erfaringer fra hva som finnes i lignende skap, samt at mange av skapene var mulig å se inn i slik som illustrert i Figur 18. Slike antagelser bringer naturligvis med seg usikkerhet knyttet til masser og materialkategoriene identifisert. Det er blitt forsøkt gjort konservative valg.



*Figur 18: Låste skap med gitter, Ellingsrud og Teglverket*

Konsekvensen av antagelsene gjort på inhomogene elementer og antagelsene som er blitt gjort i forbindelse med låste skap er de to usikkerhetskildene som antas å ha størst innvirkning på de registrerte massene. For å redusere usikkerheten knyttet til inhomogene elementer, kan slike elementer deles opp slik at man får nøyaktig masse på de brennbare delene. For å kunne ha fullstendig oversikt over innholdet i låste skap, kan en løsning være å besøke flerbruks-hallen flere ganger når de ulike brukerne av hallen med nødvendige nøkler er tilstede. Det vil imidlertid være mer tidkrevende, og nytten av slike tiltak må dermed vurderes opp mot den økte tiden som vil medgå. I denne oppgaven er det blitt ansett tilstrekkelig nøyaktig med de valgte forenklinger, og det er blitt gjort konservative valg for at resultatene skal være på den trygge siden.

### 6.1.2 Usikkerheter knyttet til den permanente brannenergien

Mengdene brennbare materialer i bygningskonstruksjonen er beregnet ut fra dokumentasjonen til byggverkene. Som nevnt har denne dokumentasjonen vært av varierende kvalitet og det har dermed vært nødvendig med antagelser og forenklinger. Bygningskonstruksjonen utgjør store volum av materialer, og antagelser medfører derfor store usikkerheter til resultatene av den dimensjonerende spesifikke brannenergien.

Et eksempel på en slik antagelse er tykkelsen på gulvbelegget på spilleflaten der slik informasjon har vært manglende. For å illustrere størrelsesordenen slike antagelser medbringer til resultatet, viser Tabell 19 et beregningseksempel med ulike antagelser for tykkelsen av sportsgulvet på en spilleflate av polyuretan med areal lik 1 012 m<sup>2</sup> og en omhyllingsflate på selve hallen lik 3 096 m<sup>2</sup>.

Tabell 19: Beregningseksempel, antagelser for tykkelse på sportsgulv

Antatt tykkelse på sportsgulv [mm]	Karakteristisk brannenergi fra sportsgulvet [MJ]	Spesifikk brannenergi fra sportsgulvet [MJ/m <sup>2</sup> gulvareal]	Spesifikk brannenergi fra sportsgulvet [MJ/m <sup>2</sup> omhyllingsflate]
9	268 589	265	87
10	298 433	295	96
12	358 119	354	116

Som eksempelet viser varierer bidraget fra gulvbelegget til den permanente brannenergien betraktelig avhengig av tykkelsen på belegget. Sportsgulvene på spilleflatene i hallene gir et betydelig bidrag til den permanente brannenergien da gulvkonstruksjonene er oppført i brennbare materialer og arealet på spilleflatene er store. Bedre dokumentasjon på oppbygging og detaljer om materialbruk ville redusert bruken av slike antagelser.

Beskyttelsesfaktoren for elementer av bygningskonstruksjonen er som nevnt vurdert til å bidra med 20 % dersom beskyttelsen er ett lag gips og 10 % dersom beskyttelsen er to lags gips. Det var i hovedsak tre av flerbrukshallene hvor en slik vurdering var nødvendig. For å illustrere konsekvensen vurderingen har på resultatene er verdiene for den spesifikke permanente brannenergien per gulvareal og per omhyllingsflate for Grefsen, Brynseng og Teglverket oppgitt i Tabell 20 både uten vurdering av beskyttelse og med vurdering av beskyttelse.

Tabell 20: Konsekvens på spesifikk permanent brannenergi per gulvareal ved vurdering av beskyttet brannenergi i konstruksjonen

Flerbrukshall	Spesifikk permanent brannenergi, med vurdering av beskyttelse per gulvareal (MJ/m <sup>2</sup> )	Spesifikk permanent brannenergi, uten vurdering av beskyttelse per gulvareal (MJ/m <sup>2</sup> )
Grefsen	408,78	509,63
Brynseng	350,10	495,23
Teglverket	473,51	675,52

Slik verdiene i tabellen viser er effekten på den spesifikke permanente brannenergien betydelig ved vurdering av beskyttelse. Universale retningslinjer for vurdering av beskyttet brannenergi er som nevnt manglende i litteraturen. Det blir derfor ofte gjort forenklinger og vurderinger ved de enkelte kartleggingene. For at resultatene fra kartlegginger av brannenergi skal være mulig å sammenligne er det nødvendig med slike universale retningslinjer. Valgene gjort for beskyttelse i denne oppgaven medfører at de beregnede verdiene for den dimensjonerende spesifikke brannenergien blir noe lavere enn verdiene beregnet av Berger (2018) som vurderte beskyttelsesfaktoren til å være lik 1 i alle tilfeller.

Det har blitt benyttet en tilhørende materialdensitet for trevirke i konstruksjonen som er basert på typiske treslag som benyttes i bygningskonstruksjonene. Dette er en forenkling, og dersom det har blitt benyttet andre treslag i eksempelvis parketten i hallen, er dette faktorer som forenklingen ikke fanger opp. Gjennom Monte Carlo-simuleringen ble det identifisert at densiteten til trevirke var en av de tre usikre variablene som påvirket resultatet for den permanente brannenergien mest i alle hallene. For at resultatene skal kunne bli enda mer nøyaktige vil det være nødvendig å skille mellom de ulike treslagene benyttet i konstruksjonen. Forenklingen er imidlertid blitt ansett som nødvendig i denne oppgaven da det er meget tidkrevende og vanskelig å skille mellom ulike typer treslag og tilhørende materialdensitet ved kartlegging. Et forsøk på å foreta et slikt skille ville dessuten i seg selv vært beheftet med usikkerheter, idet antagelsene knyttet til treslag ikke nødvendigvis ville vært korrekte. Effekten av denne forenklingen på resultatet er ikke blitt ytterligere undersøkt. Effekten antas imidlertid å være begrenset, med mindre det er blitt benyttet treslag med betydelig høyere densitet enn eksempelvis gran og furu som verdiene benyttet i beregningen av permanent brannenergi baserer seg på.

### **6.1.3 Konsekvensen på resultatet av forenklinger og antagelser gjort i beregningene**

I forbindelse med beregningene ble det gjort en rekke forenklinger og antagelser. Disse har naturligvis en innvirkning på resultatet og fører til at verdiene som er beregnet for brannenergi ikke nødvendigvis sammenfaller helt med det virkelige tilfellet. Slike forenklinger og antagelser er imidlertid nødvendige for å kunne gjennomføre en kartlegging og beregning av brannenergi.

Det ble gjort en forenkling om at alle elementene i branncellen vil gjennomgå en fullstendig forbrenning, med unntak av cellulosebaserte materialer som er multiplisert med en forbrenningsfaktor lik 0,8. Elementenes tykkelse eller tetthet av lagring er dermed ikke blitt vurdert i denne oppgaven for å ta høyde for at tykke og tettpakkede elementer sannsynligvis ikke vil gjennomgå fullstendig forbrenning (Fontana *et al.*, 2016, s. 1137). Ved å ta hensyn til eksempelvis isolerende effekter fra forkulling ville den resulterende brannenergien blitt lavere. Forenklingen medfører et konservativt bidrag til brannenergien i forhold til om dette hadde blitt vurdert i hvert enkelt tilfelle. En slik forenkling er imidlertid svært hensiktsmessig for å øke den praktiske gjennomførbarheten av kartleggingen.

Videre er brennverdiene forenklet til å være konstant gjennom hele brannen. I realiteten vil eksempelvis brennverdien til trevirke variere gjennom pyrolyseperioden ved omdanning fra karbon til kull (Yii *et al.*, 2006, s. 27). Brennverdien til kull er høyere enn verdiene brukt for



cellulosebaserte materialer i denne oppgaven, eksempelvis blir brennverdien for kull oppgitt i NS-EN 1991-1-2 (2002) til å være lik 30 MJ/kg. Effekten denne forenklingen har på resultatet er ikke ytterligere vurdert, men forenklingen er ansett som nødvendig for å kunne gjennomføre beregningen av brannenergi med valgt kartleggingsmetoden. Metoden som er benyttet for kartlegging i denne oppgaven registrerer kun masser og volum uten en videre vurdering av geometriske faktorer.

## 6.2 Brannenergi som parameter for brannteknisk prosjektering

Metoden som er benyttet for kartleggingen av brannenergi i denne oppgaven tar kun høyde for mengden brennbart materiale og tilhørende brennverdi. Det er imidlertid identifisert en rekke andre viktige faktorer for brannenes utvikling i litteraturen som kartleggingsmetoden ikke registrerer. Heller ingen av de øvrige identifiserte kartleggingsmetodene tar høyde for slike faktorer.

