



Universitetet
i Stavanger

DET TEKNISK-NATURVITENSKAPELIGE FAKULTET

MASTEROPPGAVE

Studieprogram/spesialisering:

Industriell økonomi/Risikostyring

Vårsemesteret, 2020....

Åpen

Forfatter: Eirik Hjorth Minde

Fagansvarlig:

Veileder(e): Håkon Bjorheim Abrahamsen

Tittel på masteroppgaven:

Evaluering av brannsikkerheten i åpne parkeringshus

Engelsk tittel:

Evaluation of fire safety in open car parks

Studiepoeng: 30

Emneord:

Sidetall:

+ vedlegg/annet:

Stavanger, 14.juni 2020
.....
dato/år

Sammendrag

7 januar 2020 begynte en Opel Zafira å brenne inne i parkeringshuset ved Stavanger lufthavn Sola. Brannen spredte seg raskt til andre biler, og når brannvesenet kom på stedet var brannen allerede ute av kontroll. Omtrent to timer etter brannstart kollapset en del av parkeringshuset der bæresystemet var i ubeskyttet stål .

Det er sjeldent at en bil begynner å brenne inne i et parkeringshus, men når det først skjer kan det få store konsekvenser. Det har vært flere store og alvorlige branner i parkeringshus, blant annet på Sola og i Liverpool der 1150 biler gikk tapt i tillegg til at bygget måtte rives.

Det teknologiske fremskrittet har også endret sammensetningen i biler, der moderne biler har mer brennbart materiale og mer brannenergi enn eldre biler.

Byggereglene skal sørge for at byggverk prosjekteres og utføres slik at sikkerheten for personer, materielle verdier og miljø- og samfunnsmessige forhold ved brann er ivaretatt. Bygninger skal prosjekteres og dimensjoneres for den brannenergien og brannforløpet som kan forventes i byggverket. Det har vært lite endringer i reglene for hvordan parkeringshus skal brannsikres de siste tiårene, så spørsmålet er om moderne biler har større sannsynlighet for brannspredning og større utviklingspotensial enn det er antatt i regelverket.

En gjennomgang av forskningen som er gjort angående forbrenningseffekt og spredning ved bilbrann viser at det er store forskjeller for hvordan en bilbrann utvikler seg. Tiden til maksimal forbrenningseffekt oppnås er fra 10 til 67 minutter. Ved en lang vekstfase vil brannvesenet mest sannsynlig varsles og slokke brannen før den kommer ut av kontroll.

Simuleringer har vist at vinden kan ha stor påvirkning på brannutviklingen i et åpent parkeringshus.

Store parkeringshus bør i større grad seksjoneres og/eller bygges med sprinkleranlegg. Dette er i henhold til VTEK som angir største areal uten seksjonering, men dette har ikke blitt fulgt i praksis uten noen videre analyser. Hadde parkeringshuset ved Stavanger lufthavn vært seksjonert og bygd med korrekt brannmotstand i henhold til VTEK hadde ikke konsekvensene blitt så store.

Åpne parkeringshus som bygges etter reglene med høy nok brannmotstand, seksjonering og/eller sprinkler, og i tillegg har automatisk brannalarmanlegg skal være godt nok prosjektert med henhold til brannsikkerhet.

Innholdsfortegnelse

1	Innledning	7
1.1	Bakgrunn.....	7
1.2	Formål og problemstilling.....	8
1.3	Avgrensninger	9
1.4	Rapportstruktur	9
2	Teori og kunnskapsgrunnlag	10
2.1	Brannteori.....	10
2.1.1	Brannfirkanten	10
2.1.2	Brannutvikling	12
2.1.3	Brann og røykspredning	13
2.1.4	Forbrenningseffekt.....	14
2.1.5	Dimensjonerende brannscenario og brann	15
2.1.6	Brannmotstand på bygningsdeler	16
2.2	Brannmodellering	17
2.2.1	Fire Dynamics Simulator.....	18
2.3	Regelverk	19
2.3.1	Byggteknisk forskrift (TEK17)	19
2.3.2	Byggesaksforskriften	22
2.3.3	Forskrift om brannforebygging	23
2.3.4	Regelverk i andre land.....	24
2.4	Prosjektering av parkeringshus	25
2.4.1	Stavanger lufthavn Sola.....	25
2.4.2	Trondheim	27
2.5	Tidligere hendelser	28
2.5.1	Solabrannen	28

2.5.2	Kings dock parkeringshus Liverpool	29
2.5.3	Andre branner	30
2.6	Litteraturstudium	31
2.6.1	Design av biler	31
2.6.2	Brannutvikling ved bilbrann	32
2.6.3	Brannutvikling i parkeringshus	37
2.6.4	Vindeffekt på brann.....	40
2.6.5	Statistikk brann i parkeringshus	40
3	Brannsimulering.....	44
3.1	Metode	44
3.2	Sensitivetsanalyse av cellestørrelser.....	47
3.3	Resultat.....	47
4	Diskusjon.....	49
5	Konklusjon.....	54

Figurliste

Figur 1a: Branntrekanten	Figur 1b: Brannfirkanten	10
Figur 2: Fasene i en brann (Fra referanse [9]).		12
Figur 3. Eksempel på dimensjonerende brann (Fra referanse[9]).		15
Figur 4. Utformingen av parkeringshuset brukt i simuleringene.		44
Figur 5. Forbrenningseffekt i simuleringene.		48

Tabelliste

Tabell 1. Brannklassene.	20
Tabell 2. Plassering av parkeringshus i brannklasse.	21
Tabell 3. Preaksepterte ytelser for brannmotstand på bæresystemet.	21
Tabell 4. Størrelser på brannseksjoner.	22
Tabell 5. Tiltaksplassering for utforming av brannkonsept.	22
Tabell 6. Joyeux sine forsøk.	33
Tabell 7. Forbrenningseffekt.	36
Tabell 8. Tid til maksimal forbrenningseffekt.	37
Tabell 9. Antall branner i åpne parkeringshus i Paris mellom 95-97.	40
Tabell 10. Branner i parkeringshus i Brüssel.	41
Tabell 11. Branner i parkeringshus i Berlin.	41
Tabell 12. Sammenligning av statistikk angående brann i parkeringshus.	43
Tabell 13: Størrelser på Norges mest solgte biler i 2019.	45
Tabell 14. Parametre brukt i simuleringene.	45
Tabell 15: Brannscenarioene i FDS-simuleringene.	46
Tabell 16. Sensitivitetsanalyse cellestørrelse.	47
Tabell 17. Forhold mellom vind og brannspredning.	48

Begreper

Brannenergi – Summen av varmemengde som frigis ved forbrenning av alle faste og mobile brennbare materialer i et område.

Brannkonsept - sammenstilling av krav og ytelse som er grunnlaget for detaljprosjektering, og vil også vanligvis omfatte branntegninger.

Brann- og eksplosjonsvernloven – kortformen av Lov om vern mot brann, eksplosjon og ulykker med farlig stoff og om brannvesenets redningsoppgaver. Forvaltes av Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap.

Dimensjonerende spesifikk brannenergi – Spesifikk brannenergi som anvendes for å fastsette termiske påvirkninger ved branndimensjonering. Verdien tar hensyn til usikkerheter.

Funksjonskrav – overordnet formål eller oppgave som skal oppfylles i det ferdige byggverket.

Preakseptert ytelse – ytelse angitt av Direktoratet for byggkvalitet, og som vil oppfylle, eller bidra til å oppfylle, ett eller flere funksjonskrav i byggteknisk forskrift.

Spesifikk brannenergi – Brannenergi per arealenhet. Arealenheten kan være relatert til gulvarealet eller til hele omhyllingsflaten.

Ytelse – teknisk, bruks- eller miljømessig kvalitet, kapasitet eller egenskap ved byggverk, bygningsdel, installasjon eller utearealer. En ytelse er en tolkning og konkretisering av funksjonskrav og er angitt kvantitativt eller kvalitativt.

Forkortelser

Pbl - Lov om planlegging og byggesaksbehandling eller på kortform plan- og bygningsloven. Forvaltes av Direktoratet for byggkvalitet.

SAK – byggesaksforskriften

TEK – Byggteknisk forskrift

VTEK – veiledningen til byggteknisk forskrift

1 Innledning

1.1 Bakgrunn

7 januar 2020 begynte en Opel Zafira å brenne inne i parkeringshuset ved Stavanger lufthavn Sola. Brannen spredte seg raskt til andre biler, og når brannvesenet kom på stedet var brannen allerede ute av kontroll. Det var sterk vind på branndagen som kan ha bidratt til den raske utviklingen. Omtrent to timer etter brannstart kollapset en del av parkeringshuset der bæresystemet var i ubeskyttet stål. Av en total kapasitet på 3000 biler var det på branntidspunktet 1600 biler i anlegget og mange av disse ble i varierende grad påført skader[1]. Delen som kollapset skal rives sammen med de 400 bilene som står parkert der. Det var heldigvis ingen personskader i hendelsen, men de økonomiske konsekvensene er enorme.

Det er sjeldent at en bil begynner å brenne inne i et parkeringshus, men når det først skjer kan det få store konsekvenser. Det har vært flere store og alvorlige branner i parkeringshus, blant annet på Sola og i Liverpool der 1150 biler gikk tapt i tillegg til at bygget måtte rives[2]. Det teknologiske fremskrittet har også endret sammensetningen i biler, der moderne biler har mer brennbart materiale og mer brannenergi enn eldre biler[3]. I tillegg har det kommet biler med alternative drivstoff, som hydrogen og elbiler.

Byggereglene skal sørge for at byggverk prosjekteres og utføres slik at sikkerheten for personer, materielle verdier og miljø- og samfunnsmessige forhold ved brann er ivaretatt[4]. Bygninger skal prosjekteres og dimensjoneres for den brannenergien og brannforløpet som kan forventes i byggverket. Det har vært lite endringer i reglene for hvordan parkeringshus skal brannsikres de siste tiårene, så spørsmålet er om moderne biler har større sannsynlighet for brannspredning og større utviklingspotensial enn det er antatt i regelverket.

Det er to metoder for å undersøke utviklingen ved brann i en bil, fullskalaforsøk og simulering med datamaskiner. Fullskalaforsøk er dyrt og tidskrevende, men gir de mest realistiske resultatene. Det har blitt utført en del forskning, som gjennomgås senere i oppgaven, både når det gjelder forbrenningseffekt og spredning ved en bilbrann. Simulering har etter hvert blitt et reelt alternativ for å utforske de forskjellige aspektene ved en brann. Siden det er vanskelig å kontrollere alle parametre er det en del antakelser og betraktninger

som må gjøres, så det vil være usikkerhet tilstede. I denne oppgaven utføres det flere simuleringer for å undersøke hvordan vinden påvirker brannspredning i parkeringshus.

Det finnes forskjellige typer parkeringshus, åpne, lukkede eller underjordiske. Åpne parkeringshus har veggene eller deler av veggene åpne, lukkede har hele vegger, mens underjordiske er under jorda og dermed også lukkede. Parkeringshusene kan være selvstående eller være sammenkoblet andre bygninger. De kan være bygget for parkering ved flyplasser, hotell, kjøpesenter, boligbygg, eller for å gi flere parkeringsplasser i bysentrum. På grunn av forskjeller i ventilasjon kan en brann utvikle seg annerledes i et åpent parkeringshus i forhold til et lukket. I et åpent parkeringshus vil det alltid være tilgang til luft som gjør at brannen kan brenne fritt til den enten slokkes eller alle brennbare materialer har brent bort. I et lukket parkeringshus er det begrenset tilgang til luft i tillegg til vegger som hindrer røygassene i å ventileres ut. På grunn av dette har det vært en konsensus at brann i lukkede parkeringshus er mer alvorlige enn brann i åpne.

1.2 Formål og problemstilling

Formålet med oppgaven er som overskriften sier å evaluere brannsikkerheten i åpne parkeringshus på bakgrunn av det regelverket som finnes i dag.

På veien dit er det flere spørsmål som må svares på, blant annet:

- Hva er bakgrunnen for at regelverket er formet som det er, og hva bygger det på?
- Er det sannsynlig at det forekommer brannspredning mellom biler ved en bilbrann?
- Er brannenergien i et parkeringshus større enn antatt?
- Brannvesenet pekte på vinden ved brannen i parkeringshuset ved Stavanger lufthavn som et avgjørende moment for at brannen ble så stor. Hvilken påvirkning har vinden for spredning og utvikling av en brann?
- Hvordan påvirker en brann i åpne parkeringshus de bærende konstruksjonene?

Til slutt konkluderes det og hovedproblemstillingen blir dermed:

Er regelverket for brannsikring av åpne parkeringshus i Norge godt nok i forhold til den risikoen en brann utgjør?

1.3 Avgrensninger

Selv om mange av spørsmålene som stilles i forrige avsnitt gjelder bilbrann og bilbrann i parkeringshus generelt, er hovedfokuset til denne oppgaven brann i åpne parkeringshus. Regelverket, litt avhengig av størrelse på parkeringshuset, differensierer mellom parkeringshus med åpne vegger mot friluft og lukkede.

1.4 Rapportstruktur

Kapittel 1 består av innledning, bakgrunn for oppgaven og problemstilling. Kapittel 2 inneholder teori og kunnskapsgrunnlag. Der blir byggreglene forklart, tidligere hendelser med brann i parkeringshus gjennomgått, og det blir gjennomført et litteraturstudium. I kapittel 3 utføres det brannsimuleringer for å undersøke vindens påvirkning på brannspredning i parkeringshus, før oppgaven avsluttes med diskusjon av funnene og konklusjon.

2 Teori og kunnskapsgrunnlag

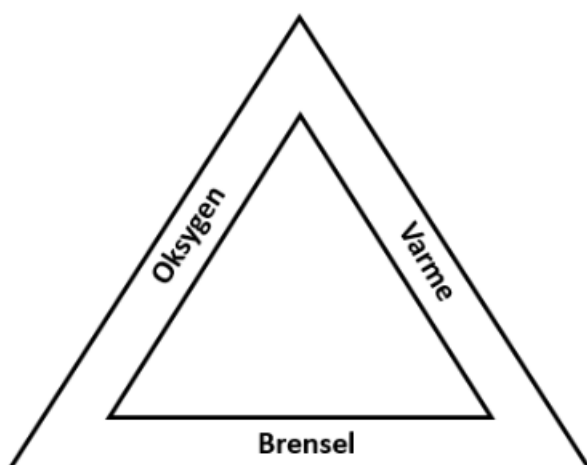
Dette kapitlet gir først en grunnleggende innføring i relevante temaer angående risiko og brannteori

2.1 Brannteori

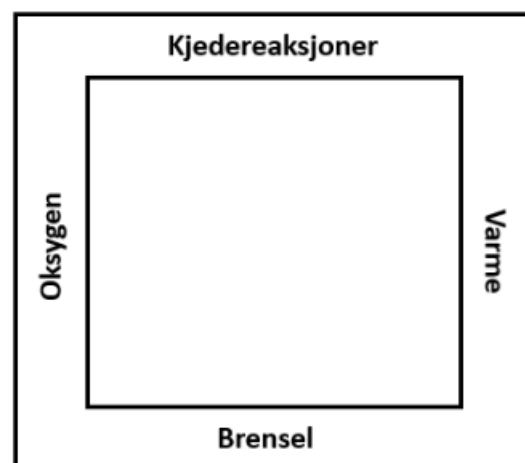
En brann er definert som en uønsket eller ukontrollert forbrenningsprosess som kjennetegnes av varmeavgivelse ledsaget av røyk, flamme eller gløding[5]. Det er en kompleks prosess som inneholder flere kjemiske og fysiske delprosesser som blant annet antennelse, forbrenning og brann- og røykspredning, noe som gjør det vanskelig å forutse hvordan en brann vil utvikle seg. Videre i dette kapitlet utdypes noen av disse prosessene og hvordan en kan gå frem for å modellere en brann.

2.1.1 Brannfirkanten

Opprinnelig ble det antatt at tre elementer måtte være til stede for å starte en brann; brennbart material, oksygen og varme[6]. Dette ble illustrert, og blir det fortsatt i allmennheten, gjennom branntrekanten som vist i figur 1a. Etter hvert som det er kommet mer kunnskap om fenomenet brann, er det funnet at det også må være frie radikaler og kjedereaksjoner tilstede[7]. Branntrekanten blir dermed utvidet til en brannfirkant som vist i figur 1b.



Figur 1a: Branntrekanten



Figur 1b: Brannfirkanten

Brensel finnes i tre aggregattilstander, fast stoff, væske eller gass[6]. For at en brann skal kunne oppstå, må brenselet være i gassform, så faste stoffer og væsker må omdannes til gass før de brenner[8]. For væsker skjer dette ved at det fordampes og gassen antennes når den blandes med luft. Faste stoffer kan antennes enten ved at de først smelter før de fordampes, sublimerer (direkte fra fast stoff til gass) eller pyrolyse. Pyrolyse er en irreversibel kjemisk spaltning av et fast stoff under påvirkning av varme som fører til at stoffet avgir gasser direkte[5].

