

# Simulering av effekten av taktiska val och byggnadens egenskaper vid insats i garage under mark

---

Oscar Svensson | Avdelningen för Brandteknik | LTH |  
LUNDS UNIVERSITET





**Simulering av effekten av taktiska val och byggnadens  
egenskaper vid insats i garage under mark**

**Oscar Svensson**

**Lund 2020**

**Titel:** Simulering av effekten av taktiska val och byggnadens egenskaper vid insats i garage under mark

**Title:** Simulation of the effects of tactical decisions and building properties in underground parking structures

**Författare/ Author:** Oscar Svensson

**Report 5631**

**ISRN: LUTVDG/TVBB--5631--SE**

**Antal sidor/Number of pages:** 62 (exklusive bilagor / excluding appendencies)

### **Sökord/Keywords**

Garagebrand, simulering, räddningstjänst, brandgasventilation, PPV-fläkt, FDS, bilbrand

### **Abstract**

Fires in underground parking garages in the recent years are believed to have increased in severity and poses a safety problem for Swedish fire and rescue services. Among the suspected reasons for the increased severity is an increase in time before an internal operation is initiated by the fire and rescue services. With several tactical decisions available during an operation, it is often uncertain how these would affect key safety parameters such as temperature and visibility. To examine the effect such decisions may have, this work started with outlining available decisions through interviews with a few fire and rescue services in Sweden. The identified tactical decisions were then examined using the computer simulation program Fire Dynamics Simulator with focus on the key safety parameters temperature and visibility. The examined scenarios regarding fire and rescue operations included time of arrival and the use of positive pressure ventilators, with and without added water mist, placed in the entrance of the garage. In addition, building specific scenarios with variation in ceiling height and amount openings for smoke ventilation were also examined. The results showed a small improvement when using positive pressure ventilators, both with and without water mist, regarding temperature and visibility. Ceiling height and increased amount of smoke ventilation openings also improved the conditions. This work was limited to cars with regular fuels, petrol and diesel, further investigations of cars with alternative fuels, such as electricity or gas, is therefore recommended. In addition, a closer investigation of tactical decisions is also recommended since some of the results differ from what fire and rescue services have experienced in practical use.

© Copyright: Division of Fire Safety Engineering, Faculty of Engineering, Lund University, Lund 2020

Avdelningen för Brandteknik, Lunds tekniska högskola, Lunds universitet, Lund 2020.

---

Brandteknik  
Lunds tekniska högskola  
Lunds universitet  
Box 118  
221 00 Lund

[www.brand.lth.se](http://www.brand.lth.se)  
Telefon: 046 - 222 73 60

---

Division of Fire Safety Engineering  
Faculty of Engineering  
Lund University  
P.O. Box 118  
SE-221 00 Lund  
Sweden

[www.brand.lth.se](http://www.brand.lth.se)  
Telephone: +46 46 222 73 60

# FÖRORD

Detta arbete genomfördes som ett examensarbete vid brandingenjörsprogrammet vid Lunds Tekniska Högskola.

Jag vill rikta ett stort tack till alla de som ställt upp och stöttat mitt arbete under den här tiden. Ett extra stort tack till följande personer vars hjälp har gjort arbetet möjligt genom bland annat handledning, råd och korrekturläsning.

Marcus Runefors	Universitetsadjunkt, Brandteknik vid Lund Tekniska Högskola
Lucas Andersson	Brandkonsult, Briab
Joakim Ilmrud	Brandingenjör & yttre befäl, Räddningstjänsten Syd
Stefan Svensson	Docent & brandingenjör, Myndigheten för Samhällsskydd och Beredskap
Jonathan Wahlqvist	Post-doktor, Brandteknik LTH
Joakim Åström	Student brand- och riskingenjör, Lunds Tekniska Högskola
Sofia Lindahl	Student brand- och riskingenjör, Lunds Tekniska Högskola

Jag vill även tacka de som ställt upp på intervju mitt under sommaren och AFRY Safety för att jag fått använda deras serverkapacitet för simuleringarna, samt min familj och flickvän Kätli som hjälpt med korrekturläsning, engelska formuleringar och stöd under hela arbetets gång.