Kartleggingsmetoden registrerer kun tilgjengelig mengde energi som kan frigis ved en brann, men dette er ikke nødvendigvis hvor mye energi som kommer til å frigis. Parameteren brannenergi alene gir ikke nok informasjon for å kunne predikere brannenes utvikling og temperaturene som vil kunne forventes i branncellen. En kartleggingsmetode som tar høyde for faktorer som ventilasjonsforhold, eksponert overflateareal og varmeavgivelseshastighet ville bidratt til å kunne predikere brannens utvikling bedre, og ville dermed vært nyttig for god brannteknisk dimensjonering.

Thrane (1981, s. 32-33) beskriver også følgende egenskaper ved selve brannbelastningen som er sentrale for brannens alvorlighetsgrad: brenselets evne til å spre flammer og til å antenne, egenskaper for røykutvikling og produksjon av giftige gasser. Slik brannenergien er blitt registrert i denne oppgaven blir ikke slike egenskaper tatt høyde for og vurdert.

Til tross for at det er en rekke øvrige faktorer som spiller inn på brannens utvikling, har man i lang tid benyttet en sammenheng mellom brannenergi og brannens varighet som ble etablert på slutten av 1920-tallet gjennom Ingberg sitt arbeid (Drysdale, 2011, s. 423). Denne sammenhengen knytter kun mengde brannenergi opp mot forventet branntid. Den tar dermed ikke høyde for innvirkning fra andre viktige faktorer. I litteraturen er det imidlertid av flere blitt fremholdt at denne sammenhengen ikke kan brukes alene, ettersom sammenhengen er en forenkling. Ved prosjektering må det derfor også tas høyde for andre faktorer som påvirker brannens utvikling (Shorter, 1968, s. 3; Harmathy og Lie, 1970, s. 87; Issen, 1978).

Den forenklete metoden for å beregne branntid som ble gitt i NS 3478 ved bruk av formel (5) og (6) benytter denne direkte sammenhengen mellom mengde tilgjengelig brannenergi og forventet branntid (Thrane, 1981, s. 49). Ved bruk av formel (5) på grenseverdiene i de oppgitte intervallene i VTEK for å beregne brannveggers nødvendige motstand finner man også igjen denne sammenhengen mellom brannenergi og branntid (DIBK, 2017):

- 120 min =  $400 \text{ MJ/m}^2 * 0,3$
- 180 min =  $600 \text{ MJ/m}^2 * 0,3$
- 240 min =  $800 \text{ MJ/m}^2 * 0,3$

Ved å benytte seg av slike preaksepterte intervaller fra VTEK benytter man seg dermed fortsatt av den forenklete sammenhengen mellom branntid og brannenergi, uten å ta høyde for andre viktige faktorer for brannens utvikling. Med andre ord benyttes fortsatt denne forenklingen, til tross for at senere forskning indikerer at denne ikke i tilstrekkelig grad beskriver brannens utvikling alene.

### **6.3 Verdiene for spesifikk brannenergi gitt i Eurokoden**

I Eurokode 1 del 1-2 oppgis en rekke verdier for spesifikk brannenergi for ulike bygningstyper. I TEK17 henvises det til å bruke relevant anerkjent statistikk i henhold til Eurokoden, dvs. slike verdier for spesifikk brannenergi for de ulike bygningstyper (DIBK, 2017). En relevant problemstilling er derfor: Hvor riktige er disse statistiske verdiene for situasjonen i dagens byggverk?

En rekke av verdiene som er å finne i Eurokode 1 del 1-2 er også blitt identifisert i CIB W14 (Thomas, 1986). I «Implementation of Eurocodes, Handbook 5» blir det oppgitt at verdiene gitt for de ulike bygningstypene er hentet fra internasjonale dokumenter. Alle disse er imidlertid skrevet før årtusenskiftet (Schleich, 2005a, s. I-24). Verdiene baserer seg dermed på litteratur som i dag er minst tyve år gammel.

Med bakgrunn i det som er identifisert i litteraturen om brannenergi er det derfor naturlig å stille spørsmålet om hvor godt bilde de oppgitte verdiene gir av dagens situasjon. Fontana *et al.* (2016, s. 1138) beskriver at brannenergien varierer mye med både geografisk område og tid. Det er naturlig å anta at det har vært en endring i livsstil, materialvalg og interiørvalg fra da disse verdiene ble funnet ved kartlegging. Verdiene oppgitt i Eurokoden 1 del 1-2 bør derfor kanskje brukes med varsomhet.

### **6.4 Statistisk behandling**

Gumbel-fordelingene ble i denne oppgaven benyttet på datasettet med verdier for den spesifikk variable brannenergien per gulvareal. Gumbel-fordelingen er en ekstremverdifordeling som brukes på ekstremverdier hentet ut fra et datasett delt inn i blokker, hvor hver blokk eksempelvis representerer en bestemt tidsperiode. Verdiene for brannenergi er imidlertid ikke slike ekstremverdier. Brannenergien for hvert byggverk representeres ved kun én verdi, og det er derfor ikke praktisk mulig å hente ut ekstremverdier for hvert byggverk. Dette har sammenheng med at en kartlegging av brannenergi er en svært tid- og ressurskrevende prosedyre, og den blir derfor vanligvis ikke gjentatt flere ganger for samme byggverk.

Til tross for dette brukes normalt Gumbel-fordelingen for brannenergi i litteraturen. Ettersom forutsetningene for å bruke en slik ekstremverdifordeling ikke synes å være til stede, fremstår dette noe påfallende. Den nærmere teorien bak den statistiske behandlingen faller imidlertid utenfor denne oppgavens grenser, og Gumbel-fordelingen er blitt benyttet ettersom det er denne fordelingen som representerer verdiene oppgitt i Eurokoden 1 del 1-2.

## **6.5 Variasjonen i den variable brannenergien i to identiske bygninger**

Som nevnt i kapittel 4.1 ovenfor, har to av de kartlagte flerbrukshallene (Ellingsrud og Voksen) identiske bygningskonstruksjoner, foruten å være speilvendte. Ettersom bygningskroppen for de nevnte hallene er lik, har disse nøyaktig like mange kvadratmeter til lagring og oppbevaring av utstyr. Det er i den forbindelse interessant å undersøke hvor mye den variable brannenergien varierer med lik mulighet til lagring. Resultatene viser at Ellingsrud flerbrukshall hadde en variabel spesifikk brannenergi på 56,25 MJ/m<sup>2</sup> per gulvareal, mens i Voksen flerbrukshall ble verdien beregnet til å være 44,05 MJ/m<sup>2</sup> per gulvareal.

Under kartleggingene var lagringen i hallene tilsynelatende ganske lik. Enkelte elementer medførte imidlertid en høyere variabel brannenergi på Ellingsrud. På Ellingsrud var lagerrommene rotete, og det ble identifisert en rekke elementer som var ødelagte, men likevel stablet i et hjørne. Det ble også oppbevart noen store tunge gummidekk i et av lagerrommene. Videre var det to store sofaer i rommene i tilknytning til hallen. Disse nevnte tilfellene medfører betydelige konsekvenser på brannenergien. På Voksen ble det ikke oppbevart annet en idrettsteknisk utstyr, og her var lagerrommene langt ryddigere med kun oppbevaring av utstyr som tilsynelatende var i bruk. Det var heller ingen tunge møbler i oppholdsarealene.

Ulikheten i den variable brannenergien i disse to hallene viser at effekten av hallens bruk kan medføre betydelige variasjoner i brannenergien. Selv om det var kun små forskjeller i lagring i disse to identiske byggverkene utgjorde disse forskjellene en merkbar betydning på resultatene av den variable brannenergien. Dette indikerer at dersom en flerbrukshall eksempelvis skal benyttes til arrangementer som messer og loppemarkeder hvor hele spilleflaten vil fylles med brennbare materialer er det forventet en betydelig økning i den variable brannenergien.

## 7 Konklusjon og videre arbeid

Gjennom arbeidet med denne masteroppgaven er følgende spørsmål forsøkt besvart:

1. Hvilke metoder for å kartlegge brannenergi er å finne i litteraturen, og hvilken metode er mest hensiktsmessig å benytte for å kartlegge brannenergien i en flerbrukshall?
2. Er den dimensjonerende spesifikke brannenergien i flerbrukshaller i samsvar med det som er angitt i bygningenes branndokumentasjon?
3. Hva er 80 %-fraktilen for den variable brannenergien for bygningstypen flerbrukshall gitt ved Gumbel-fordelingen?
4. Hvilke andre faktorer har innvirkning på brannens utvikling og temperaturene som vil kunne oppstå i branncellen ved en brann?