Oksygen til være tilgjengelig gjennom luft som blir trukket inn i forbrenningssonen på grunn av trykk og tetthetsforskjeller. Hvor mye oksygen som trengs for å få en antennelse og holde forbrenningen i gang kommer an på temperatur, trykk og den kjemiske sammensetningen av stoffet[7]. Luft inneholder ca 21% oksygen og tilfører dermed forbrenningen oksygen så lenge lufttilførselen er tilfredsstillende. Hvis lufttilgangen hindres kan det etter hvert oppstå oksygenmangel. Dette skjer vanligvis ved at brannen har fått utviklet seg så mye at all oksygen i rommet er brukt opp, og at det må tilføres mer luft for at brannen skal kunne fortsette.

For å få en antennelse må det frigjøres tilstrekkelig energi fra en kjemisk reaksjon til at reaksjonen kan fortsette uten ekstern energitilførsel[8]. Deretter for at forbrenningen skal kunne opprettholdes må energiproduksjonen være større enn energitapet. I en brann blir energi produsert som varme, så varme må tilføres eller produseres av materialet selv for å få en antennelse, og varmeproduksjonen i forbrenningssonen må være større enn varmetapet for at brannen skal fortsette. Flammepunktet til et stoff er den laveste temperaturen der det avgir tilstrekkelig mengde brennbar gass til å antennes momentant ved eksponering for flamme[5]. Antennelsestemperaturen til et stoff er den laveste temperaturen der flammen er vedvarende. Flammepunkt skiller seg dermed fra antennelsestemperatur ved at forbrenningen ikke vedvarer.

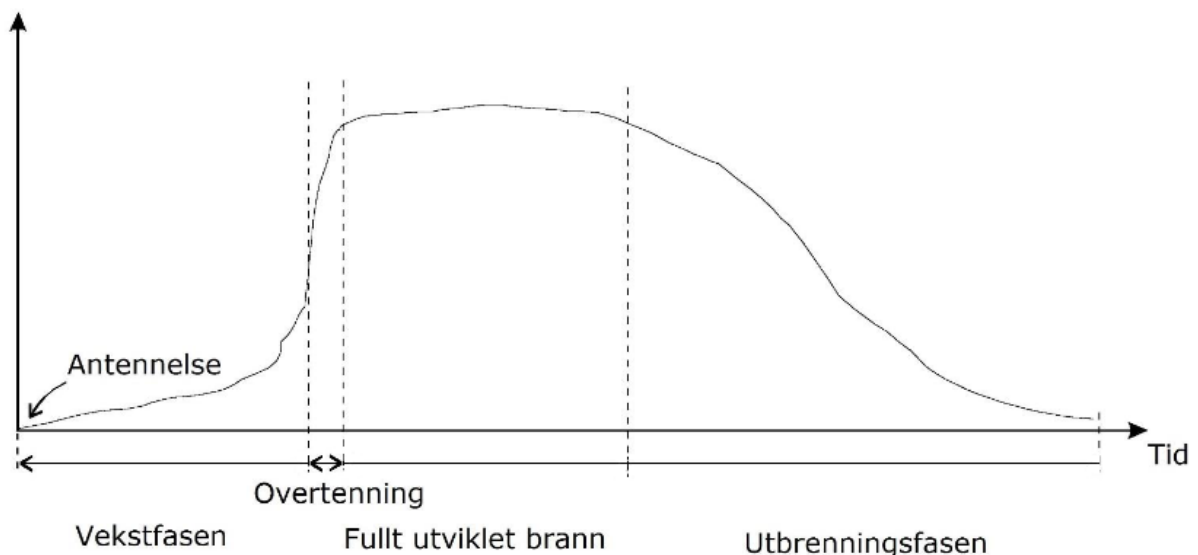
For at en brann skal starte og vedvares må brensel reagere med oksygen i lufta og danne produkter[8]. Ved en fullstendig forbrenning er det et ideelt forhold mellom brensel og oksygen, og alle reaktantene reagerer og danner produkter. Dette er imidlertid uvanlig i virkeligheten der blandingsforholdet mellom luft og brensel vil være varierende, og det vil forekomme ufullstendig forbrenning. I en ufullstendig forbrenning vil deler av de opprinnelige reaktantene også være en del av sluttproduktene. Man skiller mellom to typer

ufullstendige forbrenninger, brenselrik og brenselfattig. I en brenselrik forbrenning er det underskudd av oksygen slik at ikke all brensel blir forbrukt, mens i en brenselfattig forbrenning er det underskudd på brensel.

De fire delene i brannfirkanten er altså brensel, varme, oksygen og kjedereaksjoner. For å slokke en brann kan man dermed fjerne brenselet, kjøle ned, hindre tilgang til oksygen, eller stoppe kjedereaksjonene.

2.1.2 Brannutvikling

En brann kan utvikle seg på mange forskjellige måter, avhengig av faktorer som brenselets egenskaper og plassering, hvor og hvordan antennelsen skjer, rommets/områdets geometri, ventilasjonsåpninger og de termiske egenskapene til vegger, tak, gulv og andre bygningsdeler[9]. En brann deles vanligvis inn i antennelsesfasen, vekstfasen, overtenning, fullt utviklet brann og utbrenningsfasen[7, 9]. Figur 2 viser hvordan temperaturen varierer i de forskjellige fasene. Brannen trenger ikke nødvendigvis å gå gjennom alle fasene, ofte blir den slokket av menneskelig inntreden, automatiske slokkeanlegg, eller det ikke er tilstrekkelig mengde luft eller brensel der det brenner.



Figur 2: Fasene i en brann (Fra referanse [9]).

Varme i en brann overføres ved varmeledning, konveksjon eller varmestråling[8].

Varmeledning er varmeoverføring i og gjennom faste stoffer, for eksempel hvordan varme ledes langs et langt metallrør. Konveksjon er varmeoverføring mellom væske eller gass og

faste stoffer, for eksempel varm røyk som varmer opp taket. Varmestråling er overføring av varme gjennom elektromagnetisk bølger.

Antennelse er en prosess som produserer en eksoterm reaksjon med temperatur klart høyere enn omgivelsestemperaturen[9]. Årsakene kan være mange, for eksempel en gnist, elektrisk feil, spontanantennelse eller selvantennelse. Denne fasen vil være kort, så når antennelse har funnet sted gå brannen over i vekstfasen.

Den viktigste faktoren for hvor raskt brannen utvikler seg i begynnelsen, er brenselets egenskaper som hvilket materiale, mengde, plassering og geometri[9]. En slik brann kalles brenselstyrt siden det er brenselet som er bestemmende for brannens videre utvikling. Etter hvert i vekstfasen kan brannen utvikle seg på tre måter[8]. Den kan slokke av seg selv uten at den sprer seg til andre materialer enn der antennelsen skjedde. Hvis brannen har forbrukt alt brennbart materiale der antennelsen skjedde og ikke har klart å spre seg videre, vil brannen gå til utbrenningsfasen og slokke.

Hvis det ikke er tilstrekkelig tilgang til luft, kan brannen bli ventilasjonsstyrt og enten slokke av seg selv, eller brenne med lav forbrenningshastighet. Hvis brannen etterhvert får tilført mer luft gjennom at dører åpnes eller vinduer knuses kan brannen blusse opp igjen.

Hvis det er god tilgang til brensel og luft, kan brannen utvikle seg til en fullt utviklet rombrann hvor brannen har spredt seg til alle brennbare overflater. Fullt utviklet brann er fasen der energiproduksjonen er på det høyeste, og brannen ikke kan bli større uten å spre seg til andre rom. Overgangen mellom vekstfasen og fullt utviklet brann kalles overtenning.

En fullt utviklet brann har et stort forbruk av brennbart materiale. Etter hvert som det blir brent opp, vil brannen begynne å minke i omfang og gå over i utbrenningsfasen. Ofte antas det at denne fasen starter når gjennomsnittstemperaturen har falt til 80% av den høyeste temperaturen i brannen[8].

2.1.3 Brann og røykspredning

I begynnelsen vil brannen produsere røykgasser som stiger mot taket i en røyksøyle på grunn av temperatur- og tetthetsforskjeller. I begynnelsen i vekstfasen mens temperaturen enda er forholdsvis lav er det varmeledning og konveksjon som bidrar til varmetransporten.

Varmeledning skjer ved at varme materialer kommer i kontakt med andre brennbare

materialer. Varmeoverføring ved konveksjon skjer ved at det varme røyksjiktet varmer opp overflater i rommet. Etter hvert som brannen utvikler seg med en større flamme og varmere røyksjikt, vil varmestrålingen bidra med videre oppvarming av overflatene som gjør at de kan antennes lettere. Temperaturen og tykkelsen på røyksjiktet vil dermed føre til raskere brannspredning. Turbulens bidrar til å trekke luft inn i søylen slik at en blanding av varme røykgasser og luft stiger mot taket og brer seg utover[9]. I et rom med høy takhøyde blir mye luft trukket inn i søylen slik at temperaturen kan være ganske lav. I et rom med lav takhøyde vil mindre luft blandes inn i røyksøylen så temperaturen og varmeoverføringen til brannen og andre overflater vil være større. Flammehøyden kan også nå opp til taket og deretter spre seg horisontalt, noe som vil øke tilbakestrålingen kraftig. I et rom vil røyksøylen treffe veggene, og røyksjiktet vil synke ned mot gulvet etter hvert som det produseres mer røykgasser. Siden et åpent parkeringshus ikke har fulldekkende vegger, vil røykgassene ventileres ut i motsetning til et rom der veggene holder de igjen. Men dersom brannen får utviklet seg, kan den lave takhøyden øke brannspredningen hurtig.

2.1.4 Forbrenningseffekt

I de eksoterme reaksjonene som foregår i en brann, vil det bli produsert energi som varme. Varmeproduksjonen er kanskje den viktigste variabelen når man skal beskrive en brann, og derfor vanlig å bruke for å modellere en brann kvantitativt[6]. På engelsk kalles det heat release rate eller HRR. På norsk bruker Hagen varmeproduksjon, mens KBT bruker forbrenningseffekt[5, 7]. Videre i denne oppgaven blir forbrenningseffekt brukt, som kan uttrykkes på følgende måte[9]:

Formel 1. Forbrenningseffekt.

$$\dot{Q} = A_t \dot{m}'' \chi \Delta H_c$$

Hvor:

\dot{Q} er forbrenningseffekten eller energiproduksjonen [kW]

A_t er brannens areal [m^2]

\dot{m}'' er massetapsrate per areal [kg/m^2s]

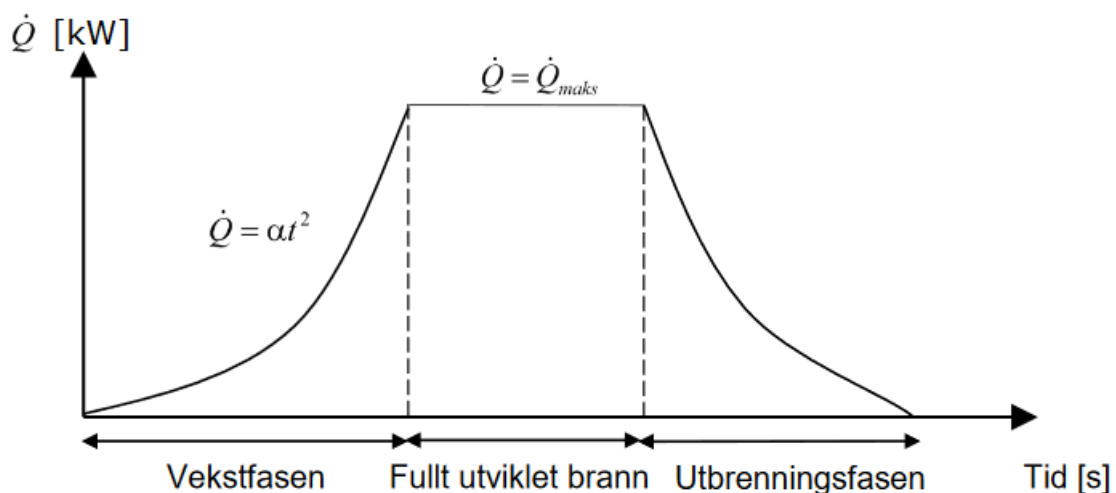
χ er forbrenningseffektiviteten [-]

ΔH_c er brenselets forbrenningsvarme [MJ/kg]

Den vanligste måten å måle forbrenningseffekten på er med et konkolorimeter[9]. For de fleste brennbare stoffer frigis en nokså lik mengde energi per enhet oksygen som reagerer i forbrenningen, 13 100kJ/kg. Et konkolorimeter måler denne mengden, og forbrenningseffekten kan dermed fastslås med ganske stor nøyaktighet.

2.1.5 Dimensjonerende brannscenario og brann

En dimensjonerende brann er en kvantitativ beskrivelse av antatte karakteristiske parametre ved brann innenfor det dimensjonerende brannscenario[5]. Viktige variabler er type og mengde brennbart materiale, forbrenningseffekt, antennelsesmetode, brannvekst, flammespredningshastighet, utbrenningsfasen og hvordan brannen vil slukke. Fastsettelse av disse variablene baserer seg på mange antagelser, så det vil alltid være usikkerhet knyttet til valget[10]. Det er ikke noen eksakt metode eller standard for å fastsette en dimensjonerende brann[9]. Ingeniøren må bruke den informasjonen han har om bygget og innholdet, og selv avgjøre hvilke variabler og verdier som skal brukes. Deretter gjøres en sensitivitetsanalyse for å sjekke løsningene. En enkel måte å sett opp en dimensjonerende brann er å dele brannutviklingen inn i en vekstfase, en stabil fase og en utbrenningsfase, som vist i figur 3.



Figur 3. Eksempel på dimensjonerende brann (Fra referanse[9]).

Den vanligste måten å modellere den dimensjonerende brannen er en beskrivelse av antatt forbrenningseffekt som funksjon av tid[11].

2.1.6 Brannmotstand på bygningsdeler

Brannmotstanden til en bygningsdel forklarer hvor lang tid bygningsdelen kan opprettholde sine vesentlige ytelser som bæreevne, integritet og isolasjonsevne når den prøves i en ovn hvor temperaturen styres i henhold til standard tid-temperaturkurve. Forkortelsene som brukes er R for bæreevne, E for integritet og I for isolasjon. Bæreevne (R) er definert som en bygningsdels evne til å motstå brannpåkjenningen på én eller flere sider i den aktuelle tidsperioden, uten at den mister nødvendig bæreevne og stabilitet, når den samtidig er påført en mekanisk last. Integritet (E) er definert som bygningsdelens evne til å motstå brannpåkjenningen på én av sidene, uten at brannen smitter igjennom som følge av gjennomtrengning av flammer eller varme gasser. Isolasjon (I) er definert som evnen til å motstå brannpåkjenning på én av sidene, uten at brannen overføres til baksiden som en følge av betydelig varmegjennomgang (varmeledning). Varmeledningen må være så begrenset at verken overflaten på baksiden eller andre materialer i nærheten av denne blir antent. Tiden blir angitt i minutter og disse er 15, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 180, 240.

Det kan også settes krav til overflaten til bygningsdelene, der overflaten er det ytterste laget på en bygningsdel. Hovedklassene er A1, A2, B, C, D, E og F der produkter i klasse A1 er ubrennbare og produkter i klasse F ikke har noen bestemt ytelse når det gjelder egenskaper ved brannpåvirkning. Underklassene er s1, s2 og s3 for røykproduksjon og d0, d1 og d2 for brennende dråper. Klasse s1 betyr liten røykproduksjon og s3 i motsatt ende har ingen begrensning for røykproduksjon. D0 betyr at det ikke oppstår flammende dråper eller partikler, med d2 i motsatt ende.

En bygningsdel med brannmotstand EI 30 skal dermed ikke miste sin integritet eller isolasjonsevne i løpet av minimum 30 minutter. En bygningsdel med brannmotstand R 90 A1-s1,d0 skal opprettholde bæreevnen i minst 30 minutter samtidig som den er ubrennbar og liten eller ingen røykproduksjon og brennende dråper eller partikler.

