

RISE

Brannsikkerhet i naturlig ventilerte parkeringshus

RISE RAPPORT 2022:95

Christoph Meraner

Kemal Sarp Arsava

RRISE Fire Research AS

Division RISE SAFETY AND TRANSPORT

Brannsikkerhet i naturlig ventilerte parkeringshus

Christoph Meraner, Kemal Sarp Arsava

Abstract

Fire safety in naturally ventilated car parks

This study investigates fires in car parks, and is financed by the Norwegian Directorate for Civil Protection (DSB) and the Norwegian Building Authority (DiBK).

The main objective of the study is to collect knowledge in order to evaluate whether it is safe to reduce the fire resistance of main load-bearing systems in car parks in fire classes 1 and 2 to R 15 A2-s1,d0 [incombustible material], provided that more than 1/3 of the wall area is open and that the building design is such that good ventilation is ensured. Reduced fire resistance is indicated as a pre-accepted solution in the guideline to the Regulations on technical requirements for construction works (TEK17).

The results of this study indicate that the fire resistance of the load-bearing structures should not be reduced from R30 - R60 to R15, even if the wall surfaces have more than 1/3 open area fraction.

Relevant regulations in Norway, Sweden, Denmark and Finland have been surveyed. The following main rules apply to load-bearing systems in car parks in these Nordic countries:

- Car park with two floors : R 30 – R 60
- Car park with three and four floors : R 60
- Car park with more than four floors : R 60 – R 90 – R 120

In Norway and Sweden, subject to different prerequisites, the fire resistance may be reduced to R 15. In Denmark and Finland, however, the use of R 15 for the load-bearing system in car parks is not allowed. Sweden and Finland require the installation of an automatic sprinkler system if the fire resistance is reduced. This requirement applies to car parks with two floors in Sweden (from R 30 to R 15 with sprinklers) and for car parks with a height above 28 m, which is around eight floors, (from R 120 A2-s1,d0 to R 90 A2-s1,d0 with sprinklers). Of the four Nordic countries, only Norway uses the open area fraction in wall surfaces as a basis for reducing the fire resistance.

Under the pre-accepted solutions in the guideline to TEK17, car parks with open wall surfaces will in practice often need to have sprinkler systems, either because each floor is defined as a separate fire cell, or because the total gross area in a fire cell with open connection across several floors exceeds 800 m², or because the fire section size demands it. In these cases, the design will be more commensurable with Sweden, i.e. a reduction in fire resistance, but with the installation of a sprinkler system.

In order to be able to assess the effect of wall surfaces with a different open area fraction, a total of ten fire simulations with different wind conditions (direction and force) were carried out. Two generic car parks, one with 21 % open area fraction and one with 41 % open area fraction, were examined. The car parks have one floor and a floor area of 1 797 m², three «open» sides and one side closed by a firewall.

It is emphasized that the CFD simulations and structural analysis involve a number of uncertainties and limitations. Absolute values for fire spread and collapse time therefore only provide some

indications and no final answers. The focus is therefore on a comparison of car parks with a different open area fraction.

In a car park with 41 % open area fraction, i.e. more than 1/3 open wall area, the main load-bearing system may under certain conditions be constructed with a fire resistance of minimum R 15 A2-s1,d0 [incombustible material]. For a car park with 21 % open area fraction, the fire resistance must be minimum R 30 or R 60 depending on the number of floors.

In this study, only one floor was simulated. The fire simulations are based on a simple spreading model and are well suited for a comparative study. Owing to model uncertainty, spreading progress cannot be directly used for the analysis of other car parks.

The fire simulations have shown that a larger open area fraction, and thus better ventilation, can limit the extent of fire spread, i.e. the number of cars to which the fire spreads.

The difference between a closed (less than 1/3 open area fraction) and an open (more than 1/3 open area fraction) car park in terms of the number of cars that are burning, is most visible after 40 minutes – 60 minutes, when the fire has reached a certain size. This is because the difference in the time it takes the fire to spread between cars is accumulated over time, and because the ventilation conditions assume greater importance when the fire becomes so large as to make it ventilation controlled.

For very high wind velocities (e.g. 11 m/s), the open area fraction plays a smaller role, since this leads to good ventilation also when the open area fraction is lower (21 % in this study).

Increased ventilation and thus increased wind velocity in car parks, leads to the fire spreading faster in the wind direction, downstream of cars that are already burning. This is because the fire and smoke are driven to one side, and thus closer to adjacent cars. In major fires, increased ventilation will also give the fire increased access to oxygen.

A faster spread of fire in the wind direction may result in more cars burning simultaneously, compared with a more closed car park, where the flow rate is lower. Several cars burning simultaneously may cause greater thermal stress on the support system, and potentially an earlier collapse of the structure. The extent of stress will depend significantly on the wind direction, layout of the car park, location of the fire start relative to the location of other cars, and so on.

A simplified structural analysis showed that an increased open area fraction both entails a positive and a negative effect on the structure's load-bearing ability in a fire, depending on whether wind conditions are favorable or not.

Regardless of wind conditions, the structural analysis showed that expanding the open area fraction from 21 % (i.e. less than 1/3) to 41 % (more than 1/3), has a smaller effect on the collapse time than reducing the fire resistance from R 30 to R 15. The difference is even more pronounced in a reduction from R 60 to R 15. By using R 60 none of the beams collapsed. The results of this study indicate therefore that the fire resistance for load-bearing structures should not be reduced even if the wall surfaces have more than 1/3 open area fraction.

For all the fire simulations visibility conditions were examined after 15 minutes. For very low or very high wind velocities little difference in visibility conditions is expected, depending on the open area fraction. At moderate wind velocities, statistically the most common, it turned out that increasing the open area fraction improves visibility when the wind direction was favorable.

In what way open wall surfaces impact a car park fire is highly dependent on the fire scenario and wind conditions. These two factors cannot be controlled. Dimensioning the fire resistance to the main load-bearing system in a car park based on the open area fraction of wall surfaces (more than 1/3 of the area) is therefore considered unreliable. Open wall surfaces contribute in some cases to improving visibility conditions in car parks, which may extend the available escape time. For this reason, open wall constructions are nevertheless considered advantageous.

This study did not examine the effect of sprinkler systems in combination with a reduction in fire resistance, such as is allowed in Sweden. Nevertheless, a sprinkler system, which is little affected by wind conditions, is generally considered better suited as a compensatory measure if the fire resistance is reduced.

It is, therefore, our recommendation that the possibility of reducing the fire resistance in open car parks in fire classes 1 and 2 be reconsidered. This option should be considered removed, or other criteria could be employed to reduce the fire resistance, such as e.g. sprinkler systems (as in Sweden). Sprinkler systems are considered better suited as a compensatory measure if the fire resistance is reduced.

As a basis for such reassessment experiments (fire tests) should be carried out. This is because CFD simulations have some limitations, especially regarding the interaction between sprinkler/drops of water and solid fuel.

In addition to the wall design, other factors may also impact the spread of fire, such as e.g. ceiling height, the design of the floor slab, and the distance between cars. These factors were not examined in this study. E.g., simulations show that a ribbed floor slab (floor slab with underlying beams) may have a large impact on local flow conditions and thus the spread of fire. To examine these parameters it is recommended that the existing fire spreading model be used, and if relevant validated through experimental research.

Key words: car fire, car park, parking garage, fire spreading, CFD simulations, structural analysis, review of regulations.

Bilbrann, parkeringshus, parkeringsgarasje, brannspredning, CFD simuleringer, strukturanalyse, kartlegging regelverk

RISE Research Institutes of Sweden AB

RISE-rapport 2022:95

ISBN: 978-91-89711-35-8

Prosjektnummer: 20569-3

Kvalitetssikring: Tian Li

Finansiert av: Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap (DSB) og Direktoratet for byggkvalitet (DiBK)

Forsidebilde: Visualisering av brann i parkeringshus ved 11 m/s vind, fra numerisk simulering utført i prosjektet. Bilde: RISE Fire Research.

Trondheim 2022

Innhold

Abstract	1
Innhold	5
Forord	7
Sammendrag	8
1 Innledning	11
1.1 Bakgrunn	11
1.2 Målsetting	11
1.3 Omfang og begrensninger	11
1.4 Metodebeskrivelse	12
2 Kartlegging av regelverk	13
2.1 Norske regler (preaksepterte ytelser)	13
2.1.1 Bakgrunn og forutsetninger for redusert brannmotstand	14
2.1.2 Om behovet for automatisk sprinkleranlegg	15
2.2 Svenske regler (allmänna råd og konstruksjonsregler).....	15
2.3 Danske regler (præ-aksepterte løsninger)	16
2.4 Finske regler	17
2.5 Oppsummering.....	18
3 Brannmodellutvikling	20
3.1 Modell av en enkel bil.....	20
3.2 Brannspredning til en tilstøtende bil	21
3.3 Generisk P-hus geometri.....	23
3.4 Numerisk grid	28
4 Strukturanalyse	30
4.1 Dimensjonering av bærekonstruksjonen	30
4.2 Tid til kollaps.....	34
5 Scenarier	35
6 Resultater og diskusjon	37
6.1 Scenario 0 m/s vind.....	37
6.2 Scenario 3 m/s vind fra vest.....	41
6.3 Scenario 11 m/s vind fra vest.....	43
6.4 Scenario 3 m/s vind fra sør.....	45
6.5 Scenario 11 m/s vind fra sør.....	48
6.6 Oppsummering.....	51
7 Konklusjoner	53
7.1 Kartlegging av regelverk.....	53
7.2 Brannsimuleringene og strukturanalysen	54
7.3 Anbefaling	55

8 Referanser.....57

Forord

Dette prosjektet er finansiert av Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap (DSB) og Direktoratet for byggkvalitet (DiBK), og er utført som en del av prosjektporteføljen under forskningsavtalen mellom DSB og RISE Fire Research. Prosjektets bakgrunn og målsetting er beskrevet i kapittel 1.

Vi takker Vidar Stenstad som bidro i kartleggingen av regelverket og ellers støttet prosjektet med sin brannfaglige kunnskap.

Christoph Meraner, prosjektleder

Trondheim, juni 2022

Sammendrag

Denne studien omhandler branner i parkeringshus, og er finansiert av Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap (DSB) og Direktoratet for byggkvalitet (DiBK).

Hovedmålet med studien er å skaffe kunnskap for å kunne vurdere om det er forsvarlig å redusere brannmotstanden til det bærende hovedsystemet i parkeringshus i brannklasse 1 og 2 til R 15 A2-s1,d0 [ubrennbart materiale], under forutsetning av at mer enn 1/3 av veggarealet er åpent og at utformingen er slik at det oppnås god gjennomlufting. En slik reduksjon av brannmotstanden er angitt som preakseptert ytelse i veiledningen til byggt teknisk forskrift (TEK17).

Resultatene fra denne studien indikerer at brannmotstanden til bærende konstruksjoner, ikke bør reduseres fra R30 - R60 til R15 selv om veggflatene har mer enn 1/3 åpningsgrad.

Relevante regelverk i Norge, Sverige, Danmark og Finland er kartlagt. Følgende hovedregler gjelder for bæresystem i parkeringshus i disse nordiske landene:

- Parkeringshus i to etasjer : R 30 – R 60
- Parkeringshus i tre og fire etasjer : R 60
- Parkeringshus i mer enn fire etasjer : R 60 - R 90 – R 120

I Norge og Sverige kan, avhengig av forskjellige forutsetninger, brannmotstanden reduseres til R 15. I Danmark og Finland er R 15, derimot, ikke tillatt for bæresystemet i parkeringshus. Sverige og Finland forutsetter at det installeres et automatisk sprinkleranlegg dersom brannmotstanden blir redusert. Dette gjelder for parkeringshus med to etasjer i Sverige (fra R 30 til R 15 med sprinkler) og for parkeringshus over en høyde på 28 m, som er ca. åtte etasjer, (fra R 120 A2-s1,d0 til R 90 A2-s1,d0 med sprinkler). Av de fire nordiske landene er det kun Norge som bruker åpningsgraden i veggflatene som grunnlag for redusert brannmotstand.

Etter de preaksepterte ytelsene i veiledningen til TEK17, vil i praksis parkeringshus med åpne veggflater ofte måtte ha sprinkleranlegg, enten fordi hvert plan er definert som en egen branncelle, fordi samlet bruttoareal i en branncelle med åpen forbindelse over flere plan overstiger 800 m², eller fordi størrelsen av brannseksjonen krever det. I disse tilfellene vil utførelsen være mer sammenlignbar med Sverige, altså reduksjon av brannmotstanden, men med installasjon av sprinkleranlegg.

For å kunne vurdere effekten av veggflater med ulik åpningsgrad, er det gjennomført totalt ti brannsimuleringer med forskjellige vindforhold (retning og styrke). To generiske parkeringshus, ett med 21 % åpningsgrad og ett med 41 % åpningsgrad, ble undersøkt. Parkeringshusene har én etasje og et golvareal på 1 797 m², tre «åpne» sider og en side lukket av en brannvegg.

Det understrekes at CFD-simuleringene og strukturanalysen innebærer mange usikkerheter og begrensninger. Absoluttverdiene for brannspredningen og kollapstider gir derfor kun noen indikasjoner, og ikke endelige svar. Fokuset ligger derfor på sammenligningen av parkeringshus med forskjellige åpningsgrader.

I et parkeringshus med 41 % åpningsgrad, altså mer enn 1/3 åpent veggareal, kan det bærende hovedsystemet under visse forutsetninger oppføres med brannmotstand på minst R 15 A2-s1,d0

[ubrennbart materiale]. For et parkeringshus med 21 % åpningsgrad, må brannmotstanden være minst R 30 eller R 60 avhengig av antall etasjer.

I denne studien er kun én etasje simulert. Brannsimuleringene er basert på en enkel spredningsmodell, og er godt egnet for en sammenligningsstudie. På grunn av modellusikkerheter kan spredningsforløpet ikke direkte brukes for analyse av andre parkeringshus.

Brannsimuleringene har vist at en større åpningsgrad, og dermed bedre gjennomlufting, kan begrense omfanget av brannspredningen, altså hvor mange biler brannen sprer seg til.

Forskjellen mellom et lukket (mindre enn 1/3 åpningsgrad) og et åpent (mer enn 1/3 åpningsgrad) parkeringshus med tanke på hvor mange biler som brenner, er mest synlig etter 40 minutter – 60 minutter når brannen har oppnådd en viss størrelse. Dette er fordi forskjellen i spredningstiden mellom biler akkumuleres over tid og fordi ventilasjonsforholdene blir viktigere når brannen er så stor at den blir ventilasjonskontrollert.

For veldig høye vindhastigheter (f. eks 11 m/s), spiller åpningsgraden en mindre rolle, siden dette fører til god gjennomlufting også for mindre åpningsgrader (21 % i denne studien).

Økt gjennomlufting og dermed økt vindhastighet i parkeringshus, fører til raskere brannspredning i vindretningen, nedstrøms av biler som allerede brenner. Det skyldes at brannen og brannrøyken drives til én side, og dermed nærmere tilstøtende biler. For større branner vil økt gjennomlufting også føre til at brannen har økt tilgang til oksygen.

En raskere brannspredning i vindretningen kan føre til at flere biler brenner samtidig, sammenlignet med et mer lukket parkeringshus, hvor strømningshastigheten vil være lavere. Når flere biler brenner samtidig kan det føre til større termisk påkjenning på bæresystemet og potensielt tidligere kollaps av strukturen. Påkjenningen vil være sterkt avhengig av vindretningen, parkeringshusets layout, lokasjonen av brannstarten i forhold til lokasjon av andre biler og mer.

En forenklet strukturanalyse viste at en økt åpningsgrad både har en positiv og en negativ effekt for strukturens bæreevne ved brann, avhengig av om vindforholdene er gunstige eller ikke.

Uavhengig av vindforholdene viste strukturanalysen at å øke åpningsgraden fra 21 % (altså mindre enn 1/3) til 41 % (mer enn 1/3), har en mye mindre effekt på kollapstiden enn å redusere brannmotstanden fra R 30 til R 15. Forskjellen er enda større for en reduksjon fra R 60 til R 15. Ved å bruke R 60 kollapset ingen av bjelkene. Resultatene fra denne studien indikerer derfor at brannmotstanden til bærekonstruksjonen ikke bør reduseres selv om veggflatene har mer enn 1/3 åpningsgrad.

For alle brannsimuleringene ble siktforholdene etter 15 minutter undersøkt. For veldig lave eller veldig høye vindhastigheter forventes det liten forskjell i siktforholdene avhengig av åpningsgraden. Ved moderate vindhastigheter, som er statistisk sett mest vanlig, viste det seg at å øke åpningsgraden forbedrer siktforholdene når vindretningen var fordelaktig.

Hvordan åpne veggflater påvirker en brann i parkeringshus er sterkt avhengig av brannscenariet og vindforholdene. Dette er to faktorer som ikke kan kontrolleres. Å dimensjonere brannmotstanden til det bærende hovedsystemet i et parkeringshus basert på åpningsgraden av veggflatene (mer enn 1/3 av arealet), anses derfor som lite robust. Åpne veggflater bidrar i noen tilfeller til å forbedre

siktforholdene i parkeringshus, noe som kan øke den tilgjengelige rømmingstiden. Derfor anses åpne veggkonstruksjoner likevel som fordelaktig.

Denne studien har ikke undersøkt effekten av sprinkleranlegg i kombinasjon med redusert brannmotstand, slik man tillater i Sverige. Likevel anses et slikt tiltak, som er lite påvirket av vindforholdene, som generelt bedre egnet som kompenserende tiltak for å redusere brannmotstanden.

Det anbefales derfor at muligheten til reduksjon av brannmotstanden i åpne parkeringshus i brannklasse 1 og 2 revurderes. Denne muligheten bør vurderes fjernet, eller det kan benyttes andre kriterier for å redusere brannmotstanden, for eksempel sprinkleranlegg (som i Sverige). Sprinkleranlegg anses å være bedre egnet som kompenserende tiltak for redusert brannmotstand.

Som grunnlag for en slik revurdering bør det gjøres eksperimenter (brannforsøk). Dette fordi CFD-simuleringer har noen begrensninger, spesielt med tanke på samspill mellom sprinkler/vanndråper og fast brennstoff.

I tillegg til veggutformingen kan også andre faktorer påvirke brannspredningen, som for eksempel takhøyde, utformingen av tak-/dekkekonstruksjonen og avstand mellom biler. Disse faktorene har ikke blitt undersøkt i denne studien. Simuleringene viser for eksempel at et dekke med underliggende bjelker (ribbedekke) kan ha en stor effekt på de lokale strømningsforholdene og dermed brannspredningen. Det anbefales å bruke den eksisterende brannspredningsmodellen for å undersøke disse parameterne, og eventuelt validere med eksperimentell forskning.

1 Innledning

1.1 Bakgrunn

RISE har i evalueringsrapporten etter Sola-brannen [1] anbefalt at den preaksepterte ytelsen som gir åpning for å redusere brannmotstanden til bærende hovedsystem i parkeringshus i brannklasse 1 og 2 bør endres. Den preaksepterte ytelsen forutsetter at mer enn 1/3 av veggarealet er åpent, og utformingen er slik at det oppnås god utlufting. Det bør i den forbindelse utredes hva graden av åpenhet (størrelse, form og fordeling på åpninger) har å si for brannutvikling, hva som anses som god, hensiktsmessig utlufting, og om det skal legges begrensninger i parkeringshusets golvareal og utforming for at denne bestemmelsen skal gjelde.

Åpne veggflater er i brannkonseptet for p-huset på Sola også benyttet som argument for å unnlate seksjonering. I veiledningen til TEK er åpne veggflater ikke knyttet til kravet om seksjonering, men til tidligfasen av en brann og tiltak som skal sikre tilstrekkelig tid til rømning og redning. Etter veiledningen til TEK [2] kan åpne veggflater, under visse forutsetninger, redusere brannmotstanden til bæresystem i parkeringshus i brannklasse 1 og 2. Kravet i TEK17 § 11-4 *Bæreevne og stabilitet*, tredje ledd er at [3]:

«bæresystemet 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».

Veiledningen sier at:

«Under forutsetning av at nødvendig tid til rømning og sikkerhet for slokkemannskaper er ivaretatt, kan parkeringshus med mer enn 1/3 av veggflatene åpne, oppføres med brannmotstand R 15 A2-s1,d0 [ubrennbart materiale]. Åpningene må være fordelt og de enkelte plan ha slik form at en oppnår god gjennomlufting. Byggverket må ikke være høyere enn at slokkemannskapene kan komme lett til med sine høyderedskaper».

1.2 Målsetting

Målet med prosjektet er å vurdere de preaksepterte ytelsene knyttet til bæreevne under brann for parkeringshus i brannklasse 1 og 2 i tråd med anbefalingen til RISE etter Sola-brannen. Prosjektet skal etablere grunnlaget for vurderingene ved å gjennomføre brannsimuleringer. Videre skal regler i andre land (spesielt de nordiske) kartlegges. Vurderingen av preaksepterte ytelser til bæreevne vil for øvrig ses i sammenheng med andre krav gitt i TEK17, spesielt i § 11-7 *Brannseksjoner* og § 11-12 *Tiltak for å påvirke rømnings- og redningstider*.

1.3 Omfang og begrensninger

Denne studien er basert på brannsimuleringer i et generisk parkeringshus. Resultatene kan derfor ikke brukes direkte for (andre) parkeringshus som har en annen utforming.