# SUMMARY

Räddningstjänsten Syd, the Fire and Rescue Service for the five municipalities Burlöv, Eslöv, Kävlinge, Lund and Malmö, has in the last ten years experienced an increase in severity of the damage after fires in underground parking structures. After two firefighters ended up in an emergency during a fire in an underground parking structure their strategy has been questioned. The goal of this work was to map and compare the effects of tactical decisions made by fire rescue personnel during response to underground garage fires, as well as the fire protection within the building itself regarding the safety of the fire rescue personnel. The work was based on the following questions:

- What tactical decisions are available for fire and rescue personnel during response to underground garage fires?
- How do these tactical decisions affect visibility and temperature, which are critical to the safety of fire and rescue personnel, in the garage?
- What tactical decisions are suitable to take during response to underground garage fires?
- How do measures in the planning process of building construction affect the safety of fire and rescue personnel during response to underground garage fires and what effect does smoke ventilation according to chapter 5:732 in the building code have on the operation?

The work was divided into three sections; collect and study information about vehicle and parking structure fires, interviews with personnel in Swedish fire and rescue services, and analysis using computer simulations. The information study mainly focused on research in the area and building codes, both today and earlier. Interviews with representatives from a small number of fire and rescue services in Sweden were conducted to gather information about what strategies and tools are being used in the case of fire in underground parking structures.

The identified tactics and parameters were then analysed in the computer simulation program Fire Dynamics Simulator to examine the effects of these parameters have on temperature and visibility in the garage.

Based on the interview answers the following parameters were identified regarding fire and rescue services:

- Normal response time: 10 minutes
- Longer response time: 30 minutes
- Use of normal positive pressure ventilator: 31 000 m<sup>3</sup>/h
- Use of larger positive pressure ventilator: 96 000 m<sup>3</sup>/h
- Water vapor in air inflow: 60 l/min

In addition to the fire and rescue service parameters the following parameters regarding fire protection solutions in the constructions were identified:

- Ceiling height: 3,0 m instead of 2,4 m
- No smoke ventilation
- More smoke ventilation: Total 1 % of floor area instead of 0,5 %

The simulations were run with a fire involving a total of three cars with peak heat release rate of 6,7 MW each parked next to each other. The fire started in one car and spread to the second after 12,5 minutes and to the third after another 12,5 minutes. Total time for each simulation was 60 minutes.

The results were compared with information collected from literature and the information collected during interview and from event reports and accident investigations, as well as criteria for firefighter safety. The following conclusions were made based on the results:

- The response time affect the environment in the garage somewhat, mainly during the first minutes of the operation. However, later arrival increases the risk for further fire spread if the fire is not limited to three cars. A system for quick fire detection, for example an automatic fire alarm, is therefore recommended to increase the possibilities for the fire and rescue services to confine the fire.
- Tactical decisions to use positive pressure ventilators are limited and the required capacity for desired effect is considered to depend on the size of the garage. Large volumes require large capacity to get any form of effect. The effect of positive pressure ventilators, with or without added water vapor, further depends on the placement in relation to the location of the fire.
- In general, the temperature does not constitute a risk to the safety of fire and rescue personnel based on the defined criteria. The volume of the garage is assumed to have a great impact, and for garages with smaller volume the temperature may increase above the safety criteria.
- The visibility is in general bad, regardless of decisions made by fire and rescue personnel, but since Fire Dynamics Simulator include great uncertainties regarding the calculations of parameters affecting visibility the result compared to reality is unreliable. Among the compared decisions made by fire and rescue personnel, using a positive pressure ventilator with larger capacity gives the best results. Out of the compared construction specific measures a higher ceiling height gives the best effect on visibility.



# SAMMANFATTNING

Räddningstjänsten Syd har sedan 10 år tillbaka upplevt att garagebränder under mark ökat i omfattning, och sedan ett tillbud vid insats där två rökdykare hamnade i nödläge har strategin under insatser i denna typ av byggnader ifrågasatts. Målet med detta arbete var att kartlägga och jämföra effekterna av räddningstjänstens taktiska val under insats vid brand i garage under mark, samt byggnadstekniskt brandskydd med avseende på räddningspersonalens säkerhet i garaget. Arbetet utgick från följande frågeställningar:

- Vilka taktiska val finns tillgängliga för räddningstjänsten under insats vid fordonsbrand i garage under mark?
- Hur påverkar dessa taktiska val sikt och temperatur, vilka är kritiska för räddningspersonalens säkerhet, i garaget?
- Vilka taktiska val är lämpliga att använda under insats vid fordonsbrand i garage under mark?
- Hur påverkar åtgärder i projekteringsstadiet säkerheten under en insats i garage under mark och vilken effekt har brandgasventilation i enlighet med allmänt råd i BBR kap 5:732 på insatsen?