2.2 Brannmodellering

Etter hvert som forståelsen for de fysiske egenskapene til en brann har utviklet seg, har det blitt laget flere typer modeller for å simulere utviklingen til en brann. Disse modellene kan enten være probabilistisk eller deterministisk. En probabilistisk beregningsmodell behandler fenomener som en serie av påfølgende hendelser eller tilstander, med matematiske regler som styrer overgang fra en hendelse til en annen, og med sannsynlighet knyttet til hver overgang[5]. En deterministisk beregningsmodell bruker vitenskapelig baserte matematiske uttrykk til å produsere det samme resultat hver gang metoden anvendes med det samme settet av inngangsdata. De deterministiske beregningsmodellene når det gjelder brannsimulering kan deles inn i tre kategorier, håndberegninger, to-sone modeller og computational fluid dynamics (CFD)[9]. Disse beregner de fysiske egenskapene ved en brann ved å bruke lovene om konservering av masse, energi og momentum. Disse utledes deretter og gir ett sett av forskjellige differensialligninger.

Håndberegninger er den minst avanserte metoden, og den eneste modellen man kan bruke uten å bruke datamaskiner. Ved å bruke flere antagelser og tilnærminger har det blitt utledet flere forenklete ligninger for å beregne for eksempel forbrenningseffekt, flammehøyde eller temperatur og hastighet i røyksøylen.

To-sone modeller deler rommet opp i et varmt øvre lag, og et kaldt nedre lag. Ligningene for konservering av masse og energi løses numerisk for begge soner for hvert tidssteg. Ligningen for konservering av momentum brukes ikke direkte, istedenfor beregnes hastighet og trykk i rommet ved å bruke forenklete analytiske løsninger.

CFD er den mest avanserte av disse modellene, og brukes for å løse problemer innenfor mange flere emner enn kun brann. CFD løser problemet ved å dele rommet eller området inn i et stort antall kontrollvolum til et nettverk av celler. Deretter blir tilstanden i hver celle beregnet ved å bruke lovene for konservering av masse, energi og momentum gjennom tredimensjonale, tidsavhengige, ikke-lineære, partielle differensialligninger som kalles Navier-Stokes ligningene[12]. For å beregne alle tilstandene ved en brann er det i tillegg flere sub-prosesser som må modelleres, som for eksempel forbrenningsmodell, turbulens og strålingsmodell. Det finnes flere typer CFD-programmer på markedet. Fluent, ANSYS og COMSOL er eksempler på program med mange forskjellige bruksområder, mens

Smartfire, Kameleon FireEx og Fire Dynamics Simulator er eksempler på programmer som kun er utviklet for brannproblematikk.

2.2.1 Fire Dynamics Simulator

Programmet som blir brukt til modellering i denne oppgaven er Fire Dynamics Simulator (FDS) versjon 6 som er utviklet og utgitt av National Institute of Standards and Technology (NIST) i USA. FDS og visualiseringsprogrammet som følger med, Smokeview, er fritt tilgjengelig på hjemmesiden til NIST. FDS er validert til å beskrive prosessene ved en brann på en realistisk måte.

FDS er et program for brannsimulering basert på CFD med fokus på transport av røyk og varme ved branner. FDS løser numerisk en form av Navier-Stokes ligningene for termisk drevne lavhastighetsstrømninger. Turbulens modelleres gjennom Large Eddy Simulation (LES) der de store strømvirvlene beregnes ved bruk av ligningene for termodynamikk, mens de mindre virvlene gjennomsnittsberegnes eller ignoreres.

Som i alle typer brannmodellering krever ei simulering i FDS at et stort antall variabler fastsettes som beskriver geometri, materialer og egenskaper ved brannen.

Forbrenningseffekten er den viktigste fysiske variabelen, siden den avgjør energiproduksjonen. Cellestørrelsen er en annen variabel som kan ha stor innvirkning på resultatene. De fysiske egenskapene beregnes uniformt i hver celle, så for å få de mest nøyaktige resultatene bør cellene være så små som mulige. Veldig små celler krever imidlertid enorm datakapasitet, så det er vanlig å utføre en sensitivitetsanalyse for forskjellige cellestørrelser for å undersøke hvordan resultatene endrer seg. Hvis cellestørrelsen halvreres, øker simuleringstiden 16 ganger så det er vanlig å gjøre en avveining mellom simuleringens nøyaktighet og simuleringstid.

En sensitivitetsanalyse angående cellestørrelse kan utføres ved å begynne med en relativt stor celle, og deretter redusere størrelsen inntil resultatene ikke endrer seg nevneverdig.

2.3 Regelverk

Det er plan- og bygningsloven og brann- og eksplosjonsvernloven som regulerer brann sikkerheten i bygg i Norge. Begge lover har i tillegg forskrifter som utdyper og utfyller lovenes bestemmelser, blant annet byggt teknisk forskrift (TEK) og byggesaksforskriften (SAK) tilhørende pbl , og forskrift om brannforebygging (FOB) tilhørende brann- og eksplosjonsvernloven som er de relevante for denne oppgaven. Forskriftene blir igjen utdypet mer i hver sin veiledning, veiledning om tekniske krav til byggverk (VTEK) og veiledning til forskrift om brannforebygging. TEK trekker opp grensen for det minimum av egenskaper et byggverk må ha for å kunne oppføres lovlig i Norge, mens forskrift om brannforebygging beskriver forebyggende plikter for byggverk allerede i bruk[4, 13].

2.3.1 Byggt teknisk forskrift (TEK17)

Det har gjennom historien vært flere forskjellige versjoner av byggt teknisk forskrift. Nåværende utgave tredde i kraft i 2017 og kalles dermed TEK17. De tidligere utgavene kalles TEKXX der XX er de to siste tallene i årstallet forskriften ble utgitt. Bygg skal bygges etter gjeldende regler så bygg prosjektert etter 2017 skal være i henhold til TEK17, mens bygg prosjektert mellom 2010 og 2017 skulle være i henhold til TEK10. Hvis det har vært endringer fra en versjon til den neste kan dermed samme type bygg være prosjektert etter forskjellige regler, for eksempel kan kravene til bæresystemet i et parkeringshus bygd i 1998 være forskjellig fra et parkeringshus bygd i 2019 hvis kravene i byggt teknisk forskrift har endret seg.

Det skal dokumenteres skriftlig at kravene i TEK er oppfylt. Kravene i TEK er enten gitt som ytelser eller funksjonskrav. Ytelser skal oppfylles, mens oppfyllelse av funksjonskravene skal dokumenteres enten ved bruk av preaksepterte ytelser, eller ved analyse som viser at ytelsene oppfyller funksjonskravene. Preaksepterte ytelser er ytelser gitt av Direktoratet for byggkvalitet og ved bruk av disse anses funksjonskravene som oppfylt. I mange byggeprosjekter er det vanlig å velge en kombinasjon av preaksepterte ytelser og analyse. De preaksepterte ytelsene brukes da så langt det passer, og for de delene av bygget der det gjøres fravik gjøres det analyse. Analysen skal dokumentere at de alternative ytelsene totalt sett gir minst samme kvalitet og sikkerhet som om de preaksepterte ytelsene var fulgt.

Omfanget av analysen er avhengig av hvor omfattende fravik som er gjort fra de preaksepterte ytelsene, og analysen skal angi nødvendige sikkerhetsmarginer.

Sikkerhet mot brann er viet et eget kapittel i TEK med tiltak for å sikre at byggverk prosjekteres og utføres slik at det oppnås tilfredsstillende sikkerhet ved brann. Det følgende er derfor hentet fra [4] og [14].

Ut fra den trusselen en brann kan innebære for skade på liv og helse, plasseres byggverk eller ulike bruksområder i et byggverk i risikoklasser. Risikoklasse og antall etasjer brukes deretter til å plassere byggverket i en brannklasse. Brannklasse klassifiserer byggverk ut fra konsekvensen en brann kan innebære for skade på liv, helse, samfunnsmessige interesser og miljø, vist i tabell 1.

Tabell 1. Brannklassene.

Brannklasse	Konsekvens
1	Liten
2	Middels
3	Stor
4	Særlig stor

Brannklassen skal legges til grunn for prosjekteringen og utførelsen for å sikre byggverkets bæreevne ved brann. Preaksepterte løsninger kan kun brukes for byggverk i brannklasse 1,2 og 3, dvs at brannsikkerheten i brannklasse 4 alltid må dokumenteres ved bruk av analyse. Byggverk i brannklasse 4 er byggverk der brann kan utgjøre stor fare for miljøet eller berøre andre vesentlige samfunnsinteresser, og skal dermed prosjekteres og utføres slik at sannsynligheten for skade på miljøet eller andre vesentlige samfunnsinteresser blir liten. Dette kan være byggverk som utgjør en vesentlig del av samfunnets infrastruktur for eksempel knyttet til transport (flyplasser, jernbanestasjoner mv.), telekommunikasjon, byggverk for kjemisk industri og miljøfarlig produksjon og byggverk hvor det lagres særlig brann- eller miljøfarlige stoffer.

Ifølge beskrivelsene i VTEK er parkeringshus med to eller flere etasjer eller plan risikoklasse 2 og brannklasse som vist i tabell 2 utfra antall etasjer.

Tabell 2. Plassering av parkeringshus i brannklasse.

Risikoklasse	Antall etasjer			
	1	2	3 og 4	5 eller flere
2	Brannklasse 1	Brannklasse 1	Brannklasse 2	Brannklasse 3

Brannklassen avgjør deretter hvilke egenskaper bæreevnen skal ha. Bæresystemet i brannklasse 1 og 2 skal dimensjoneres for å kunne opprettholde tilfredsstillende bæreevne og stabilitet i minimum den tiden som er nødvendig for å rømme og redde personer og husdyr i og på byggverket. Bæresystemet i brannklasse 3 og 4 skal dimensjoneres for å kunne opprettholde tilfredsstillende bæreevne og stabilitet gjennom et fullstendig brannforløp. De preaksepterte ytelsene for bæresystem vises i tabell 3.

Tabell 3. Preaksepterte ytelser for brannmotstand på bæresystemet.

Bygningsdel	Brannklasse		
	1	2	3
Bærende hovedsystem	R 30	R 60	R 90 A2-s1, d0
Sekundære, bærende bygningsdeler, etasjeskillere og takkonstruksjoner som ikke er en del av hovedbæresystem eller stabiliserende	R 30	R 60	R 60 A2-s1, d0

Hvis parkeringshus i brannklasse 1 og 2 har mer enn 1/3 av veggflatene åpne kan bygget oppføres med brannmotstand R 15 A2-s1,d0 dersom nødvendig tid til rømning og sikkerhet for brannmannskaper er ivaretatt. Dette unntaket er likt i VTEK17 og VTEK10 der det bare gjelder brannklasse 1 og 2, men i VTEK97 gjelder det brannklasse 3 også.

§11-7 beskriver brannseksjonering, som er et tiltak mot antennelse, utvikling og spredning av brann og røyk. Et byggverk kan deles opp i brannseksjoner for å sikre liv og helse der rømning og redning kan ta tid, hindre urimelig store økonomiske eller materielle tap, og bidra til at en brann begrenses til brannseksjonen der den startet[4]. Tabell 4 viser hva VTEK sier om størrelse på brannseksjon.

Tabell 4. Størrelser på brannseksjoner.

Spesifikk brannenergi MJ/m ²	Største bruttoareal i m ² pr. etasje uten seksjonering			
	Normalt	Med brannalarmanlegg	Med sprinkleranlegg	Med røykventilasjon
Over 400	800	1200	5000	Uegnet
50-400	1200	1800	10 000	4000
Under 50	1800	2700	Ubegrenset	10 000

§11-12 beskriver tiltak for å påvirke rømning- og redningstider. Parkeringshus i risikoklasse 2 skal ha brannalarmanlegg hvis samlet bruttoareal er større enn 1200 m², eller alternativt automatisk sprinkleranlegg. Dersom 1/3 av veggflatene på hvert plan er åpne mot det fri over ferdig planert terreng, og øverste parkeringsflate er mindre enn 16 meter over planert terreng, kan parkeringshuset oppføres uten brannalarmanlegg eller automatisk sprinkleranlegg når åpningene er plassert slik at det oppnås god utlufting.

2.3.2 Byggesaksforskriften

Byggesaksforskriften setter krav om kontroll av prosjekteringen som er utført. Utfra kompleksitet, vanskelighetsgrad og mulige konsekvenser mangler og feil kan få for helse, miljø og sikkerhet deles tiltak inn i tiltaksklasse 1, 2 eller 3[15]. Tiltaksklasse 1 omfatter de enkleste tiltakene og oppgavene, mens tiltaksklasse 3 omfatter de mest kompliserte. Tiltaksklassen har også betydning for hvilke krav som stilles til foretakenes kompetanse. Tabell 5 viser en oversikt over kriterier for tiltaksklasseplassering når det gjelder utforming av brannkonsept.

Tabell 5. Tiltaksplassering for utforming av brannkonsept.

Tiltaksklasse 1	Tiltaksklasse 2	Tiltaksklasse 3
Byggverk i brannklasse 1 og risikoklasse 1,2 og 4 som prosjekteres ved bruk av preaksepterte løsninger.	Byggverk i brannklasse 1 og risikoklasse 3,5 og 6. Byggverk i brannklasse 2 og risikoklasse 1,2 og 4. Prosjekteres ved bruk av preaksepterte løsninger.	Byggverk i alle brannklasser og alle risikoklasser. Godkjenningssområdet omfatter også helhetlig brannkonsept for byggverk med fravik fra preaksepterte ytelser.

Fastsettelse av tiltaksklasse henger altså nært sammen med fastsettelse av risiko- og brannklasse. Forskriften stiller også krav til kvalitetssikring av prosjekteringen som er gjort. Alle foretak som erklærer ansvarsrett skal ha skriftlige rutiner for kvalitetssikring som sikrer at de tekniske kravene i plan- og bygningsloven blir oppfylt. For tiltak i tiltaksklasse 2 og 3 skal det også utføres uavhengig kontroll av brannkonseptet, dvs kontrolleres av et foretak som ikke har utført arbeidet. Det skal påvises i kontrollen at brannkonseptet definerer de nødvendige ytelsene (kravene) som skal oppfylles i detaljprosjekteringen og at det er verifisert at forskriften er oppfylt. Gjennomføring av kontrollen utføres og dokumenteres i to deler – en overordnet kontroll av dokumentasjonen og en kontroll av verifikasjonen når brannsikkerheten er verifisert ved analyse.

2.3.3 Forskrift om brannforebygging

Forskriftens formål er å bidra til å redusere sannsynligheten for brann, og begrense konsekvensene brann kan få for liv, helse, miljø og materielle verdier[13]. Den setter krav til enhver plikt til å vise aktsomhet ved brannfarlig aktivitet, eiers og brukers plikter for å forebygge brann i byggverk, og kommunenes plikt til å forebygge brann. Forskriftens §8 beskriver eiers plikt til å oppgradere sikkerhetsnivået i byggverket slik at det minst tilsvarer nivået som fremkommer av de samlede kravene gitt i byggeforskrift 1985. Oppgraderingen kan skje ved bygningstekniske tiltak, andre risikoreduserende tiltak eller ved en kombinasjon av slike, og oppgraderingsplikten gjelder så langt den kan gjennomføres innenfor en praktisk og økonomisk forsvarlig ramme.

Ifølge §9 skal eier av et byggverk fastsette mål og iverksette planer og tiltak for å sikre byggverket mot brann. Eier er ansvarlig for at kravene som gjelder for byggverket blir overholdt, og stiller også krav til systematisk sikkerhetsarbeid. Det systematiske sikkerhetsarbeidet skal sikre at byggverket blir kontrollert, vedlikeholdt og oppgradert slik at sannsynligheten for brann blir redusert, og slik at det blir minst mulig konsekvenser dersom en brannskulle oppstå.

Kommunen skal identifisere og føre tilsyn over byggverk, opplag, områder, tunneler, virksomheter m.m. hvor brann kan medføre tap av mange liv eller store skader på helse, miljø eller materielle verdier. Dette er såkalte §13-bygg, oppkalt etter hvilken paragraf det henvises til i plan- og bygningsloven[16]. Forskrift og veiledning til forskrift utdyper at dette

skal gjennomføres og prioriteres på bakgrunn av blant annet risikoen for tap av liv og helse, tap av materielle og kulturhistoriske verdier og risikoen for samfunnsmessige konsekvenser.

2.3.4 Regelverk i andre land

I England er det Approved Document B som angir byggereglene for garasjeanlegg[17]. For åpne parkeringshus er det ikke noen særskilte regler bortsett fra at det skal bygges i ubrennbare materialer. Ellers baserer de branntekniske kravene seg i hovedsak på at varme røykgasser skal ventileres ut på grunn av de åpne veggene og dermed redusere risikoen for brannspredning.

Byggereglene for parkeringshus i USA baserer seg på NFPA 88A, Standard for Parking Structures. Også her er det vurdert at den naturlige ventilasjonen med åpne vegger sørger for å redusere faren for brannspredning.