Brannspredningsmodellen og strukturanalysen er basert på forenklingene og er derfor mest egnet for en sammenligningsstudie som presentert her (21 % åpningsgrad vs. 41 % åpningsgrad). De resulterende kollapstider burde derfor ikke anses som en uavhengig kvantitativ studie.

Kun én etasje ble simulert. Hvordan åpne veggflater påvirker eventuell brannspredning til andre etasjer og/eller tilstøtende bygg ble derfor ikke evaluert.

Det ble ikke simulert sprinkleranlegg eller mekanisk ventilasjon i parkeringshuset.

Brannspredningsmodellen er basert på predefinerte kurver som ble etablert for biler med fossilt drivstoff. Det ble ikke undersøkt hvordan biler med alternativt drivstoff som for eksempel EVs påvirker resultatene.

Brannmodellen tar ikke hensyn til at brannforløpet varierer for forskjellige biler. Nyere biler inneholder for eksempel en større andel plastmaterialer [4] og har en høyere maksimal varmeavgivelseshastighet [5].

Kun en avstand mellom bilene ble undersøkt i denne studien, effekten av avstanden ble derfor ikke analysert.

1.4 Metodebeskrivelse

Regelverket for parkeringshus i Norge, Sverige, Danmark og Finland ble kartlagt for å skaffe underlag for vurderingen av de preaksepterte ytelsene gitt i veiledningen til TEK 17 for bæreevne under brann for parkeringshus i brannklasse 1 og 2, dvs. for parkeringshus i to etasjer (brannklasse 1) eller i tre til fire etasjer (brannklasse 2). Kartleggingen er beskrevet i kapittel 2.

Studien er basert på totalt ti simuleringer, gjennomført i FDS¹ versjon 6.7.5, av brann i et generisk parkeringshus med to forskjellige åpningsgrader i veggene og forskjellige vindscenarier. FDS -modellen er beskrevet i kapittel 3.

Basert på temperaturutviklingen i FDS-simuleringene ble en strukturanalyse gjennomført for å undersøke hvordan forskjellige utførelser av veggene, altså åpningsgraden av parkeringshuset, påvirker strukturens evne å motstå brannen. Strukturanalysen er beskrevet i kapittel 0.

¹ <https://pages.nist.gov/fds-smv/>

2 Kartlegging av regelverk

Kartleggingen gjelder parkeringshus over terreng i Norge, Sverige, Danmark og Finland.

Kartleggingen er del av underlaget for å revurdere de preaksepterte ytelsene som er gitt i veiledningen til TEK17 for bæreevne under brann for parkeringshus i brannklasse 1 og 2, dvs. for parkeringshus i to etasjer (brannklasse 1) eller i tre til fire etasjer (brannklasse 2).

I tabellene for brannmotstand som er vist i Tabell 2-1 har vi for helhetens skyld også inkludert parkeringshus med mer enn fire etasjer. Garasjer og parkeringshus i én etasje er ikke tatt med i tabellene. Dette er ofte enkle og oversiktlige byggverk med gode rømningsforhold. Slike byggverk kan i de nordiske landene som er kartlagt, oppføres i bærende konstruksjoner med brannmotstand varierende fra uspesifisert (dvs. krav/ytelse ikke angitt) til R 15 eller R 30. Det kan benyttes brennbare konstruksjoner.

2.1 Norske regler (preaksepterte ytelser)

Parkeringshus med to eller flere etasjer eller plan er etter veiledning til TEK17 (VTEK17) § 11-2 *Risikoklasser* plassert i risikoklasse 2.

Plassering i brannklasse følger av VTEK17 § 11-3: *Brannklasser*:

En og to etasjer: Brannklasse 1

Tre og fire etasjer: Brannklasse 2

Fem eller flere etasjer: Brannklasse 3

Nødvendig brannmotstand følger så av VTEK17 § 11-4: *Bæreevne og stabilitet* (utdrag se Tabell 2-1):

Tabell 2-1 Bærende bygningsdelers brannmotstand avhengig av brannklasse i Norge.

Bygningsdel *	Brannklasse		
	1 (1 og 2 etasjer)	2 (3 og 4 etasjer)	3 ** (5 eller flere etasjer)
Bærende hovedsystem	R 30 (B 30)	R 60 (B 60)	R 90 A2-s1,d0 (A 90)
Sekundære, bærende bygningsdeler, etasjeskillere og takkonstruksjoner som ikke er del av hovedbæresystem eller stabiliserende	R 30 (B 30)	R 60 (B 60)	R 60 A2-s1,d0 (A 60)

*) Brannmotstand for trappeløp og bygningsdeler under øverste kjeller er utelatt.

***) Preaksepterte ytelser gjelder for byggverk i inntil 16 etasjer.

For bærende konstruksjoner i parkeringshus i brannklasse 1 og 2 er det imidlertid gitt anledning til å redusere brannmotstanden, jf. preaksepterte ytelser nr. 7:

«Under forutsetning av at nødvendig tid til rømning og sikkerhet for slokkemannskaper er ivaretatt, kan parkeringshus med mer enn 1/3 av veggflatene åpne, oppføres med brannmotstand R 15 A2-s1,d0 [ubrennbart materiale]. Åpningene må være fordelt og de enkelte plan ha slik form at en oppnår god gjennomlufting. Byggverket må ikke være høyere enn at slokkemannskapene kan komme lett til med sine høyderedskaper.»

2.1.1 Bakgrunn og forutsetninger for redusert brannmotstand

Funksjonskravet for brannklasse 1 og 2 er gitt i TEK17 § 11-4 *Bæreevne og stabilitet*, tredje ledd:

«Bæresystemet i byggverk 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.»

Dette funksjonskravet er bakgrunnen for at veiledningen til TEK (preaksepterte ytelser) under visse forutsetninger gir muligheten til redusert brannmotstand for bærende konstruksjoner i parkeringshus i brannklasse 1 og 2. Forutsetningene er at:

- *nødvendig tid til rømning og sikkerhet for slokkemannskaper er ivaretatt*
- *åpningene er fordelt og de enkelte plan har slik form at en oppnår god gjennomlufting*
- *byggverket ikke er høyere enn at slokkemannskapene kan komme lett til med sine høyderedskaper*

Nødvendig tid til rømning kan normalt forutsettes å være ivaretatt ved å oppfylle preaksepterte ytelser til TEK17 § 11-13 *Utgang fra branncelle*. Her angis at det i parkeringshus må være:

- Maksimalt 50 m avstand fra hvilket som helst sted i en branncelle til nærmeste utgang (rømningsvei eller sikkert sted)
- Minst to trapperom Tr 2 dersom det ikke er utgang fra hver etasje til sikkert sted (gjelder inntil 8 etasjer)

Om det vil oppnås god gjennomlufting vil være avhengig av utformingen av parkeringshuset. God gjennomlufting er en forutsatt ytelser som må dokumenteres i hvert enkelt tilfelle. Veiledningen til TEK17 går ikke nærmere inn på hvordan ytelsen kan dokumenteres, men temaet er behandlet i Byggforskserien fra SINTEF Community². Veiledningen til TEK17 angir at relevante anvisninger i Byggforskserien kan benyttes for å dokumentere oppfyllelse av ytelser.

Byggforskserien, anvisning 520.380 Røykkontroll i bygninger (2006), beskriver åpne veggflater som alternativ til mekanisk røykventilasjon i garasjeanlegg. Følgende forutsetninger må være oppfylt:

- Minst 33 % av ytterveggen må være *fri åpning*.
- Samlet åpningsareal må være minst 2,5 % av golvarealet.
- Åpningsarealet må være godt fordelt, helst over to motstående parallelle langvegger for å skape god gjennomtrekk.
- Det må være mindre enn 25 m fra et hvilket som helst sted i garasjeanlegget til nærmeste ventilasjonsåpning. *Maksimal garasjebredde er altså 50 m.*
- Overkant av veggåpningene må plasseres i en høyde som tilsvarer minst 90 % av total romhøyde.
- Underkant av veggåpningene kan maksimalt være 1,3 m over golvet.

² <https://www.byggforsk.no/byggforskserien>

Byggverket må dessuten være tilrettelagt slik at slokkemannskapene kan komme lett til med sine høyderedskaper. Preaksepterte ytelser til § 11-17 *Tilrettelegging for rednings- og slokkemannskap* angir at:

- Det må være kjørbart atkomst fram til hovedinngangen og brannvesenets angrepsvei
- Det må være tilgjengelighet for brannvesenets høyderedskap slik at alle etasjer og brannseksjoner kan nås
- Alle deler av en etasje må kunne nås med maksimalt 50 m slangeutlegg
- Det må være orienteringsplan ved inngangen til hovedangrepsveien (bl.a. større byggverk i rkl. 2).

Sikkerheten for slokkemannskaper må vurderes av brannvesenet under pågående innsats. I tilfeller der det ikke er behov for redning av personer, kan slokkeinnsatsen primært gjøres fra utsiden av byggverket.

2.1.2 Om behovet for automatisk sprinkleranlegg

TEK17 § 11-8 *Brannceller*, annet ledd, stiller krav om at brannceller skal være utført slik at de forhindrer spredning av brann og branngasser til andre brannceller i den tiden som er nødvendig for rømning og redning.

Dersom hvert plan er definert som en egen branncelle, må brannspredning mellom hvert plan forhindres i den nødvendige tiden. Veiledningen gir preaksepterte ytelser for å oppnå dette. For parkeringshus med åpne veggflater er det primært automatisk sprinkleranlegg som er egnet.

Alternativt kan en branncelle ha åpen forbindelse over inntil tre plan. Etter preaksepterte ytelser må det da installeres automatisk sprinkleranlegg når samlet bruttoareal for plan som har åpen forbindelse er over 800 m².

Hvorvidt forbindelsen mellom ulike plan i et parkeringshus defineres som åpen, vil være avhengig av utformingen av fasadene og den interne forbindelsen mellom planene.

For å oppfylle kravet i TEK17 § 11-8 *Brannceller*, vil det derfor i mange tilfeller være nødvendig å installere et automatisk sprinkleranlegg i parkeringshus med åpne veggflater.

2.2 Svenske regler (allmänna råd og konstruksjonsregler)

Kartleggingen er basert på

- *Boverkets byggregler (2011:6) – föreskrifter och allmänna råd, BBR (BFS 2011:6 med ändringar till och med BFS 2020:4)*
- *Boverkets konstruktionsregler EKS 11 (gjeldende fra 1. juli 2019).*

For å kunne bestemme nødvendig brannmotstand for bærende konstruksjoner må man plassere byggverket i virksomhetsklasse (verksamhetsklass, Vk 1-6 med underklasser) og bygningsklasse (byggnadsklass, Br0 til Br3).

Et parkeringshus vil normalt plasseres i virksomhetsklasse 2A. Om det påregnes mer enn 150 personer i parkeringshuset samtidig, bør parkeringshuset plasseres i virksomhetsklasse 2B. Denne klassen kan

være aktuell for eksempel for parkeringshus i tilknytning til større forsamlingslokaler som teater etc. Vi tar imidlertid her utgangspunkt i virksomhetsklasse 2A.

For virksomhetsklasse 2A blir bygningsklassen for parkeringshus

- Tre eller flere etasjer : Br1
- To etasjer og mer enn 200 m² uten seksjonering : Br2
- Én etasje : Br3

Bæreevne under brann bestemmes i samsvar med Boverkets konstruksjonsregler EKS 11 (gjeldende fra 1. juli 2019).

Avhengig av bygningsklasse plasseres bygningsdelene først i brannsikkerhetsklasser (BSK) 1 til 5 etter tabellene «C-3» til «C-5» i EKS11.

Tabell «C-7» i Boverkets konstruksjonsregler EKS 11 gir så nødvendig brannmotstand avhengig av brannsikkerhetsklassen. Nødvendig brannmotstand er avhengig av brannenergien i byggverket. For parkeringshus antas brannenergi $\leq 800 \text{ MJ/m}^2$.

Basert på vår tolkning av dette blir nødvendig brannmotstand for bærende konstruksjoner i parkeringshus som vist i tabellen Tabell 2-2. Brannsikkerhetsklasse = BSK.

Tabell 2-2 Nødvendig brannmotstand avhengig av brannsikkerhetsklassen i Sverige.

Brannmotstand etter bygge- og konstruksjonsreglene (BBR 2011:6 og EKS11)	2 etasjer (Br 2)	3 og 4 etasjer (Br 1)	5 - 8 etasjer (Br 1)	8 - 16 etasjer (Br 1)
Bærende konstruksjoner generelt	Alt. 1 R 30	R 60	Alt. 1 R 90 *	Alt. 1 R 90
	Alt. 2 R 15 med sprinkler		Alt. 2 R 60 + sprinkleranlegg	Alt. 2 R 60 + sprinkleranlegg
	(BSK 3)	(BSK 4)	(BSK 5)	(BSK 5)
*) Bjelkelag og massive vegger plasseres i BSK 4, og kan være R 60				

2.3 Danske regler (præ-aksepterte løsninger)

Kartleggingen av de danske reglene er basert på en oversikt som er gitt i rapporten *Brandsikkerhed i garageanlæg, oplag af litium-ion batterier og batterier til solcelleanlæg i bygninger*, 2022-01-14, versjon 02, DBI (Dansk Brand- og sikringsteknisk Institut) og TI (Teknologisk Institut).

Det er ikke gitt særskilte preaksepterte ytelser (præ-accepterede løsninger) for brannmotstanden til bærende bygningsdeler i garasjeanlegg. Brannmotstanden bestemmes derfor av om garasjeanlegget plasseres i anvendelseskategori 1 eller anvendelseskategori 3. For bærende bygningsdeler er det ikke forskjell på de preaksepterte ytelsene for disse to kategoriene.

Nødvendig brannmotstand for bærende konstruksjoner i parkeringshus følger av Tabell 2-3.

Tabell 2-3 Brannmotstand for bærende konstruksjoner i parkeringshus i Danmark.

Brannmotstand etter byggreglene fra 2018 - BR18	Golv i øverste etasje inntil 5,1 m over terreng (tilsv. ca. 2 etasjer)	Golv i øverste etasje inntil 12,0 m over terreng (tilsv. ca. 4 etasjer)	Golv i øverste etasje inntil 45,0 m over terreng (tilsv. ca. 15 etasjer)
Bærende bygningsdeler <i>BS: ubrennbare materialer</i> <i>BD: brennbare materialer</i>	R 60 (BD 60) Øverste etasje: R 30 (BD 30)	<u>Alt. 1:</u> R 60 / A2-s1,d0 (BS 60) <u>Alt. 2:</u> R 60 / D-s2,d2 + beskyttelse ved mer enn 20 % eksponert overflate <u>Alt. 3:</u> R 60 / D-s2,d2 + sprinkleranlegg Øverste etasje (for alle alternativer): R 30 (BD 30)	R 120 / A2-s1,d0 (BS 120) Øverste etasje: R 60 (BD 60)

2.4 Finske regler

Vi har fått en kort oppsummering av de finske reglene fra Esko Mikkola, KK-Palokonsultti Oy. Reglene finnes i 848/2017 Decree of the Ministry of the Environment on Fire safety of Buildings.

Følgende gjelder for parkeringshus (se Tabell 2-4):

Tabell 2-4 Brannmotstand avhengig av antall etasjer/høyde i Finland.

Antall etasjer/høyde	Brannmotstand
To etasjer (høyde inntil 9 m)	R 30 D-s2,d2
Mer enn to etasjer og høyde inntil 28 m (ca. 8 etasjer)	R 60 A2-s1 d0
Høyde 28 m – 56 m (ca. 9 til ca. 18 etasjer)	R 120 A2-s1,d0 eller R 90 A2-s1,d0 med automatisk sprinkleranlegg
Høyde over 56 m (over ca. 18 etasjer)	R 120 A2-s1,d0 og automatisk sprinkleranlegg

2.5 Oppsummering

En samlet oversikt over nødvendig brannmotstand for bæresystem i parkeringshus i Norge, Sverige, Danmark og Finland er gitt i tabellen nedenfor.

Følgende hovedregler gjelder:

- Parkeringshus i to etasjer : R 30 – R 60
- Parkeringshus i tre og fire etasjer : R 60
- Parkeringshus i mer enn fire etasjer : R 60 - R 90 – R 120

I Norge kan brannmotstanden reduseres i parkeringshus med to etasjer (fra R 30 til R 15 A2-s1,d0) og i parkeringshus med tre og fire etasjer (fra R 60 til R 15 A2-s1,d0), dersom mer enn 1/3 av veggflatene er åpne og gitte forutsetninger er oppfylt. Det kan benyttes brennbare konstruksjoner inntil fire etasjer. For å oppfylle kravet i TEK17 § 11-8 om brannceller, vil det i mange tilfeller være nødvendig å installere et automatisk sprinkleranlegg i parkeringshus med åpne veggflater.

I Sverige er det mulig å redusere brannmotstanden i parkeringshus med to etasjer (fra R 30 til R 15) og i parkeringshus med mer enn fire etasjer (fra R 90 til R 60), dersom det installeres et automatisk sprinkleranlegg. Det kan benyttes brennbare konstruksjoner uavhengig av antall etasjer.

I Danmark kan brannmotstanden reduseres i øverste etasje. Det kan benyttes brennbare konstruksjoner (klasse BD) i inntil fire etasjer, og generelt i øverste etasje.

I Finland kan brannmotstanden reduseres i parkeringshus med høyde over 28 m (fra R 120 til R 90) ved installasjon av automatisk sprinkleranlegg. Det kan bare benyttes brennbare konstruksjoner (klasse D-s2,d0) i parkeringshus inntil to etasjer.

Tabell 2-5 Oppsummering av brannmotstand for bæresystem i parkeringshus i Norge, Sverige, Danmark og Finland.

Brannmotstand for bæresystem i parkeringshus											
2 etasjer (DK: Øverste golv <= 5,1 m over terreng) (FIN: Høyde inntil 9 m)				3-4 etasjer (DK: Øverste golv <= 12,0 m over terreng)				5-16 etasjer (DK: Øverste golv <= 45,0 m over terreng)			
N	S	DK	FIN	N	S	DK	FIN	N	S	DK	FIN
R 30 ¹⁾ (B 30)	<u>Alt. 1</u> R 30 <u>Alt. 2</u> R 15 med sprinkler	R 60 (BD 60) Øverste etasje: R 30 (BD 30)	R 30 D- s2,d0	R 60 ¹⁾ (B 60)	R 60	<u>Alt. 1:</u> R 60 A2-s1,d0 ²⁾ (BS 60) <u>Alt. 2 ²⁾:</u> R 60 D-s2,d2 + beskyttelse ved mer enn 20 % eksponert overflate <u>Alt. 3 ²⁾:</u> R 60 D-s2,d2 + sprinkler	R 60 A2-s1, d0	R 90 A2- s1,d0 ³⁾ (A 90)	<u>Alt. 1</u> R 90 ⁴⁾ <u>Alt. 2</u> R 60 med sprinkler	R 120 A2- s1,d0 (BS 120) Øverste etasje: R 60 (BD 60)	<u>Inntil høyde 28 m (ca. 8 etasjer):</u> R 60 A2-s1, d0 <u>Over høyde 28 m (ca. 8 etasjer):</u> R 120 A2-s1,d0 eller R 90 A2- s1,d0 med sprinkler

¹⁾ R 15 A2-s1,d0 (ubrennbart materiale) dersom mer enn 1/3 av veggflatene er åpne. Det er forutsatt at nødvendig tid til rømning og sikkerhet for slokkemannskaper er ivaretatt. Åpningene må være fordelt og de enkelte plan ha slik form at en oppnår god gjennomlufting. Byggverket må ikke være høyere enn at slokkemannskapene kan komme lett til med sine høyderedskaper.

²⁾ Øverste etasje: R 30 (BD 30)

³⁾ R 60 A2-s1,d0 (A 60) for sekundære, bærende bygningsdeler, etasjeskillere og takkonstruksjoner som ikke er del av hovedbæresystem eller stabiliserende

⁴⁾ Fem til åtte etasjer: R 60 for bjelkelag og massive vegger

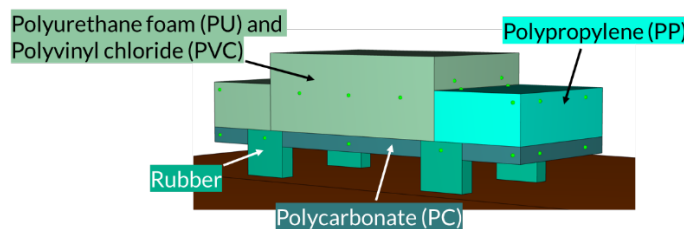
3 Brannmodellutvikling

Formålet med brannsimuleringene er å undersøke hvordan veggutforming, altså åpningsgraden av parkeringshuset, påvirker brannspredningen fra bil til bil og dermed den termiske belastningen på det bærende hovedsystemet. Derfor fokuserte modellutviklingen i hovedsak på brannspredningen fra bil til bil, mens brannforløpet i en enkel bil er predefinert. Flere detaljer er beskrevet i de følgende avsnittene.

Det er viktig å understreke at brannspredningsmodellen i denne studien er en forenklet modell med formål å sammenligne brannspredning ved forskjellige ventilasjonsforhold. På grunn av forenklingene og generaliseringene, burde antennelsestidspunktene kun brukes for sammenligning av parkeringshus med forskjellig åpningsgrad.