Arbetet delades upp i tre större etapper; inläsning om bil- och garagebränder, intervjuer med räddningstjänst samt analys. Inläsningen bestod av informationssökning och inläsning av bland annat genomförd forskning kring bil- och garagebränder, samt om de lagkrav som gäller idag och tidigare gällande regler. Intervjuer genomfördes med representanter från flera svenska räddningstjänster för att inhämta information om hur insatser i garage under mark hanteras generellt.

Analysen genomfördes sedan med hjälp av datorsimuleringar i programmet Fire Dynamics Simulator där åtta scenarier, definierade utifrån information om hur räddningstjänsten agerar vid insatser i garage under mark, simulerades för att undersöka hur förhållanden med avseende på temperatur och sikt i garaget påverkades.

Utifrån svaren i intervjuerna undersöktes följande parametrar kopplade till räddningstjänsten:

- Normal insatstid: 10 minuter
- Lång insatstid: 30 minuter
- Användning av övertrycksfläktfläkt: 31 000 m<sup>3</sup>/h
- Användning av större övertrycksfläkt: 96 000 m<sup>3</sup>/h
- Vattendimma i tilluft: 60 l/min

Följande byggnadstekniska egenskaper med koppling till byggnadsegenskaper och nu gällande bygglagstiftning undersöktes:

- Högre takhöjd: 3,0 m istället för 2,4 m
- Ingen brandgasventilation
- Mer brandgasventilation: Motsvarande 1 % av golvytan istället för 0,5 %

Simuleringarna genomfördes med en dimensionerande brand innehållande tre bilar med en maximal effektutveckling på 6,7 MW per bil parkerade parallellt bredvid varandra. Branden startades i en bil och spreds sedan till nästa efter 12,5 minuter, och sedan till den tredje efter ytterligare 12,5 minuter. Simuleringen genomfördes under 60 minuter.

Resultatet från simuleringarna jämfördes med information från litteratur och den information som insamlats under intervjuer och från olycksundersökningar och händelserapporter. Följande slutsatser kunde dras utifrån de genomförda simuleringarna:

- Insattiden påverkar förhållandena något, främst inledningsvis under påbörjad insats. Däremot utgör sen ankomst en risk för vidare spridning om branden inte begränsas till tre bilar. System för tidig upptäckt, exempelvis automatiskt brandlarm, är därför en rekommendation för att räddningstjänsten ska få goda möjligheter att tidigt begränsa.
- Räddningstjänstens taktiska val att använda fläkt är begränsad och den nödvändiga kapaciteten för att få önskad effekt bedöms bero på garagets storlek. Stora volymer kräver större kapacitet för att ge effekt. Effekten av fläkt, både med och utan inblandad vattendimma i tilluften, beror vidare på placering av tilluftsöppningen i relation till branden.
- Generellt utgör temperaturen inte en större risk utifrån de angivna acceptanskriterierna för räddningstjänstens säkerhet vid rökdykning. Garagets volym förutsätts däremot ha en stor påverkan, och vid mindre volymer kan temperaturen överstiga de angivna acceptanskriterierna.
- Sikten är generellt dålig oavsett vidtagna åtgärder, men då FDS innefattar stora osäkerheter blir resultatet i jämförelse med verkligheten opålitligt. Vid jämförelse av räddningstjänstens åtgärder ger fläkt med stor kapacitet den bästa effekten på sikten. Av de byggnadstekniska åtgärderna ger takhöjd den bästa effekten.

# TERMINOLOGI

BBR	Boverkets Byggregler, en författningssamling med byggnadstekniska regler kring bland annat brandskydd.
BBRAD	Boverkets allmänna råd om analytisk dimensionering av byggnaders brandskydd, en samling råd för hur brandskydd bör dimensioneras vid avsteg från förenklad dimensionering enligt BBR.
CFD	Computational Fluid Dynamics, en metod för datorberäkningar av flöden.
FDS	Fire Dynamics Simulator, en CFD-modell utgiven av NIST anpassad för beräkningar av långsamma flöden till följd av brand.
HRRPUA	Heat Release Rate Per Unit Area, effektutveckling per areaenhet.
Mesh	Ett beräkningsnät i FDS innehållande en mängd beräkningsceller, eller kontrollvolym, där beräkningar genomförs.
NIST	National Institute of Standards and Technology, amerikansk myndighet som bland annat publicerar regler och forskning kring brandskydd.
Slice file	Ett verktyg för att visualisera egenskaper i Smokeview med tvärsnitt genom hela byggnaden i X-, Y- eller Z-led.
Smokeview	Program för att visualisera resultatet från simuleringar i FDS.
PPV	Positive Pressure Ventilator, övertrycksfläkt som används av räddningstjänsten.