2.4 Prosjektering av parkeringshus

I dette avsnittet undersøkes det hvordan noen parkeringshus i Norge er prosjektert. Parkeringshusene som går gjennom er ved flyplassene i Stavanger og Trondheim. De følgende avsnittene er hentet og gjengitt fra brannkonseptene.

2.4.1 Stavanger lufthavn Sola

Parkeringshuset er et åpent parkeringshus i tre deler, bygd på forskjellige tidspunkt. Brannkonseptet for trinn 1 var ikke mulig å få tak i. Det ble tatt i bruk i 1991 og er bygd i betong med brannmotstand tilsvarende R60[1]. Konseptet for trinn 2 og trinn 3 går gjennom nedenfor. Går ikke gjennom alle detaljene, men har fokus på fravik fra VTEK eller andre betraktninger som er av særskilt interesse for problemstillingene i denne oppgaven.

Trinn 2 ble prosjektert i 2008 og det er derfor TEK97 som er gjeldende. Det har en grunnflate på ca 7800 m² inkludert to kjøreramper og er på fem etasjer. Avstanden mellom trinn 1 og 2 er 4,8 meter. Åpningene skal være jevnt fordelt med minimum 50% av de totale veggflatene åpne på hvert plan. Det har to trapperom med utgang direkte til det fri i 1.etasje. Det er i konseptet satt bygget til risikoklasse 2 og brannklasse 3 med spesifikk brannenergi i området 50-400 MJ/M². Brannmotstanden er satt til R15 i ubrennbart materiale for søyler som er i henhold til VTEK97, men det er fravik på brannmotstanden på bjelker/dragere på R10. Her kan det nevnes at fra og med VTEK10 er krav til brannmotstand økt fra R15 til R60 for slike parkeringshus. Det er ikke satt krav til brannseksjonering siden veggflatene er minst halvparten av totale veggflater og dermed regnes bygget som "ute i det fri". Det er ikke behov for røykventilering, automatisk brannalarmanlegg, mekanisk røykkontroll eller sprinkleranlegg. Det er ikke krav eller behov for særskilte tiltak for å sikre bygget mot brannsmitte til/fra nabobygg siden avstand er over 8 meter. Alle arealer skal dekkes av håndslukkeutstyr. Tilrettelegging for rednings- og slokkemannskap var avklart med brannvesenet og i henhold til TEK/VTEK.

Utvalgte punkter fra begrunnelsen for fraviket på bæreevne på bjelker/dragere var som følger: "det forutsettes minimum 50% åpne fasader i p-huset og ingen intern oppdeling med vegger. Dette vil hindre kritisk trykk- og temperaturoppbygging som kan påvirke stålet i en grad som kan medfølge kollaps før nødvendig rømning og redning er utført. Røykgasser med høye temperaturer vil bli ventilert ut og avkjølt grunnet innblanding av frisk luft. En langvarig

brannpåkjenning av bæresystemet i en størrelsesorden som gjør at stålet mister sin bæreevne er derfor lite sannsynlig, selv om de skulle bli direkte eksponert for brann. Det vises til en studie "Open-deck car park fire tests" der resultatene fra fullskalaforsøk dokumenterer at stålet ikke vil oppnå kritiske temperaturer. Forsøkene tar ikke hensyn til manuell slokkeinnsats og innsats fra brannvesen, noe som ytterligere reduserer sannsynligheten for kritisk brannpåkjenning av stålet. En eventuell kollaps av bjelker/dragere lokalt over brannstedet vil ikke medføre kollaps av bygget for øvrig. Det mest sannsynlige brannscenario er en bilbrann på et av parkeringsdekkene. En slik brann har liten sannsynlighet for å spre seg videre til andre biler (henvisning til samme studie som tidligere). Samtidig blir det ikke annet brennbart materiale på parkeringsdekkene. Dette betyr at det med stor sannsynlighet bare vil påvirke en mindre lokal del av bæresystemet i umiddelbar nærhet av bilen som brenner."

Det blir også henvist til en brann i trailer i Bygarasjen i Bergen i 2000. Traileren brant i 30-45 minutter før den ble sloknet, og tilstandsanalyser utført i etterkant konkluderte med at selv om brannen utviklet stor varmeutvikling ble det ikke registrert skader på hovedbæresystemet.

På bakgrunn av blant annet disse punktene konkluderte de prosjekterende med at forskriftskravet om at bærende hovedsystem i brannklasse 3 og 4 skal bevare stabiliteten gjennom en fullstendig brannforløp var ivaretatt. På tross av dette ble det likevel valgt å bygge trinnet med betong med brannmotstand R60 og enkelte søyler med R180[1].

Trinn 3 ble prosjektert i 2013 og er dermed i henhold til TEK10. Grunnflaten er 5500 m² inkludert to kjøreramper og er på fem etasjer. Den totale grunnflaten til parkeringshuset med alle trinnene er dermed 18 500 m². Åpningene til det fri er jevnt fordelt og minimum 50% av de totalte veggflatene på hvert plan skal være åpne. Det skal være to trapperom i trinnet, i tillegg til trapperom i de andre trinnene. Risikoklasse er 2 og brannklasse er 3, mens brannenergi er satt til mellom 50 og 400 MJ/m² omhyllingsflate. Brannmotstand på søylene var satt til R15 A2-s1,d0 i henhold til VTEK ifølge de som prosjekterte, mens det var fravik på bjelker/dragere som var satt til R10 A2-s1,d0. Det er ikke behov eller for brannseksjonering siden det er minimum 50% åpne veggflater. Det er ikke krav om sprinkleranlegg eller automatisk brannalarm, men de som prosjekterte anbefalte byggeier å vurdere brannalarm basert på byggets størrelse og innhold. Dette ble ikke tatt til følge av byggeier og bygget ble

oppført uten automatisk brannalarm. Bygget må utstyres med egnet antall håndslukkeapparat. Tilrettelegging for rednings- og slokkemannskap var avklart med brannvesenet og i henhold til TEK/VTEK.

Dokumentasjonen for fraviket er ordrett likt dokumentasjonen som ble gjort for trinn 2. Konseptet for både trinn 2 og 3 er utført av samme selskap og samme person.

Det er i tillegg utført en brannteknisk risikoanalyse av parkeringshuset. Bakgrunnen for dette er et avvik som ble påvist under et branntilsyn angående mangelfull risikokartlegging vedrørende risikoforhold i parkeringshuset. Målsetningen var å kartlegge mulige uønskede hendelser ved brann. Det ble utført en grovanalyse i henhold til NS 3901:2012.

Konsekvensene ble vurdert med hensyn til personsikkerhet, verdisikkerhet, drift og omdømme. Scenarioene som ble vurdert var bilbrann i forbindelse med kollisjon, bilbrann i parkert bil, feil på elektrisk anlegg, brann i tekniske rom, brann i trafo, brann i parkeringskontor og brann i kontorer for leiebil. Konklusjonen fra grovanalysen var at byggets bruk ikke medfører forhold som blir ansett som uakseptable.

2.4.2 Trondheim

Brannkonseptet er fra 2008, og dermed er det TEK97 som gjelder. Det er et hovedsakelig åpent parkeringshus, med underetasjen lukket. Bygget er plassert i risikoklasse 2 og brannklasse 3 på grunn av antall etasjer. På tross av at regelverket tillot at bæresystemet i de åpne etasjene hadde en brannmotstand på R15 A2-s1,d0, argumenterte brannrådgiverne for at det burde bygges med R90 A2-s1,d0 på grunn av store useksjonerte areal, etasjeantall og fordi robustheten dette ville gi vil kunne være avgjørende i forhold til fremtidige endringer eller utvidelser. I tillegg måtte uansett underetasjen og dekke mot plan 1 bygges med høyere brannmotstand siden dette ikke er åpent.

Underetasjen ble sprinklet siden grunnflaten var i overkant av 5000 m² og bygget ikke var delt opp i brannseksjoner. De sier så at det ikke er nødvendig å seksjonere eller sprinkle de andre etasjene på grunn av den forutsatte åpenheten.

De skriver at det ikke er behov for automatisk brannalarmanlegg i henhold til regelverket, og heller ikke anses som nødvendig i forhold til rømningssikkerhet. Likevel mener de det vil kunne være hensiktsmessig for å sikre at brannvesenet får tidlig nok varsel om brann.

2.5 Tidligere hendelser

2.5.1 Solabrannen

7.januar 2020 begynte det å brenne i en parkert bil i parkeringshuset ved Stavanger lufthavn Sola. Ingen personer ble skadet, men brannen spredte seg raskt og utviklet store mengder røyk- og branngasser. Av en total kapasitet på 3000 biler i anlegget, var det 1600 parkerte biler på det aktuelle tidspunktet, og de fleste bilene ble eksponert for mye røyk. Informasjon om denne hendelsen er hentet fra evalueringsrapporten til Rogaland brann og redning[1]. Brannen startet i en Opel Zafira i byggetrinn 2 da eieren forsøkte å starte den. Ifølge etterforskningen tyder det på at det tok rundt 8 minutter fra brannen startet til brannvesenet ble varslet. 20 minutter etter brannstart var første brannressurs på stedet, og da stod allerede 8-10 biler i brann. Kort tid etter ankomst observerer utrykningsleder, ved hjelp av varmekamera, brennende røykgasser som rullet i taket fra midten av byggetrinn 2 og langt inn i byggetrinn 3 i første etasje. Innsatsleder brann observerer også at brannen smitter raskt over til nye rekker med biler, noe som trolig er på grunn av drivstoff som renner langs gulvet og blir antent. 50 minutter etter brannen starter stenger flyplassen for flytrafikk. Etter 1 time og 22 minutter trekker alle brannmannskaper seg ut av bygget i frykt for bygningskollaps. 1 time og 56 minutter etter brannstart kolliderer byggetrinn 3.

Rogaland brann og rednings evalueringsrapport peker på følgende punkter som førte til at brannen:

- Regelverk som tillater oppføring av store parkeringshus uten tilstrekkelige sikkerhetsbarrierer (automatisk slokkeanlegg, automatisk brannalarmanlegg, seksjonering).
- De menneskelige faktorene, som gjorde at det tok over 20 minutter fra brannen startet til de kom i gang med slokking. Fravær av automatisk brannalarmanlegg fordrer publikums evne og vilje til å varsle og om mulig forsøke å slokke.
- Innsatsen ville startet tidligere dersom brannen hadde blitt varslet på et tidligere tidspunkt.
- De ytre faktorene, som vær og vind, spilte ikke på lag, med vindkast på opptil 40 knop. Sterk vind bidro til å eskalere brannen og ikke ventilere den, slik analysemodellene forutsetter som kriterie for å velge bort ulike sikkerhetsbarrierer.

- Byggets tekniske utforming med bæreevne på 10 minutter forhindret innvendig slokking på et tidlig stadium i slokkeprosessen.

2.5.2 Kings dock parkeringshus Liverpool

I desember 2017 førte en bilbrann i parkeringshuset Kings Dock i Liverpool til at ca 1150 biler gikk tapt i tillegg til at bygget måtte rives. Informasjonen om denne brannen er hentet fra evalueringsrapporten til det lokale brannvesenet[2] Brannen startet i en bil i 4 etasje, men spredde seg til store deler av bygget. Fra brannen først ble oppdaget på overvåkningskamera til brannvesenet ble varslet gikk det 13 minutter, og 8 minutter senere var de fremme på stedet. Røykdykkerinnsats startet 39 minutter etter brannen først ble observert, og de rapporterte kort tid etter om rask brannspredning mellom biler i rekke, brennende drivstoff på gulvet og brannspredning mellom etasjer. Biler de allerede hadde slokket antente igjen. 1 time og 11 minutter etter brannstart ble det rapportert om brann i opptil 30 kjøretøy. 46 minutter senere trekker alle brannmannskaper seg ut av bygget av hensyn til deres sikkerhet.

Parkeringshuset i Kings Dock hadde et totalt areal på 24 000 m², gikk over åtte etasjer og hadde åpne sidevegger. Det var bygget i betong, noe som gjorde at bæreevnen var bedre enn 15 minutter som er kravet i byggeforskriften i England. Brannvesenet peker likevel i sin evalueringsrapport at 15 minutter i de fleste tilfeller vil være for lavt til at brannmannskapene kan igangsette trygg innsats. Det var i tillegg store skader på bygningen, der deler av betongen hadde smuldret opp eller rast sammen.

Noen av læringspunktene i evalueringsrapporten var:

- Brannmannskapene meldte underveis i brannen at et nytt kjøretøy tok fyr med 30 sekunders mellomrom. Rask brannspredning vil forekomme når to eller flere kjøretøy er i brann, der brannen også sprer seg mellom biler med ledig parkeringsplass mellom. Rask bekjempelse fra brannvesenet eller et sprinklersystem er avgjørende for å få kontroll på brannen.
- Rennende drivstoff fra drivstofftanker fører til brannspredning, noe som må tas hensyn til ved design og prosjektering.
- Parkeringshuset hadde et avløpssystem i gulvene som skulle føre overflatevann vekk og ut. Med temperaturer på opp til 1200 C i taket, ble dette avløpssystemet en

svakhhet som gjorde at branngasser kunne trenge igjennom til etasjen over.

Prosjektering og plassering av avløpssystemet må derfor skje med tanke på fare for brannspredning mellom etasjer.

- Overvåkningskameraer viste mange personer som observerte brannen uten å ringe nødnummeret. Første post på sosiale media registrert var klokka 16.50, altså ca samtidig som brannvesenet ankom. Evalueringsrapporten peker på den økende trenden der det synes å være viktigere å ta bilder, filme og poste på sosiale medier enn å evakuere og varsle nødetatene om hendelser.

2.5.3 Andre branner

Det har i tillegg vært flere andre branner i parkeringshus og på parkeringsområder av forskjellig alvorlighetsgrad i løpet av de siste årene. Et utvalg av disse blir kort gått gjennom:

- Florida, USA, parkeringsområde i friluft 03/04/2020
 - o 3500 biler på et parkeringsområde ble ødelagt i brannen[18]. Brannvesenet ble utkalt når ca 20 biler stod i brann, men når de ankom estimerte de at det hadde økt til ca 100 biler i brann.
- Newark Airport, USA, åpent parkeringshus 16/12/2019
 - o Brann i 17 biler på taket i parkeringshuset[19].
- Cork, Irland, åpent parkeringshus 01/09/2019
 - o 60 biler ødelagt[20].
- Manchester Airport, England, åpent parkeringshus 31/05/2019
 - o Fire biler ødelagt i brann på taket på parkeringshuset[21].
- Topp Way, England, åpent parkeringshus 20/01/2019
 - o Startet å brenne i én bil uten at det ble spredning til andre biler, men det stod ingen biler på de nærmeste parkeringsplassene[22]. Brannvesenet ankom etter fire minutter.
- Kings Plaza, USA, åpent parkeringshus 09/2018
 - o Påsatt brann i bil som spredde seg og ødela 135 kjøretøy[23].
- Hampshire, England, parkeringsområde i friluft 12/08/2016
 - o 82 biler ødelagt på et biloppstillingsområde[24]. Når brannvesenet ble utkalt var det brann i fire biler, men det spredde seg raskt.

2.6 Litteraturstudium

Litteratursøket ble utført med hensikt i å finne relevant forskning til temaer angående brann i parkeringshus. Forskjellige temaer ble gjennomgått med tanke på hvordan det påvirker en bilbrann. Disse temaene er:

- Design av biler
- Alternative typer drivstoff
- Spredningsfare ved bilbrann
- Design av parkeringshus
- Statistikk angående brann i parkeringshus
- Vind

2.6.1 Design av biler

Reguleringer angående brannsikkerhet i biler er ganske harmonisert over hele verden og går tilbake til American Standard Federal Motor Vehicle Safety Standards 302 som er basert på studier fra 60-tallet[25]. Kravene er lave og de fleste materialer kan bestå testen.

De siste tiårene har bilene endret seg stort, i sammenheng med det teknologiske fremskrittet. Der bilene før hovedsaklig bestod av stål og jern, har moderne biler større mengder med aluminium, magnesium og plast[26]. Blant annet er drivstofftanken laget av plast på ca 85% av nye biler[3]. Undersøkelser i en studie fra 2006 viste at en gjennomsnittlig bil på den tiden inneholdt 150-200 kg brennbart materiale[27]. Swift rapporterte i 2012 om en økning i plast og kompositt i biler fra 9,1 kg på 1960-tallet til 181,4 kg på 2010-tallet[28]. En artikkel fra 2015 spådde at den gjennomsnittlige mengden plast i en bil skulle økes fra 200 kg til 350 kg mellom 2014 og 2020[29].