### 7.1 Kartleggingsmetode for kartlegging av brannenergi i flerbrukshaller

Veiningsmetoden, inventarmetoden, kombinasjonsmetoden, spørreskjemametoden og undersøkelse av nettsider med bilder er de fem metodene som er identifisert i litteraturen for kartlegging av brannenergi i byggverk. Gjennom litteraturstudien ble det avdekket at kombinasjonsmetoden er metoden som anbefales for kartlegging av brannenergi i byggverk, da dette er metoden som gir mest pålitelige resultater og den forenkler selve gjennomføringen av brannenergiundersøkelsen i praksis. Videre fører metoden til at antallet antagelser som må gjøres reduseres sammenlignet med de øvrige metodene.

### 7.2 Dimensjonerende spesifikk brannenergi i de kartlagte hallene

Karakteristiske verdier for brannenergien i ti flerbrukshaller i Oslo-området er kartlagt ved å benytte kombinasjonsmetoden. Den dimensjonerende spesifikke brannenergien per omhyllingsflate for de ti kartlagte objektene i denne oppgaven er beregnet til å ligge mellom 103,75-273,12 MJ/m<sup>2</sup>. Dette er innenfor det mye brukte intervallet i den branntekniske dokumentasjonen på byggverkene på 50-400 MJ/m<sup>2</sup> per omhyllingsflate. For to av hallene var brannenergien imidlertid angitt i branndokumentasjonen til å ligge under 50 MJ/m<sup>2</sup> per omhyllingsflate. Dette viste seg ved beregningene å ikke være tilfellet, og verdiene var henholdsvis 103,75 MJ/m<sup>2</sup> og 273,12 MJ/m<sup>2</sup> per omhyllingsflate.

80 %-fraktilen i en log-normalfordeling for den dimensjonerende spesifikke brannenergien per omhyllingsflate beregnet i denne oppgaven – sammen med verdiene beregnet av Berger (2018) – ble beregnet til 323,06 MJ/m<sup>2</sup>.

### 7.3 80 %-fraktilen for spesifikk variabel brannenergi i flerbrukshaller

Spesifikk variabel brannenergien per gulvareal for bygningstypen flerbrukshall er beregnet til å være lik 79,65 MJ/m<sup>2</sup> gitt ved 80 %-fraktilen i Gumbel-fordelingen. Verdiene beregnet av Berger (2018) er også medtatt i den statistiske analysen, og datasettet med verdier for spesifikk variabel brannenergien per gulvareal for bygningstypen flerbrukshall er dermed bestående av tyve verdier.

## 7.4 Faktorer for å predikere brannens utvikling

Brannenergi er kun én av en rekke ulike faktorer som er viktige for å kunne predikere hvordan en brann vil kunne utvikle seg og temperaturene konstruksjonen kan forventes å eksponeres for under en brann. Ventilasjonsforholdene i branncellen er sentrale for brannens utvikling og avgjør om brannen utvikler seg ventilasjonskontrollert eller brenselkontrollert. Varmeavgivelseshastigheten til brenselet medfører at samme mengde brannenergi kan gi ulike temperaturer under en brann. Videre er type brensel og geometriske faktorer også sentrale for å kunne predikere brannens utvikling. Denne oppgaven har kun kartlagt tilgjengelig mengde brannenergi, og antas derfor å si lite alene om hvordan en forventet brann vil utvikle seg i byggverkene. En kartleggingsmetode som fanger opp slike andre viktige faktorer for brannens utvikling ville vært et nyttig verktøy for god brannteknisk dimensjonering.

## 7.5 Forslag til videre forskning

Verdiene som er beregnet i denne oppgaven tar ikke høyde for flerbruken av byggverkene. Ved bruk av flerbrukshallene til eksempelvis messer, konserter og loppemarkeder vil brannenergisisuasjonen kunne være betydelig annerledes. En undersøkelse av den opptredende brannenergien ved slike arrangement vil kunne være viktige for framtidig brannteknisk prosjektering av bygningstypen flerbrukshall.

For at datasettet med spesifikk variabel brannenergi for bygningstypen flerbrukshall skal passe enda bedre med en Gumbel-fordeling vil det være hensiktsmessig å kartlegge ytterligere byggverk. I den forbindelse bør det også foretas en vurdering av hvor mange verdier som er nødvendig for en god tilpasning til Gumbel-fordelingen.

I arbeidet med denne oppgaven er det identifisert to aspekter som bør undersøkes. Disse har falt utenfor denne oppgavens grenser, men er sentrale med tanke på brannsikkerheten i flerbrukshaller og bruk av brannenergi som parameter til brannteknisk prosjektering. Disse aspekter er følgende:

- Finnes det bedre alternativer til brannenergien ved brannteknisk dimensjonering?
  - o Er det alternativer som kan predikere oppførselen til en brann bedre og som heller burde benyttes som parameter i brannteknisk prosjektering?
- Hva er konsekvensen ved å bruke det preaksepterte intervallet fra VTEK på 50-400 MJ/m<sup>2</sup> per omhyllingsflate ved dimensjonering av brannsikkerheten?
  - o Hvor store er variasjonene i temperaturene i branncellen ved verdier i intervallets ytterkanter?

For fremtidig forskning anbefales det å undersøke disse problemstillingene, da dette har betydning for relevansen av resultatene i denne oppgaven. Videre vil det ha betydning for brannteknisk prosjektering med brannenergi som parameter.

## 8 Referanseliste

- Andersson, E. (2013) *Brannsikkerhet i bygninger med byggevarer av plast*. Masteroppgave, NTNU, Trondheim. Tilgjengelig fra: <http://hdl.handle.net/11250/276177> (Hentet: 18.11.2018).
- Babrauskas, V. (1995) Heat of Combustion and Potential Heat, *Heat release in fires*,. E & FN Spon, s. 207-223. Tilgjengelig fra: [https://books.google.no/books?id=MSFgnQxSQiEC&pg=PA207&hl=no&source=gbs\\_toc\\_r&cad=3#v=onepage&q&f=false](https://books.google.no/books?id=MSFgnQxSQiEC&pg=PA207&hl=no&source=gbs_toc_r&cad=3#v=onepage&q&f=false) (Hentet: 30.04.2019).
- Berger, A. K. (2018) *Brannsikkerhet i idrettshaller- Kartlegging av karakteristiske verdier for brannenergi i flerbrukshaller*. Masteroppgave, NTNU, Trondheim. Tilgjengelig fra: <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/2506150> (Hentet: 16.09.2018).
- Beshore, D. G. (u.å) *EasyFit: Distributing Fitting Mase Easy* Tilgjengelig fra: <http://www.mathwave.com/easyfit-distribution-fitting.html> (Hentet: 09.05.2019).
- Braun, D. (2010) Simple methods for identification of plastics 5. utg. Hanser Publishers, s. 110. Tilgjengelig fra: <http://download.polympart.com/polympart/ebook/Simple%20Methods%20for%20Identification%20of%20Plastics.pdf> (Hentet: 30.04.2019).
- Bryson, J. og Gross, D. (1968) Techniques for the survey and evaluation of live floor loads and fire loads in modern office buildings, *Building science series*, 16. Tilgjengelig fra: <https://www.govinfo.gov/content/pkg/GOVPUB-C13-a14db867a4446d68b7d569d41a74ff8b/pdf/GOVPUB-C13-a14db867a4446d68b7d569d41a74ff8b.pdf> (Hentet: 27.04.2019).
- Buchanan, A. H. og Abu, A. K. (2017) *Structural design for fire safety*. 2. utg. Chichester, West Sussex, United Kingdom: John Wiley & Sons Inc.
- Bwalya, A. C., Sultan, M. A. og Bénichou, N. (2004) A pilot survey of fire loads in Canadian homes, *National Research Council Canada Ottawa*, Research Report No. 159. doi: 10.4224/20377729
- Coles, S. (2001) *An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values*. Springer. doi: DOI 10.1007/978-1-4471-3675-0.
- Culver, C. G. (1976) Survey Results for Fire Loads and Live Loads in Office Buildings, *NBS Building science series*, 85. Tilgjengelig fra: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/BSS/nbsbuildingsscience85.pdf> (Hentet: 03.04.2019).
- DIBK (2010) *Byggteknisk forskrift (TEK 10)*. Tilgjengelig fra: <https://dibk.no/byggeregler/tek/> (Hentet: 14.05.2019).
- DIBK (2017) *Byggteknisk forskrift (TEK17)*. Tilgjengelig fra: <https://dibk.no/byggereglene/byggteknisk-forskrift-tek17/> (Hentet: 28.03.2019).
- Drysdale, D. (2011) *An introduction to fire dynamics*. 3. utg. Chichester, West Sussex, United Kingdom,: John Wiley & Sons.
- Fangrat, J. *et al.* (1998) Relationship between heat of combustion, lignin content and burning weight loss, *Fire and materials*, 22, s. 1-6. doi: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1018\(199801/02\)22:1%3C1::AID-FAM622%3E3.0.CO;2-O](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1018(199801/02)22:1%3C1::AID-FAM622%3E3.0.CO;2-O).
- Fontana, M. *et al.* (2016) Fire load density, *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. 5. utg. Springer, s. 1131-1142.
- Friquin, K. L. (2011) Material properties and external factors influencing the charring rate of solid wood and glue-laminated timber, *Fire and materials*, 35(5), s. 303-327. doi: <https://doi.org/10.1002/fam.1055>
- Green, M. F. (1977) A survey of fire loads in hackney hospital, *Fire Technology*, 13(1), s. 42-52. doi: 10.1007/BF02338885.