3.1 Modell av en enkel bil

Modellen av bilen for brannsimuleringene er basert på modellen utviklet av Markert og Giuliani [6]. Bilmodellen er bygd opp av blokker med forskjellig materialsammensetning (se Figur 3-1). Tilsvarende materialegenskaper er oppgitt i Tabell 3-1.



Figur 3-1 Materialsammensetningen i bilmodellen. Gummi (Rubber) i dekkene, polykarbonat (PC) i støtfangeren, polypropylen (PP) i motordekslet, polyuretan skum (PU) i setene og polyvinylklorid (PVC) i plastdelene i midten og bakdelen av bilen.

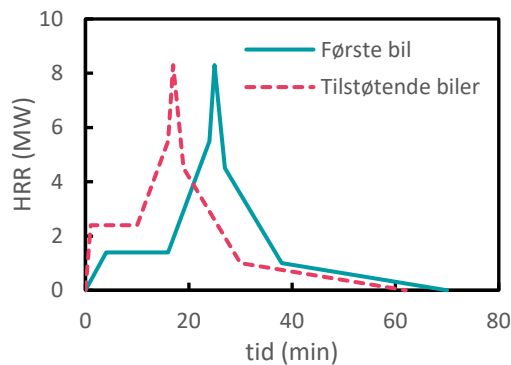
Tabell 3-1: Materialegenskaper [6].

Material	Tetthet (kg/m ³)	Varmeledningsevne (W/(m K))	Spesifikk varme (kJ/(kg K))	Maks. varmeavgivelseshastighet per overflate areal, HRRPUA (kW/m ²)	Antennelsestemperatur (°C)
Gummi (Rubber)	1100	0,13	2,01	539	289
Polyuretan skum (PU)	30	0,03	1,8	296	205
Polyvinylklorid (PVC)	1380	0,19	1,0	183	238
Polypropylen (PP)	900	0,15	1,92	1170	211
Polykarbonat (PC)	1200	0,19	1,2	429	450
Betong*	2280	1,8	1,04	2280	-

*) basert på standard verdier i FDS.

Dekkene er modellert med en tykkelse på 20 mm. Alle andre deler av bilen er modellert med en materialtykkelse på 50 mm. Middelen og bakdelen av bilen er modellert med en blanding av PU og PVC. Blandingsforholdet er 50 % / 50 % (massebasert).

Modellen utviklet av Markert og Giuliani [6] gir gode resultater sammenlignet med eksperimentelle referansebrannforløp (HRR-kurver, dvs. kurver som viser varmeavgivelseshastigheten) [3], når varmeavgivelsen er basert på predefinerte tidsintervaller for varmeavgivelsen (*HRR time-ramp*). Brannforløpet blir imidlertid for raskt når man bruker antennelsestemperaturer for de enkelte materialene. I denne studien ble det derfor brukt predefinerte tidsforløp for HRR fra bilen (se Figur 3-2). Bilen der brannen starter følger en kurve som oppnår maksimum varmeavgivelse etter 25 minutter, mens alle andre biler følger kurven som oppnår maksimum etter 19 minutter. Reaksjonen i gassfasen ble modellert basert på PVC (brensel $C_2H_3N_2$ og *soot yield* = 0,02) som har den største masseandel i bilen ifølge Markert og Giuliani [6].



Figur 3-2 Predefinert brannforløp (varmeavgivelseshastighet, HRR) basert på referansekurvene fra Steel Research, rapport EUR 18867 [7].

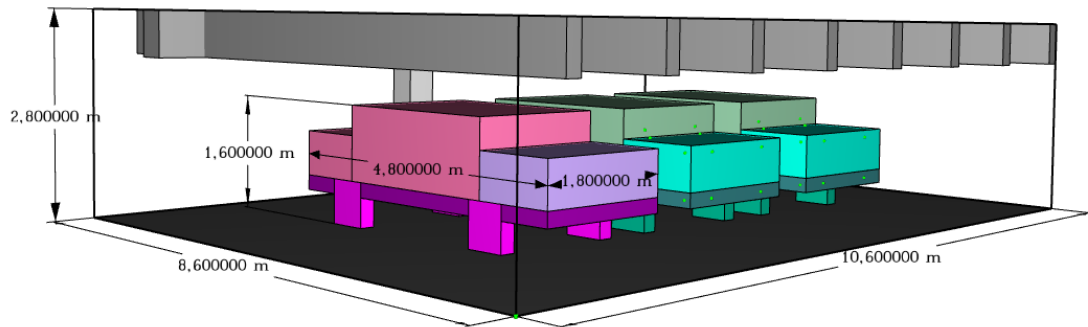
Alle deler av bilen antenner samtidig når bilen begynner å brenne. Modellen tar altså ikke hensyn til brannspredning mellom de enkelte delene av bilen, som man hadde forventet i en reell bilbrann. I et reelt tilfelle kan brannen for eksempel starte i motorrommet og spre seg til interiøret på et senere tidspunkt. Modellen tar imidlertid hensyn til at bildelene gir ulike bidrag til brannen, avhengig av materialegenskapene. Brannen frigjør derfor for eksempel mer energi i motorrommet enn i den bakre del av bilen, noe som kan ha betydning for brannspredningen fra bil til bil. En forenkling i modellen er at alle biler er parkert i samme retning. Det vil si at alle bilene står parkert med motorrommet mot sør.

For at maksimal varmeavgivelseshastighet i modellen skal samsvare med referansekurven, ble det brukt en skaleringsfaktor (*AREA_MULTIPLIER*) på 0,576 for alle bildelene.

3.2 Brannspredning til en tilstøtende bil

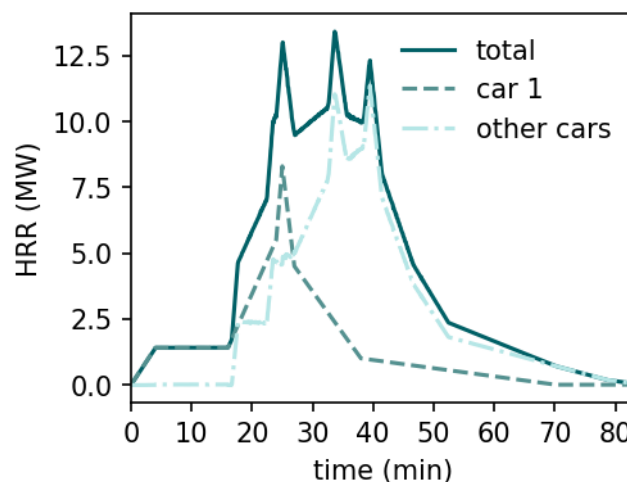
Markert og Giuliani [6] konkluderer med at deres modell ikke er egnet for å modellere brannspredningen til flere biler. En ny metode for å definere antennelsestidspunkt for tilstøtende biler ble derfor etablert i denne studien. Metoden er basert på 37 temperaturmålepunkter fordelt på alle deler og sider av bilen.

En modell av tre biler ble laget for å teste brannspredningsmodellen. Modellen inneholder et tak på 2,8 m høyde og helt åpne sider (se Figur 3-3). Brannen starter i bilen med rød/lilla farge, og sprer seg etter hvert til de to tilstøtende bilene. De lysegrønne punktene viser lokasjonen av temperaturmålepunktene som er brukt for å definere spredningen. Den kritiske antennelsestemperaturen i punktene tilsvarer antennelsestemperaturen av materialene oppgitt i Tabell 3-1.



Figur 3-3 3D-modellen av 3 biler i en åpen garasje som ble benyttet for å utvikle brannspredningsmodellen. Temperaturmålepunktene er illustrert med små grønne kuler.

Figur 3-4 viser brannforløpet uttrykt ved endringen i varmeavgivelseshastigheten over tid for simuleringen med tre biler. Den første bilen antenner etter rundt 17 minutter, mens den siste bilen antenner 23 minutter fra brannstarten, altså 6 minutter etter bil nummer to. Dette er i samme størrelsesorden som spredningstider oppgitt i litteraturen, hvor det rapporteres spredningstider til den første tilstøtende bilen på 5 – 21 minutter [7–9,9,10]. Hvor raskt brannen kan spre seg til tilstøtende biler påvirkes av flere faktorer, som for eksempel plasseringen av bilene, altså orientering og avstand til hverandre. Den raskeste spredningstiden som er rapportert (5 minutter) er fra et eksperiment [8] hvor to biler var parkert med motorrommet mot hverandre, og antennelsen av den første bilen skjedde i motorrommet. I tillegg til avstanden mellom bilene er også takhøyden en viktig faktor som påvirker spredningstiden [5].



Figur 3-4 Endringen av den totale varmeavgivelseshastigheten (heltrukket linje), varmeavgivelseshastighet for den første bilen (stiplet linje), og varmeavgivelseshastighet for de tilstøtende bilene (lys stiplete linje), over tid.

Simuleringen med tre biler viste at brannspredningen mellom bil to og tre skjer fortere enn mellom den første og andre bilen. Dette samsvarer med observasjonene som er rapportert i litteraturen. Building Research Establishment (BRE) gjennomførte for eksempel et eksperiment med fire biler (Test 4), hvor det tok 20 minutter og 36 sekunder før brannen spredde seg til bil nummer 2, men kun 3 minutter og 52 sekunder senere (altså 24 minutter 28 sekunder fra brannstart) hadde brannen spredt seg til bil nummer 3. Bil nummer fire antente nesten samtidig (5 sekund senere) med bil nummer tre [8].

Simuleringen av hele parkeringshuset (se kapittel 3.3) med brannspredningsmodellen utviklet basert på tre biler, førte til for rask brannspredning. Den første tilstøtende bilen antente tre minutter etter brannstart, og etter femten minutter var nesten alle bilene involvert i brannen. Det mistenkes at for lite av parkeringshusgeometrien var inkludert i simuleringen av de tre bilene, noe som førte til at røyksjiktet under taket fort spredte seg ut fra simuleringsområdet. Dette fører til en lavere varmefluks fra brannen til bilene og saktere brannspredning. Siden modellen ble utviklet basert på disse simuleringene betyr det at brannspredning blir for rask når tilstrekkelig av taket er inkludert i simuleringene.

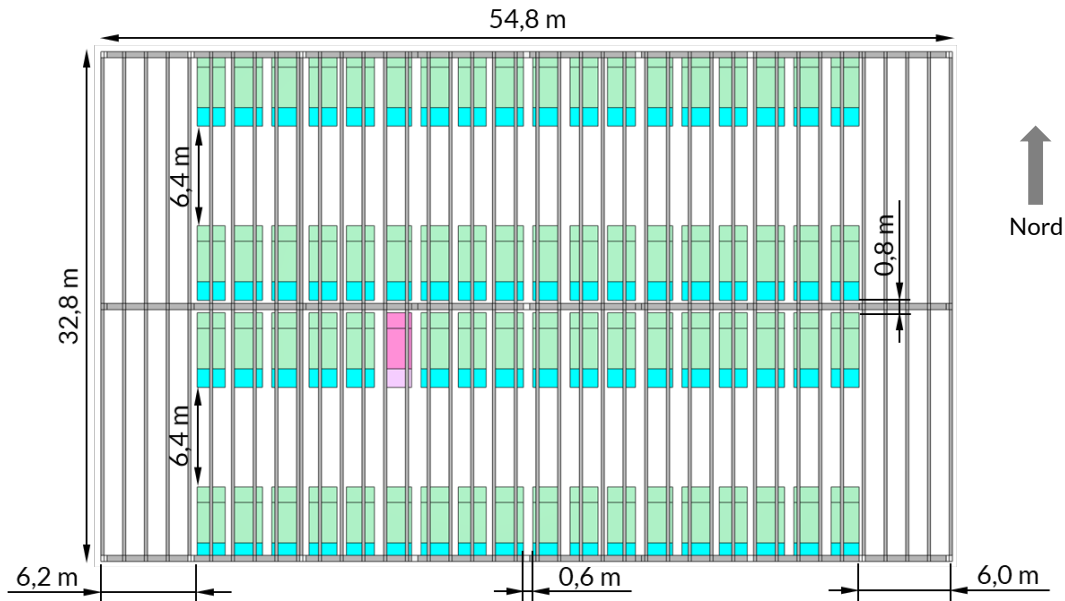
På grunn av denne utfordringen i modellutviklingen, ble det også gjort simuleringer av hele garasjen basert på antennelse ved en kritisk innfallende stråling på 20 kW/m^2 . Dette anses å være en representativ verdi for mange av bilens deler [8]. Antennelsestiden ved en innstråling på 20 kW/m^2 avhenger imidlertid av materialet. Et PVC *soft top* antenner for eksempel etter 22 – 27 sekunder, mens det tar 450 sekunder før en støtfanger antenner [8]. Derfor ble det også gjort en simulering hvor antennelse skjedde 240 sekunder etter at en innstråling på 20 kW/m^2 ble oppnådd. Dette tilsvarer antennelsestiden for bildekk ved denne innstrålingen. Dette førte til en noe saktere antennelse, men fortsatt for raskt sammenlignet med verdier som er funnet i litteraturen. En ulempe med å bruke en fast forsinkelse er også at det ikke tas hensyn til at innstrålingen varierer over tid, noe som fører til at antennelsestidspunktene ikke er konstante.

Derfor ble den kritiske antennelsestemperaturen for alle målepunktene satt til 450°C , som er antennelsestemperaturen av polykarbonat (PC), og høyest av alle materialene som er brukt i bilmodellen. Det vil si at man kan anta at på det tidspunkt en bil i modellen begynner å brenne, vil også en bil i virkeligheten ha begynt å brenne, eventuelt allerede litt tidligere. Dermed er dette en noe enklere modell, men fordelene er at man har bedret kontroll på usikkerheten, som anses godt egnet for en sammenligningsstudie. Alle resultatene presentert i denne studien er basert på modellen med en kritisk temperatur på 450°C .

3.3 Generisk P-hus geometri

Et generisk parkeringshus på en etasje ble modellert med en bredde på 32,8 m og en lengde på 54,8 m (se Figur 3-5). Nordsiden av parkeringshuset er helt lukket. Dette skal simulere en brannvegg eller seksjoneringsvegg for et ikke frittstående parkeringshus, eller et parkeringshus med flere brannseksjoner per etasje. De tre andre sidene er delvis lukket. På grunn av den tette veggen på nordsiden, er avstand fra noen steder i modellen til nærmeste ventilasjonsåpning mer enn 25 m, selv om bredden av garasjemodellen er under 50 m (ref. Byggforskeren, anvisning 520.380 Røykkontroll i bygninger (2006)). Bilene er imidlertid plassert over en lengde på 42,6 m, noe som betyr at det er lite strømningsmotstand for vinden i nærheten av ventilasjonsåpningene på vest- og østsiden, bortsett fra selve veggkonstruksjonen.

Avstanden mellom bilene er en viktig faktor for brannspredningen [5]. Markert og Giuliani [6] viste for eksempel at antennelsestiden øker med 10% når avstand mellom bilene økes fra 60 cm til 80 cm. Brannspredningshastigheten øker altså med redusert avstand mellom bilene. Nyere biler er ofte bredere enn gamle biler, samtidig som det er ønskelig å ha smale parkeringsplasser for å gi plass til flere biler. Det er likevel ikke undersøkt hvordan ulike avstander mellom bilene påvirker brannspredningen i denne studien og avstanden mellom bilene satt til 60 cm i alle simuleringene.



Figur 3-5 Dimensjoner i det generiske parkeringshuset og plassering av bilene. Brannen starter i bilen som er fremhevet med rosa farge.

Golvarealet i parkeringshuset er 1 797 m² og omhyllingsflaten, inklusive åpninger, er 4 085 m². Totalt ble 72 biler plassert i parkeringshuset, med en brannenergi på 6,8 GJ per bil, basert på referansekurvene fra Steel Research, rapport EUR 18867 [7]. Dermed er den spesifikke brannenergien 120 MJ/m², altså mellom 50 – 400 MJ/m², og golvarealet innenfor grensen for brannseksjoner med brannalarmanlegg, men uten sprinkleranlegg eller røykventilasjon (se Tabell 3-2).

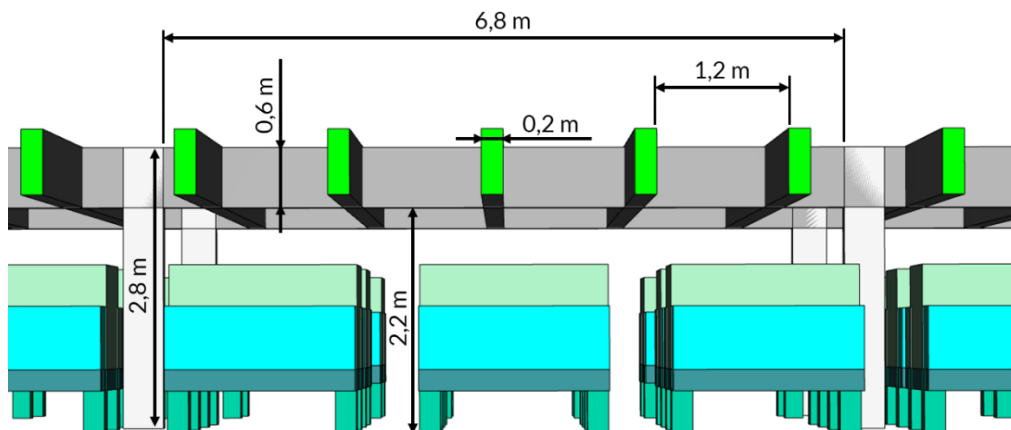
Tabell 3-2 Størrelse på brannseksjon etter VTEK17 § 11-7.

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

Hadde modellen vært del av en branncelle som strekker seg over flere sammenhengende etasjer med åpen forbindelse, skulle et automatisk sprinkleranlegg vært installert etter preaksepterte ytelser, siden arealet overstiger 800 m².

Simuleringene ble gjennomført uten å inkludere sprinkler.

Takhøyden (høyden fra golv til underkant av himling) og utformingen av tak-/dekkonstruksjonen i et parkeringshus, er viktige faktorer med tanke på brannspredningen. En lavere takhøyde gjør at røyksjiktet er nærmere bilene, noe som fører til raskere antennelse av tilstøtende biler [5]. En flat himling vil tillate at røyken sprer seg raskere i horisontal retning, og dermed tynnes ut og avkjøles. Et dekke med underliggende bjelker (ribbedekke) fører til at det dannes lommer med varm røyk under taket, noe som kan redusere antennelsestiden for tilstøtende biler. I denne studien ble det imidlertid ikke undersøkt nærmere hvordan ulike tak-/dekkonstruksjoner påvirker brannspredningen. Figur 3-6 viser konstruksjonen som ble brukt ved simuleringene. Det ble valgt en konstruksjon med underliggende bjelker og en takhøyde på 2,8 meter.

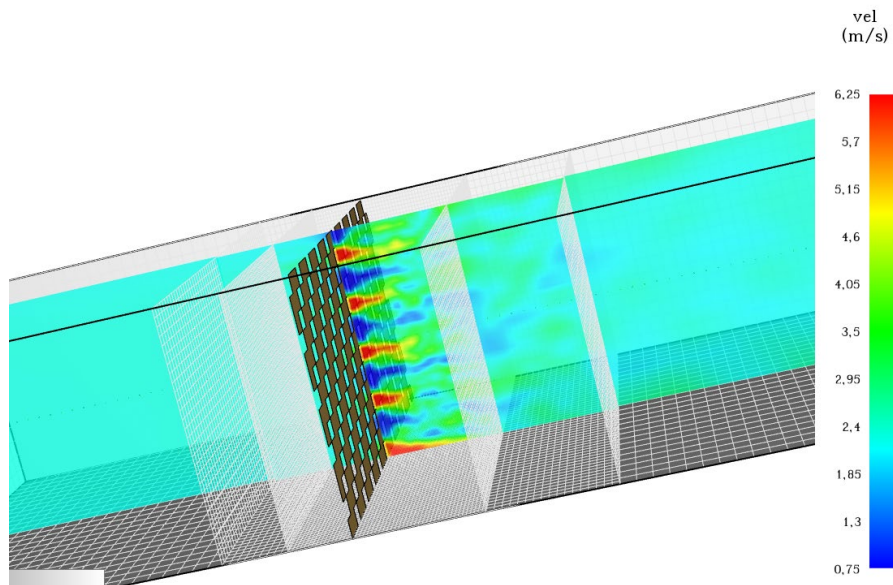


Figur 3-6 Utforming av søylene og dekkonstruksjonen i det generiske parkeringshuset.