# NOMENKLATUR

$\rho_a$	Luftens densitet [kg/m <sup>3</sup> ]
$c_p$	Luftens värmekapacitet [W/kgK]
$T_a$	Luftens temperatur [K]
$D$	Karakteriserad bränsledimension, till exempel diametern [m]
$g$	Gravitationskonstanten [m/s <sup>2</sup> ]
$Q$	Effektutveckling [kW]



# INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1.	Inledning.....	1
1.1	Bakgrund .....	1
1.2	Syfte & Mål .....	1
1.3	Frågeställning .....	2
1.4	Avgränsningar .....	2
2.	Metod .....	3
2.1	Intervjuer .....	3
2.2	Analys .....	4
3.	Teori .....	5
3.1	Fordonsbränder .....	5
3.2	Brandspridning i parkeringsgarage.....	6
3.3	Byggreglernas brandskyddsnivå för källargarage .....	7
3.4	Acceptanskriterier.....	7
3.5	Datorprogram.....	8
3.5.1	Computational Fluid Dynamics .....	8
3.5.2	Fire Dynamics Simulator .....	8
3.5.3	Pyrosim.....	8
4.	Räddningstjänst vid garagebränder .....	11
4.1	Insatsförlopp .....	11
4.2	Utrustning .....	11
4.3	Upplevda utmaningar vid räddningsinsatser i garage.....	12
5.	Brandsimulering .....	13
5.1	Brandegenskaper.....	13
5.1.1	Bränsle.....	13
5.1.2	Effektutvecklingskurva .....	14
5.1.3	Brandyta .....	16
5.2	Beräkningsdomän .....	17
5.3	Läckage.....	18
5.4	Geometri .....	19
5.5	Fläktar.....	20
5.6	Utdata.....	21
5.7	Scenarier – Räddningstjänsten.....	21
5.7.1	Scenario 1 – Naturlig brandgasventilation .....	22
5.7.2	Scenario 2 – Forcerad tilluft PPV .....	22

5.7.3	Scenario 3 – Forcerad tilluft högt flöde.....	22
5.7.4	Scenario 4 – Vattendimma i tilluft .....	22
5.7.5	Scenario 5 – Fördröjd ankomst/start på insats .....	23
5.8	Scenarier – Byggnadstekniska egenskaper.....	23
5.8.1	Scenario 6 – Högre takhöjd.....	23
5.8.2	Scenario 7 – Inga rökluckor .....	23
5.8.3	Scenario 8 – Dubbel brandgasventilationsarea .....	23
6.	Analys av simuleringsresultat .....	25
6.1	Allmänt om resultatet .....	25
6.2	Räddningstjänst .....	25
6.2.1	Påverkan av användning av fläkt (Scenario 1–4).....	26
6.2.2	Påverkan av insatstid (Scenario 5) .....	31
6.3	Byggnadsegenskaper .....	36
6.3.1	Påverkan av högre takhöjd (Scenario 6).....	36
6.3.2	Påverkan av olika mängd brandgasventilation (Scenario 7–8).....	40
7.	Känslighetsanalys.....	45
7.1	Mesh Sensitivity Study .....	45
7.2	Soot Yield.....	47
7.3	HRRPUA & brandkällans storlek.....	48
7.4	Visibility factor.....	49
8.	Diskussion .....	51
8.1	Räddningstjänst .....	51
8.2	Byggnadsegenskaper .....	52
8.3	Osäkerheter kopplat till indata.....	53
8.4	Modellosäkerheter .....	54
9.	Slutsats .....	55
10.	Framtida forskning .....	57
	Referenser.....	59
	Bilaga A.....	I
	Beräkning av tid till syrenivån påverkar brand .....	I
	Beräkning av massfraktion vatten i tilluft .....	I
	Bilaga B.....	III
	Indata till FDS-beräkningar.....	III

# 1. INLEDNING

## 1.1 Bakgrund

Stadsutvecklingen i Sverige har lett till förtätning av städer och förändrad markanvändning. Verksamheter som till exempel parkeringar och parkeringshus har blivit nerflyttade under mark för att ge plats åt grönområden och nya bostäder (Lönnermark, et al., 2015). Med de positiva effekter som garage under mark medför tillkommer dock risker och svårigheter vid brandbekämpning. Ventilering av brandgaser kan exempelvis göras genom fönster och dörrar i byggnader ovan mark, men för byggnader under mark krävs en helt annan form av ventilation.