- Gross, D. (1977) Measurements of fire loads and calculations of fire severity, *Wood and Fiber Science*, 9(1), s. 72-85. Tilgjengelig fra: <https://wfs.swst.org/index.php/wfs/article/view/1821> (Hentet: 15.11.2018).
- Hall, J. R. og Joglar, F. (2016) Probability and statistics *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. Springer, s. 2827-2874. doi: 10.1007/978-1-4939-2565-0\_73.
- Harmathy, T. og Lie, T. (1970) Fire test standard in the light of fire research, *Fire Test Performance*. Tilgjengelig fra: <https://compass.astm.org/download/STP44713S.39974.pdf> (Hentet: 01.06.2019).
- Hurley, M. J. et al. (2016) *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. New York, NY: Springer New York. doi: 10.1007/978-1-4939-2565-0.
- Issen, L. A. (1978) A literature review of fire and live load surveys in residences, *National Bureau of Standards, Washington, DC.*, s. 3. Tilgjengelig fra: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/IR/nbsir78-1440.pdf> (Hentet: 07.05.2019).
- Issen, L. A. (1980) Single-family residential fire and live loads survey. US Department of Commerce, National Bureau of Standards, s. 22. Tilgjengelig fra: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/IR/nbsir80-2155.pdf> (Hentet: 03.05.2019).
- Khan, M. M., Tewarson, A. og Chaos, M. (2016) Combustion Characteristics of Materials and Generation of Fire Products, i Hurley, M. J., et al. (red.) *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. New York, NY: Springer New York, s. 1143-1232.
- Knarud, J. I. (2018) Brannenergi i flerbrukshaller, *Byggeindustrien*, 15, s. 48.
- Kommunal- og arbeidsdepartementet (1969) *Byggeforskrift 1969*. Tilgjengelig fra: [https://dibk.no/globalassets/byggeregler/tidligere\\_regelverk/historisk-arkiv-1949---1987/byggeforskrift-1969.pdf](https://dibk.no/globalassets/byggeregler/tidligere_regelverk/historisk-arkiv-1949---1987/byggeforskrift-1969.pdf) (Hentet: 14.05.2019).
- Kommunal- og arbeidsdepartementet (1970) *Veiledning til byggeforskrifter av 1. august 1969*. Tilgjengelig fra: [https://www.regjeringen.no/contentassets/20503ddfe0664fac9e2185c1a6c80716/veiledning\\_mars\\_1970\\_til\\_byggeforskr\\_010869.pdf](https://www.regjeringen.no/contentassets/20503ddfe0664fac9e2185c1a6c80716/veiledning_mars_1970_til_byggeforskr_010869.pdf) (Hentet: 05.05.2019).
- Kommunal- og arbeidsdepartementet (1985a) *Veiledning til byggeforskrift 1985*. Tilgjengelig fra: [https://www.regjeringen.no/contentassets/20503ddfe0664fac9e2185c1a6c80716/veiledning\\_feb1985\\_til\\_byggeforskr\\_1985.pdf](https://www.regjeringen.no/contentassets/20503ddfe0664fac9e2185c1a6c80716/veiledning_feb1985_til_byggeforskr_1985.pdf) (Hentet: 05.05.2019).
- Kommunal- og arbeidsdepartementet (1985b) *Byggeforskrift 1985*. Tilgjengelig fra: [https://dibk.no/globalassets/byggeregler/tidligere\\_regelverk/historisk-arkiv-1949---1987/byggeforskrift-1985.pdf](https://dibk.no/globalassets/byggeregler/tidligere_regelverk/historisk-arkiv-1949---1987/byggeforskrift-1985.pdf) (Hentet: 14.05.2019).
- Kommunal- og arbeidsdepartementet (1987) *Byggeforskrift 1987*. Tilgjengelig fra: [https://dibk.no/globalassets/byggeregler/tidligere\\_regelverk/historisk-arkiv-1949---1987/byggeforskrift-1987.pdf](https://dibk.no/globalassets/byggeregler/tidligere_regelverk/historisk-arkiv-1949---1987/byggeforskrift-1987.pdf) (Hentet: 05.05.2019).
- Kommunal- og regionaldepartementet (1997) *Forskrift om krav til byggverk og produkter til byggverk*. Tilgjengelig fra: [https://dibk.no/globalassets/byggeregler/tidligere\\_regelverk/forskrift-om-krav-til-byggverk.pdf](https://dibk.no/globalassets/byggeregler/tidligere_regelverk/forskrift-om-krav-til-byggverk.pdf) (Hentet: 05.05.2019).
- Kommunal- og regionaldepartementet (1999) *Ren veiledning til teknisk forskrift til plan- og bygningsloven 1997, utgave 2*. Tilgjengelig fra: [https://dibk.no/globalassets/byggeregler/tidligere\\_regelverk/historisk-arkiv-1949---1987/veiledning-ren-til-forskrift-om-krav-til-byggverk-tek-2-utgave.pdf](https://dibk.no/globalassets/byggeregler/tidligere_regelverk/historisk-arkiv-1949---1987/veiledning-ren-til-forskrift-om-krav-til-byggverk-tek-2-utgave.pdf) (Hentet: 05.05.2019).
- Kucera, B. og Næss, R. M. (1999) *Tre : naturens vakreste råstoff*. Landbruksforlaget. Tilgjengelig fra: [https://www.nb.no/items/URN:NBN:no-nb\\_digibok\\_2008100200010](https://www.nb.no/items/URN:NBN:no-nb_digibok_2008100200010).
- Kultur- og Kirkedepartementet (2005) *Flerbrukshaller - Planlegging, bygging, drift og vedlikehold*. Tilgjengelig fra:

- [https://www.regjeringen.no/globalassets/upload/kkd/idrett/flerbruk\\_web.2005pdf.pdf](https://www.regjeringen.no/globalassets/upload/kkd/idrett/flerbruk_web.2005pdf.pdf)  
(Hentet: 12.10.2018).
- Kumar, S. og Rao, C. V. S. K. (1997) Fire loads in office buildings, *Journal of Structural Engineering*, 123(3), s. 365-368. Tilgjengelig fra:  
<https://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/%28ASCE%290733-9445%281997%29123%3A3%28365%29> (Hentet: 04.04.2019).
- Lechner, M. D. (2006) Polymers, i Martienssen, W. og Warlimont, H. (red.) *Handbook of Condensed Matter and Materials Data*. Springer Science & Business Media, s. 477-522. doi: 10.1007/3-540-30437-1.
- Liebe, G. (1998) *Brannfysikk : fra teori til praksis : brannutvikling, brannspredning, slokking og utlufting*. 2. utg. utg. Fjelldal, Oslo: Norges brannskole Norsk brannvern forening.
- Maslak, M. (2016) Characteristic value of the random fire load density, Probability-based specification depending on the way how the building compartment is used, *Applications of Structural Fire Engineering*. doi: <https://doi.org/10.14311/asfe.2015.009>
- Mathwawe (u.å) *Kolmogorov-Smirnov Test* Tilgjengelig fra:  
[http://www.mathwawe.com/help/easyfit/html/analyses/goodness\\_of\\_fit/kolmogorov-smirnov.html](http://www.mathwawe.com/help/easyfit/html/analyses/goodness_of_fit/kolmogorov-smirnov.html) (Hentet: 25.05 2019).
- Melinek, S. J. (1993) The distribution of fire load, *Fire Safety Journal*, 20(1), s. 83-88. doi: 10.1016/0379-7112(93)90013-G.
- Mäkinen, H., Saranpää, P. og Linder, S. (2002) Wood-density variation of Norway spruce in relation to nutrient optimization and fibre dimensions, *Canadian Journal of Forest Research*, 32(2), s. 185-194. doi: 10.1139/X01-186.
- NFPA 577 (2016) *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: 23.05.2019).
- Norges Håndballforbund (2014) *Planlegging og bygging av fleridrettshaller i Norge*. Tilgjengelig fra: <http://www.innebandy.no/2014-2015/prosessbeskrivelse-fleridrettshaller.pdf> (Hentet: 01.05 2019).
- NS-EN 1991-1-2 (2002) *Eurokode 1: Laster på konstruksjoner - Del 1-2: Almenne laster. Laster på konstruksjoner ved brann* (Hentet: 27.03 2019).
- NS-EN 12845 (2015) *Faste brannslukkesystemer, Autmatiske sprinklersystemer, Dimensjonering, installering og vedlikehold* (Hentet: 01.06.2019).
- NS-EN ISO 1716 (2018) *Prøving av byggeprodukters egenskaper ved brannpåvirkning - Bestemmelse av forbrenningsvarme (brennverdi)* (Hentet: 28.03.2019).
- NS-EN ISO 13943 (2017) *Brannsikkerhet - Terminologi* (Hentet: 15.11.2018).
- Palisade (u.å-a) *Risk analysis software using Monte Carlo simulation for Microsoft Excel and Microsoft Project*. Tilgjengelig fra: <http://go.palisade.com/RISKDownload.html> (Hentet: 09.05 2019).
- Palisade (u.å-b) *Monte Carlo Simulation* Tilgjengelig fra:  
[https://www.palisade.com/risk/monte\\_carlo\\_simulation.asp](https://www.palisade.com/risk/monte_carlo_simulation.asp) (Hentet: 01.06.2019).
- Saxi (u.å) *Hissbara väggar* Tilgjengelig fra: <http://www.saxi.se/sv/ridavaggar.html> (Hentet: 30.04.2019).
- Schleich, J.-B. (2005a) Chapter 1- Fire Actions in Buildings, *Handbook 5: Design of Buildings for the Fire Situation*. Luxembourg: Leonardo Da Vinci Pilot Project CZ/02/B/F/PP-134007.
- Schleich, J.-B. (2005b) Chapter 3 - Calibration of reliability parameters *Handbook 5: Design of buildings for the Fire Situation*. Luxembourg: Leonardo Da Vinci Pilot Project CZ/02/B/F/PP-134007.
- Selle, M. L. (2018) *Hypotesetesting*. Tilgjengelig fra:  
<https://wiki.math.ntnu.no/tma4245/tema/begreper/hypothesis> (Hentet: 25.05 2019).