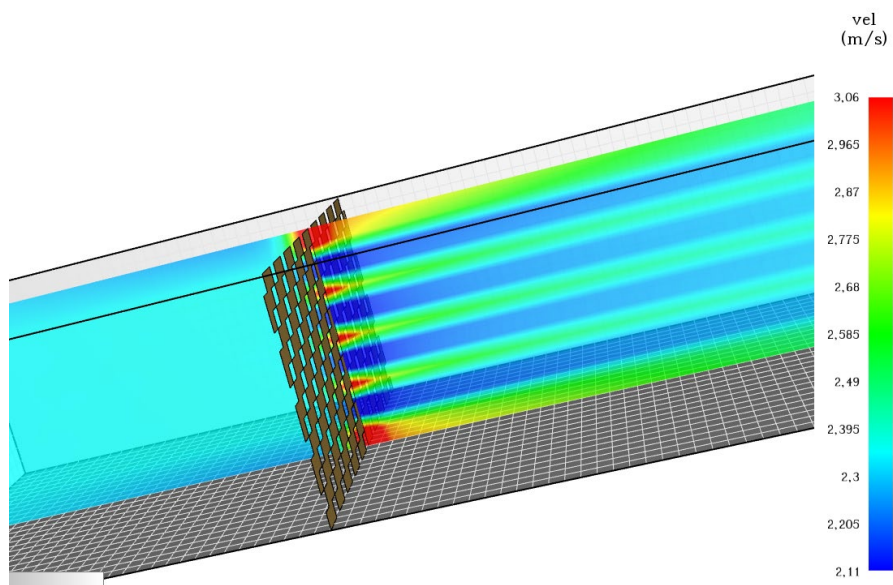
Det viktigste forskningsspørsmålet i denne studien er hvordan åpningsgraden i veggene påvirker brannutvikling og brannspredning, og hvordan dette vurderes opp mot preaksepterte ytelser knyttet til bæreevne under brann. Derfor er utformingen av veggkonstruksjonen en sentral parameter. Det er stor variasjon i utformingen av veggkonstruksjoner og kledninger i parkeringshus. Et åpent bildesøk med begrep «*car park wall cladding*» viste for eksempel flere parkeringshus som bruker perforerte plater som kledning, eller paneler med åpent mellomrom. Fordelingen og størrelsen av åpningene varierer i stor grad, og kan også variere i et enkelt parkeringshus.

Størrelsen av åpningene i perforerte kledninger er svært små sammenlignet med andre dimensjoner (høyde, bredde osv.) i et parkeringshus. Å simulere strømning gjennom en slik kledning krever derfor veldig små gridceller, noe som øker beregningskostnadene for simuleringen. Figur 3-7 og Figur 3-8 viser for eksempel strømningsfelt i en kanal som er delvis blokkert av en perforert vegg med en åpningsgrad på 30 %. For å kunne beskrive de lokale strømningsforholdene bak veggen er det i den første simuleringen (Figur 3-7) brukt en finere grid i nærheten av veggen enn i resten av kanalen. Det er benyttet fire gridceller per åpning, noe som fortsatt anses som en grov oppløsning. I Figur 3-8 ser man at simulering med en gridcellestørrelse på 10 cm fører til et ukorrekt strømningsfelt nedstrøms av veggen.

På grunn av denne utfordringen ble det brukt Lagrangian-partikler (se Figur 3-9) for å simulere trykktapet over veggkledningen. Dette betyr at hver celle som er begrenset av kledningen, inneholder en sylindrisk partikkel med en definert tykkelse. FDS bruker en empirisk modell³ fra Bartzanas et al. [11] for å beregne trykktapet over kledningen som funksjon av klednings-/partikkeltykkelsen, strømningshastigheten, luftens viskositet og tetthet, og åpningsgraden.

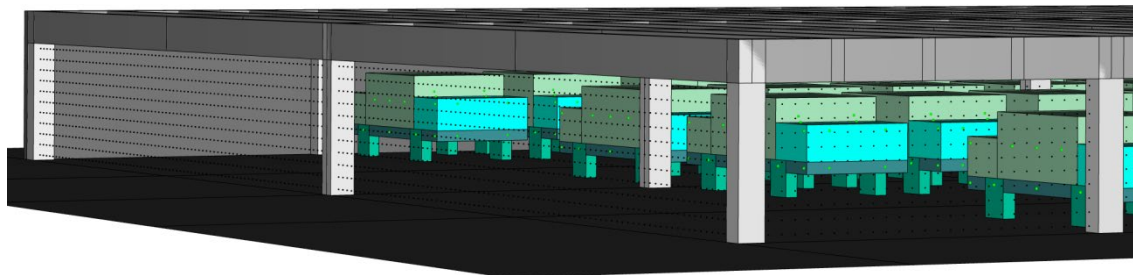


Figur 3-7 Strømnings simulering i en kanal som er delvis blokkert av en perforert vegg med 10 cm x 10 cm store åpninger. Dette gir en total åpningsgrad på 30 %. Innløpshastigheten er 3 m/s og gridcellestørrelsen er 2,5 cm rundt veggen.



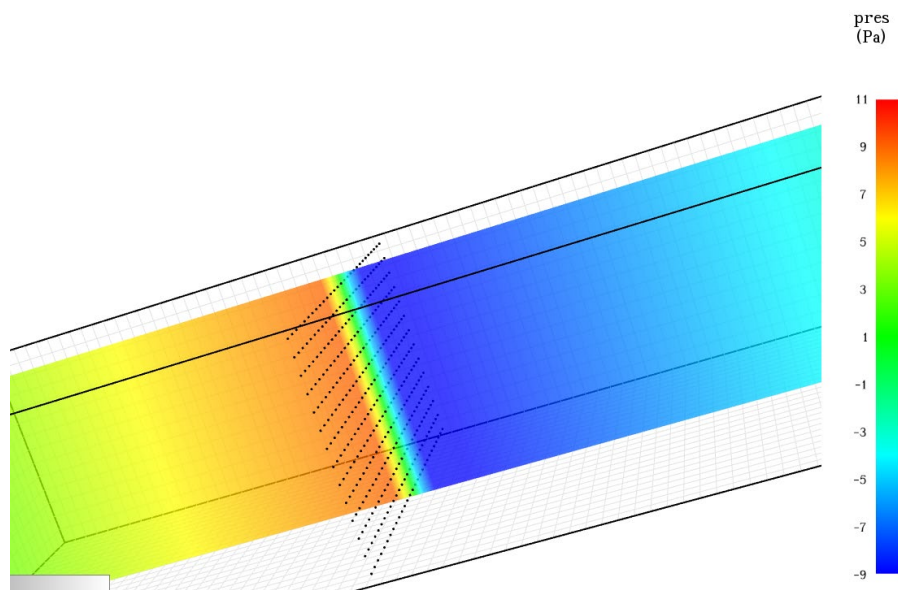
Figur 3-8 Strømnings simulering i en kanal som er delvis blokkert av en perforert vegg med 10 cm x 10 cm store åpninger. Dette gir en total åpningsgrad på 30 %. Innløpshastigheten er 3 m/s og gridcellestørrelsen er 10 cm.

³ For å bruke modellen defineres DRAG_LAW='SCREEN' i FDS input-filen.



Figur 3-9 Lagrangian-partikler er brukt for å modellere vindskjerming på de åpne sidene av parkeringshuset.

For å etablere en representativ partikkeltykkelse, ble det gjennomført flere simuleringer med forskjellig partikkeldiameter (0,5 mm, 0,25 mm, 0,15 mm, 0,125 mm og 0,0625 mm) (se Figur 3-10). Dette ble sammenlignet med simuleringen av en «ekte» vegg (se Figur 3-7). Simuleringen med en partikkeltykkelse på 0,125 mm førte til de beste resultatene i forhold til trykktap og nedstrøms hastighet. Denne tykkelsen ble derfor brukt i alle de videre simuleringene.



Figur 3-10 Strømningssimulering i en kanal som er delvis blokkert av en vegg. Modellert med Lagrangian-partikler som gir en total åpningsgrad på 30 %. Innløpshastigheten er 3 m/s og gridcellestørrelsen er 10 cm.

To forskjellige konfigurasjoner ble undersøkt i studien. I den første konfigurasjonen er det brukt vegger med en åpningsgrad på 30 %. Dermed blir åpningsgraden for hele parkeringshuset 21 %, inkludert brannveggen som er helt tett, altså åpningsgrad mindre enn 1/3. I den andre konfigurasjonen er det brukt vegger med en åpningsgrad på 60 %, noe som gir 41 % totalt, altså åpningsgrad mer enn 1/3.

3.4 Numerisk grid

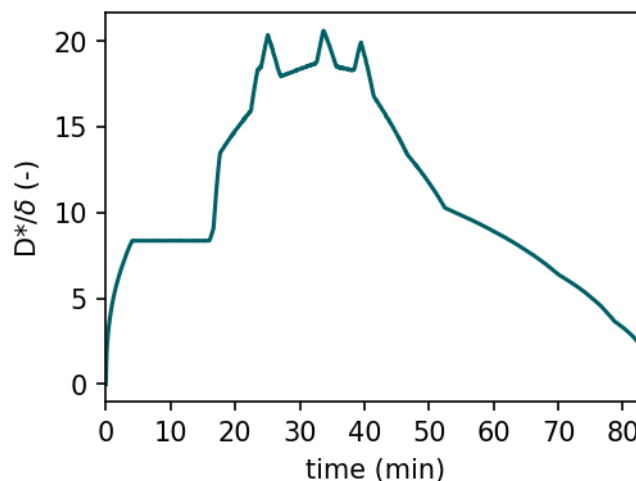
På grunn av antallet simuleringer, størrelsen av geometrien og ikke minst simuleringstid ble det valgt en grid med 20 cm celler, som anses som en grov oppløsning for denne type simulering. For *buoyancy controlled* branner (branner som er dominert av den termiske oppdriftskraften), anbefaler brukermanualen for FDS [12] å etablere en grid med tilstrekkelig oppløsning for å oppnå et dimensjonsløst forhold D^*/δ mellom 10 og 20. D^* er den karakteristiske diameter av brannen og beregnes i henhold til Ligning 3-1 og δ er den største grid cellen.

Ligning

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_\infty c_p T_\infty \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}}$$

hvor:

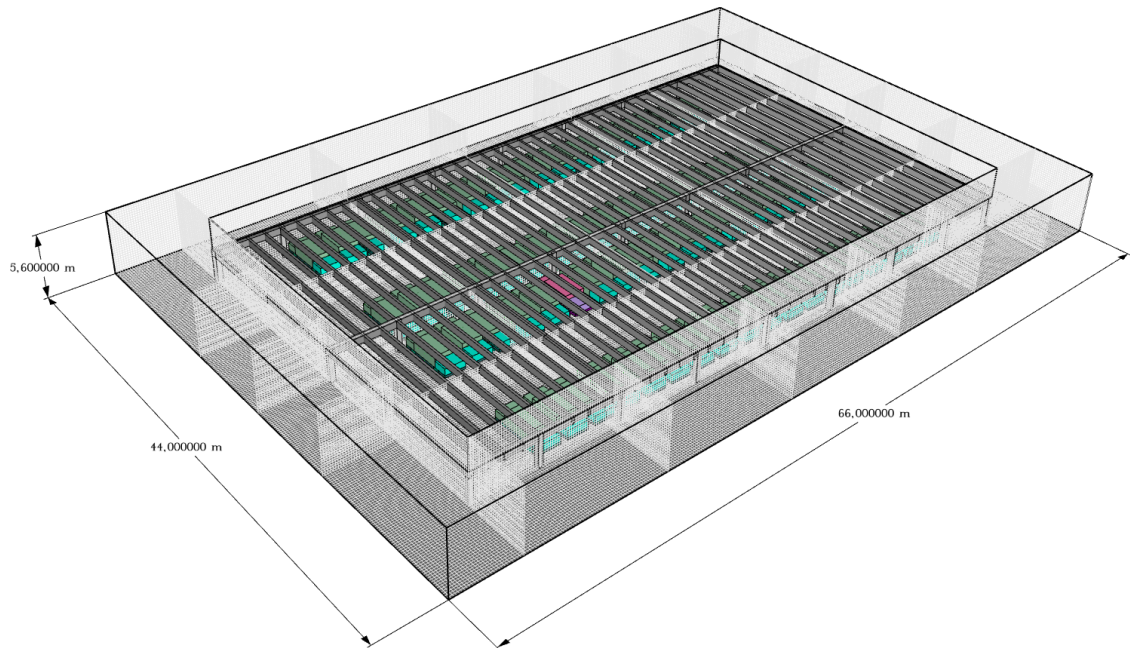
- D^* karakteristiske diameter av brannen (m),
- \dot{Q} effektiv varmeavgivelsesrate (W),
- ρ_∞ tetthet av luft ved omgivelsestemperatur (kg/m^3),
- c_p spesifikk varmekapasitet for luft (J/kg K),
- T_∞ omgivelsestemperatur (K),
- g gravitasjonskonstanten (m/s^2).



Figur 3-11 D^*/δ for simuleringen med 20 cm celler.

Figur 3-11 viser D^*/δ -forholdet for simuleringen med 20 cm celler. I tidligfasen av brannen ligger forholdet litt under 10, noe som indikerer at grid-oppløsningen er relativt grov. D^*/δ -forholdet vil imidlertid raskt bli større når flere biler bidrar til brannen.

Alle simuleringene ble gjennomført med en konstant gridcellestørrelse i hele simuleringsområdet. Simuleringsområdet er 66 m x 44 m stort, noe som betyr at det er 5,6 m (2 x takhøyde) avstand fra veggene til grensen av domenet (se Figur 3-12). Gridhøyden under taket er 2,8 m (griden faller altså sammen med taket), mens det er 5,6 m høyt utenfor parkeringshuset. Griden ble delt inn i 40 *subgrids* for å redusere simuleringstiden.

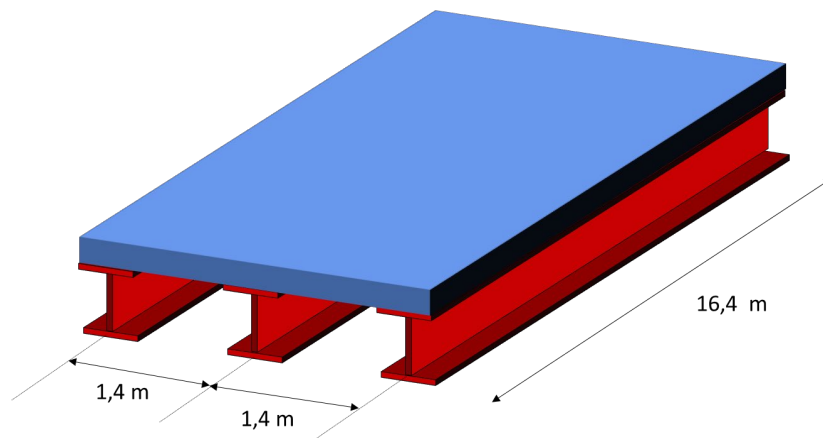


Figur 3-12 Simuleringsdomene inndelt i 40 *subgrids*

4 Strukturanalyse

4.1 Dimensjonering av bærekonstruksjonen

Strukturen (bærekonstruksjonen) i det generiske parkeringshuset ble prosjektert i tre forskjellige varianter. Én variant uten brannbeskyttelse for å oppnå R 15, én med 0,5 mm brannbeskyttende maling for å oppnå R 30, og én med 1,7 mm brannbeskyttende maling for å oppnå R 60. For å dimensjonere bærekonstruksjonen ble det antatt at det generiske parkeringshuset består av en etasje, og har en tak-/dekkekonstruksjon bestående av stålbejelker og en overliggende kontinuerlig komposittplate (Figur 3-5). Prosedyren og antagelsene beskrevet i Eurocode 3 Del 1-1 [13] og Del 1-2 [14] ble fulgt for å bestemme den kritiske temperaturen til stålbejelkene. Lengden til stålbejelkene og avstanden mellom dem vises i Figur 4-1.

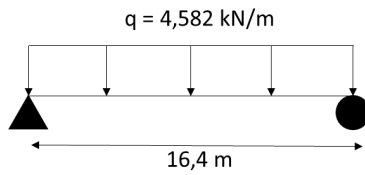


Figur 4-1 Stålbejelker med overliggende, kontinuerlig komposittplate.

En prefabrikkert halvplate ble plassert på toppen av stålbejelkene. Prefabrikkerte halvplater har typisk en tykkelse mellom 75 mm og 125 mm [15]. Komposittplatens vekt på $2,1 \text{ kN/m}^2$ (platens egenvekt = $1,6 \text{ kN/m}^2$, vektøkning grunnet etterbehandling = $0,5 \text{ kN/m}^2$) tilsvarer en 95 mm tykk plate, der 75 mm er prefabrikkert betong og 20 mm er støpt betong. «Live load» ble ikke inkludert ettersom det antas at komposittplaten er en del av taket til parkeringshuset. Snølasten ble heller ikke tatt med i vurderingen. Dimensjonene til IPE500-bejelken er hentet fra EN 10025 - Hot rolled products of structural steels. IPE500-bejelkene har en egenvekt på $0,907 \text{ kN/m}$ og flytegrense $f_y = 275 \text{ MPa}$ [16].

Beregningsprosedyren beskrives steg for steg nedenfor.

Steg 1: Beregne bjelkens bæreevne



Figur 4-2 Lastfordeling på en enkel bjelke.

$$\text{Moment ved midtspennet, } M = \frac{q \times L^2}{8} = 154,04 \text{ (kNm)} \quad \text{Ligning 4-1}$$

$$\text{Skjærkraft ved opplegg, } V = \frac{q \times L}{2} = 37,57 \text{ (kN)} \quad \text{Ligning 4-2}$$

hvor:

q fordelt last (kN/m),

L lengde, spennvidde (m).

$$\text{Kritisk moment, } M_C = \frac{W_{pl,y} \times f_y}{\gamma_{M0}} = 603,35 \text{ (kNm)}, \quad \gamma_{M0} = 1 \quad \text{Ligning 4-3}$$

$$\text{Kritisk skjærkraft, } V_C = \frac{A_v \times f_y / \sqrt{3}}{\gamma_{M0}} = 950,56 \text{ (kN)}, \quad \gamma_{M0} = 1 \quad \text{Ligning 4-4}$$

hvor:

$W_{pl,y}$ plastisk tverrsnittsmodul (motstandsmoment) ($\times 10^3 \text{ mm}^3$)

f_y flytegrense (MPa),

γ_{M0} materialfaktor for bruddformer basert på Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1

A_v skjærareal (mm^2),

Steg 2: Klassifisering av strukturdeler

$$\text{Tøyning, } \varepsilon = 0,85 \sqrt{235/f_y} = 0,785 \text{ (-)} \quad \text{Eurocode 3, Del 1-2, Ligning 4,2 [14]} \quad \text{Ligning 4-5}$$

$$c/t_w \leq 72\varepsilon, 426/10,2 \leq 72\varepsilon, \text{ stegklasse 1} \quad \text{Eurocode 3, Del 1-1, Tabell 5,2 [13]} \quad \text{Ligning 4-6}$$

$$c/t_f \leq 9\varepsilon, 94,9/16 \leq 9\varepsilon, \text{ flensklasse 1} \quad \text{Eurocode 3, Del 1-1, Tabell 5,2 [13]} \quad \text{Ligning 4-7}$$

$$\mu_M = \frac{M}{M_C} \times \frac{\gamma_{M0}}{\gamma_{M,fi}} = 0,26, \quad \gamma_{M0} = \gamma_{M,fi} = 1 \quad \begin{array}{l} \text{Eurocode 3, Del 1-2,} \\ \text{Ligning 4,24 [14]} \end{array} \quad \text{Ligning 4-8}$$

$$\mu_V = \frac{V}{V_C} \times \frac{\gamma_{M0}}{\gamma_{M,fi}} = 0,04, \quad \gamma_{M0} = \gamma_{M,fi} = 1 \quad \begin{array}{l} \text{Eurocode 3, Del 1-2,} \\ \text{Ligning 4,24 [14]} \end{array} \quad \text{Ligning 4-9}$$

$K_1 = 0,7$, for en ubeskyttet bjelke som er fritt eksponert på tre sider og har en kompositt- eller betongplate på den fjerde siden. Eurocode 3, Del 1-2 [14]

$$K_2 = 1, \text{ Eurocode 3, Del 1-2 [14]} \quad \text{Ligning 4-10}$$

$$\mu_{M,K} = \mu_M(K_1 K_2) = 0,18 \quad \text{Ligning 4-11}$$

$$\mu_{V,K} = \mu_V = 0,04 \quad \text{Ligning 4-12}$$

$$\mu_0 = \text{Max}(\mu_{M,K}, \mu_{V,K}) = 0,18 \quad \text{Ligning 4-13}$$

hvor:

c *depth of the beam web* (mm),

$\gamma_{M,fi}$ materialfaktor for brann (-),

t_w stegtykkelse (mm),

t_f flenstykkelse (mm),

μ_M utnyttelsesgrad basert på kritisk moment (-),

K_1 *adaption factor* (-),

K_2 *adaption factor* (-),

μ_V utnyttelsesgrad basert på kritisk skjærkraft (-),

μ_0 utnyttelsesgrad (-).

Steg 3: Kritisk temperatur (Eurocode 3, Del 1-2, Ligning. 4,22 [14])

$$\text{Kritisk temperatur} \quad \theta_{cr} = 39,19 \ln \left[\frac{1}{0,9674 \mu_0^{3,833}} - 1 \right] + 482 = 741,90 \text{ (}^\circ\text{C)} \quad \text{Ligning 4-14}$$

IPE500-bjeltene som ble benyttet har en kritisk temperatur på 742 °C. Basert på ISO-kurven (cellulosebrannkurve (ISO-834)) vil den kritiske temperaturen bli nådd 15 minutter etter antennelse. IPE500-(S275) bjeltene vil beholde sin strukturelle integritet i 15 minutter, som betyr at de kan klassifiseres som R 15.