Biler med alternative kilder til drivstoff er allerede på markedet i stor grad i form av elbiler, hybrider og hydrogenbiler. Det har vært knyttet usikkerhet til spesielt elbilers brannrisiko i forhold til bensin- og dieslbiler, og det kunne ha vært en masteroppgave i seg selv. Går derfor ikke veldig dypt inn i temaet her, men henviser bare til et par oversiktsstudier angående temaet.

En studie utført av NHTA i USA konkluderte med at konsekvensene ved en brann eller eksplosjon i li-ion batterier brukt i elbiler er antatt til å være lik eller mindre enn en brann i

en bensin- eller dieselbil[30]. Sun et al oppsummerte flere elbilbranner i en studie[31]. Det ble påpekt at det finnes få fullskallatester av brann i elbil, men at de som har blitt gjort viser at brannenergien i en brann i en elbil er omtrent lik som i en bensin/dieselbil.

2.6.2 Brannutvikling ved bilbrann

Mangs og Keski-Rahkonen utførte i 1994 tre forsøk for å måle forskjellige parametre som forbrenningseffekt, varmestrålingsfluks, CO og CO₂ produksjon, røyktemperatur over bilen, i tillegg til temperatur på spesifikke steder på bilen ved en bilbrann[32]. Forsøkene ble utført med 3 biler fra 70-tallet, en Ford sedan og to forskjellige typer Datsun sedan. I forsøk 1 med Ford ble bilen antent med et fat heptan under frontsetet, med alle vinduer åpne og den ene døra litt åpen. Forsøk 2 og 3 med Datsun ble antent med et fat heptan under motoren, med alle dører igjen, ett vindu helt åpen og de andre vinduene litt åpne. I alle forsøkene lot de bilene brenne til de slokkes av seg selv. Den maksimale forbrenningseffekten som ble målt i forsøkene var henholdsvis 1,5 MW, 1,8 MW og 2,0 MW.

Shipp og Spearpoint utførte i 1995 to fullskalaforsøk av bilbranner med hensikt å måle blant annet HRR og temperatur[33]. I det første forsøket ble en Austin Maestro fra 1982 antent inne i bilen. Forbrenningseffekten økte kraftig til 7,5 MW etter ca 13 minutter da drivstofftanken revnet som førte til en væskedamsbrann med bensin. Brannen ble slokkes etter 17 minutter. I det andre forsøket ble en Citroen BX 14 fra 1986 antent med et fat bensin under motoren. Denne bilen brant i 57 minutter før den ble slokkes og nådde en maksimal forbrenningseffekt på 4,5 MW.

Joyeux utførte en rekke eksperimenter i 1997 med hensikt å finne ut branneeffekten ved en bilbrann[34]. Det ble gjort ti forsøk med ulike utforming av rommet, alle med tak.

Oppsummeringen er som følger:

Tabell 6. Joyeux sine forsøk.

Forsøk	Antall biler	Rom-utforming	Antennelses kilde	Brannenergi [GJ]	Forbrennings-effekt [MW]
1	2	Hjørne	Under setet	4,98	3,5
2	1	Hjørne	Under setet	-	-
3	1	Hjørne	Under setet	2,1	3,5
4	1	Hjørne	Under setet	3,08	2,15
5	2	Hjørne	Under setet	-	10
6	2	Lukket	Under setet	8,51	1,7
7	1	Åpen	Under setet	6,67	8,3
8	1	Åpen	Under bilen	4,09	4,07
9	2	Åpen	Under bilen	8,89	7,5
10	2	Åpen	Under bilen	8,38	8,31

I sju av forsøkene ble bilene antent ved å plassere 1,5 liter bensin under setet. I de resterende tre forsøkene ble det brukt 1 liter bensin under girboksen. Forsøk 1-6 ble utført med biler fra 80-tallet, mens test 7-10 brukte biler fra 90-tallet. Resultatene viste at nyere biler hadde større brannenergi og forbrenningseffekt enn eldre biler.

Stroup et al utførte i 2001 to forsøk med en minivan fra 1995. Forsøket ble utført innendørs under en 4 m x 5 m stort kalorimeter[35]. Det første forsøket ble utført med alle vinduer lukket og antennelsen skjedde med å antenne 0,317 kg papir i frontsetet på passasjersiden. Temperaturen steg raskt til 500°C, men sank deretter raskt, 5 minutter antennelse var temperaturen under 150°C. Etter 30 minutter ble forsøket avsluttet uten at brannen spredte seg fra innsiden av bilen, og dermed kunne heller ikke forbrenningseffekten bli målt.

I forsøk 2 ble 2 liter bensin helt ut i frontsetene og på gulvet, og vinduene fremme var åpne. Etter hvert som brannen utviklet seg, knustes resten av vinduene. 4 minutter etter antennelse ble brannen slokket. Høyeste forbrenningseffekt målt var 2,4 MW.

BRE utførte 7 fullskalaforsøk med forskjellige scenarier der formålet var å observere hvordan en bilbrann utviklet seg for forskjellige typer biler, og måle diverse egenskaper ved brannen som forbrenningseffekt og temperatur[3]. Det ble brukt forskjellige bilmerker og varierende størrelser på bilene. Årsmodellene var fra 1998 til 2004.

To forsøk ble utført med én bil involert for å se hvordan en bilbrann utvikler seg når brannen starter innvendig, når antennelse skjer i førersetet. I begge forsøkene ble brannene etter hvert ventilasjonsstyrt og slokket av seg selv uten å spre seg til utsiden av bilene.

To forsøk ble utført for å se hvordan en bilbrann utvikler seg når brannen starter i motoren. I det første forsøket ble det brukt én bil. Brannen utviklet seg til ca 1 MW etter 10 minutter og brente med en effekt mellom 1 og 2 MW i 30 minutter før lekkasje av drivstoff førte til en forbrenningseffekt på ca 4,8 MW. I det andre forsøket ble det brukt to biler plassert med fronten mot hverandre med en avstand på 0,5 meter. Hensikten var å se om brannen spredde seg til en annen bil. Brann i bil nr 1 utviklet seg til ca 2 MW etter 15 minutter, og utviklet seg til ca 3,5 MW etter 50 minutter da det ble lekkasje på drivstofftanken. Bil nr 2 ble antent 5 minutter inn i testen, og deretter dratt vekk med en gang for ikke å bidra mer i brannen.

Det ble utført tre forsøk der et varmestralingspanel ble brukt for prøve å antenne en bil. Panelet hadde en varmestralingsfluks på $30 \pm 5 \text{ kW/m}^2$ og ble plassert 30 cm fra bilen som hadde alle vinduer lukket. Eksteriøret antente på grunn av strålingen, før baksetevinduet knuste og flammene spredde seg til innsiden. Forsøket ble så avsluttet da varmestralingspanelet sluttet og fungere som tenkt. Det andre forsøket ble utført på samme måte som det første. Etter 30 minutter uten antennelse ble varmestralingspanelet flyttet nærmere bilen, og 15 minutter senere ble det observert flammer. Brannen spredde seg så videre inn i bilen gjennom sidespeilet før forsøket ble avsluttet. Det tredje forsøket ble også utført likt som det første. Eksteriøret antente, men spredde seg ikke videre til resten av bilen. Etter 45 minutter ble et vindu knust manuelt, og resten av bilen antente før forsøket ble avsluttet.

Okamoto et al utførte fire fullskalaforsøk med samme type minivan fra 90-tallet[36]. Tre av forsøkene ble utført med alle vinduer igjen, mens det siste ble utført med ei åpning på 20 cm i førervinduet. Det var 10 liter bensin i drivstofftanken som var i stål. Antennelse ble gjort med 80 gram brennbar alkohol plassert på forskjellige steder på bilen i hvert forsøk. Forbrenningseffekten i forsøk 1 nådde maksimalt 3,6 MW etter ca 60 minutter. Forsøk 2 nådde høyeste forbrenningseffekt etter ca 55 minutter på 3,2 MW. Forbrenningseffekten i forsøk 3 kunne ikke bli målt siden brannen ble ventilasjonsstyrt og sloknet av seg selv. I forsøk 4 ble høyeste forbrenningseffekt på 4,2 MW målt etter ca 20 minutter.

Jiang et al utførte i 2018 to fullskalaforsøk for å undersøke brannspredning i biler[37]. Forsøk 1 ble utført som om én bil begynte å brenne i fri luft. Frontvinduene var åpne og førerdøra åpen som om fører har forlatt bilen i hast uten å lukke den igjen. Forsøk 2 ble utført som om

en bil begynte å brenne på en parkeringsplass. To biler ble plassert ved siden av hverandre med en avstand på 0,8 meter og med alle dører og vinduer igjen. Drivstofftankene i alle biler var så godt som tomme. Brannen i begge forsøkene ble startet i motoren med en svamp med litt bensin som ble antent med et gnist med panseret igjen.

Brannspredningen i startfasen var lik i begge forsøkene. Brannen spredde seg fra motoren til panseret, til høyre fremhjul, innsiden av bilen og bagasjerommet til slutt. I forsøk 1 spredde brannen seg til innsiden etter ca 10 minutter, og etter ca 15 minutter brant hele bilen bortsett fra bagasjerommet kraftig før forsøket ble avsluttet. I forsøk 2 spredde brannen seg til innsiden av bilen gjennom ventilasjonsanlegget etter ca 16 minutter og etter 21 minutter ble det overtenning inne i bilen da vinduet på førersiden knuste. Bakhjulet på bil 2 ble antent etter ca 20 minutter og brannen utviklet seg gradvis til hele bilen var i brann. Noen av observasjonene i forsøkene var:

- Brannspredning forekommer langs lakken, og spredningen er raskere på taket enn på sidene.
- Motorolje, bremsevæske o.l. i motoren kan fremme brannutviklingen. Dette er ofte neglisjert i tidligere utførte studier som hovedsakelig har brukt vrakede biler. Brannutviklingen kan dermed være raskere enn i tidligere utførte fullskalaforsøk.
- Under brannene forekom det tydelig at forskjellige bildeler smeltet og dryppet på bakken, spesielt i fronten av bilene. Materialer i plast som smelter og danner en væskedamsbrann kan føre til raskere brannutvikling.

Park et al utførte i 2019 to fullskalaforsøk for å undersøke parametre som brannspredning, røykgasskonsentrasjon og forbrenningseffekt ved brann i en og to biler[38]. I forsøket med to biler var avstanden mellom bilene 50 cm, og bilene ble tømt for drivstoff. Bilene som ble brukt var sedan årsmodell 1998. Brannutviklingen i begge forsøkene var lik i begynnelsen med en forbrenningseffekt på ca 2 MW etter 3 minutter. I forsøket med en bil, økte deretter forbrenningseffekten til 3,5 MW etter 25 minutter før brannen etter hvert sloknet av seg selv. I forsøket med to biler spredde brannen seg til den andre bilen etter 10 minutter, og brannen hadde en maksimal forbrenningseffekt på 6 MW etter ca 19 minutter. Resultatene de fikk var ganske lik enkelte andre studier som det ble sammenlignet med, men lavere enn resultatene til Schipp og Spearpoint på opptil 7,5 MW som tidligere i dette avsnittet.

Grunnen ble antatt å være at forsøkene til Schipp og Spearpoint ble utført med bensin i tankene.

Joyeux klassifiserte biler i fem kategorier utfra størrelse[39]. Funnene viste at jo større bil, dess høyere brannenergi. Det var også en tendens til at nyere biler hadde høyere brannenergi. Det viste seg også at teoretisk brannenergi må multipliseres med en koeffisient mellom 0,5 og 0,8 for å få reellt energi frigitt under en brann. For nye biler på denne tiden (90-tallet) var koeffisienten oftest mellom 0,7 og 0,8.

Ingason og Lönnermarks undersøkelser fra 2006 viste at forbrenningseffekten ved brann i én bil varierte fra 1,5 til 8 MW[27]. Med brann i to biler varierte effekten mellom 3,5 og 10 MW. Tiden til høyeste effekt var mellom 10 og 55 minutter. Basert på dataene de samlet inn så de en tendens til at høyeste forbrenningseffekt økte lineært med total brannenergi i bilene involvert i brannen. Videre analyser viste at økningen var ca 0,7 MW/GJ.

Tohir undersøkte 41 forskjellige forsøk som har blitt utført angående bilbrann i en enkelt bil[40]. Han kategoriserte bilene brukt i forsøkene i sju kategorier utfra bilens vekt ifølge klassifikasjonene til ANSI. Mange av forsøkene der det ble brukt biler i kategoriene tung, van og SUV ble utelatt fra statistikken på grunn av mangelfulle data. Det var bare utført to forsøk med SUV og begge disse ble utelatt. Av bilene i klassifisering tung ble bare ett forsøk tatt med. Funnene er oppsummert i tabell 6 og 7 for henholdsvis forbrenningseffekt og tid til maksimal forbrenningseffekt.

Tabell 7. Forbrenningseffekt.

Type klassifisering	Forbrenningsffekt [kW]			
	Gjennomsnitt	Standardavvik	Maksimal	Minimum
Mini	3492	964	4063	1710
Lett	4509	3088	8872	1521
Kompakt	4144	1973	8188	1990
Medium	6843	2797	9854	3650
Tung	3332	1126	3332	780
Van	4759	1041	6206	3800
SUV	-	-	-	

Tabell 8. Tid til maksimal forbrenningseffekt.

Type klassifisering	Tid til maksimal forbrenningseffekt [min]			
	Gjennomsnitt	Standardavvik	Maksimal	Minimum
Mini	16,9	7,2	27,6	10,0
Lett	19,6	7,4	33,4	12,0
Kompakt	37,8	16,9	67	25,0
Medium	37,2	7,4	46,9	26,0
Tung	34,4	-	34,4	34,4
Van	26,3	19,7	54	9,2

2.6.3 Brannutvikling i parkeringshus

I Fire Note no. 10 i 1968 ble det utført tre forsøk, med ni biler involvert i hvert plassert i en 3x3 konfigurasjon for å simulere slik de kan være parkert i et parkeringshus[41]. To av forsøkene ble utført med åpne vegger for å simulere brann i et åpent parkeringshus, mens ett forsøk ble utført som i et lukket parkeringshus med vegger. Taket var 2,1 meter høyt, og avstanden mellom bilene var fra 0,75 m til 1,2 m. Drivstofftankene ble fylt med 23 liter drivstoff, i tillegg til at det ble plassert annet brennbart materiale inni bilene. I hvert forsøk ble det satt fyr på bilen i midten, og den fikk brenne til brannen slokket eller temperaturen ble ubetydelig lav. Førervinduet var halvveis åpent, resten av vinduene lukket. Høyeste temperatur som ble målt var 840°C i røykgassene og 360°C på bygningsdelene av stål, begge deler under det andre forsøket med åpne vegger. Brannen spredde seg ikke til andre biler under noen av forsøkene. Konklusjonen var at det var lite sannsynlig at en bilbrann ville spre seg videre til andre biler, i det minste før brannvesenet ankom. Dette er også studien som ble brukt som bakgrunn for anbefalingene i Approved Document B i England[3].

Bennetts et al. utførte i 1985 to fullskalaforsøk i et toetasjers åpent parkeringshus bygd i ubeskyttet stål[42]. I begge forsøkene ble fem biler parkert i første etasje med mellomrom på 0,4 m. Det ene frontvinduet på bilen som ble antent var åpent, og drivstofftankene var halvfulle for alle biler. Bilen som ble antent i forsøk 1 hadde drivstofftank i stål, mens tanken til bilen som ble antent i forsøk 2 hadde både plasttank og LPG-tank. I forsøk 1 brant bilen som ble antent i 70 minutter uten at brannen spredde seg til andre biler. I forsøk 2 spredde brannen seg til seg til de to nærmeste bilene etter henholdsvis 14 og 35 minutter. Maksimal temperatur som ble målt på bygningsdelene i stål var 285°C i forsøk 1 og 340°C i forsøk 2. Konklusjonen var at det er stor sikkerhetsmargin ved brann i åpne parkeringshus med tanke

på bæreevnen til ubeskyttet stål. Dette er studien som er lagt til grunn for fraviket på bæreevne for parkeringshuset som kollapset under brann ved Stavanger lufthavn i 2020.

Joyeux utførte tre fullskalaforsøk i 2001 med biler i et åpent parkeringshus, blant annet for å se hvordan brannen påvirket bygningsdelene[39]. Parkeringshuset var 32 x 15 meter, bygd med bjelker og søyler i ubeskyttet stål. Taket bestod av plater bestående av betong og stål. Tre biler ble parkert ved siden av hverandre, og den midterste bilen ble antent med et kar med 1,5 liter heptan plassert under bilen ved girstanga. I forsøk 1 var det omtrent vindstille, og brannen spredte seg til bil 2 etter 16 minutter og bil 3 etter 36 minutter. Drivstofftanken til alle bilene revnet på forskjellige tidspunkter og væskedamsbrann førte til økt brannutvikling. Temperaturen under taket ble målt til mellom 900-1000°C over bilene. Høyeste målte temperatur på stålsøylene var 640°C og stålbjerkene 700°C. To stålsøyler som var eksponert for brannen hadde fått bøyning på 2,5 cm, og det ble observert sidelengs knekking og ustabil flens. Temperaturen i taket ble målt til 600°C i ståldelene og 260°C 25 mm inn i betongen.