- Shorter, G. (1968) The fire protection engineer and modern building design, *Fire Technology*, 4(3), s. 206-213. doi: 10.1007/BF02588568.
- SIAT (2016) *Statistikk over antall idrettsanlegg bygget i perioden 2006-2015*. Tilgjengelig fra: [https://www.godeidrettsanlegg.no/system/files/sites/default/files/AntallIdrettsanlegg\\_1.pdf](https://www.godeidrettsanlegg.no/system/files/sites/default/files/AntallIdrettsanlegg_1.pdf) (Hentet: 27.03.2019).
- SINTEF Byggforsk (1999) *520.333 Brannbelastning i bygninger. Beregninger og statistiske verdier*. Tilgjengelig fra: [https://www.byggforsk.no/dokument/arkiv/7969/brannbelastning\\_i\\_bygninger\\_beregninger\\_og\\_statistiske\\_verdier](https://www.byggforsk.no/dokument/arkiv/7969/brannbelastning_i_bygninger_beregninger_og_statistiske_verdier) (Hentet: 01.02.2019).
- SINTEF Byggforsk (2009) *520.333 Brannenergi i bygninger. Beregninger og statistiske verdier*. Tilgjengelig fra: [https://www.byggforsk.no/dokument/arkiv/7969/brannbelastning\\_i\\_bygninger\\_beregninger\\_og\\_statistiske\\_verdier](https://www.byggforsk.no/dokument/arkiv/7969/brannbelastning_i_bygninger_beregninger_og_statistiske_verdier) (Hentet: 01.02.2019).
- SINTEF Byggforsk (2010) *541.810: Golv i idrettshaller for flerbruk*. Tilgjengelig fra: [https://www.byggforsk.no/dokument/469/golv\\_i\\_idrettshaller\\_for\\_flerbruk](https://www.byggforsk.no/dokument/469/golv_i_idrettshaller_for_flerbruk) (Hentet: 07.05.2019).
- SINTEF Byggforsk (2013a) *471.031 Egenlaster for bygningsmaterialer, byggevarer og bygningsdeler*. Tilgjengelig fra: [https://www.byggforsk.no/dokument/215/egenlaster\\_for\\_bygningsmaterialer\\_byggevarer\\_og\\_bygningsdeler](https://www.byggforsk.no/dokument/215/egenlaster_for_bygningsmaterialer_byggevarer_og_bygningsdeler) (Hentet: 30.04.2019).
- SINTEF Byggforsk (2013b) *321.051 Brannenergi i bygninger. Beregninger og statistiske verdier*. Tilgjengelig fra: <https://www.byggforsk.no/dokument/4096/> (Hentet: 15.09.2018).
- SINTEF Byggforsk (2015) *571.523 Trevirke, treslag og materialeegenskaper*. Tilgjengelig fra: [https://www.byggforsk.no/dokument/578/trevirke\\_treslag\\_og\\_materialeegenskaper](https://www.byggforsk.no/dokument/578/trevirke_treslag_og_materialeegenskaper) (Hentet: 01.05.2019).
- Statens Bygningstekniske Etat (1990) *Rett og slett en veiledning til Byggeforskrift 1987*. Tilgjengelig fra: [https://dibk.no/globalassets/byggeregler/tidligere\\_regelverk/historisk-arkiv-1949---1987/rett-og-slett.-veiledning-til-byggeforskrift-1987\\_illustrert.pdf](https://dibk.no/globalassets/byggeregler/tidligere_regelverk/historisk-arkiv-1949---1987/rett-og-slett.-veiledning-til-byggeforskrift-1987_illustrert.pdf) (Hentet: 05.05.2019).
- Stokke, D. D., Wu, Q. og Han, G. (2014) *Introduction to wood and natural fiber composites*. John Wiley & Sons, Ltd. doi: 10.1002/9780470711804.
- Thauvoye, C. *et al.* (2008) Fire load survey and statistical analysis, *Fire Safety Science*, 9, s. 991-1002. doi: 10.3801/IAFSS.FSS.9-991.
- Thomas, P. H. (1986) Design Guide: Structural Fire Safety - Workshop CIB W14, *Fire Safety Journal*, 10(2), s. 77-137. doi: [https://doi.org/10.1016/0379-7112\(86\)90041-X](https://doi.org/10.1016/0379-7112(86)90041-X)
- Thrane, E. J. (1981) *Brannteknisk dimensjonering av bygningskonstruksjoner, Innføring i NS 3478*. Trondheim: Tapir.
- Unisport (u.å) *Lydisolerte skillevegger*. Tilgjengelig fra: <https://www.unisport.com/nb/lydisolerte-skillevegger> (Hentet: 01.05.2019).
- Walters, R. N., Hackett, S. M. og Lyon, R. E. (2000) Heats of combustion of high temperature polymers, *Fire and materials*, 24(5), s. 245-252. doi: [https://doi.org/10.1002/1099-1018\(200009/10\)24:5<245::AID-FAM744>3.0.CO;2-7](https://doi.org/10.1002/1099-1018(200009/10)24:5<245::AID-FAM744>3.0.CO;2-7)
- Xie, Q. *et al.* (2018) Probabilistic Analysis of Building Fire Severity Based on Fire Load Density Models, *Fire Technology*, s. 1-27. doi: <https://doi.org/10.1007/s10694-018-0716-0>.
- Yii, E. H., Buchanan, A. H. og Fleischmann, C. M. (2006) Simulating the effects of fuel type and geometry on post-flashover fire temperatures, *Fire Safety Journal*, 41(1), s. 62-75. doi: <https://doi.org/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, Carleton University, Canada. Tilgjengelig fra: <https://vdocuments.site/fire-load-survey-methodologies.html> (Hentet: 05.11.2018).
- Zalok, E. og Eduful, J. (2013) Assessment of fuel load survey methodologies and its impact on fire load data, *Fire Safety Journal*, 62, s. 299-310. doi: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2013.08.011>
- Aarnes, H. (2014) *Statistiske sannsynlighetsfordelinger*. Tilgjengelig fra: <https://www.mn.uio.no/ibv/tjenester/kunnskap/plantefys/tall/statfordeling.pdf> (Hentet: 03.06.2019).

# **A Brennverdiel**

Brennverdi for et utvalg ulike plastikkmaterialer [MJ/kg]

Materialer	Standard Norge, 2008*	Drysdale, 2011*	Khan, Tewarson og Chaos, 2016*	Walters, Hackett og Lyon, 2000*	Thomas, 1986*	Babrauskas og Grayson, 1995	Lechner, 2006
Polyamid (Nylon)		31,9	30,8	28,76		28-29,6	
Polyester	30		32,5		30-31	20,3-28,5	
Polyetylen (PE)	40	46,5	43,6	44,6	43-44	43,1-43,4	46,4
Polyetylentereftalat (PET)		22	22	23,22		21,27	21,6
Polymetylmetakralat (PMMA)		26,2	25,2	25		24,88	
Polypropylen (PP)	40	46	39,2	42,66	42-43	43,23	44
Polystyren (PS)	40	41,6	39,2	41,96	39-40	39,7-39,8	41,6
Polyuretan (PU)	25				22-24	22,7	
Polyuretanskum(PUR)		24,4	23,2-27,2		23-28	23,2-28	
Polyvinylklorid (PVC)	20	19,9	16,4		16-17	16,9	19
Gummi	30				31-33		

\* Verdiene er samlet inn av Berger (2018).