Steg 4: Brannbeskyttelse

For at IPE500-bjelkene skal klare å opprettholde sin bæreevne i 30 minutter eller lenger, kreves det brannbeskyttelse. For å beregne ståltemperaturen i de beskyttede bjelkene, ble metoden fra Eurocode 3, Del 1-2, Avsnitt 4.2.5.2 [14] brukt. Den uttrykker temperaturøkningen, $\Delta\theta_{a,t}$, som følgende:

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_p A_p/V}{d_p c_a \rho_a} \frac{(\theta_{g,t} - \theta_{a,t})}{(1+\phi/3)} \Delta t - \left(e^{\frac{\phi}{10}} - 1 \right) \Delta\theta_{g,t} \quad \text{Ligning 4-15}$$

(men $\Delta\theta_{a,t} \geq 0$ hvis $\Delta\theta_{g,t} > 0$)

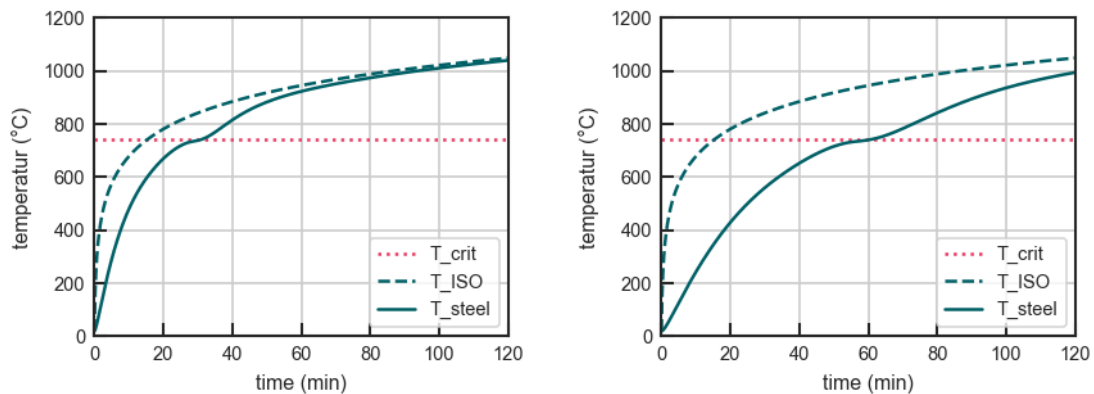
med:

$$\phi = \frac{c_p \rho_p}{c_a \rho_a} d_p A_p/V \quad \text{Ligning 4-16}$$

hvor:

- A_p/V er profilmfaktor for stålelementer isolert med brannbeskyttelse (1/m),
- A_p er tverrsnittsareal med brannbeskyttelse per lengdeenhet av elementet (m²/m),
- V er volumet til elementet per lengdeenhet (m³/m),
- c_a er den temperaturavhengige spesifikke varmen til stål, basert på Avsnitt 3 i Eurocode 3, Del 1-2 [14] (J/kgK),
- c_p er den temperaturuavhengige spesifikke varmen til brannbeskyttelsen, 1 000 J/kg K basert på Krishnamoorthy og Baily [17] (J/kgK),
- d_p er tykkelsen på brannbeskyttelsen (m),
- Δt er tidsintervallet (s),
- $\theta_{a,t}$ er ståltemperaturen på tidspunktet, t (°C),
- $\theta_{g,t}$ er omgivelsesgasstemperaturen på tidspunktet, t (°C),
- λ_p er den termiske ledningsevnen til brannbeskyttelsen, 0,046 W/mK basert på Krishnamoorthy og Baily [17] (W/mK),
- ρ_a er enhetsmassen til stål, 7 850 kg/m³ basert på Avsnitt 3 i Eurocode 3, Del 1-2 [14] (kg/m³),
- ρ_p er den temperaturavhengige enhetsmassen til brannbeskyttelsen basert på Krishnamoorthy og Baily [17] (kg/m³).

Ligning 4-15 ble brukt i en iterativ prosess for å finne hvilken tykkelse brannbeskyttelse som gir brannmotstand R 30 og R 60. Det ble brukt en gjennomsnitt termisk ledningsevne på 0,046 W/mK basert på verdiene fra Krishnamoorthy og Baily [17]. Dette er en forenkling, siden den termiske ledningsevnen i realiteten er avhengig av temperaturen. Figur 4-3 viser ståltemperaturen sammenlignet med ISO-834 kurven for disse to utførelsene.



Figur 4-3 Venstre: R30 designkurve (heltrukket linje) sammenlignet med ISO-834-kurven (stiplet linje). Høyre: R60 designkurve (heltrukket linje) sammenlignet med ISO-834- kurven (stiplet linje).

4.2 Tid til kollaps

For å beregne tiden til en eventuell kollaps av en bjelke, det vil si at ståltemperaturen overstiger bjelkens kritiske temperatur, ble den adiabatisk overflatetemperaturen fra brannsimuleringene eksportert og brukt for å beregne ståltemperaturen i bjelkens tverrsnitt (ref. Avsnitt 4.1). For å forenkle beregningene ble det antatt en uniform temperaturfordeling rundt de eksponerte sidene av bjelkene. Temperaturen på undersiden av bjelkene, som er generelt høyere enn temperaturen på sidene av en bjelke, ble brukt i beregningene. Det betyr at varmefluks fra sidene er noe større enn i virkeligheten, som fører til et konservativt resultat, altså kortere tid til kollaps. Det ble imidlertid tatt hensyn til temperaturvariasjonene langs bjelkenes lengde. Tiden til kollaps ble beregnet for alle datapunkter langs bjelkene, og den korteste tiden ble brukt for å bestemme når en bjelke ville kollapse.

For hvert brannscenario ble kollapsestiden for alle bjelker beregnet. Det ble imidlertid ikke tatt hensyn til at lasten på bjelkene øker når en av dem kollapse og vekten fordeles på de bjelkene som fortsatt bærer last. I realiteten forventes det at dette etter hvert fører til en suksessiv kollaps av hele, eller store deler av, konstruksjonen.

5 Scenarier

Ventilasjonen i et åpent parkeringshus, altså et parkeringshus som har mer enn 1/3 av veggarealet åpent i henhold til VTEK 17, og som er uten mekanisk ventilasjon, vil være sterkt avhengig av vindforholdene. Ved brann vil også selve brannen påvirke ventilasjonsforholdene. Det er derfor viktig å undersøke flere vindforhold. Tabell 5-1 viser vindstatistikken for noen utvalgte lokasjoner i Norge. En typisk årlig gjennomsnittlig vindhastighet er 3 m/s. Vinden kan imidlertid være sterkere enn gjennomsnittet. Ved Sola-brannen var «vindstyrken ved brannstart for eksempel ca. 11 m/s – 12 m/s (kraftigste vindkast ca. 16-17 m/s), noe som tilsvarer liten kuling. Vinden økte til 12,8 m/s (kraftigste vindkast 19,3 m/s) på det meste kl. 18, for så å avta noe utover kvelden» [1]. Derfor er det gjennomført simuleringer med både 3 m/s og 11 m/s. I tillegg er det gjennomført simuleringer uten ekstern vind, altså 0 m/s vindhastighet, for å se isolert på ventilasjonsforholdene som skapes av selve brannen. Dette er også representativt for alle scenarier hvor vinden er svak, og hvor brannen er stor nok til å dominere ventilasjonsforholdene i parkeringshuset.

Tabell 5-1 Årlig vindstatistikk for utvalgte lokasjoner i Norge.

Lokasjon	Årlig gjennomsnittsvindhastighet (m/s)	Årlig gjennomsnittsvindkasthastighet (m/s)	Observasjonstidsrom	Datakilde
Oslo Blindern	3	6	07/2006 – 08/2021	https://www.windfinder.com/windstatistics/oslo-blindern
Bergen Nordnes	3	5	05/2012 – 11/2017	https://www.windfinder.com/windstatistics/Bergen-Nordnes
Trondheim Kalvskinnet	3	4	05/2012 – 11/2020	https://www.windfinder.com/windstatistics/kalvskinnet_trondheim
Tromsø	3	7	09/2011 – 08/2021	https://www.windfinder.com/windstatistics/tromso
Stavanger Lufthavn/Sola	5	11	01/2002 – 08/2021	https://www.windfinder.com/windstatistics/stavanger_sola
Trondheim Værnes	4	10	01/2002 – 08/2021	https://www.windfinder.com/windstatistics/trondheim_vaernes

I tillegg til vindstyrken er også vindretning viktig. Parkeringshuset som er brukt i denne studien har en brannvegg på nordsiden. I simuleringene treffer vind fra sør på en vegg (se Kapittel 3.3) som fører til at det utvikles et område med lav ventilasjon i nærheten av stagnasjonspunktet, og vinden ledes mot øst- og vestsidene. Vind fra vest treffer derimot på mindre motstand, noe som fører til bedre gjennomlufting. På grunn av bilplasseringen som ble valgt i modellen, vil vind fra vest blåse langs bilrekkene.

Basert på de tre forskjellige vindhastighetene og de to forskjellige vindretningene, ble det etablert fem forskjellige vindscenarier. Hvert scenario ble simulert for to forskjellige veggkonfigurasjoner, ett med mer og ett med mindre enn 1/3 åpningsgrad. Dermed ble totalt ti simuleringer gjennomført (se Tabell 5-2). I alle simuleringer ble brannen startet 1 minutt etter

simuleringsstart for å etablere et initielt strømningsfelt. I alle simuleringer ble brannen startet 1 minutt etter simuleringsstart for å etablere et initielt strømningsfelt.

Tabell 5-2 Scenario-oversikt.

Simulering	Åpningsgrad (%) Total [uten brannvegg]	Vindretning* [fra]	Vindhastighet (m/s)
1	21 [30]	vest	11
2	21 [30]	vest	3
3	21 [30]	sør	11
4	21 [30]	sør	3
5	21 [30]	-	0
6	41 [60]	vest	11
7	41 [60]	vest	3
8	41 [60]	sør	11
9	41 [60]	sør	3
10	41 [60]	-	0

*) Nordsiden er helt lukket av en vegg.

6 Resultater og diskusjon

Dette kapitlet presenterer alle resultater fra simuleringene, med hovedfokus på hvordan åpningsgraden påvirker brannspredningshastigheten, brannstørrelsen, tiden til kollaps og spredning av røyk med tanke på redusert sikt. Når det gjelder kollapsestider viser det kun resultater for R 15- og R 30- utførelsen av strukturen. Strukturen med R 60 brannmotstand oppnådde ikke den kritiske ståltemperaturen i noen av simuleringene.

For å interpretare resultatene presentert i dette kapitlet, er det viktig å ta hensyn til at CFD-simuleringene og strukturanalysen er basert på forenklede modeller. Absoluttverdiene for brannspredningen og kollapsestider er derfor kun indikative. Fokuset ligger på sammenligning av parkeringshus med forskjellige åpningsgrader.

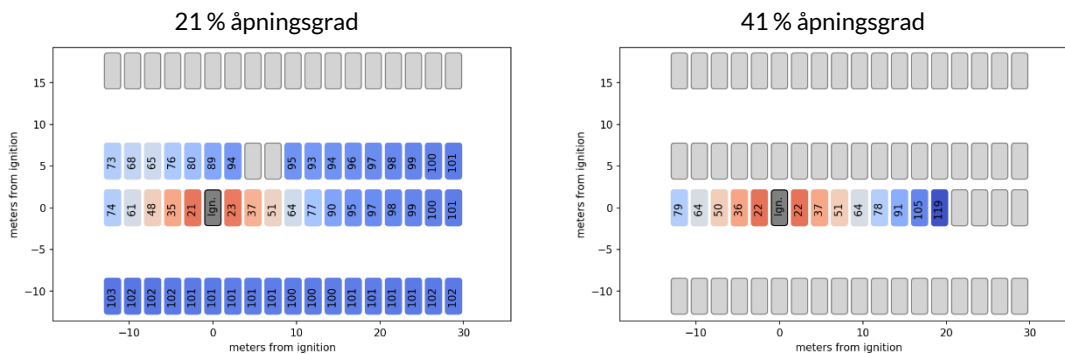
6.1 Scenario 0 m/s vind

Når det ikke blåser noe vind er det selve brannen som på grunn av termisk oppdriftskraft og ekspansjon, etablerer et strømningsfelt i parkeringshuset. Siden strømningshastigheten er avhengig av brannstørrelsen, kan det forventes at åpningsgraden har mindre effekt i tidligfasen av brannen når kun få biler er involvert, men at effekten øker med brannstørrelsen. Dette ble bekreftet av simuleringene. Figur 6-1 viser antennelsestiden for individuelle biler for brannscenario uten vind. Tallet i bilsymbolet (firkantene) viser antennelsestidspunktet i minutter etter brannstart.

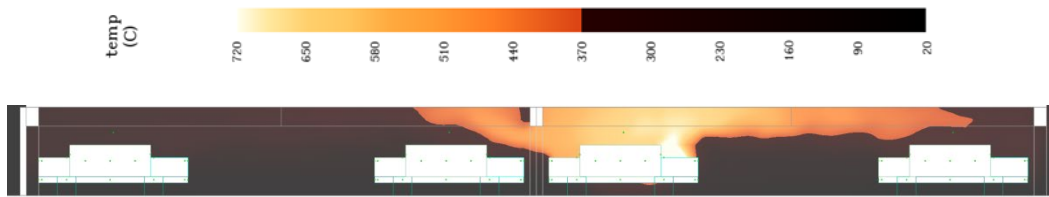
For begge veggkonfigurasjoner, med hhv. 21 % og 41 % åpningsgrad, tar det litt over 20 minutter før den første tilstøtende bilen antennes. Etter de første 60 minuttene har brannen spredt seg like langt i begge tilfeller.

I parkeringshuset med 21 % åpningsgrad antenner den første bilen i naborekka etter 65 minutter. Etter 100 minutter ser vi at brannen overtenner, noe som fører til at antennelseskriteriet oppnås for nesten hele tredje rekke.

I parkeringshuset med 41 % åpningsgrad sprer brannen seg aldri til en ny bilrekke innenfor de 120 minuttene som ble simulert.



Figur 6-1 Tid (min) til antennelse av individuelle biler etter brannstart i lokasjon merket med «Ign.» og uten vind, altså 0 m/s vind. Røde farger indikerer raskere antennelse, mens blå/grå farger indikerer senere antennelsestidspunkter. Venstre: veggutførelse med 21 % åpningsgrad, høyre: veggutførelse med 41 % åpningsgrad. Veggen på nordsiden, altså øverst i figuren, er helt tett i begge tilfeller.



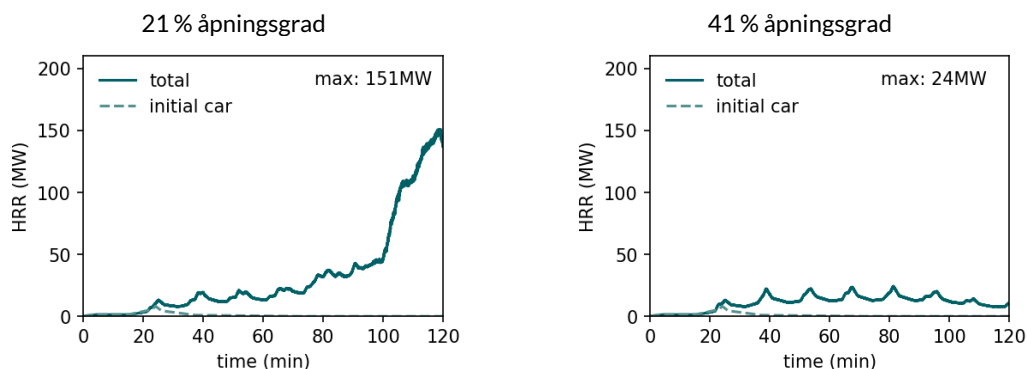
Figur 6-2 Temperatur (°C) i nord-sør tverrsnitt sett fra vest etter 20 minutter, for brannscenario uten vind og veggutførelse med 21 % åpningsgrad. Tverrsnittet ligger i bilen som startet brannen, altså 0 m fra brannstart.

En viktig faktor for brannspredningen er dekke med underliggende bjelker (ribbedekke) som fører til at det dannes lommer med varm røyk under taket. På grunn av bjelken som strekker seg fra vest til øst oppstår det et skille mellom de to midterste bilrekkene som fører til at mer av røyken sprer seg mot sør enn nord (se Figur 6-2). Først når brannen har spredt seg lenger mot vest strømmer nok varm røyk mot nord for å antenne den andre bilrekken (se Figur 6-3).



Figur 6-3 Temperatur (°C) etter 68 minutter sett ovenfra for brannscenario uten vind, altså 0 m/s vind og veggutførelse med 21 % åpningsgrad.

Brannforløpet gjenspeiles også i varmeavgivelseshastigheten (HRR) som vises i Figur 6-4. Når man sammenligner HRR med antennelsestiden, er det viktig å huske at den redefinerte brannkurven for en bil har en «relativt» lav HRR på 2,4 MW i 10 minutter etter antennelse, før HRR øker raskt (se Figur 3-2).

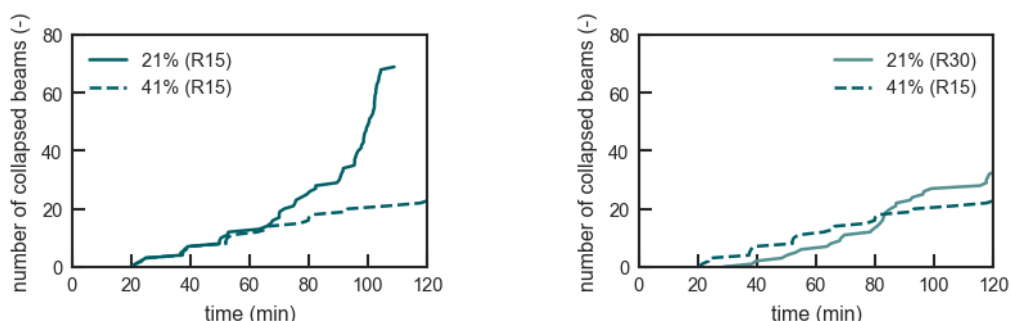


Figur 6-4 Endringen av den totale varmeavgivelseshastigheten (heltrukket linje) og varmeavgivelseshastigheten fra den første bilen (stiplede linjer) over tid for brannscenarioet uten vind, altså 0 m/s vind. Den maksimale totale varmeavgivelseshastigheten er oppgitt i øvre høyre hjørne. Venstre: veggutførelse med 21 % åpningsgrad, høyre: veggutførelse med 41 % åpningsgrad. Veggen på nordsiden, altså øverst i figuren, er helt tett i begge tilfeller.

Figur 6-5 viser antall bjelker som har kollapset, altså oppnådd den kritiske temperaturen, avhengig av tid. Figuren til venstre sammenligner kollaps for begge parkeringshusene, med hhv. 21 % og 41 % åpningsgrad og antatt at de har samme ubeskyttede (R 15) stålkonstruksjon. Det vil si at forskjellen i kollapstiden for bjelkene kun skyldes forskjellig brann dynamikk. Derfor ser man igjen at forløpene er nesten helt like i de første 60 minuttene.

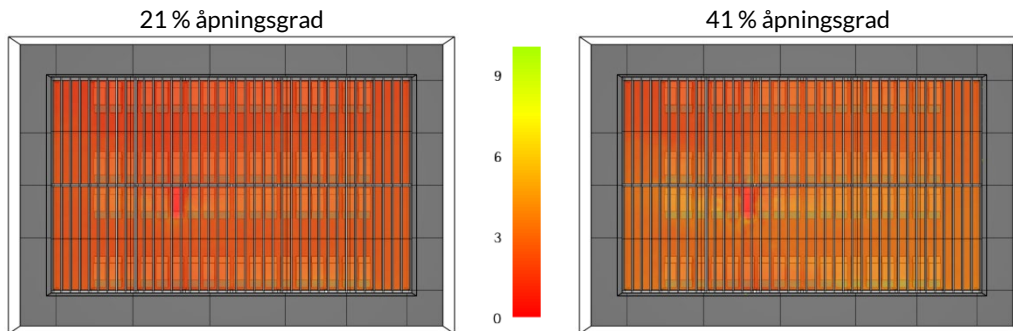
Brannmotstand R 15 er likevel, i henhold til VTEK 17, ikke tilstrekkelig for parkeringshuset med 21 % åpningsgrad. Derfor er det viktig å sammenligne kollapstider for en R 30-utførelse i parkeringshus med 21 % åpningsgrad, med R 15-utførelse i parkeringshus med 41 % åpningsgrad (se Figur 6-5 høyre).

Ved å gjøre dette ser man at parkeringshuset med mindre åpningsgrad klarer å motstå brannen lengre enn det mer åpne parkeringshuset, dvs. det tar lengre tid før de første bjelkene gir etter. Dette skyldes den økte brannmotstanden. Etter litt over 80 minutter derimot, har brannen økt så signifikant i parkeringshuset med 21 % åpningsgrad, at flere bjelker kollapse der enn i det mer åpne parkeringshuset. Her er det viktig å huske at resultatene er basert på en forenklet analyse som ikke tar hensyn til kaskade-effekten når bjelker begynner å gi etter. Derfor er tiden til de første kollapsene mer representativ for realiteten enn tiden for senere kollaps.



Figur 6-5 Antall bjelker som har mistet sin bæreevne over tid for brannscenarioet uten vind, altså 0 m/s vind. Venstre: «Lukket» garasje med R15 bjelker (heltrukket linje) sammenlignet med åpen garasje med R15 (stiplet linje). Høyre: «Lukket» garasje med R30 bjelker (heltrukket linje) sammenlignet med åpen garasje med R15 (stiplet linje).