Forsøk 2 ble utført på samme måte som i forsøk 1 med samme type biler. Eneste endringen var at det ble byttet hvilken type bolter som ble brukt i sammenslutningen mellom søyler og bjelker. Under dette forsøket var vinden 2 m/s. Brannen spredte seg til bil 2 og bil 3 etter 5-6 minutter med 20 sekunders mellomrom og brannutviklingen økte raskt. Det ble observert samme skader på søyler og bjelker som under første forsøket, men denne gangen var bøyningen på søylene 4 cm. Temperaturen over bilene var omtrent lik som i forsøk 1, men temperaturen på søylene og bjerkene var litt lavere. Grunnen ble antatt å være på grunn av vinden som bøyde av flammene slik at de ikke traff like direkte på bygningsdelene. Høyeste målte temperatur i taket var 191°C på ståldelen og 163°C 25 mm inn i betongen.

Forsøk 3 ble utført i samme parkeringshus med to biler parkert front mot front for å undersøke brannspredning mellom bilene. Bil 1 ble antent på samme måte som i de forrige forsøkene, og en vindskjerm ble plassert for å minske vindens påvirkning på brannen. Brannutviklingen i bil 1 var veldig lav, brannen spredde seg til bil 2 etter 56 minutter rett etter drivstofftanken på bil 1 revnet.

Konklusjonen i studien var at forsøkene viste at brannprosjekteringen av parkeringshus slik de ble utført var god nok. Sterk vind førte til en mye raskere brannutvikling i forsøk 2, men dette ble kompensert med lavere temperatur på bygningsdeler.

BRE utførte fire forsøk for å se om/hvordan en bilbrann sprer seg videre i et åpent parkeringshus[3]. Det første forsøket involverte tre biler, to av de parkert ved siden av hverandre mens det var en ledig parkeringsplass mellom bil 2 og 3. Antennelsen ble gjort i bil 1 og ble antatt å være påsatt. Vinduet på førersiden var åpent (vinduet lengst bort fra bil 2). "Parkeringshuset" var 12 meter langt og 6 meter bredt med takhøyde på 2,9 meter. Rammeverket var av stål, mens taket var betong. Den ene siden var åpen, den ene lukket, og de to andre med ventilasjonsåpninger. Etter antennelse utviklet brannen i bil 1 seg og brente i 20 minutter med en forbrenningseffekt på ca 2 MW, før eksteriøret og lakken på bil 2 antente. Et par minutter senere knustes vinduene og brannen i bil 2 ble fullt utviklet. Forbrenningseffekten på dette tidspunktet målte 16 MW med temperaturer i taket på 1100°C og varmestrålingsfluks på over 25 kW/m². Dette førte deretter til at bil 3 antente før forsøket ble avsluttet. Store mengder betong fra taket var rast ned under forsøket. Det andre forsøket ble utført likt som i det første, men denne gang med sprinkleranlegg. Etter antennelse utviklet brannen i bil 1 seg inntil sprinkleranlegget ble utløst. Brannen fortsatte likevel å vokse og etter 55 minutter ble det målt en forbrenningseffekt på 7 MW. Første sprinklerhode ble utløst etter 4 minutter, og etter hvert var alle 6 installerte hoder utløst. Forsøket ble avsluttet over en time etter første sprinklerhode ble utløst. Brannen spredde seg ikke til bil 2 og 3.

Det tredje forsøket ble utført likt som i det første. Etter antennelse utviklet brannen seg i bil 1 til en forbrenningseffekt på ca 6 MW før bil 2 antente og effekten var på opptil 11 MW, temperaturer på over 1000°C, og varmestrålingsfluks over 25 kW/m². Deretter antente bil 3 før forsøket ble avsluttet.

Noen av konklusjonene i studien til BRE var som følger:

- forsøkene viste at en bilbrann i parkeringshus fort kan spre seg til andre biler, og når en brann er fullt utviklet kan den også spre seg til biler på tross av en ledig parkeringsplass mellom. Forbrenningseffekten kan bli over 16 MW med bare to biler i brann.

- Lav takhøyde fører til veldig varmt røyksjikt under taket, så det er betydelig varmestråling fra flammene og det varme røyklaget. De brukte bare tre eller fire biler i forsøkene, men mente utfra funnene at en videre spredning til mange flere biler er sannsynlig.
- Sprinkleranlegg er effektivt i å forsinke brannutviklingen, men forbrenningseffekten kan likevel bli veldig høy.
- Til tross for høy forbrenningseffekt ved en bilbrann, behøver det ikke føre til store skader på bygningen. Hvis brannen derimot sprer seg videre til andre biler, kan det føre til store skader på bygningen. I flere av forsøkene hadde deler av betongen i taket rast ned.

2.6.4 Vindeffekt på brann

Vind har hatt stor påvirkning og ført til mange alvorlige branner, som oftest på grunn av flygebrann[43, 44]. Spesielt ved skogbranner er vind en fryktet ting, men også i bygningsbranner kan vinden føre til hurtig og kraftig brannspredning[45]. Det har blitt utført en del forskning på vindens påvirkning på bygningsbranner og rombranner, men lite når det gjelder parkeringshus. Forsøkene som er gjort for bygningsbranner viser at temperaturen og flammehøyden ut av åpninger reduseres av vinden[46] [47, 48].

2.6.5 Statistikk brann i parkeringshus

Joyeux et al undersøkte i en studie brannstatistikk i parkeringshus fra Berlin, Brüssel og flere byer i Frankrike[39]. Statistikken fra Paris skiller mellom lukkede og åpne parkeringshus, mens de andre byene ikke gjør det. I Paris ble det registrert 55 bilbranner i åpne parkeringshus mellom 1995 og 1997. Antall biler i brann i de forskjellige brannene vises i tabell 9:

Tabell 9. Antall branner i åpne parkeringshus i Paris mellom 95-97.

Åpent parkeringshus	
Antall biler	Antall hendelser
1	44
2	5
3	6

Det ble også undersøkt hvor lang tid det tok å slokke brannene. Alle brannene ble slokket innen en time, og bare 9 av 55 hendelser (55%) tok over 30 minutter å slokke.

Gjennomsnittlig tid for å slokke var 11 minutter. 5,5% av brannene ble slokket før brannvesenet ankom. Det ble kun registrert to personskader i brannene, en bileier som fikk brannskader på fingrene og ei bileier med brannskader på beinet.

I Brussel ble det registrert 28 branner i parkeringshus i årene 1995-1997. 5 av brannene ble slokket før brannvesenet ankom. Distribusjonen for hvor mange biler som brant vises i tabell 10.

Tabell 10. Branner i parkeringshus i Brussel.

Antall biler	Antall hendelser	Prosent
0	12	43,0
1	10	36,6
2	3	10,7
3	3	10,7

I Berlin ble det registrert 88 branner i parkeringshus i årene 1994-1998. Distribusjonen vises i tabell 11.

Tabell 11. Branner i parkeringshus i Berlin.

Antall biler	Antall hendelser	Prosent
0	57	65
1	23	26
2	3	3,4
3	3	3,4
4	0	0
5	2	2,2

Statistikken viser tydelig at det var sjeldent en brann spredde seg videre fra en bil i årene statistikken ble hentet fra.

BRE undersøkte brannstatistikk i parkeringshus i England i perioden 1994 til 2005 i sin studie[3]. De fant 3096 rapporterte branner i parkeringshus, hvor 1592 av disse brannene startet i en bil. De skiller ikke i statistikken mellom om det er brann i bil eller ikke. Branner i parkeringshus representerte mindre enn 0,1% av totale branner. De skriver at de fleste

branner ikke sprer seg til andre biler, men har ikke noen oversikt der de kobler antall hendelser til antall biler involvert.

I 162 av brannene var det installert sprinkleranlegg. Dette slokket brannen i 16 (9,9%) av tilfellene, kontrollerte brannen i 84 (51,9%) av tilfellene, ble utløst men slokket ikke brannen i 1 av tilfellene (0,6%) og ble ikke utløst i 61 (37,6%) av tilfellene (mest sannsynlig fordi brannen var for liten).

Undersøkelser av brannstatistikk i New Zealand viste at brannvesenet rykket ut til 96 branner i parkeringshus mellom 1995 og 2003, det vil si 12 branner hvert år[49]. Det skiller ikke mellom åpne og lukkede parkeringshus. Hovedårsakene til disse brannene var i 26,7% av tilfellene påsatt, 24,8% skyldes elektrisk feil og 16,8% skyldes mekanisk svikt. I 3% av alle brannene spredde brannen seg videre, i ett tilfelle brant fire biler og i to tilfeller to biler. Det var ikke registrert noen omkomne i disse brannene, men rundt to skadde personer med hovedsakelig små brannskader i året. Gjennomsnittsalderen på bilene som begynte å brenne var 14,3 år, og med en korrelasjon mellom alder og sannsynlighet for at en bil skal begynne å brenne.

Denda undersøkte 400 branner i parkeringshus i USA der det ble rapportert om null omkomne, men skader på fem brannmenn og tre sivile[50]. Brannen spredde seg videre til flere biler i 7% av tilfellene, ett tilfelle med tre biler involvert, ett med fire biler, og resten med to biler.

Thouroude et al undersøkte brannstatistikk i parkeringshus i Frankrike mellom 2010 og 2014[51]. De studerte 1931 forskjellige parkeringshus, hvorav det hadde vært brann i 41% av disse. 78% av parkeringshusene var underjordiske, 13% åpne og 9% en blanding.

Oppsummeringen av funnene fra statistikken følger her:

- Sannsynligheten for brann i parkeringshus med flere enn 1000 parkeringsplasser er seks ganger høyere enn i parkeringshus med mindre 1000 plasser.
- 60% av brannene var påsatt, 20% skyldtes teknisk feil og 20% var ukjent.
- Tiden fra brannvesenet ble varslet til slokking startet var i gjennomsnitt 12 minutter, med en maksimal tid på to timer.
- I 62% av tilfellene var én bil involvert i brannen, i 90% mindre enn 4 biler, i 8% flere enn 5 biler, og i 6% flere enn 7 biler.

- Det ble registrert 91 skader i disse brannene og tre omkomne. De fleste skadede var brannmenn. De omkomne var én hjemløs mann som ble funnet under trappa i parkeringshuset, én person som døde av hjerteinfarkt i senga si i leilighet over parkeringshuset, og ett med ukjent årsak.

Det ble gjort en sammenligning med statistikken til Joyeux vist i tabell 12. Det er en tydelig tendens til at det er flere biler involert i branner i parkeringshus nå enn tidligere.

Tabell 12. Sammenligning av statistikk angående brann i parkeringshus.

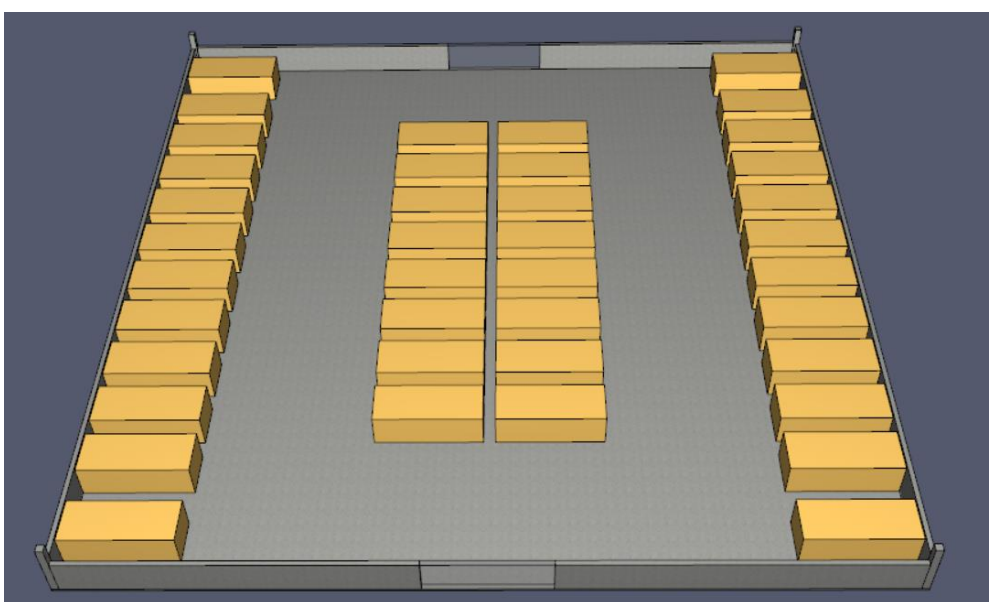
Antall biler involert i brannen	Årstall for statistikk	
	2010-2004	2000
1 bil	62%	85%
Færre enn fire biler	90%	98%
Flere enn 5 biler	8%	1%
Flere enn 7 biler	6%	0%

3 Brannsimulering

Dette kapitlet beskriver metoden som er brukt for å utføre simuleringene. Deretter blir sensitivitetsanalysen angående cellestørrelse vist, og til slutt presenteres resultatene for hvordan vinden påvirker brannspredning mellom bilene

3.1 Metode

For å undersøke hvordan vinden påvirker brannutvikling- og spredning i et åpent parkeringshus ble det utført simuleringer i FDS. Parkeringshuset er 33 x 33 meter og taket er 2,5 meter høyt, utformet som vist i figur 4 (taket er skjult).



Figur 4. Utformingen av parkeringshuset brukt i simuleringene.

Alle bygningdeler er av betong med massetetthet på 2280 kg/m^3 , spesifikk varmekapasitet $1,04 \text{ kJ/kgK}$, konduktivitet $1,8 \text{ W/mK}$ og emissivitet $0,9$. Det er en innkjørsel og en utkjørsel på 5 meter bredde midt på to av sidene. Veggene er 1,6 meter høye, noe som tilsvarer at åpningene i veggene er over $1/3$ av de totale veggflatene som er kravet i TEK. Arealet i parkeringshuset er på 990 m^2 , noe som er ganske mye mindre enn flere andre store parkeringshus. Grunnen til dette er på grunn av simuleringstiden det ville tatt ved å bruke et areal på for eksempel 5500 m^2 som var arealet i trinn 3 i parkeringshuset ved Stavanger lufthavn. Det er likevel et tilstrekkelig antall biler i anlegget til å observere og sammenligne brannspredningen.

Parkeringsplassene er satt til å være fem meter lange og 2,5 meter brede, og kjørefeltet mellom radene 6,5 meter. Dette ifølge anbefalingene fra Byggforsk angående utforming av parkeringsanlegg[52]. De anbefaler at innvendig høyde ikke bør være mindre enn 2,3 meter, og i større garasjeanlegg 2,5 meter.

Statistikk angående biler forsikret i Gjensidige viste at 91,1% av bilene var kortere enn 4,8 meter og 93,2% av bilene var smalere enn 1,8 meter[53]. Størrelsene til de seks mest solgte bilene i 2019 er vist i tabell 11. Bilene i simuleringen blir satt til 4,5 meter lange, 1,8 meter brede og 1,6 meter høye. Dette gir da en avstand på 0,7 meter mellom bilene.

Tabell 13: Størrelser på Norges mest solgte biler i 2019.

Bilmerke og modell	Lengde	Bredde	Høyde
Tesla Model 3	4,69 m	1,85 m	1,44 m
VW Golf	4,20 m	1,76 m	1,49 m
Nissan Leaf	4,45 m	1,78 m	1,55 m
Audi E-Tron	4,90 m	1,94 m	1,63 m
Toyota Rav4	4,60 m	1,86 m	1,69 m
BMW i3	4,01	1,79 m	1,59 m
Gjennomsnitt	4,48 m	1,83 m	1,57 m

Det er en veldig forenkling at bilene er satt til å være rektangulære firkanter. Siden det er forbrenningseffekt og forholdet mellom brannspredning mellom biler i forskjellige scenarioer som skal observeres, anses det likevel å være en god nok løsning i denne sammenhengen. Materialet i bilene er satt til polypropylene med tykkelse på 5 mm, massetetthet 900 kg/m^3 , spesifikk varmekapasitet $2,2 \text{ kJ/kgK}$, konduktivitet $0,2 \text{ W/mK}$, emissivitet 0,9 og antennelsestemperatur på 400°C [54]. Forsøkene som er gjennomgått tidligere i oppgaven viser at deler av plast på bilen ofte er det første som antennes. Ellers viser tabell 12 utvalgte innstillinger satt i simuleringene. Der annet ikke er nevnt, brukes standardinnstillingene til FDS.