Brennverdi for et utvalg ulike cellulosematerialer [MJ/kg]

Materiale	Standard Norge, 2008*	Khan, Tewarson og Chaos, 2016*	Zalok, 2011*	Thomas, 1986*	Babrauskas og Grayson, 1995
Papir	20		16,3	13-21	
Eik (oak)		17,1	17,1-18,7		
Furu (pine)		17,9	19,11		17,6
Bjørk (birch)			18,7		18,7
Bøk (beech)			18,7		18,7
Lønn (maple)			17,8		17,8
Trevirke	17,5		17-20	15-18	

\* Verdiene er samlet inn av Berger (2018).

*Brennverdi for et utvalg ulike tekstiler [MJ/kg]*

<b>Materiale</b>	<b>Standard Norge, 2008*</b>	<b>Khan, Tewarson og Chaos, 2016*</b>	<b>Zalok, 2011*</b>	<b>Thomas, 1986*</b>	<b>Babrauskas og Grayson, 1995</b>
Bomull	20		15,6-20	16-20	26,1
Ull	20		20,5-26	21-26	20,7-26,6
Nylon		30,8	23,2-33,1		28-29,6
Polyester	30	32,5	23,2-32,5	30-31	20,3-28,5
Klær	20		17-21	17-21	

*\*Verdiene er samlet inn av Berger (2018)*

## **B Densiteter**

Densitet for et utvalg heisvegger [kg/m<sup>2</sup>]

Kilde/ Materiale	Saxi (u.å)	Norges Håndballforbund (2014)	Unisport (u.å)	Berger (2018)*
PVC-duk	0,75	0,7		
PVC-duk, lydisolerende	1,2		1,2	
Nylonnett, stormasket	0,5			0,4

\*Verdien hentet fra Berger (2018) mangler henvisning til hvor verdien er hentet fra

Densitet for trevirke brukt i beregning av masse til konstruksjonen [kg/m<sup>3</sup>]

Kilde/ Materiale	Mäkinen <i>et al.</i> (2002) <sup>*, 1)</sup>	SINTEF Byggforsk (2015)*	Hurley <i>et al.</i> (2016) <sup>2)</sup> , Hentet fra tabell A.28 på s. 3436	Stokke <i>et al.</i> (2014) <sup>*</sup> , Hentet fra tabell 3.6 på s. 80
Furu (pine)		457,6	430	308
Gran (spruce)	Ca. 409	413,6	420	352

<sup>1)</sup>Verdien er avlest fra tabell

<sup>2)</sup>Ikke spesifisert fuktighetsinnhold, antatt 0 %-fuktighet

Densitet for trevirke brukt i beregning av masse til inventar og utstyr [kg/m<sup>3</sup>]

Kilde/ Materiale	SINTEF Byggforsk (2015)	Hurley <i>et al.</i> (2016) <sup>1)</sup> , Hentet fra tabell A.28 på s. 3436	Fangrat <i>et al.</i> (1998)	Stokke <i>et al.</i> (2014), Hentet fra tabell 3.6 på s. 80
Kryssfiner (plywood)			520	
Eik (oak)	607,2	540		554,4-598,4
Lønn (maple)	580,8	540		413,6-554,4
Bjørk (birch)	560,56			545,6
Bøk (beech)	633,6			
Sponplate (particle board)			631,6	

<sup>1)</sup> Ikke spesifisert fuktighetsinnhold, antatt 0 %-fuktighet

*Densitet for polyuretan [kg/m<sup>3</sup>]*

<b>Kilde/ Materiale</b>	<b>Lechner (2006)</b>	<b>Hurley <i>et al.</i> (2016)</b> <i>Hentet fra tabell A.36 på s. 3457</i>	<b>Braun (2010)</b> <i>Hentet fra tabell 9.1 på side 110</i>
Polyurethane (PUR)	1 050	1 100	1 260
Polyurethane (TPU)	1 050	1 270	1 170

*Densitet for gulvbelegg [kg/m<sup>3</sup>]*

<b>Kilde/ materiale</b>	<b>(SINTEF Byggforsk, 2013a)</b>
PVC (gulvbelegg)	1 500
Gummi (gulvbelegg)	1 200-1 800
Linoleum (gulvbelegg)	1 200



## **C Skjema for kartlegging av brannenergi**

VARIABEL BRANNENERGI						
Flerbrukshall:				Rom:		
				Dato:		
Veiningsmetoden						
Type	Vekt (kg)	Mat.	H <sub>ui</sub> (MJ/kg)	Ant.	Brannenergi (MJ)	Kommentar

T= cellulosebaserte materialer, MP= myk plast, HP= hard plast, TE= tekstiler, S=skum

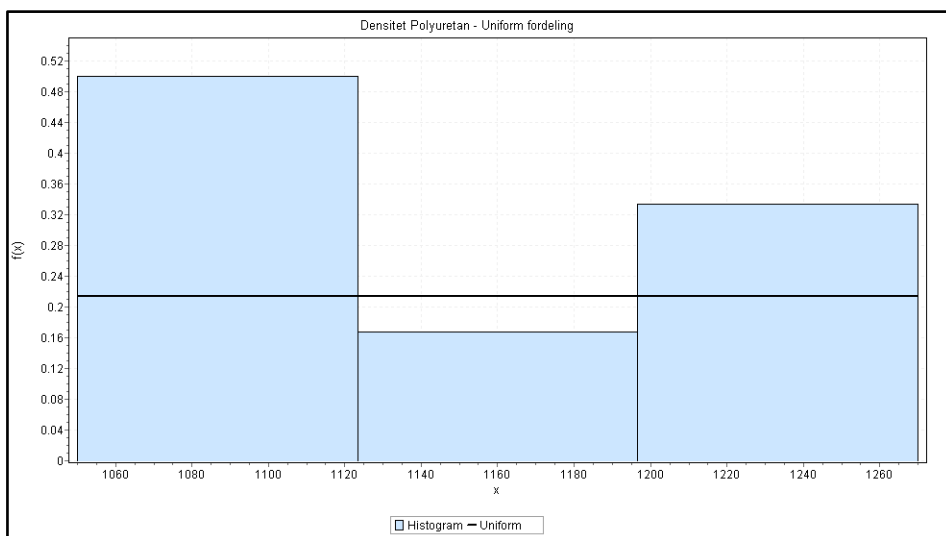
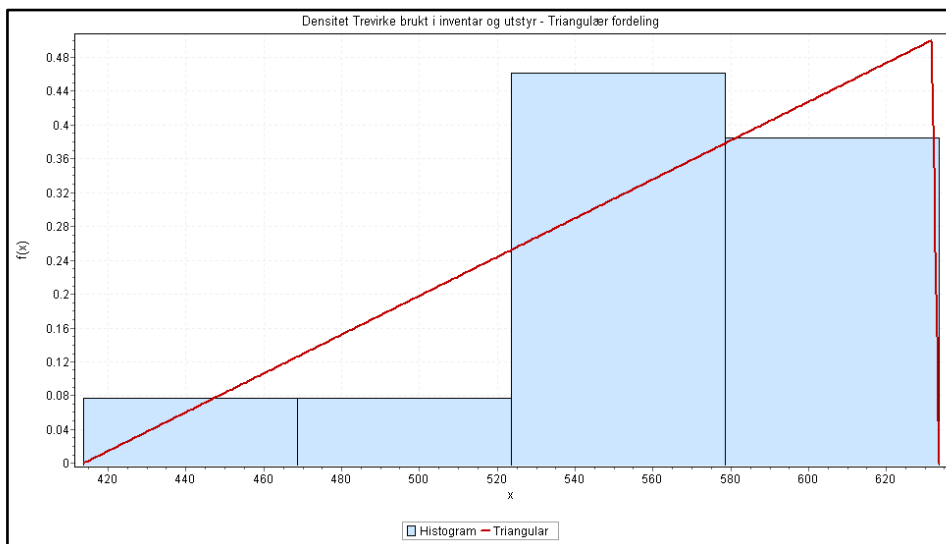
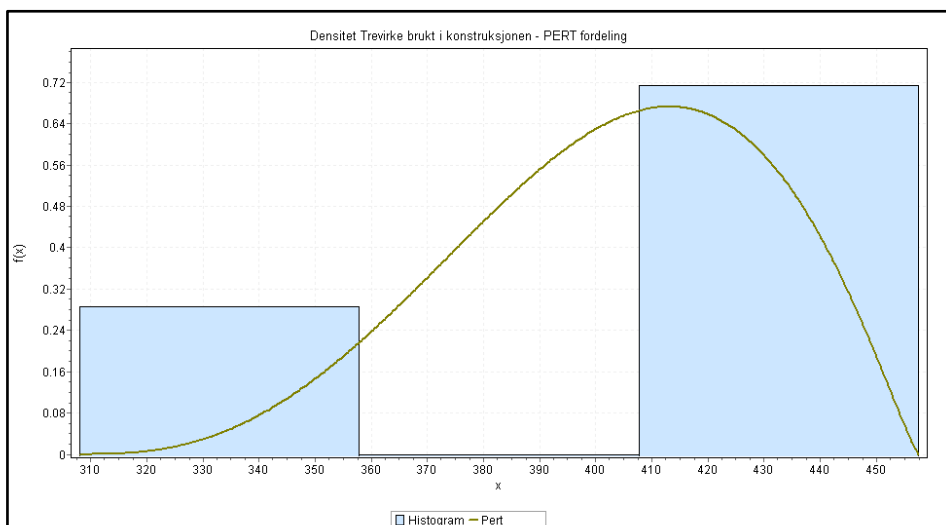
VARIABEL BRANNENERGI										
Flerbrukshall:							Rom:			
							Dato:			
Inventarmetoden										
Type	Mat.	H (m)	B (m)	L (m)	V (m <sup>3</sup> )	ρ <sub>i</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	H <sub>ui</sub> (MJ/kg)	Ant.	Brannenergi	Kommentar