Bilbränder är en vanlig insats som räddningstjänsterna i Sverige måste hantera. Årligen sker 3500–4000 bilbränder utomhus enligt MSB (2020). Den vanligaste orsaken som kunnat fastställas är anlagd brand på cirka 35 %, följt av fel i utrustning på cirka 21 %. Bränder där ingen orsak kunnat fastställas utgör däremot den största andelen på 39 %, vilket även kan innefatta anlagda bränder och bränder till följd av fel i utrustning.

Bränder i bilar är ett väl studerat område och flertalet experiment visar att effektutvecklingen ligger i spannet 1,5–8 MW, men sällan över 5 MW (Babrauskas, 2016). Materialet i bilar, exempelvis plast och gummi, producerar stora mängder sot vid förbränning vilket bidrar till svårigheter vid insatser i garage, till exempel dålig sikt. Bilbränder i garage under mark blir ytterligare mer komplicerade och svårhanterliga då öppningar till det fria ofta är färre, vilket resulterar i färre tillträdesvägar och att brandgaser ansamlas i högre grad.

Räddningstjänsten Syd åker frekvent på insatser vid brand i garage under mark. Med begränsade handlingsmöjligheter och svårigheter att initialt skapa sig en bild av var och vad som brinner försvåras möjligheterna till en effektiv släckinsats, vilket resulterar i mer omfattande skador. Tidigare hanterade Räddningstjänsten Syd sådana bränder väldigt offensivt och släckningsarbetet påbörjades tidigt. Efter ett tillbud där två rökdykare hamnade i nödläge förändrades dock strategin där och fokus har lagts på att bättre planera insatsen innan den påbörjas för att höja säkerheten för räddningstjänstens personal (H. Greif, personlig kommunikation, 2020-04-21). Sedan dess är uppfattningen att skadorna ofta blir mer omfattande, både antal bilar inblandade i branden och övriga totalskadade bilar, hypotetiskt på grund av längre tid innan släckningsarbetet påbörjas. Samtidigt återstår osäkerheter kring insatsernas utförande och hur de val som görs faktiskt påverkar brandförloppet och skadornas omfattning. Räddningstjänsten Syd har identifierat några troliga orsaker till de mer omfattande skadorna (H. Greif, personlig kommunikation, 2020-04-21):

- Materialet i moderna bilar innehåller mer brännbara ämnen
- De som anlägger bränder gör bränderna mer omfattande från början
- **Fördröjning under insats på grund av osäkerheter kring effekten av taktiska val**

Av dessa troliga orsaker kan de taktiska valens påverkan analyseras med beräkningsmodeller.

## 1.2 Syfte & Mål

Syftet med examensarbetet är att kartlägga möjliga taktiska val vid fordonsbränder i garage under mark i samråd med räddningstjänster i Sverige. Vidare syftar examensarbetet till att jämföra hur effekterna av dessa val påverkar förhållandena för räddningstjänstens personal vid insats i sådana byggnader.

Målet med arbetet är att genom CFD-beräkningar utvärdera effekten av olika taktiska val vid fordonsbrand i garage under mark och dra slutsatser vilka val som är att rekommendera utifrån beräkningarnas resultat.

### 1.3 Frågeställning

I detta avsnitt listas de frågeställningar som ska besvaras inom examensarbetets avgränsningar.

- Vilka taktiska val finns tillgängliga för räddningstjänsten under insats vid fordonsbrand i garage under mark?
- Hur påverkar dessa taktiska val sikt och temperatur i garaget, vilka är kritiska för räddningspersonalens säkerhet?
- Vilka taktiska val är lämpliga att använda under insats vid fordonsbrand i garage under mark?
- Hur påverkar åtgärder i projekteringsstadiet säkerheten under en insats i garage under mark och vilken effekt har brandgasventilation i enlighet med allmänt råd i BBR kap 5:732 på insatsen?

### 1.4 Avgränsningar

Ett flertal avgränsningar har gjorts för att begränsa och fokusera arbetets omfattning:

- Projektet är avgränsat till att främst undersöka bränder i fordon med drivmedel bensin och diesel. Trots att användningen av elbilar och bilar med alternativa drivmedel ökar visar statistik från Trafikanalys att 91% av alla registrerade personbilar i Sverige fortfarande drivs av bensin eller diesel (Trafikanalys, 2020).
- Garage utrustat med sprinkler undersöks inte då dessa generellt begränsar bränder och normalt inte installeras i mindre och medelstora garage.
- Endast en initial brandplacering undersöks, där en trolig värsta placeringen valts.
- Brandgasventilation i byggnaden är avgränsad till endast rökluckor, vilket är den vanligaste lösningen. Brandfläktar och andra former av brandgasventilation är inte undersökta.
- Projektet är avgränsat till att endast undersöka en storlek på garaget. Större och mindre garage har inte tagits hänsyn till i analysen.