Hovedfokuset i denne studien ligger på bæreevnen av strukturen. Likevel er det viktig å ta hensyn til andre faktorer som kan påvirke den nødvendige tiden til rømning, og sikkerheten for slökkemannskaper. I Figur 6-6 sammenlignes derfor sikt i parkeringshusene etter 15 minutter. På grunn av manglende vind, og dermed lite røykevakuering fra bygningen, er sikten i 2 meter høyde i hele parkeringshuset mindre enn 10 meter uavhengig av åpningsgraden, noe som bryter med kriteria oppgitt i INSTA/TS 950:2014 [18].

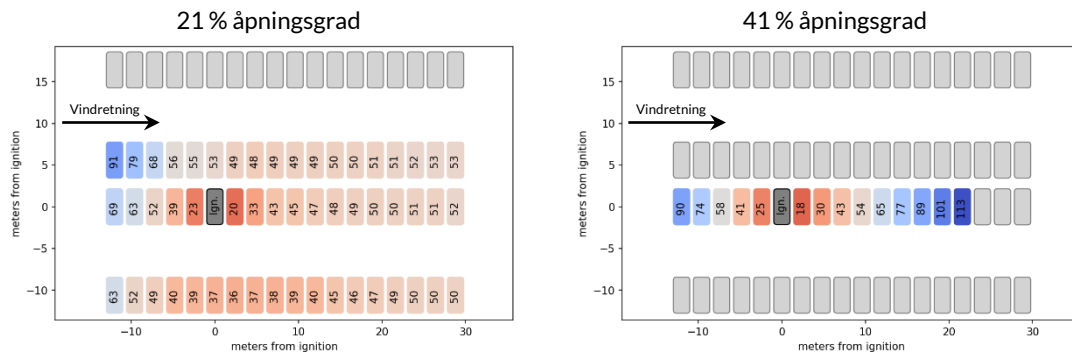


Figur 6-6 Sikt (m) i 2 meter høyde (se fargeskala som angir antall meter sikt), 15 minutter etter brannstart for brannscenariet uten vind, altså 0 m/s vind. Venstre: veggutførelse med 21 % åpningsgrad, høyre: veggutførelse med 41 % åpningsgrad. Veggen på nordsiden, altså øverst i figuren, er helt tett i begge tilfeller.

Simulering av scenariet uten vind, som også anses representativ for scenarier med veldig svak vind, viser at økt åpningsgrad (mer enn 1/3 av veggflaten) ikke gir grunnlag for å redusere brannmotstanden til R 15. Dette fordi åpningsgraden først utgjør en signifikant forskjell når brannen har oppnådd vist størrelse. I simuleringen tok det ca. 60 minutter før dette var tilfelle.

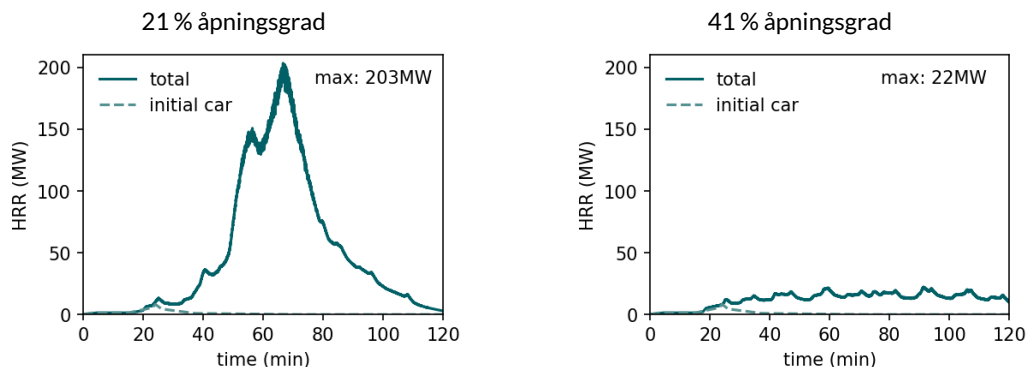
6.2 Scenario 3 m/s vind fra vest

Figur 6-7 viser antennelsestider for de to alternativene, dvs. parkeringshus med hhv. 21 % og 41 % åpningsgrad, ved vind fra vest med hastighet på 3 m/s. Antall biler som er involvert i brannen innen 120 minutter, er sammenlignbart med scenariet uten ekstern vind. Antennelsestidene er imidlertid noe kortere for parkeringshuset med 21 % åpningsgrad. Brannen klarer her å spre seg til den sørligste bilrekken allerede etter 36 minutter, sammenlignet med 100 minutter for scenariet uten vind. For parkeringshuset med 21 % åpningsgrad har vinden i dette tilfellet altså en negativ effekt, som også gjenspeiles i HRR.



Figur 6-7 Tid (min) til antennelse av individuelle biler etter brannstart i lokasjon merket med «Ign.» og 3 m/s vind fra vest. Røde farger indikerer raskere antennelse, mens blå/grå farger indikerer senere antennelsestidspunkter. Venstre: veggutførelse med 21 % åpningsgrad, høyre: veggutførelse med 41 % åpningsgrad. Veggen på nordsiden, altså øverst i figuren, er helt tett i begge tilfeller.

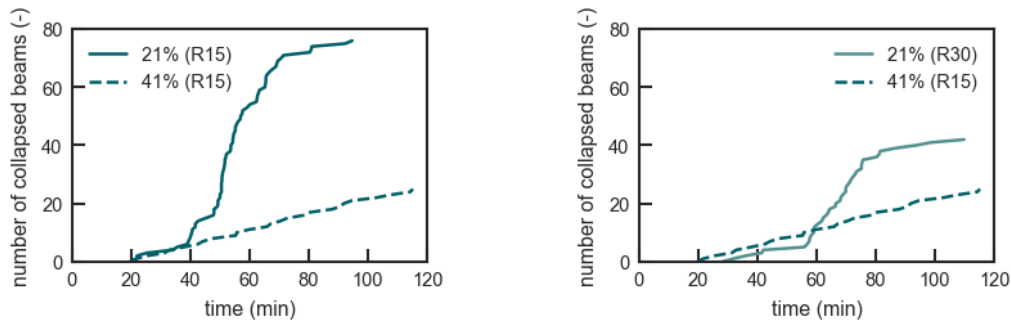
Man ser en rask økning i HRR etter ca. 40 minutter, og brannen vokser til rundt 150 MW innen den første timen (se Figur 6-8 venstre). Også maks HRR er større, (og er på) 203 MW, sammenlignet med 151 MW for scenariet uten vind. For parkeringshuset med over 1/3 åpningsgrad (41 %) ser man derimot ingen signifikant endring.



Figur 6-8 Endringen av den totale varmeavgivelseshastigheten (heltrukket linje) og varmeavgivelseshastigheten fra den første bilen (stiplede linjer) over tid, for brannscenariet med 3 m/s vind fra vest. Den maksimale totale varmeavgivelseshastigheten er oppgitt i øvre høyre hjørne. Venstre: veggutførelse med 21 % åpningsgrad, høyre: veggutførelse med 41 % åpningsgrad. Veggen på nordsiden, altså øverst i figuren, er helt tett i begge tilfeller.

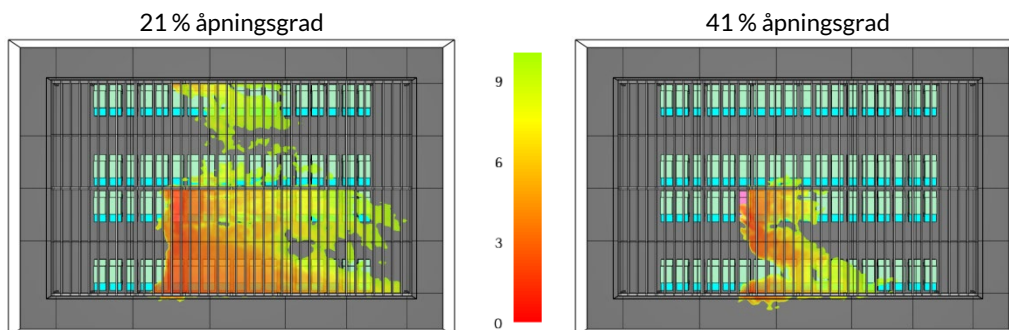
På grunn av raskere brannspredning i parkeringshuset med 21 % åpningsgrad, ser man etter 40 minutter også en veldig rask økning i antall kollapsede bjelker (se Figur 6-9 venstre). Før dette tidspunktet viser begge parkeringshusene nesten samme forløp i antall kollapsede bjelker. Brukes det derimot R 30 brannmotstand i parkeringshuset med mindre åpningsgrad, er det færre

bjelker som kollapser sammenlignet med det åpne parkeringshuset (41 % åpningsgrad). Dette gjelder de første 60 minuttene. Dette vil si at den økte brannmotstanden kan kompensere for dårligere gjennomlufting på grunn av tettere vegger.



Figur 6-9 Antall bjelker som har mistet sin bæreevne over tid for brannscenarioet med 3 m/s vind fra vest. Venstre: «Lukket» garasje med R15 bjelker (heltrukket linje) sammenlignet med åpen garasje med R15 (stiplet linje). Høyre: «Lukket» garasje med R30 bjelker (heltrukket linje) sammenlignet med åpen garasje med R15 (stiplet linje).

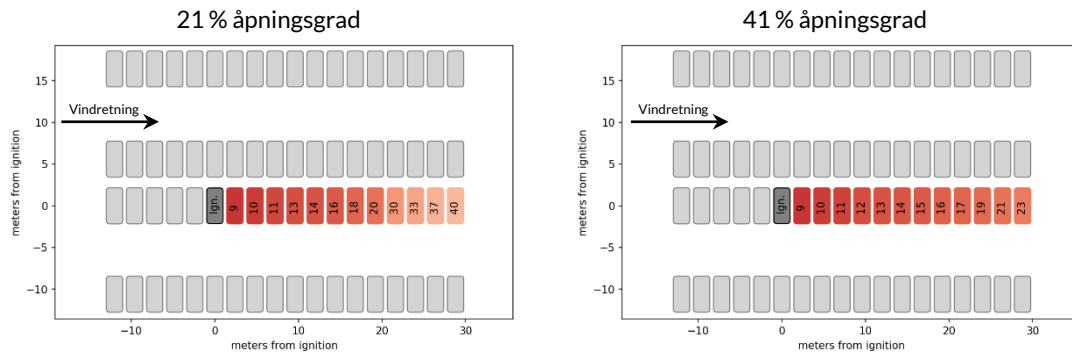
Den større åpningsgraden viser seg i dette scenarioet også å være en fordel med tanke på sikt i tidligfasen av brannen (i de første 15 minutter). Bedre gjennomlufting, som oppnås ved å ha en større åpningsgrad (41 %), fører til at sikten blir under 10 meter i et mindre område enn i parkeringshuset med 21 % åpningsgrad (se Figur 6-10).



Figur 6-10 Sikt (m) i 2 meter høyde (se fargeskala som angir antall meter sikt), 15 minutter etter brannstart for brannscenarioet med 3 m/s vind fra vest. Venstre: veggutførelse med 21 % åpningsgrad, høyre: veggutførelse med 41 % åpningsgrad. Veggen på nordsiden, altså øverst i figuren, er helt tett i begge tilfeller.

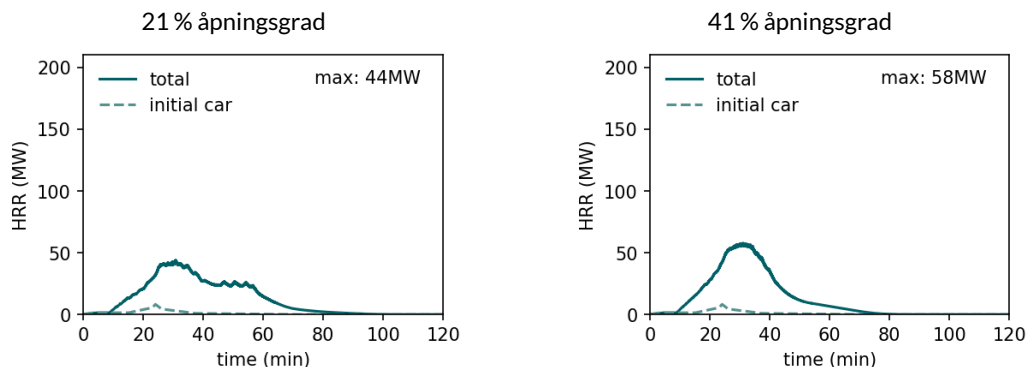
6.3 Scenario 11 m/s vind fra vest

Vinden har en betydelig effekt på brannspredningen når vindstyrken øker fra 3 m/s til 11 m/s. Vindhastigheten er i dette tilfellet så høy at brannspredningen oppstrøms forhindres uavhengig av åpningsgraden (se Figur 6-11). I tillegg sprer brannen seg ikke til andre bilrekker.



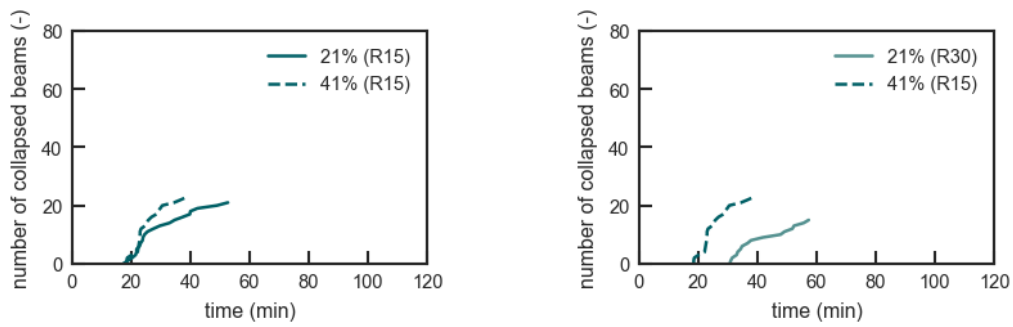
Figur 6-11 Tid (min) til antennelse av individuelle biler etter brannstart i lokasjon merket med «Ign.» og 11 m/s vind fra vest. Røde farger indikerer raskere antennelse, mens blå/grå farger indikerer senere antennelsestidspunkter. Venstre: veggutførelse med 21% åpningsgrad, høyre: veggutførelse med 41% åpningsgrad. Veggene på nordsiden, altså øverst i figuren, er helt tett i begge tilfeller.

Selv om vinden begrenser det totale omfanget av brannspredningen til andre biler, dvs. totalt antall biler som er involvert gjennom hele brannforløpet på 120 minutter, så ser man en negativ effekt på brannspredningen i vindretningen. Brannspredningen skjer her forttere sammenlignet med scenariene med lavere vindhastighet (se Figur 6-11). Den første tilstøtende bilen antennes allerede etter 9 minutter, og etter hhv. 40 minutter og 23 minutter har alle biler nedstrøms av den initiale bilen begynt å brenne. Den negative effekten av en raskere brannspredning er større i parkeringshuset med 41% åpningsgrad, hvor det også fører til en større maks HRR (se Figur 6-12) på 58 MW sammenlignet med 22 MW for scenariet med 3 m/s vind fra samme retning.



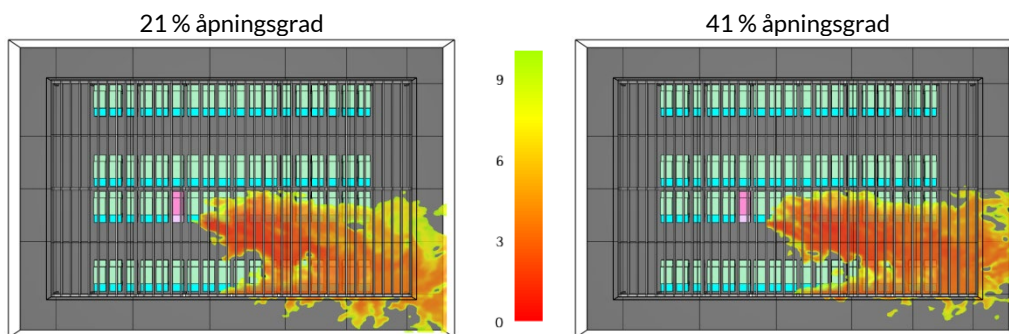
Figur 6-12 Endringen av den totale varmeavgivelseshastigheten (heltrukket linje) og varmeavgivelseshastigheten fra den første bilen (stiplet linje) over tid for brannscenariet med 11 m/s vind fra vest. Den maksimale totale varmeavgivelseshastigheten er oppgitt i øvre høyre hjørne. Venstre: veggutførelse med 21% åpningsgrad, høyre: veggutførelse med 41% åpningsgrad. Veggene på nordsiden, altså øverst i figuren, er helt tett i begge tilfeller.

Den raske brannspredningen fører til at rundt 10 bjelker har kollapset etter ca. 20 minutter (se Figur 6-13). Parkeringshuset med mindre åpningsgrad opprettholder bæreevnen noe lengre uavhengig av brannmotstanden for bjelkene, men spesielt når det brukes brannmotstand R 30.



Figur 6-13 Antall bjelker som har mistet sin bæreevne over tid for brannscenariet med 11 m/s vind fra vest. Venstre: «Lukket» garasje med R15 bjelker (heltrukket linje) sammenlignet med åpen garasje med R15 (stiplet linje). Høyre: «Lukket» garasje med R30 bjelker (heltrukket linje) sammenlignet med åpen garasje med R15 (stiplet linje).

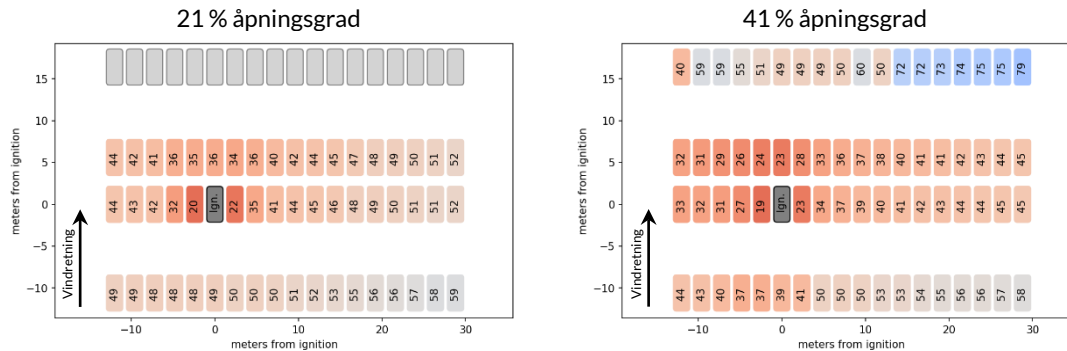
Den høye vindhastigheten hjelper i begge tilfeller til å begrense røykspredningen i parkeringshuset. Likevel synker sikten under 10 meter i området nedstrøms av brannens startlokasjon (se Figur 6-14). Det vises kun minimale forskjeller i sikt mellom de to ulike åpningsgradene.



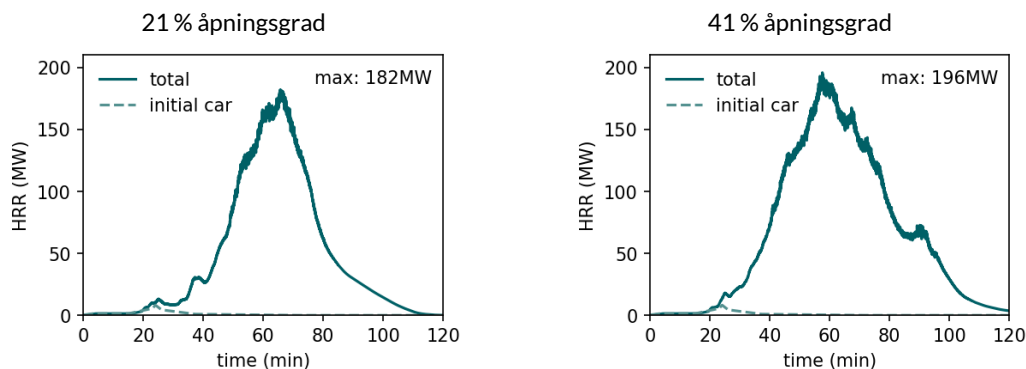
Figur 6-14 Sikt (m) i 2 meter høyde, (se fargeskala som angir antall meter sikt), 15 minutter etter brannstart for brannscenariet med 11 m/s vind fra vest. Venstre: veggutførelse med 21 % åpningsgrad, høyre: veggutførelse med 41 % åpningsgrad. Vegg på nordsiden, altså øverst i figuren, er helt tett i begge tilfeller.

6.4 Scenario 3 m/s vind fra sør

Figur 6-15 viser antennelsestider for brannscenarioet 3 m/s fra sør. På grunn av brannveggen på nordsiden, anses denne vindretningen som mindre gunstig enn vind fra vest. Vind fra sør, som er vinkelrett på bilrekkene, øker også sannsynligheten for brannspredning mellom rekkene. På grunn av den ugunstige vindretningen sprer brannen seg til alle bilene i hhv. tre og fire rekker.