T= cellulosebaserte materialer, MP= myk plast, HP= hard plast, TE= tekstiler, S=skum

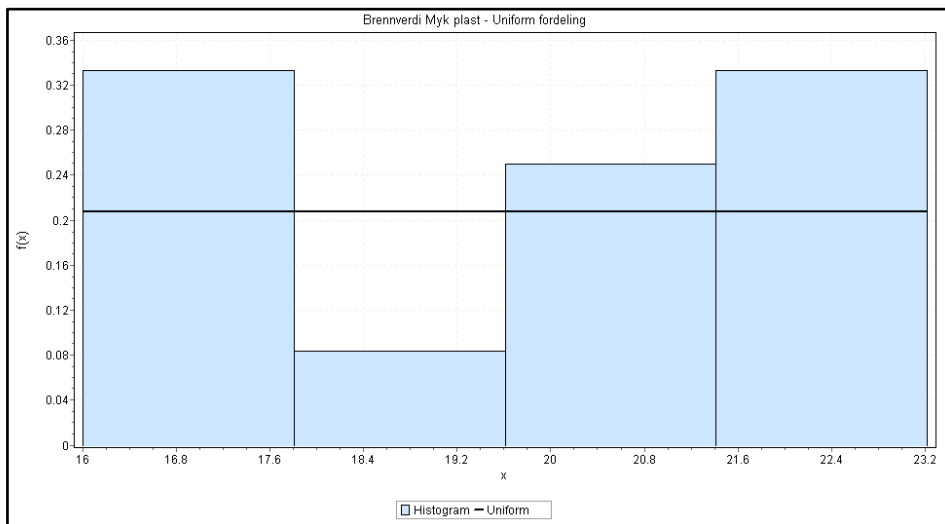
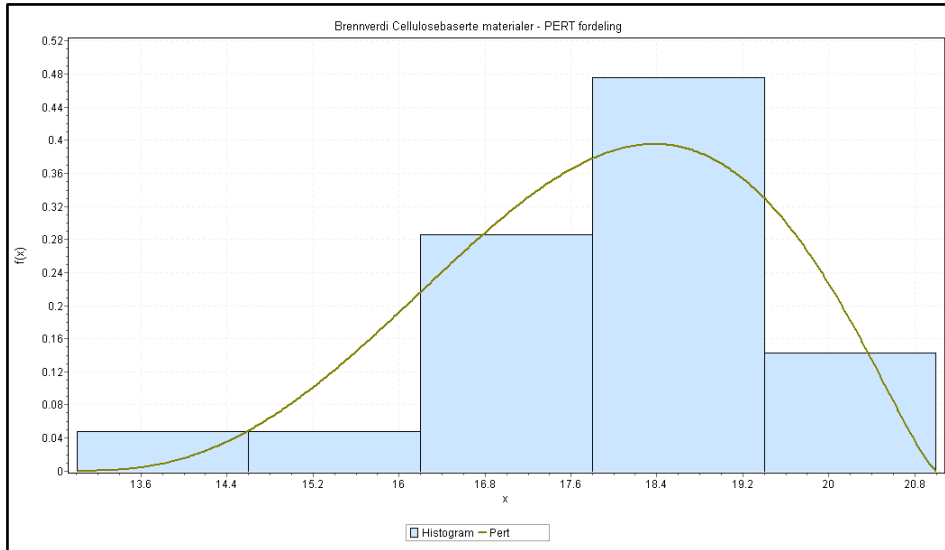
PERMANENT BRANNENERGI						
Flerbrukshall:			Bredde:			
Rom:			Lengde:			
			Høyde under tak:			
			Gulvareal:			
Bygningsdel	Materiale	Mengde (m <sup>3</sup> ) eller (m <sup>2</sup> )	H <sub>ui</sub> (MJ/kg)	ρ <sub>i</sub> (kg/m <sup>3</sup> ) eller (kg/m <sup>2</sup> )	Brannenergi	Beskyttelse
Gulv						
Vegg						
Tak						
Fastmontert utstyr						

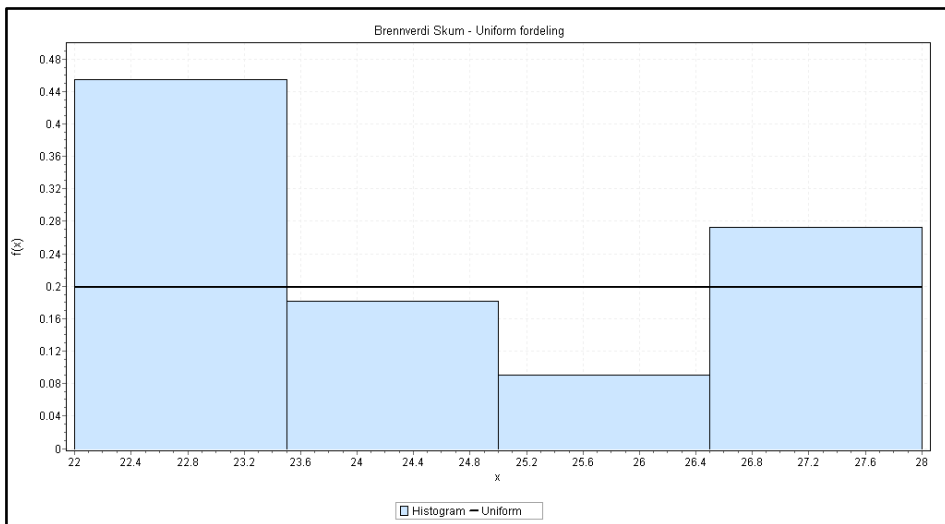
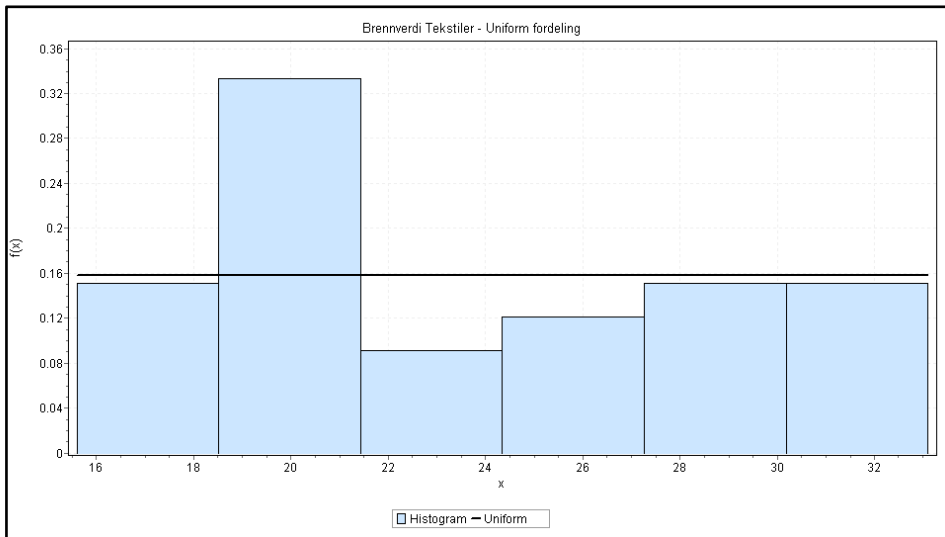
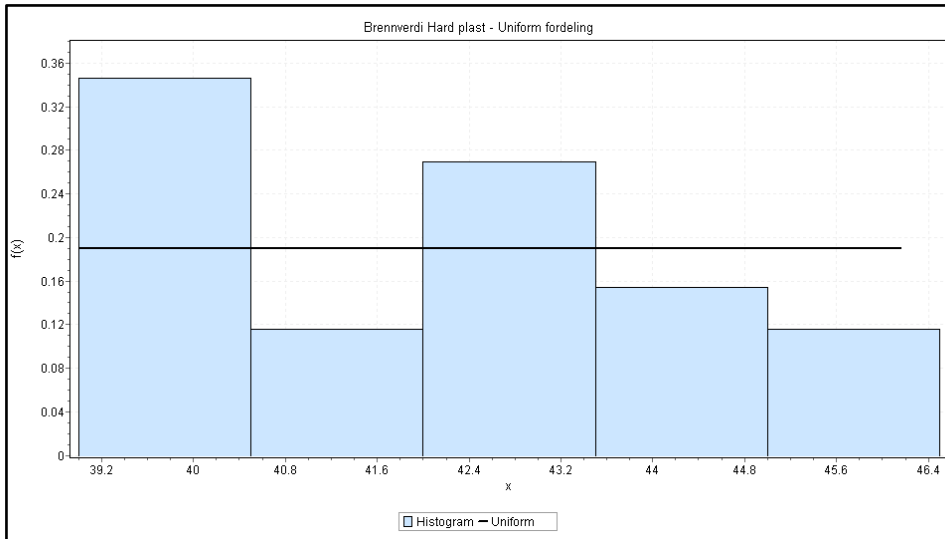
## **D Fordelingsfunksjoner**