Tabell 14. Parametre brukt i simuleringene.

Omgivelsestemperatur	10°C
Simuleringstid	20 minutter
Turbulensmodell	Large Eddy simulation
Antennelsestemperatur biler	400°C

Forbrenningseffekten er som beskrevet tidligere den viktigste fysiske egenskapen i en deterministisk modellering. Tidligere undersøkelser i oppgaven fra forsøk viser veldig store variasjoner på hvor lang vekstfasen er og hva den maksimale forbrenningseffekten er. Brannen ved Stavanger lufthavn ble varslet til nødetatene etter 8 minutter og 39 minutter mens det enda brant i én bil. Etter 18 minutter og 17 sekunder kom det melding om at det brant i ca 10 biler. Det er åpenbart at denne brannen utviklet seg mye raskere enn i mange av forsøkene som tidligere er nevnt.

Den dimensjonerende brannen i bilen der brannen starter er i de videre simuleringene modellert med en vekstfase som en t^2 -brann som oppnår en maksimal forbrenningseffekt etter 10 minutter. Bilen brenner deretter med denne effekten i 5,5 minutter før utbrenningsfasen er modellert på samme måte som vekstfasen. For de resterende bilene er vekstfasen på to minutter fra antennelse, og brannen brenner med maksimal forbrenningseffekt i 5,5 minutter før utbrenningsfasen som er modellert på samme måte som i bilen som blir antent. Den forholdsvis korte vekstfasen er delvis for å korte ned simuleringstiden, men hovedsakelig for å prøve å etterligne brannen i parkeringshuset i Stavanger og Kings Dock der brannen åpenbart har utviklet seg raskt. Den maksimale forbrenningseffekten er satt til 6 MW i tre forsøk og 4,5 MW i to forsøk for å undersøke sensitiviteten. Disse verdiene er hentet fra forsøkene til BRE.

Det er blitt utført en sensitivitetsanalyse med cellestørrelse med 20 cm, 25 cm og 30 cm. Deretter er det blitt simulert tre brannscenarioer som vist i tabell 13.

Tabell 15: Brannscenarioene i FDS-simuleringene.

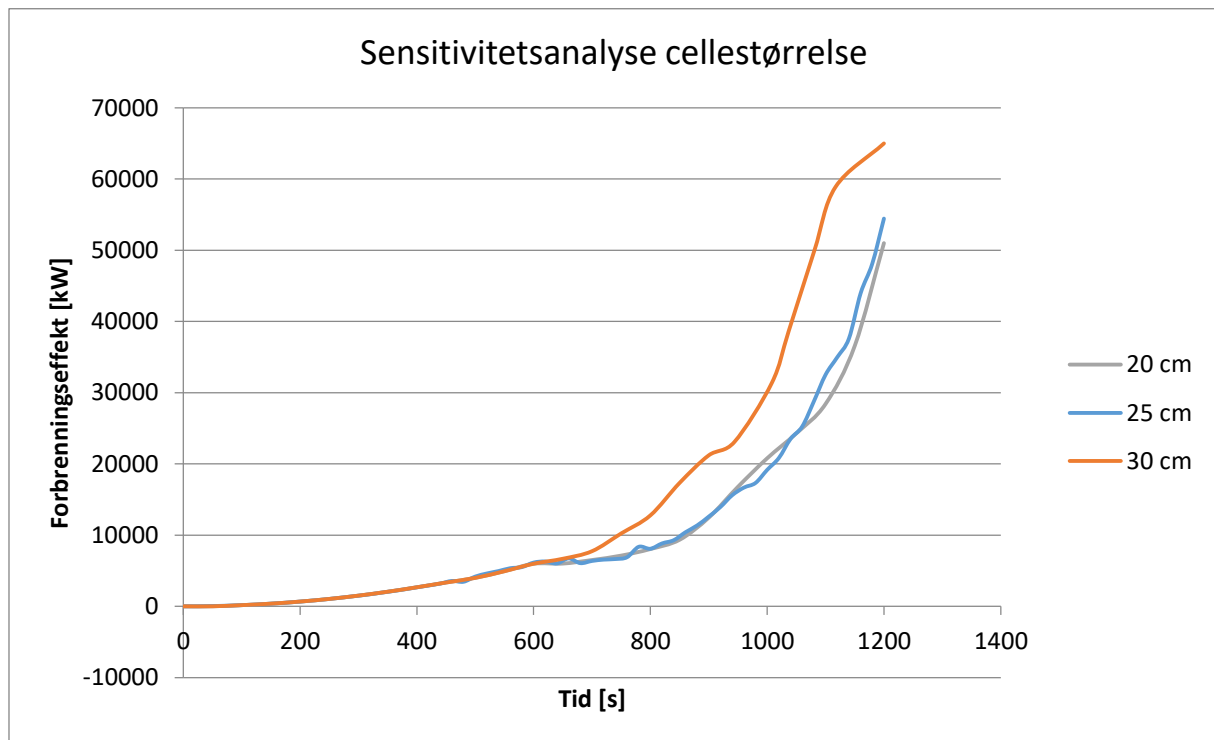
Simulering nr	Forbrenningseffekt	Vind
1	6 MW	0 m/s
2	6 MW	5 m/s
3	6 MW	10 m/s

Vinden er satt med FDS sine egne innstillinger for vind i simuleringsparametrene med en vinkel på 150°, som blir fra sørøst i figur 4.

3.2 Sensitivitetsanalyse av cellestørrelser

Sensitivitetsanalysen har blitt utført med cellestørrelser på 20 cm, 25 cm og 30 cm. Det gir D^*/δ_x på henholdsvis 10, 8 og 6,6. Figur x viser forbrenningseffekten som funksjon av tid.

Tabell 16. Sensitivitetsanalyse cellestørrelse.



Cellestørrelse på 30 cm gir et betydelig raskere og kraftigere branntilløp enn cellestørrelse på 20 cm og 25 cm som det er liten differanse mellom. Cellestørrelsen i de videre simuleringene blir derfor satt til 25 cm for å spare tid ved simuleringene.

3.3 Resultat

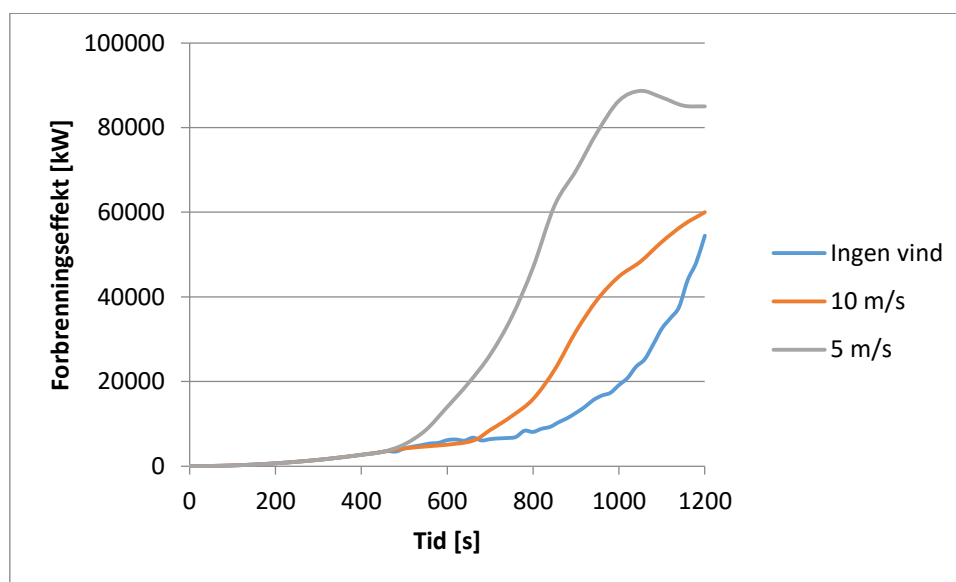
Resultatene når det kommer til tid mellom brannspredning mellom de ti første bilen vises i tabell 17. Det er stort sett liten forskjell i brannspredningen i scenarioene med vind, bortsett fra den siste bilen. Det vises også klart at brannspredningen skjer raskere med vind med de parametrene som er valgt i simuleringene.

Tabell 17. Forhold mellom vind og brannspredning.

Scenario	Tid til spredning til bil x forekommer i sekunder									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
6 MW, ingen vind	593	598	780	845	857	857	860	944	977	992
6 MW, 5 m/s	486	541	581	608	647	656	674	698	700	712
6 MW, 10 m/s	488	538	586	612	631	642	651	693	700	800

Ved en brann på 6 MW tar det fra ca 12 minutter med 5 m/s til 16,5 minutter med ingen vind til brannen har spredd seg til 10 biler. I brannen i parkeringshuset ved Stavanger lufthavn brant det i ca 10 biler etter 18 minutter og 17 sekunder. Brannspredningen skjer altså raskere i dette tilfellet, også for scenarioet uten vind. Det er stor usikkerhet knyttet til mange av variablene i simuleringen, ikke minst når det kommer til hvordan antennelsen skjer.

Figur 5 viser forbrenningseffekten i de ulike scenarioene. Scenarioet med 5 m/s hadde den klart største og raskeste brannutviklingen.



Figur 5. Forbrenningseffekt i simuleringene.

4 Diskusjon

Forskningen som har blitt utført angående brann i bil viser at det er store variasjoner på viktige brannegenskaper som forbrenningseffekt, brannenergi og når tid til maksimal forbrenningseffekt oppnås. Det finnes ikke noe standard for hvordan egenskapene ved en bilbrann skal måles, så utførelsen ved forsøkene er veldig varierende. Hvor antennen blir gjort, hvordan den blir gjort, om dører og vinduer er åpne eller lukket og om det er drivstoff på tanken er noen av parametrene som kan føre til forskjellige målinger, i tillegg til det åpenbare at biler er forskjellige.

Mange av forsøkene var i tillegg utført uten drivstoff i tanken. Både ved brannene i parkeringshuset ved Stavanger lufthavn og Kings dock observerte slokkemannskaper tydelig brannspredning på grunn av væskedamsbranner med bensin/diesel. Bensin har en netto brennverdi på 33,3 MJ/l og et flammepunkt på -40°C så vil antennes umiddelbart ved en eventuell lekkasje(enclosure fire dynamics). Når man vet at drivstofftankene i 85% av tilfellene er av plast og dermed kan smelte ved en kraftig brann, vil en eventuell ruptur bidra til en umiddelbar økning i forbrenningseffekt. Som observert i flere branner kan dette også føre til brennende drivstoff som flyter rundt på bakken og fører til enda raskere brannspredning. Dette virker å være et prinsipp som er undervurdert i mange av forsøkene siden de har blitt utført med lite eller ingen drivstoff i tanken.

Undersøkelsene har vist at det er en tendens til at det er mer brennbart materiale og spesielt plastprodukter i nyere biler. Hvis spådommen fra 2015 om at mengde plast i biler ville øke fra 200 kg til 350 kg frem til 2020 vil bare det gi en økning i brannenergi på 3750-6000 MJ hvis man antar en netto brennverdi på 25-40 MJ/kg for eksempel nylon, polyuretan eller polypolymer[6]. I tillegg har bilene blitt stadig større, som ifølge formel 1 også skal gi større forbrenningseffekt på grunn av større areal. Dette har ikke vist seg i forsøkene som har blitt gjort, men bilene som har blitt brukt har hovedsakelig vært fra 90-tallet eller eldre. Tohirs oversikt over 44 forsøk viste at det kun i noen tilfeller var brukt biler fra begynnelsen av 2000-tallet, ellers eldre modeller. Dessverre er det ikke funnet noen forsøk som er blitt gjort med nyere biler for å sammenligne forbrenningseffekten og brannenergi med tidligere forsøk med eldre biler, men i teorien skal det gi større brannenergi og forbrenningseffekt.

De tidligste studiene som ble gjort angående brannspredning mellom biler i parkeringshus viste at brannen ikke spredde seg videre. Brannstatistikken fra 90-tallet viste også at det var sjeldent det var mer enn én bil som brant. Nyere statistikk fra 2010-2014 viste en tendens til at brannspredning mellom biler er mer sannsynlig i tillegg til at det er flere biler totalt som brenner i brannene. Det har også vært flere store branner med spredning til mange biler både på tak i parkeringshus og på parkeringsområder i fri luft. Dette viser at en bilbrann kan spre seg til mange andre kjøretøy på tross av teorien om at åpne vegger i parkeringshus skal ventilere ut røykgassene slik at brannspredning ikke forekommer i stor grad før brannvesenet ankommer. Forsøk som har blitt utført har vist at varmemestrålingen fra det varme røyklaget kan føre til betydelig brannspredning selv om veggene er åpne. Den lave takhøyden er en åpenbar grunn til dette, selv om flere hendelser har vist at dette kan skje ute i det fri også. At åpne parkeringshus kan lempe på sikkerhetsbarriere på grunn av at røykgasser ventileres ut må revurderes.

Utfra undersøkelsene som er gjort ser det ut som en bilbrann i nyere biler som får utvikle seg fritt sannsynligvis vil spre seg til andre biler. Hvor raskt brannspredningen skjer varierer veldig. Når brannen i bil 2 får utviklet seg øker den totale forbrenningseffekten voldsomt og spredning til videre biler skjer kjapt. Ved brannen i parkeringshuset i Kings dock mente brannmannskapene at brannen etterhvert spredte seg til en ny bil hvert 30 sekund. Relativt hurtig slokkeinnsats virker å være kritisk med tanke på å hindre at brannen utvikler seg og kommer ut av kontroll for slokkemannskapene.

Risikoen for at en bil begynner å brenne kan ikke bli null, faren vil alltid være tilstede. Det man kan gjøre er å redusere sannsynligheten for at brann oppstår, eller redusere konsekvensene av en bilbrann. Når det gjelder scenarioet bilbrann i parkeringshus, kan ikke byggeier kontrollere sannsynligheten, det er bilprodusenter og bileier med vedlikehold av bil som er ansvarlig for. Det eneste byggeier kan er å redusere konsekvensene, gjennom aktive, passive eller organisatoriske tiltak. Dagens byggeregler med forenklet prosjektering gjør det raskt og enkelt å prosjektere et bygg når forutsetningene er kjent og det ikke er behov for store fravik. Det er dermed ikke behov for å gjøre noen risikovurderinger utenom. De eksemplene på brannprosjektering av parkeringshus som er gått igjennom viser at det er gjort fravik fra viktige branntekniske barrierer uten veldig detaljerte analyser. Trinn 3 av parkeringshuset ved Stavanger lufthavn ble til og med prosjektert med bæremotstand i R 10

og R 15 selv om de preaksepterte løsningene sier R 90. Det virker heller ikke som det legges noe vekt på seksjonering av parkeringshus. Ifølge VTEK kan ikke en brannseksjon være større enn 4000 m² når det er ventilert, noe som er tilfelle med åpne vegger. Med sprinkleranlegg kan største useksjonerte areal være 10 000 m². I brannprosjekteringen til parkeringshusene både ved Stavanger lufthavn og Trondheim lufthavn ble mangel av brannseksjoner begrunnet med at det ikke var nødvendig på grunn av store åpne veggarealer. Denne begrunnelsen

Både i brannkonseptene og risikoanalysen utført for parkeringshuset ved Stavanger lufthavn blir det brukt kilder for begrunnelser som er så godt som utgåtte. Der studier og statistikk på 80-tallet hevdet en bilbrann sjelden spredde seg videre, er det annerledes i dag. Kildene som brukes må velges med omhu. Ved analyser må antagelsene og begrunnelsene som gjøres i større grad vurderes på grunnlag av bakgrunnskunnskapen. En metode å gjøre dette på er et scoringssystem på tre punkter[55]. Bakgrunnskunnskapen anses som svak dersom en eller flere av disse punktene er sann:

- Antagelsene representerer sterke forenklinger.
- Data/statistikk/informasjon eksisterer enten ikke eller er upålitelig.
- Det er uenighet blant eksperter.
- Fenomenet som utforskes er dårlig forstått og modeller er ikke-eksisterende eller antatt å gi dårlige resultater.

I motsatt ende anses bakgrunnskunnskapen som sterk dersom alle disse punktene er tilstede:

- Antagelsene som er gjort anses å være fornuftig.
- Det finnes mye data/statistikk om temaet.
- Det er stor enighet blant ekspertene.
- Fenomenet er godt forstått og modeller anses å gi resultater med god nøyaktighet.

I brannkonseptene ble brannspredning mellom mange biler i et parkeringshus ansett til å være usannsynlig. Var brannen i parkeringshuset ved Stavanger lufthavn en sort svane? En sort svane er en overraskende ekstrem hendelse i forhold til nåværende kunnskap[57].