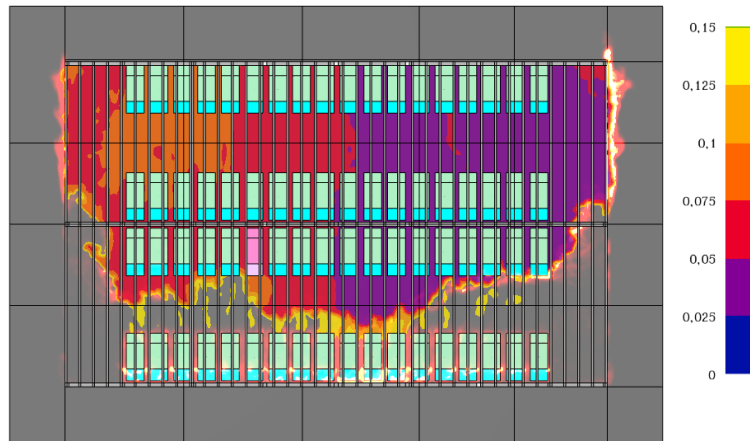


Figur 6-15 Tid (min) til antennelse av individuelle biler etter brannstart i lokasjon merket «Ign.» og 3 m/s vind fra sør. Røde farger indikerer raskere antennelse, mens blå/grå farger indikerer senere antennelsestidspunkter. Venstre: veggutførelse med 21 % åpningsgrad, høyre: veggutførelse med 41 % åpningsgrad. Veggen på nordsiden, altså øverst i figuren, er helt tett i begge tilfeller.



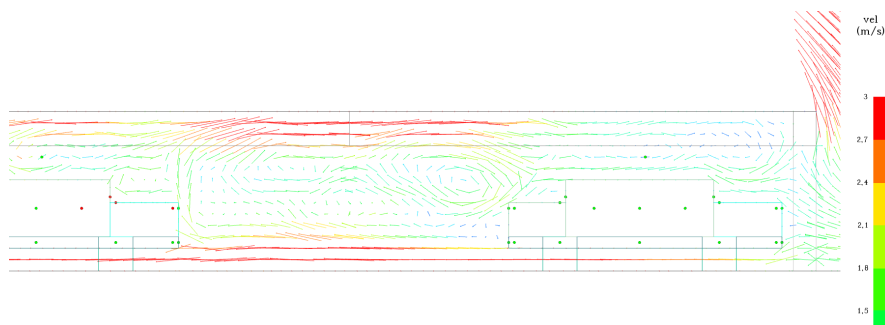
Figur 6-16 Endringen av den totale varmeavgivelseshastigheten (heltrukket linje) og varmeavgivelseshastigheten fra den første bilen (stiplet linje) over tid for brannscenarioet med 3 m/s vind fra sør. Den maksimale totale varmeavgivelseshastigheten er oppgitt i øvre høyre hjørne. Venstre: veggutførelse med 21 % åpningsgrad, høyre: veggutførelse med 41 % åpningsgrad. Veggen på nordsiden, altså øverst i figuren, er helt tett i begge tilfeller.

For begge åpningsgradene øker brannen til over 180 MW (se Figur 6-16), noe som fører til en underventilert brann (se Figur 6-17 som viser oksygenkonsentrasjonen). For parkeringshuset med 21 % åpningsgrad fører det til at brannen ikke sprer seg til bilrekken nærmest brannveggen på nordsiden.

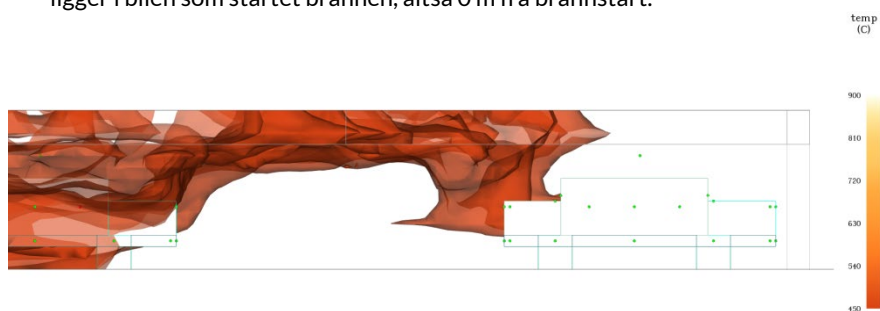


Figur 6-17 Oksygenkonsentrasjonen (kg/kg, se fargeskala) i et tverrsnitt 10 centimeter over golvet kombinert med 3D rendering av HRR per enhetsvolum (i gul/rød farge) etter 70 minutter for scenario med 3 m/s vind fra sør i parkeringshuset med 21 % åpningsgrad. Oksygenkonsentrasjonen over 0,15 kg/kg vises ikke i figuren.

En interessant forskjell mellom antennelsestidspunktene presentert i Figur 6-15 er at brannen sprer seg noe raskere mot vindretningen for parkeringshuset med 41 %, sammenlignet med parkeringshuset med 21 %. Dette er mot forventningene, men kan forklares ved å se på lokale strømningsforhold i parkeringshuset. På grunn av de underliggende bjelkene finnes det et område med relativ lav vindhastighet mot nord under taket (se Figur 6-18). I dette området sprer brann og varm røyk seg mot vindretningen (se Figur 6-19). Når brannen/røyken nærmer seg bilene på sørsiden av parkeringshuset, kommer den inn i et område hvor vinden trekker ned bak bilene. Dette fører til at røyken trekkes mot bilene og fører etter hvert til antennelse av bilene på sørsiden.

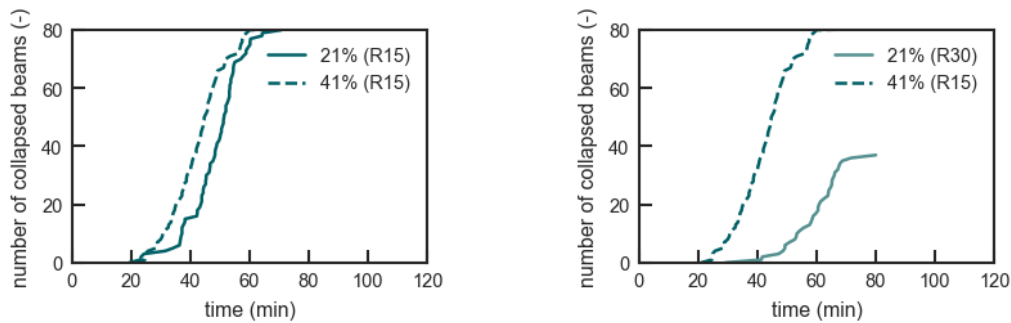


Figur 6-18 Strømningshastighet (m/s) i nord-sør tverrsnitt sett fra vest etter 39 minutter, for brannscenario med 3 m/s vind fra sør og veggutførelse med 41 % åpningsgrad. Tverrsnittet ligger i bilen som startet brannen, altså 0 m fra brannstart.



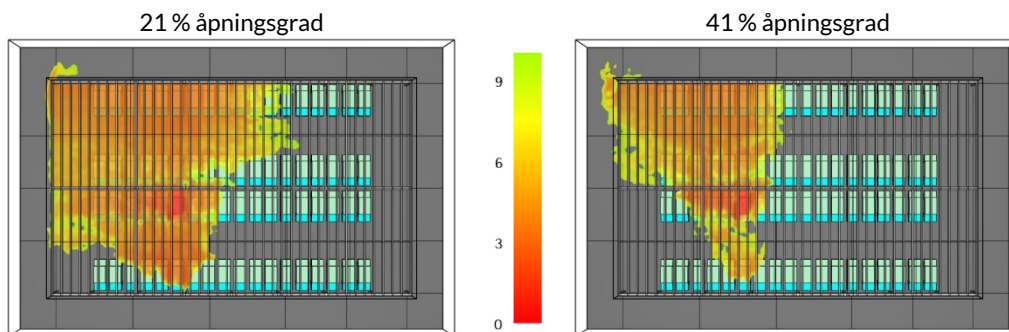
Figur 6-19 *Isosurface* av 450°C etter 39 minutter for brannscenario med 3 m/s vind fra sør og veggutførelse med 41 % åpningsgrad.

På grunn av vindretningen har vinden for dette scenariet en negativ effekt på brannspredningen, noe som også gjenspeiles i strukturanalysen. Sammenligner man løsningene med samme brannmotstand, så viser det mest innelukkede parkeringshuset (21 % åpningsgrad) lengre tid til kollaps (se Figur 6-20 venstre). Forskjellen blir enda større når det mest innelukkede parkeringshuset utføres med bjelker som har R 30 brannmotstand (se Figur 6-20 høyre).



Figur 6-20 Antall bjelker som har mistet sin bæreevne over tid for brannscenariet med 3 m/s vind fra sør. Venstre: «Lukket» garasje med R15-bjelker (heltrukket linje) sammenlignet med åpen garasje med R15-bjelker (stiplet linje). Høyre: «Lukket» garasje med R30-bjelker (heltrukket linje) sammenlignet med åpen garasje med R15-bjelker (stiplet linje).

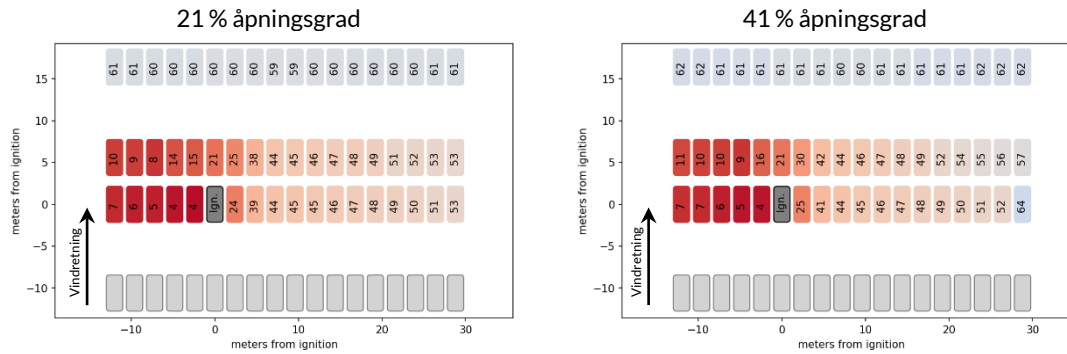
For sikten i parkeringshuset ser man derimot at det fortsatt er en fordel å ha en veggkonfigurasjon med større åpningsgrad. Figur 6-21 viser at området som har sikt under 10 meter, er noe mindre i parkeringshuset med 41 % åpningsgrad enn i parkeringshuset som har 21 % åpningsgrad.



Figur 6-21 Sikt (m) i 2 meter høyde (se fargeskala som angir antall meter sikt) 15 minutter etter brannstart for brannscenariet med 3 m/s vind fra sør. Venstre: veggutførelse med 21 % åpningsgrad, høyre: veggutførelse med 41 % åpningsgrad. Vegg på nordsiden, altså øverst i figuren, er helt tett i begge tilfeller.

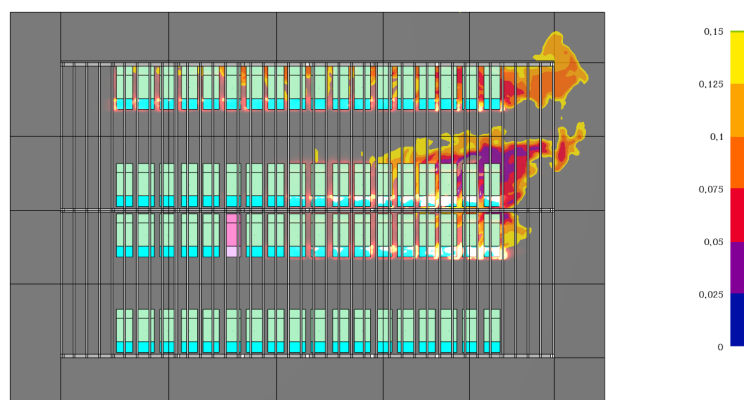
6.5 Scenario 11 m/s vind fra sør

Når vinden fra sør øker til 11 m/s, blir det tilført tilstrekkelig oksygen (se Figur 6-23) til at brannen klarer å spre seg til bilrekken nærmest brannveggen ved begge åpningsgrader. Vindhastigheten er også så høy at brannen ikke sprer seg oppstrøms, altså mot den sørligste bilrekken.



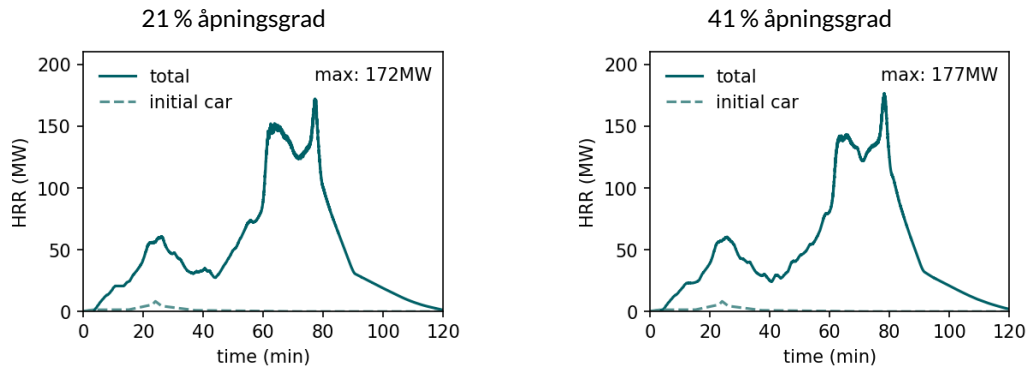
Figur 6-22 Tid (min) til antennelse av individuelle biler etter brannstart i lokasjon merket med «Ign.» og med 11 m/s vind fra sør. Røde farger indikerer raskere antennelse, mens blå/grå farger indikerer senere antennestidspunkter. Venstre: veggutførelse med 21 % åpningsgrad, høyre: veggutførelse med 41 % åpningsgrad. Vegg på nordsiden, altså øverst i figuren, er helt tett i begge tilfelle.

Scenariet med 11 m/s vind fra sør fører til raskest brannspredning til den første tilstøtende bilen, som antenner etter kun 4 minutter. Vinden tilfører tilstrekkelig oksygen til brannen i dette scenariet, samtidig som man mister den «positive» effekten av å evakuere mye røyk på grunn av brannveggen på nordsiden. Dette viser hvor viktig det er å følge veiledningen i Byggforskeren, anvisning 520.380 Røykkontroll i bygninger (2006), som sier: «Åpningsarealet må være godt fordelt, helst over to motstående parallelle langvegger for å skape god gjennomtrekk.» Det er imidlertid bare i frittstående parkeringshus dette prinsippet er enkelt gjennomførbart. For parkeringshus som henger sammen med andre bygg, eller har et så stort grunnareal per etasje at det er nødvendig å seksjonere, vil visse vindretninger føre til at gjennomluftingen ikke blir ideell.



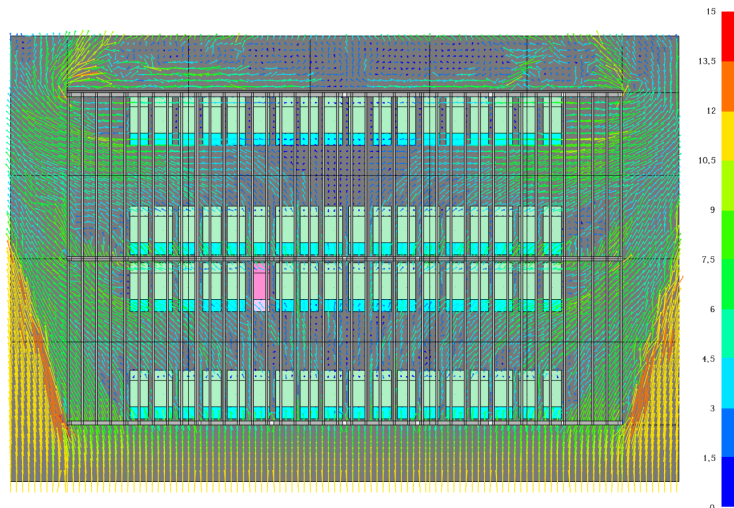
Figur 6-23 Oksygenkonsentrasjonen (kg/kg, se fargeskala) i et tverrsnitt 10 centimeter over golvet kombinert med 3D rendering av HRR per enhetsvolum (i gul/rød farge) etter 70 minutter for scenario med 11 m/s vind fra sør i parkeringshuset med 21 % åpningsgrad. Oksygenkonsentrasjonen over 0,15 kg/kg vises ikke i figuren.

Figur 6-24 viser HRR kurven for hhv. 21 % og 41 % åpningsgrad. Forløpet er ganske likt i begge tilfellene, og er karakterisert av to distinkte topper, den første etter ca. 20 minutter og den andre etter ca. 70 minutter. Den første toppen tilsvarer tidspunktet når bilene i de to midterste rekkene på vestsiden av startbrannen begynner å brenne. I Figur 6-22 tilsvarer det bilene med mørkerød farge.



Figur 6-24 Endringen av den totale varmeavgivelseshastigheten (heltrukket linje) og varmeavgivelseshastigheten av den første bilen (stiplet linje) over tid for brannscenariet med 11 m/s vind fra sør. Den maksimale totale varmeavgivelseshastigheten er oppgitt i øvre høyre hjørne. Venstre: veggutførelse med 21 % åpningsgrad, høyre: veggutførelse med 41 % åpningsgrad. Veggen på nordsiden, altså øverst i figuren, er helt tett i begge tilfeller.

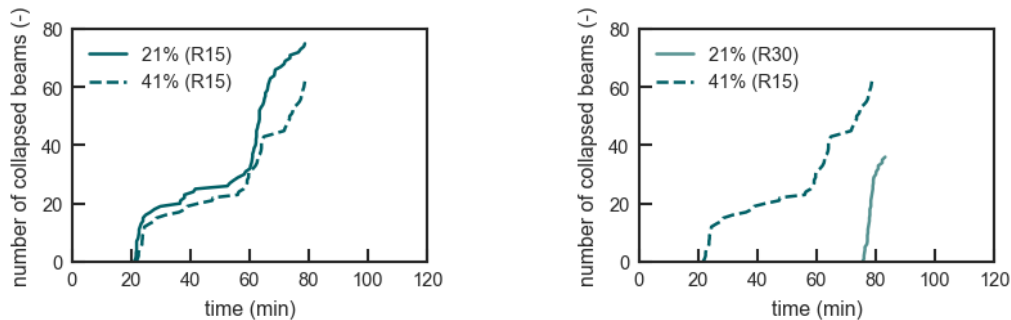
Etter den første toppen i HRR avtar kurven og når et lokalt minimum rundt 40 minutter etter brannstart. Dette skyldes den relativt lave vindhastigheten i midten av parkeringshuset (se Figur 6-25). Når brannen har spredt seg gjennom dette området med lav vindhastighet, hjelper vinden på østsiden av parkeringshuset til å spre brannen raskt igjen. Dette fører til den andre toppen i HRR med maksimum på hhv. 172 MW og 177 MW..



Figur 6-25 Strømningsfelt i 1,4 m høyde før brannstart i parkeringshuset med 21 % åpningsgrad og vind på 11 m/s fra sør. Fargene presenterer hastigheten i m/s.

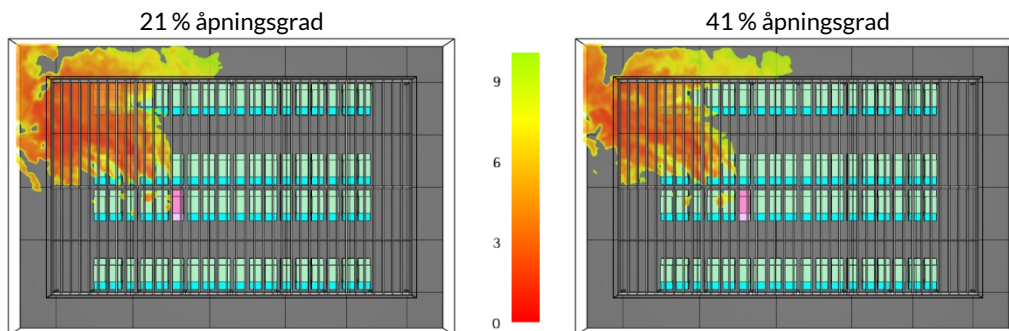
Selv om den andre toppen i HRR oppnår større maksimalverdier, så er det den første toppen som er kritisk siden den allerede har ført til kollaps av flere bjelker (se Figur 6-26). Med samme brannmotstand ($R 15$) er kollapstidene relativt like for begge åpningsgradene i de første 60 minuttene. Rundt ca. 20 minutter etter brannstart ser man kollaps av 12 bjelker, noe som tilsvarer 15% av totalt 80 bjelker (se Figur 6-26 venstre). Ved å bruke $R 30$ brannmotstand i det

mest innelukkede parkeringshuset, økes tiden til første kollaps betydelig, til nesten 80 minutter (se Figur 6-26 høyre).



Figur 6-26 Antall bjelker som har mistet sin bæreevne over tid for brannscenarioet med 11 m/s vind fra sør. Venstre: «Lukket» garasje med R15-bjelker (heltrukket linje) sammenlignet med åpen garasje med R15-bjelker (stiplet linje). Høyre: «Lukket» garasje med R30-bjelker (heltrukket linje) sammenlignet med åpen garasje med R15-bjelker (stiplet linje).