## Fordelingsfunksjonene til datasettene med densiteter



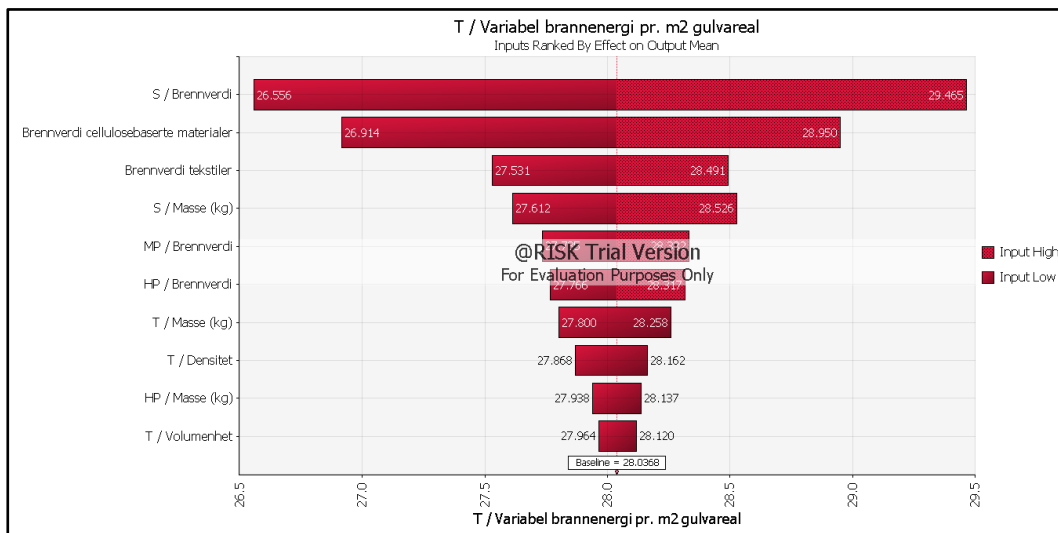
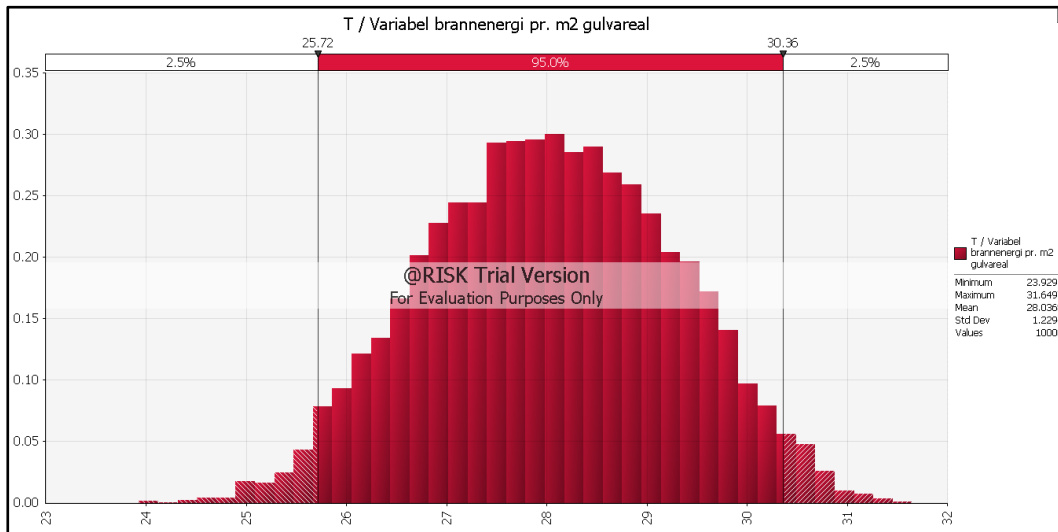
## Fordelingsfunksjonene til datasettene for netto brennverdier





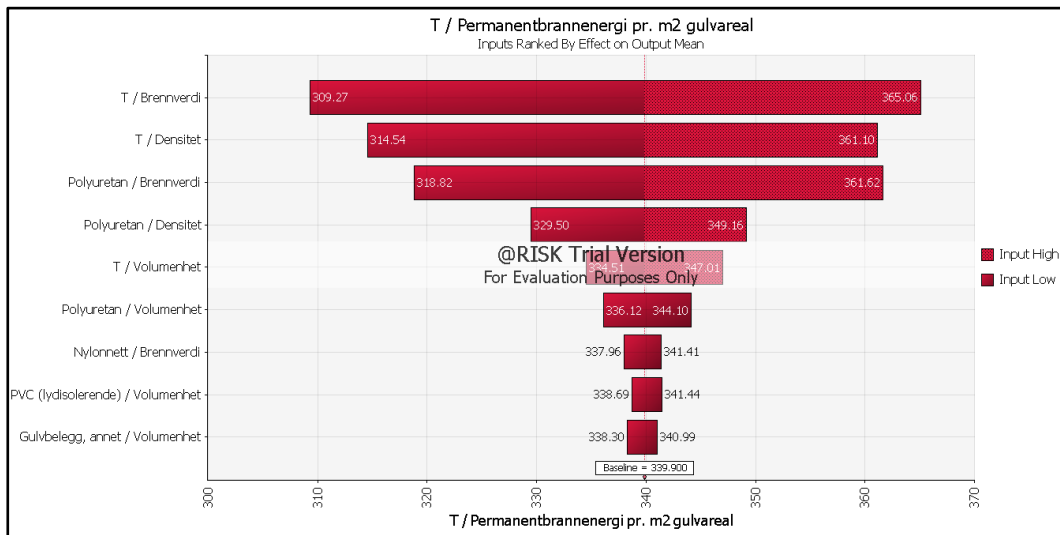
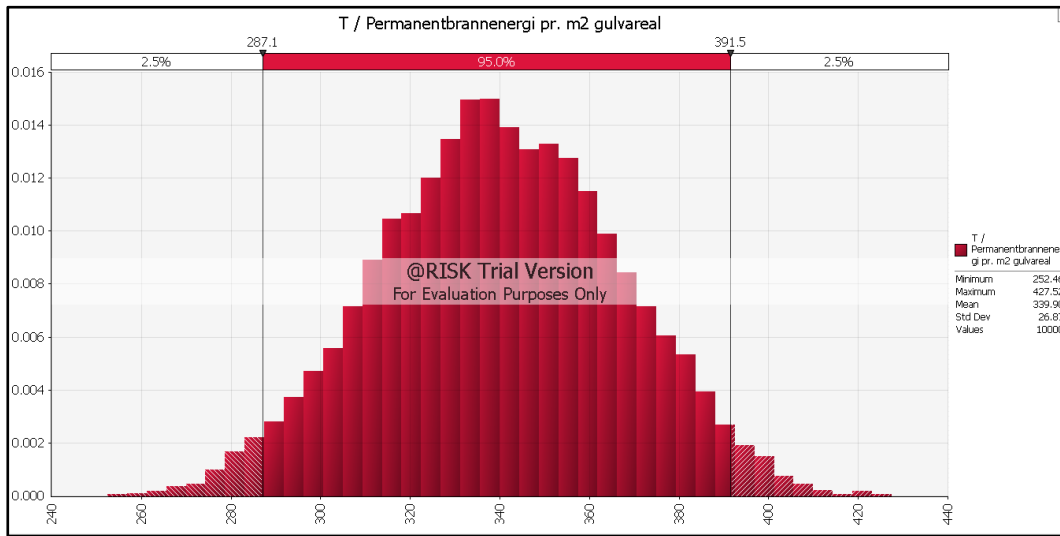
## **E Resultater fra Monte Carlo-simuleringen (Bjørnsletta flerbrukshall)**

# Spesifikk variabel brannenergi per gulvareal





# Spesifikk permanent brannenergi per gulvareal



# Dimensjonerende spesifikk brannenergi