Aven skiller mellom tre typer svarte svaner:

- I. Ukjente ukjente. Hendelser ukjente for alle.
- II. Ukjente kjente. Hendelser ukjente for de som utfører risikoanalysen, men kjent for andre.
- III. Kjente hendelser. Hendelser hvor sannsynligheten for at hendelsene inntreffer er vurdert til å være neglisjerbar.

Det har vært flere store hendelser med brann i parkeringshus, så punkt I passer ikke. Scenarioet bør være kjent for branningeniører som utfører risikoanalyser, så punkt II strykes også. Hva så med punkt III? For noen titalls år siden kunne nok en brann i parkeringshus som sprer seg til flere titalls eller hundrevis av biler passe inn under dette punktet. Flere studier på 60-, 70-, og 80-tallet som er gått gjennom tidligere i oppgaven konkluderte med at det var liten sannsynlighet for brannspredning mellom biler, og hvertfall mellom mange biler. Nyere studier som den fra BRE viser derimot det er stor sannsynlig for brannspredning mellom biler hvis ikke slokking blir igangsatt tidlig nok. I Norge har det de siste årene vært mellom 800 til 850 bilbranner i året[58]. At en bil skal begynne å brenne mens den er i et parkeringshus vil være liten, men kan ikke neglisjeres. En stor brann i parkeringshus som sprer seg til mange biler kan derfor ikke være en sort svane, og bør være et brannscenario som blir vurdert i risikoanalyser.

Så er regelverket for brannprosjektering av parkeringshus godt nok? For det første må det bygges etter regelverket. Hadde parkeringshuset ved Stavanger lufthavn vært prosjektert i henhold til TEK/VTEK hadde det blitt bygd med brannmotstand på minimum R 90 og ville dermed ikke kollapse slik det gjorde. Det ville ha vært delt opp i brannseksjoner på maks 10 000 m² hvis det var sprinklet i tillegg, eller maks 4000 m². Hadde dette vært tilfellet ville brannen blitt mye mindre alvorlig, men den kunne fortsatt spredt seg over store arealer.

Brannvesenet ankom stedet 19 minutter og 21 sekunder etter brannstart. Da hadde det tatt 8 minutter og 49 sekunder før 110-sentralen ble varslet. Altså kunne brannvesenet vært fremme etter 10 minutter og 32 sekunder om det hadde gått en direkte brannalarm til 110-sentralen. Det har blitt vist tidligere at det er sannsynlig at en bilbrann vil spre seg videre til andre biler hvis det ikke settes i gang slokkeinnsats på et tidlig nok tidspunkt. En studie for et lite utvalg kommuner viste en gjennomsnittlig responstid for brannvesenet på 9,4 minutter

og median på 7,6 minutter på 3657 hendelser[56]. Hvis brannvesenet får varsling tidlig nok vil de i de fleste tilfeller være raskt fremme. Det bør derfor komme krav om automatisk brannalarmanlegg også i åpne parkeringshus.

5 Konklusjon

Bakgrunnen for regelverket virker å være at åpne vegger skal ventilere ut varme røykgasser slik at brannspredning ikke forekommer mellom biler før brannvesenet kommer. Denne likheten forekommer i regelverket i flere land som er undersøkt.

Endring i størrelse og materialer i moderne biler har ført til at de inneholder mye mer brennbart materiale enn de gjorde tidligere. Forsøkene som har blitt gjort har derimot ikke vist dette i praksis, men forsøkene som har blitt undersøkt er utført med biler fra 70 til begynnelsen av 2000-tallet. Det er ikke funnet noen studier utført der forbrenningseffekt og brannenergi måles i nyere biler, men i teorien skal begge deler være betraktelig høyere. Det er behov for at dette undersøkes nærmere i nye studier, men det er kostbart og tidkrevende å utføre.

Forsøk har vist at det er stor variasjon i hvordan et branntilløp i en bil utvikler seg i forhold til forbrenningseffekt, brannenergi og tid til maksimal forbrenningseffekt oppnås. Nyere studier har vist at det er sannsynlig at en bilbrann sprer seg til biler i umiddelbar nærhet. Når brannen derimot også har utviklet seg i bil 2, er forbrenningseffekten blitt så stor at spredning til videre biler skjer raskt. For at brannen ikke skal komme ut av kontroll, er man avhengig av slokking enten av automatisk slokkeanlegg, med håndslukkere eller brannvesenet. For å sikre tidlig nok slokkeinnsats bør det komme inn i regelverket at åpne parkeringshus også skal ha automatisk brannalarm.

Simuleringer har vist at vinden kan ha stor påvirkning på brannutviklingen i et åpent parkeringshus.

Store parkeringshus bør i større grad seksjoneres og/eller bygges med sprinkleranlegg. Dette er i henhold til VTEK som angir største areal uten seksjonering, men dette har ikke blitt fulgt i praksis uten noen videre analyser. Hadde parkeringshuset ved Stavanger lufthavn vært seksjonert og bygd med korrekt brannmotstand i henhold til VTEK hadde ikke konsekvensene blitt så store.

Åpne parkeringshus som bygges etter reglene med høy nok brannmotstand, seksjonering og/eller sprinkler, og i tillegg har automatisk brannalarmanlegg skal være godt nok prosjektert med henhold til brannsikkerhet.

Kilder

- [1] L. Grahl-Jacobsen and K. Vik, "Evaluering av brann i parkeringshus Stavanger lufthavn Sola," Rogaland brann og redning, 2020.
- [2] M. F. R. service, "Kings Dock car park fire protection report," 2018.
- [3] BRE, *Fire spread in car parks BD2552*: Department for Communities and Local Government, 2010. [Online]. Available: <https://webarchive.nationalarchives.gov.uk/20120919204054/http://www.communities.gov.uk/documents/planningandbuilding/pdf/1795610.pdf>.
- [4] "Byggteknisk forskrift (TEK17)," *Forskrift om tekniske krav til byggverk (FOR-2017-06-19-840)*, 2017. [Online]. Available: <https://lovdata.no/forskrift/2017-06-19-840>.
- [5] "Kollegiet for brannfaglig terminologi." <http://www.kbt.no/index.asp> (accessed).
- [6] M. J. Hurley *et al.*, *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 5th ed. ed. New York, NY: Springer New York : Imprint: Springer, 2016.
- [7] B. C. Hagen, *Grunnleggende brannteknikk*. Haugesund: B.C. Hagen, 2004.
- [8] D. Drysdale, *An introduction to fire dynamics*, 3rd ed. ed. Chichester: Wiley, 2011.
- [9] B. Karlsson and J. G. Quintiere, *Enclosure fire dynamics* (Environmental and energy engineering series). Boca Raton, Fla: CRC Press, 2000.
- [10] A. Bwalya, "An Overview of Design Fires for Building Compartments," *Fire Technology*, vol. 44, no. 2, pp. 167-184, 2008, doi: 10.1007/s10694-007-0031-7.
- [11] A. Borg, O. Njå, and J. Torero, "A Framework for Selecting Design Fires in Performance Based Fire Safety Engineering," *Fire Technology*, vol. 51, no. 4, pp. 995-1017, 2015, doi: 10.1007/s10694-014-0454-x.
- [12] J. Stensaas and B. Mostue, "NY KUNNSKAP OM BRANN OFFSHORE. En innføring i ny kunnskap om brann offshore, tilegnet gjennom de siste 10 års forskning - 2. utgave," SINTEF, 2005.
- [13] "Forskrift om brannforebygging FOR-2015-12-17-1710," 2015. [Online]. Available: <https://lovdata.no/forskrift/2015-12-17-1710>.
- [14] "Veiledning til Byggteknisk forskrift," 2017. [Online]. Available: <https://dibk.no/byggereglene/byggteknisk-forskrift-tek17/>.
- [15] "Byggesaksforskriften (SAK10)," *Forskrift om byggesak FOR-2010-03-26-488*, 2010. [Online]. Available: <https://lovdata.no/forskrift/2010-03-26-488>.
- [16] "Brann- og eksplosjonsvernloven," *Lov om vern mot brann, eksplosjon og ulykker med farlig stoff og om brannvesenets redningsoppgaver LOV-2002-06-14-20*, 2002. [Online]. Available: <https://lovdata.no/lov/2002-06-14-20>.
- [17] *Approved Document B Volume 2: Buildings other than dwellings*.
- [18] M. Alonso, "A fire at a Florida airport destroyed more than 3500 rental cars," in *CNN*, ed, 2020.
- [19] R. Torrejon, "Newark Airport: No one hurt after 17 cars caught fire at parking garage," in *USA Today*, ed, 2019.
- [20] B. Roche, "Up to 60 cars scorched in "accidental" Cork car park blaze," in *The Irish Times*, ed, 2019.
- [21] S. Yarwood, "Manchester Airport fire: Images show burnt out cars at terminal two multi-storey car park," in *Manchester Evening News*, ed, 2019.
- [22] V. Oliphant, "Bolton car park fire: Panic as smoke billows from multi-storey blaze - shoppers EVACUATED," in *Daily Express*, ed, 2018.

- [23] J. DeJesus, "Man sentenced to 5 years in prison for Kings Plaza parking lot arson," in *Brooklyn Daily Eagle*, ed, 2019.
- [24] H. Cockburn, "Fire at BoomTown music festival in Hampshire destroys 80 cars," in *Independent*, ed, 2016.
- [25] S. Krüger, A. Hofmann, A. Berger, and N. Gude, "Investigation of smoke gases and temperatures during car fire – large-scale and small-scale tests and numerical investigations," *Fire and Materials*, vol. 40, no. 6, pp. 785-799, 2016, doi: 10.1002/fam.2342.
- [26] J. D. Rowe, *Advanced materials in automotive engineering* (Woodhead Publishing in materials). Oxford: Oxford : Woodhead, 2012.
- [27] A. Lönnemark and P. Blomqvist, "Emissions from an automobile fire," *Chemosphere*, vol. 62, no. 7, pp. 1043-1056, 2006/02/01/ 2006, doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2005.05.002>.
- [28] K. Swift, "Chemistry and light vehicle annual report," *Washington, DC, USA: Economics & Statistics Department, American Chemistry Council*, 2012.
- [29] "Plastics use in vehicles to grow 75% by 2020, says industry watcher." <https://www.plasticstoday.com/automotive-and-mobility/plastics-use-vehicles-grow-75-2020-says-industry-watcher/63791493722019> (accessed 23 mars, 2020).
- [30] D. Stephens *et al.*, "Lithium-ion Battery Safety Issues for Electric and Plug-in Hybrid Vehicles," National Highway Traffic Safety Administration, 2017. [Online]. Available: https://www.nhtsa.gov/sites/nhtsa.dot.gov/files/documents/12848-lithiumionsafetyhybrids_101217-v3-tag.pdf
- [31] P. Sun, R. Bisschop, H. Niu, and X. Huang, "A Review of Battery Fires in Electric Vehicles," *Fire Technology*, pp. 1-50, 01/11 2020, doi: 10.1007/s10694-019-00944-3.
- [32] J. Mangs and O. Keski-Rahkonen, "Characterization of the fire behaviour of a burning passenger car. Part I: Car fire experiments," *Fire Safety Journal*, vol. 23, no. 1, pp. 17-35, 1994, doi: 10.1016/0379-7112(94)90059-0.
- [33] M. Shipp and M. Spearpoint, "Measurements of the severity of fires involving private motor vehicles," *Fire and Materials*, vol. 19, no. 3, pp. 143-151, 1995, doi: 10.1002/fam.810190307.
- [34] D. Joyeux, "Natural fires in closed Car parks–Car fire tests," *INC-96/294d-DJ/NB*, 1997.
- [35] D. Stroup, L. DeLauter, J. Lee, and G. Roadarmel, *Passenger minivan fire tests*. National Institute of Standards and Technology Gaithersburg, 2001.
- [36] K. Okamoto, T. Otake, H. Miyamoto, M. Honma, and N. Watanabe, "Burning behavior of minivan passenger cars," *Fire Safety Journal*, vol. 62, pp. 272-280, 2013/11/01/ 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2013.09.010>.
- [37] X.-h. Jiang, G.-q. Zhu, H. Zhu, and D.-y. Li, "Full-scale Experimental Study of Fire Spread Behavior of Cars," *Procedia Engineering*, vol. 211, pp. 297-305, 2018/01/01/ 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.12.016>.
- [38] Y. Park and J. Ryu, "Experimental Study on the Fire-Spreading Characteristics and Heat Release Rates of Burning Vehicles Using a Large-Scale Calorimeter," *Energies*, vol. 12, no. 8, p. 1465, 2019, doi: 10.3390/en12081465.
- [39] D. Joyeux, *Demonstration of real fire tests in car parks and high buildings : contract no. 7215-PP/025, 1 July 1998 to 30 June 2001 ; final report*. Office f. Official Publ. of the Europ. Communities, 2002.

- [40] M. Z. Mohd Tohir and M. Spearpoint, "Distribution analysis of the fire severity characteristics of single passenger road vehicles using heat release rate data," *Fire Science Reviews*, vol. 2, no. 1, p. 5, 2013/09/24 2013, doi: 10.1186/2193-0414-2-5.
- [41] B. E. G., L.-T. G., and G. Bedford, "Fire and car-park buildings," *Joint Fire Research Organization*, 1968.
- [42] I. D. Bennetts, B. H. P. C. M. R. Laboratories, and B. S. I. G. L. P. Division, *Open-deck Car Park Fire Tests*. BHP Steel International Group, Long Products Division, 1985.
- [43] D. Madrzykowki and S. Kerber, "Fire Fighting Tactics Under Wind Driven Conditions: Laboratory Experiments," in "NIST Technical Note 1618," National Institute of Standards and Technology, 2009.
- [44] W. Węgrzyński and T. Lipecki, "Wind and Fire Coupled Modelling—Part I: Literature Review," *Fire Technology*, vol. 54, no. 5, pp. 1405-1442, 2018/09/01 2018, doi: 10.1007/s10694-018-0748-5.
- [45] A. Steen-Hansen, A. G. Bøe, K. Hox, R. F. Mikalsen, J. Stensaas, and K. Storesund, "Hva kan vi lære av brannen i Lærdal i januar 2014? Vurdering av brannspredningen.," SP Fire Research AS, 2014.
- [46] F. Ren, L. Hu, X. Sun, and K. Hu, "An experimental study on vertical temperature profile of facade fire plume ejected from compartment with an opening subjected to external wind normal to facade," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 130, pp. 94-99, 2018, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2018.04.008.
- [47] L. Hu, K. Hu, F. Ren, and X. Sun, "Facade flame height ejected from an opening of fire compartment under external wind," *Fire Safety Journal*, vol. 92, pp. 151-158, 2017/09/01/ 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.06.008>.
- [48] L. Hu, X. Sun, X. Zhang, and F. Ren, "Facade flame height and horizontal extending distance from opening of compartment fire with external sideward wind," *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 37, no. 3, pp. 3859-3867, 2019/01/01/ 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.proci.2018.06.201>.
- [49] Y. Li and M. Spearpoint, "Analysis of Vehicle Fire Statistics in New Zealand Parking Buildings," *Fire Technology*, vol. 43, no. 2, p. 93, 2007, doi: 10.1007/s10694-006-0004-2.
- [50] D. Denda, "What About Parking Garage Fires," *American Fire Journal*, vol. 45, no. 2, pp. 22-25, 1993.
- [51] D. Thouroude, E. Guillaume, D. Joyeux, and O. Lecoq-Jammes, "Statistical Analysis, a Need to Reach an Optimised Risk Management in Car Parks," *Fourth International Conference on Fire in Vehicles*, 2016. [Online]. Available: <https://ri.diva-portal.org/smash/get/diva2:1120218/FULLTEXT01.pdf>.
- [52] Byggforsk, "312.130 Parkeringsplasser og garasjeanlegg," 2015.
- [53] S. vegvesen and G. NOR, "Utforming og drift av parkeringsanlegg," 2002.
- [54] A. Tewarson, I. Abu-Isa, D. Cummings, and D. Ladue, "Characterization Of The Ignition Behaviour Of Polymers Commonly Used In The Automotive Industry," *Fire Safety Science*, vol. 6, pp. 991-1002, 01/01 2000, doi: 10.3801/IAFSS.FSS.6-991.
- [55] A. Terje, *Risk Analysis*, Second edition. ed. GB: GB: Wiley, 2015.
- [56] J. Pedersen, "Brannvesenets responstid når sekundene virkelig teller," Handelshøgskolen, UiT Norges arktiske universitet, 2015.
- [57] T. Aven, *Risk, Surprises and Black Swans: Fundamental Ideas and Concepts in Risk Assessment and Risk Management*. Routledge, 2014.
- [58] "Brannstatistikk.no." DSB. <https://www.brannstatistikk.no/brus-ui/>