Figur 6-27 viser sikten i 2 meter høyde, 15 minutter etter brannstart. På dette tidspunktet brenner fortsatt kun biler på vestsiden av parkeringshuset. Røyken sprer seg ikke mot vindretningen, noe som fører til at kun den nordvestlige delen av parkeringshuset har en sikt under 10 meter. Effekten av de to forskjellige åpningsgradene er på dette tidspunktet neglisjerbar.



Figur 6-27 Sikt (m) i 2 meter høyde (se fargeskala som angir antall meter sikt), 15 minutter etter brannstart for brannscenarioet 11 m/s vind fra sør. Venstre: veggutførelse med 21 % åpningsgrad, høyre: veggutførelse med 41 % åpningsgrad. Vegg på nordsiden, altså øverst i figuren, er helt tett i begge tilfeller.

6.6 Oppsummering

Det understrekes at CFD-simuleringene og strukturanalysen innebærer mange usikkerheter og begrensninger. Resultatene gir derfor kun indikasjoner for sammenligning mellom parkeringshus med ulike åpningsgrader, og ikke endelige absoluttverdier.

Figur 6-28 viser en oversikt over tiden til kollaps av bærende bjelker for alle de gjennomførte simuleringene innen de første 60 minutter etter brannstart.

Sammenligner man kollapsestider for parkeringshus med forskjellige åpningsgrader, 21 % og 41 %, men med samme brannmotstand (R 15), ser man at brannen må oppnå en viss størrelse, eller ekstern vind må være til stede, før man ser en betydelig forskjell i kollapsestiden.

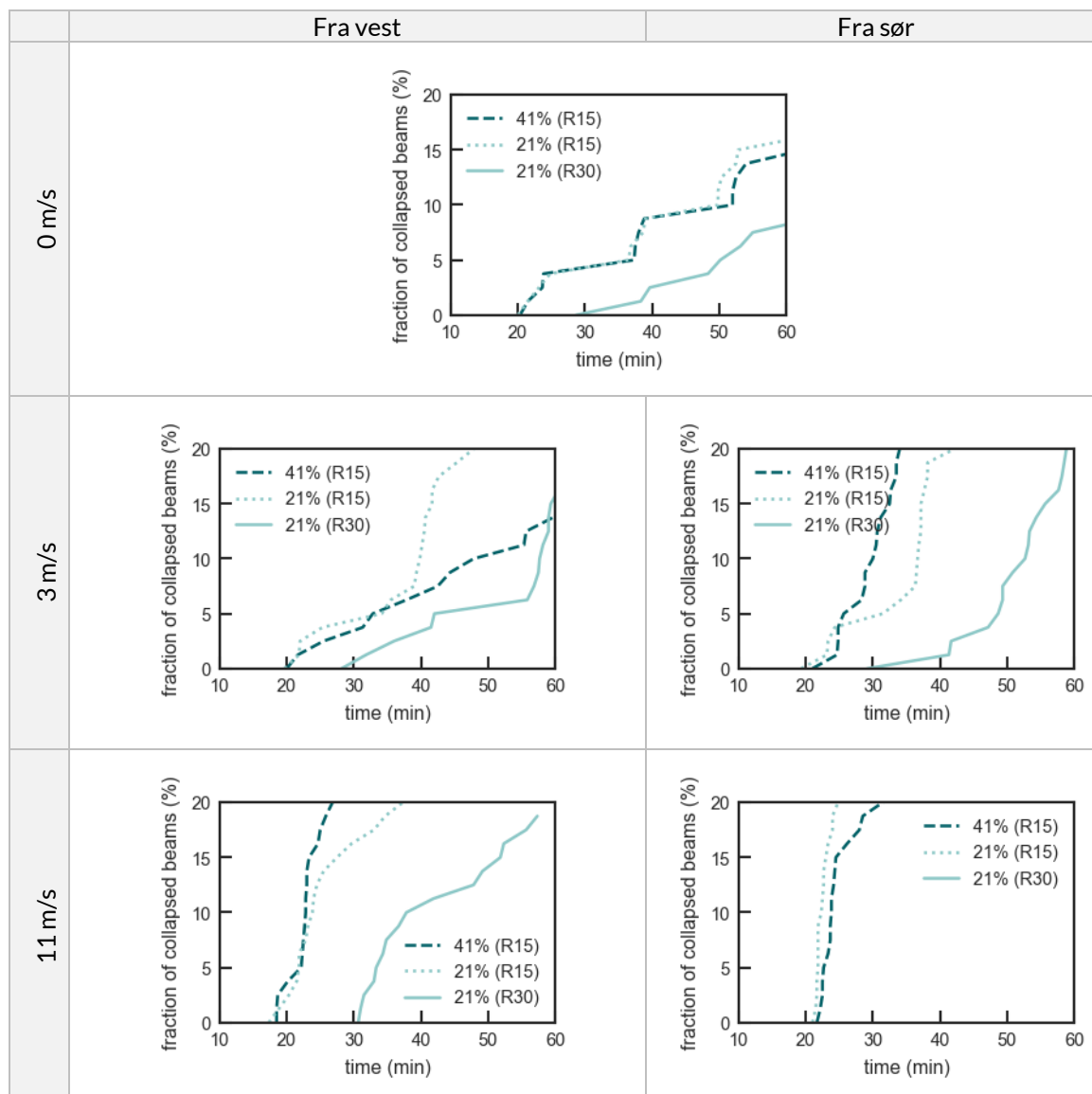
For en moderat vindhastighet på 3 m/s, viser det seg at en større åpningsgrad fører til senere kollaps når vinden kommer fra en fordelaktig retning slik at det oppnås god gjennomlufting. Denne vindhastigheten fører imidlertid til raskere kollaps når vinden kommer fra en ufordelaktig retning.

Vind med høy hastighet på 11 m/s førte, uavhengig av vindretningen, til rask brannspredning til bilene i nærheten av brannstarten og kollaps av ca. 15% av bjelkene etter rundt 20 minutter. Dette gjelder bjelkene med brannmotstand R 15.

I alle de undersøkte scenariene kollapser R 15-bjelkene i det åpne parkeringshuset raskere enn R 30-bjelkene i det mer lukkede parkeringshuset..

Å redusere brannmotstanden fra R 30 til R 15 når åpningsgraden er over 1/3 av veggflaten, fører til at bjelkene kollapser minst 10 minutter tidligere i de undersøkte scenariene.

Med brannmotstand R 60 førte ingen av de simulerte scenariene til kollaps av parkeringshuset med 21 % åpningsgrad.



Figur 6-28 Oversikt over kollapstiden for alle scenariene og parkeringshusutføringene.

Å øke åpningsgraden fra 21 % til 41 % førte generelt til forholdsvis liten forbedring av siktforholdene i de første 15 minuttene av brannforløpet. Forskjellen mellom siktforholdene i parkeringshusene var størst for scenariene med 3 m/s vind. Dette gjelder spesielt for scenariet med vind fra vest som førte til god gjennomlufting og betydelig forbedring i siktforholdene. For scenariene uten vind, eller med vind på 11 m/s, var forskjellene i siktforholdene minimale.

7 Konklusjoner

Dette kapitlet presenterer konklusjonene som er basert på kartlegging av regelverket, gjennomføring av brannsimuleringer og en forenklet strukturanalyse.

7.1 Kartlegging av regelverk

Følgende hovedregler gjelder for bæresystem i parkeringshus i Norge, Sverige, Danmark og Finland:

- Parkeringshus i to etasjer : R 30 – R 60
- Parkeringshus i tre og fire etasjer : R 60
- Parkeringshus i mer enn fire etasjer : R 60 - R 90 – R 120

I Norge kan brannmotstanden reduseres i parkeringshus med to etasjer (fra R 30 til R 15 A2-s1,d0) og i parkeringshus med tre og fire etasjer (fra R 60 til R 15 A2-s1,d0), dersom mer enn 1/3 av veggflatene er åpne og gitte forutsetninger er oppfylt. Det kan benyttes brennbare konstruksjoner inntil fire etasjer. For å oppfylle kravet i TEK17 § 11-8 om brannceller, vil det i mange tilfeller være nødvendig å installere et automatisk sprinkleranlegg i parkeringshus med åpne veggflater.

Sverige tillater også å redusere brannmotstanden fra R 30 til R 15, men kun for parkeringshus med to etasjer. For parkeringshus med tre til fire etasjer kreves det alltid R 60. I parkeringshus med mer enn fire etasjer er det mulig å redusere brannmotstanden fra R 90 til R 60. En viktig forskjell mellom regelverket i Norge og Sverige er at reduksjonen av brannmotstanden i Sverige forutsetter installasjon av et automatisk sprinkleranlegg og ikke er avhengig av åpningsgraden i veggflatene. Også Finland tillater reduksjon av brannmotstand ved installasjon av sprinkler, men dette gjelder kun for parkeringshus med en høyde over 28 meter (ca. 8 etasjer) og en reduksjon fra R 120 til R 60.

Danmark tillater å redusere brannmotstanden i øverste etasje fra R 60 til R 30 for parkeringshus med øverste golv \leq 5,1 meter (to etasjer) og fra R 120 til R 60 i parkeringshus med øverste golv \leq 45 meter (5 – 16 etasjer).

Verken Danmark eller Finland tillater R 15 brannmotstand for hovedbæresystemet i parkeringshus.

Danmark bruker lokasjonen i parkeringshus (kun øverste etasje) som kriterium for en reduksjon av brannmotstanden, mens Sverige og Finland bruker installasjon av sprinkler som kriterium. Av de undersøkte skandinaviske landene er det kun Norge som bruker åpningsgraden av veggflatene som et kriterium for å redusere brannmotstanden.

I praksis vil parkeringshus med åpne veggflater i Norge ofte kreve installasjon av sprinkleranlegg, enten fordi hvert plan er definert som en egen branncelle, eller fordi samlet bruttoareal i en branncelle med åpen forbindelse over flere plan overstiger 800 m². I disse tilfellene vil utførelsen være mer sammenlignbar med Sverige, altså at det aksepteres en reduksjon av brannmotstanden dersom det installeres sprinkleranlegg.

7.2 Brannsimuleringene og strukturanalysen

Det understrekes at CFD-simuleringene og strukturanalysen innebærer mange usikkerheter og begrensninger. Resultatene gir derfor bare noen indikasjoner, og ikke endelige svar. De største usikkerhetene i CFD-simuleringene er knyttet til antennelse av tilstøtende biler på grunn av varmpåkjønning og brannspredning i en enkelt bil. Brannspredning i faste brensel er generelt utfordrende å modellere og ble i denne studien håndtert ved å etablere enkle modeller. Viktige faktorer som kan endre brannforløpet er for eksempel tidspunktet når bilvinduer ødelegges, eller en bensintank sprekker. Disse faktorene er ikke tatt spesifikt hensyn til i simuleringene. De største forenklingene i strukturanalysen er at den tredimensjonale varmeledningen i strukturen ikke ble modellert og at det ikke ble tatt hensyn til fortløpende kollaps av strukturen (kaskadeeffekt).

I en situasjon uten vind, eller med moderat vind på 3 m/s som fører til god gjennomlufting, vil åpne veggflater bidra til å redusere brannspredningen i et parkeringshus. Det vil si at færre biler blir involvert i brannen.

Effekten av forskjellige åpningsgrader, som var 21 % og 41 % i denne studien, ser man imidlertid først når brannen har oppnådd en viss størrelse. I denne studien skjedde det etter 40 minutter til 60 minutter. Dette gjelder spesielt for veldig lave vindhastigheter, her representert ved et scenario uten vind, hvor det er brannen som dominerer ventilasjonsforholdene i parkeringshuset.

For høye vindhastigheter, som for eksempel 11 m/s, vil lufthastigheten inne i parkeringshuset fortsatt være relativt høy, selv i parkeringshus med mer lukkede veggflater (21 % åpningsgrad). I dette tilfellet, hvor vindhastigheten er så høy at brannen ikke sprer seg oppstrøms, vil vindretningen bestemme hvilke biler brannen sprer seg til.

Simuleringen viser altså at vinden kan bidra til å begrense hvor mange biler som blir involvert i brannen. Nedstrøms av biler som allerede brenner eller bilen som starter brannen, fører en økt vindhastighet til raskere brannspredning. Siden større åpninger i veggflaten øker vindhastigheten inne i parkeringshuset, vil det også føre til raskere brannspredning i nedstrøms retning.

En brann som sprer seg raskt fra bil til bil slik at mange biler brenner samtidig, kan føre til en større påkjønning på bæresystemet sammenlignet med en brann som sprer seg sakte. En brann som sprer seg sakte kan totalt sett spre seg til flere biler, men det er færre biler som brenner samtidig. Derfor kan et mer åpent parkeringshus, som fører til høyere vindhastighet, øke varmpåkjønningen på bæresystemet. Varmepåkjønningen vil imidlertid være sterkt avhengig av bl.a. vindretningen, parkeringshusets layout og lokasjonen av brannstarten i forhold til lokasjon av andre biler.

I strukturanalysen ble det ikke tatt hensyn til fortløpende kollaps av strukturen (kaskadeeffekt). Derfor er det ikke mulig å si noe om hvor mange bjelker som kan miste bæreevnen før større deler eller hele parkeringshuset kolliderer. Resultatene fra strukturanalysen for alle scenariene viser imidlertid at mer enn 5% av bjelkene kolliderer innen 20 til 30 minutter ved en brannmotstand på R 15. Dette gjelder uavhengig av åpningsgraden som ble brukt.

Videre viste strukturanalysen at å øke åpningsgraden fra 21 % (altså mindre enn 1/3) til 41 % (mer enn 1/3) har en mye mindre effekt på kollapstiden enn å redusere brannmotstanden fra

R 30 til R 15. Forskjellen er enda større for en reduksjon fra R 60 (som ikke førte til kollaps av noen av bjelkene) til R 15.

Hvor stor effekt åpne veggflater har på røykspredningen (med tanke på redusert sikt og dermed redusert tilgjengelig rømningstid) avhenger sterkt av vindforholdene. For veldig lave eller veldig høye vindhastigheter forventes det liten forskjell i siktforholdene avhengig av åpningsgraden. Ved moderate vindhastigheter, som er statistisk sett mest vanlig, viste det seg at å øke åpningsgraden forbedrer siktforholdene når vindretningen var fordelaktig.

7.3 Anbefaling

Basert på resultatene fra brannsimuleringene og strukturanalysen, som innebærer de ovennevnte begrensinger og usikkerheter, anbefales følgende:

Hvordan åpne veggflater påvirker branner i parkeringshus er sterkt avhengig av brannscenariet og vindforholdene. Dette er to faktorer som ikke kan kontrolleres. Å dimensjonere brannmotstanden til bæresystemet i et parkeringshus basert på åpningsgraden av veggflatene (mer enn 1/3 av arealet), anses derfor som lite robust.

Brannsimuleringene og strukturanalysen gjennomført i denne studien, viste videre at bedre ventilasjon på grunn av åpne veggflater (mer enn 1/3 av arealet), selv ved fordelaktige vindforhold, ikke kan kompensere for redusert brannmotstand (fra R 60 eller R 30 til R 15). Kollaps inntreffer tidligere i åpne parkeringshus dimensjonert med brannmotstand R 15 sammenlignet med parkeringshus som har mindre enn 1/3 av veggflatene åpne, men brannmotstand R 30 eller R 60. Resultatene fra denne studien tilsier derfor at brannmotstanden ikke bør reduseres til R 15 i parkeringshus med åpne veggflater.

Åpne veggflater bidrar i noen tilfeller til å forbedre siktforholdene i parkeringshus slik at den tilgjengelige rømningstiden øker, men også dette er avhengig av brannscenario og vindforholdene. Den største forbedringen i siktforholdene ble observert for scenariene med en moderat vind på 3 m/s, noe som er en typisk årlig gjennomsnittshastighet. Derfor anses åpne veggkonstruksjoner likevel som fordelaktig.

Kartlegging av regelverket i Sverige, Danmark og Finland viste at disse landene bruker installasjon av sprinkler (Sverige og Finland) og lokasjon innenfor parkeringshuset (reduksjon kun tillatt i øverste etasje) som en av forutsetningene⁴ for å tillate reduksjon i brannmotstanden. Denne studien har ikke undersøkt effekten av sprinkleranlegg eller forskjell på lokasjonen innenfor parkeringshuset.

Vurderingen av et automatisk sprinkleranlegg som kompenserende tiltak for å redusere brannmotstanden, er altså ikke inkludert i denne studien. Et sprinkleranlegg anses likevel å være mer uavhengig av vindforholdene, og derfor bedre egnet som tiltak for å kunne redusere brannmotstanden.

⁴ Også andre kriterier, som for eksempel antall etasjer, må tas hensyn til.

Gjennomgangen av det norske regelverket viste at det i praksis ofte er nødvendig å installere sprinkleranlegg i åpne parkeringshus. Dette er imidlertid ikke direkte koplet til kriteriet om mer enn 1/3 åpent veggareal.

Det anbefales at muligheten til reduksjon av brannmotstanden i åpne parkeringshus revurderes. Denne muligheten bør vurderes fjernet, eller det kan benyttes andre kriterier for å redusere brannmotstanden, for eksempel sprinkleranlegg (som i Sverige). Sprinkleranlegg anses å være bedre egnet som kompenserende tiltak mot redusert brannmotstand.

Som grunnlag for en slik revurdering bør det gjøres eksperimenter (brannforsøk). Dette fordi CFD-simuleringer har noen begrensninger, spesielt med tanke på samspill mellom sprinkler/vanndråper og fast brennstoff.

I tillegg til veggutformingen kan også andre faktorer påvirke brannspredningen, som for eksempel takhøyde, utformingen av tak-/dekkekonstruksjonen og avstand mellom bilene. Disse faktorene har ikke blitt undersøkt i denne studien. Simuleringene viser for eksempel at et dekke med underliggende bjelker (ribbedekke) kan ha en stor effekt på de lokale strømningsforholdene og dermed brannspredningen. Det anbefales å bruke den eksisterende brannspredningsmodellen for å undersøke disse parameterne, og eventuell validere med eksperimentell forskning.

8 Referanser

- [1] K. Storesund, C. Sesseng, R. F. Mikalsen, O. A. Holmvaag, and A. Steen-Hansen, 'Evaluering av brann i parkeringshus på Stavanger lufthavn Sola 7. januar 2020', RISE Fire Research, Trondheim, Norway, RISE-rapport 2020:43, Sep. 2020.
- [2] Direktoratet for byggkvalitet, 'Veiledning om tekniske krav til byggverk - Byggteknisk forskrift (TEK17) med veiledning. Ikrafttredelse 1. juli 2017.' DiBK, 01 Jul. 2017.
- [3] Kommunal- og moderniseringsdepartementet, *Forskrift 19. juni 2017 nr. 840 om tekniske krav til byggverk (Byggteknisk forskrift, TEK17)*. 2017.
- [4] A. Patil, A. Patel, and R. Purohit, 'An overview of Polymeric Materials for Automotive Applications', *Materials Today: Proceedings*, vol. 4, no. 2, pp. 3807–3815, 2017.
- [5] Dansk Brand- og sikringsteknisk Institut and Teknologisk Institut, 'Brandsikkerhed i garageanlæg, oplag af litium-ion batterier og batterier til solcelleanlæg i bygninger', Version: 02, Jan. 2022.
- [6] F. Markert and L. Giuliani, 'Hydrogen-fueled car fire spread to adjacent vehicles in car parks', presented at the 8th International Conference on Hydrogen Safety, Adelaide, Australia, 2019.
- [7] 'Development of design rules for steel structures subjected to natural fires in closed car parks', Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 1997.
- [8] Building Research Establishment, 'Fire spread in car parks', Building Research Establishment, London, England, BD2552, Dec. 2010.
- [9] Park, Ryu, and H. S. Ryou, '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, Apr. 2019.
- [10] Dayan Li et al, 'Flame spread and smoke temperature of full-scale fire test of car fire', *Case Studies in Thermal Engineering*, Aug. 2017.
- [11] T. Bartzanas, T. Boulard, and C. Kittas, 'Numerical simulation of the airflow and temperature distribution in a tunnel greenhouse equipped with insect-proof screen in the openings', *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 34, no. 1–3, pp. 207–221, May. 2002.
- [12] K. McGrattan, S. Hostikka, J. Floyd, R. McDermott, and M. Vanella, 'Fire Dynamics Simulator User's Guide', *NIST Special Publication*, p. 434.
- [13] 'EN 1993-1-1:2005, Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1-1: General rules and rules for buildings'. European Committee for Standardization, 2005.
- [14] 'EN 1993-1-2:2005, Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1-2: General rules - Structural fire design'. European Committee for Standardization, 2005.
- [15] Building and Construction Authority, Singapore Government, 'Building Framework - Floor Slab with Precast Façade System'.
- [16] CEN, 'EN 10025-2: Hot rolled products of structural steels - Part 2: Technical delivery conditions for non-alloy structural steels'. 2019.
- [17] R. R. Krishnamoorthy and C. G. Bailey, 'Temperature distribution of intumescent coated steel framed connection at elevated temperature.', p. 8.
- [18] SN/K227, 'Fire Safety Engineering - Comparative method to verify fire safety design in buildings'. 2014.

RISE – Research Institutes of Sweden
ri.se / info@ri.se / post@risefr.no / (+47) 464 18 000
Postboks 4767 Torgarden, 7465 TRONDHEIM

RISE Fire Research AS
RISE Rapport: 2022:95
ISBN: 978-91-89711-35-8