## 2. METOD

Innan projektets start utformades ett måldokument med syfte, mål och bakgrund till projektet, samt en översiktlig plan över utförande. Därefter genomfördes arbetet i tre etapper; inläsning, intervjuer och analys.

Under inläsningen hämtades information från diverse forskningsrapporter kring de övergripande ämnena fordonsbränder och bränder i parkeringsgarage ovan och under mark. Bland annat användes sökmotorer och databaser som Google Scholar, Researchgate och Springer för att hitta lämplig information. BBR och äldre regelverk hämtades från Boverkets hemsida. Nedan redovisas några nyckelsökord användes vid sökning av information, enskilt och i olika kombination:

Tabell 1. Nyckelsökord vid sökning av information om bränder i bilar och i garage

Svenska ord	Engelska ord
Brand	Fire
Garage	Garage
Bilbrand	Car fire
Garage under mark	Underground garage
Parkeringshus	Parking structure
	FDS

Intervjuer hölls sedan med personer från några svenska räddningstjänster för att undersöka strategier kring bränder i garage under mark samt vilka svårigheter som finns i koppling till denna typ av bränder. Tillsammans med intervjuerna samlades även insatsrapporter och olycksutredningar in från de räddningstjänster som hade sådana tillgängliga.

Slutligen genomfördes en analys av brandförloppet och förhållandena i ett garage med hjälp av datorsimuleringar, där räddningstjänstens taktiska val, samt några byggnadstekniska parametrar, i olika scenarier undersöktes.

### 2.1 Intervjuer

För insamling av information kring insatser i garage under mark genomfördes intervjuer med personer från några av Sveriges räddningstjänster. De representerade räddningstjänsterna innefattade både större räddningsförbund och mindre, kommunala räddningstjänster. Alla personer som intervjuades hade ledningsposition inom operativ räddningstjänst och samtliga hade även personlig erfarenhet från insatser i garage under mark. Totalt genomfördes sex intervjuer med personer från nedanstående fem räddningstjänster och räddningsförbund.

Tabell 2. Intervjuade personer från svenska räddningstjänster

Informant A	Räddningstjänsten Syd
Informant B	Räddningstjänsten Storgöteborg
Informant C	
Informant D	Storstockholms Brandförsvaret
Informant E	Räddningstjänsten Östra Blekinge
Informant F	Uppsala Brandförsvaret

I kombination med intervjuerna samlades även insatsrapporter och olycksutredningar in från de intervjuade räddningstjänsterna, och utifrån dessa tre informationskällorna definierades indataparametrar till brandsimuleringar som motsvarar taktiska val vid insatser i undermarksgarage. I intervjuerna erhöles även de faktorer som ansågs vara mest kritiska för räddningspersonalens säkerhet.

Intervjuerna genomfördes på distans via internet med hjälp av konferensprogrammet Zoom. För att underlätta arbetet med sammanställning av informationen spelades intervjuerna in och transkriberades efteråt. Transkriptionerna finns tillgängliga vid förfrågan. Intervjuerna byggde på följande grundläggande frågor:

- Upplever ni som räddningstjänst att det är särskilt svårt med insatser i undermarksgarage?
- Har ni klara rutiner för ett insatsförlopp? Om ja, hur ser de ut?
- Skulle du kunna beskriva de strategier som du hade använt vid en brand i undermarksgarage?
- Vilka faktorer anser du vara mest kritiska för säkerheten under insatser?

Dessa frågor kompletterades sedan med utvecklande följdfrågor under varje intervju. Den sammanställda informationen från intervjuer, insatsrapporter och olycksutredningar användes för att definiera indataparametrar till datorsimuleringar motsvarande taktiska val, samt de faktorer som ansågs påverka räddningstjänstens personal mest.

## 2.2 Analys

Analysen genomfördes genom datorsimuleringar i programmet Fire Dynamics Simulator (FDS) version 6.7.4 utvecklat av amerikanska National Institute of Standards and Technology (NIST). FDS är en Computational Fluid Dynamics (CFD) modell anpassad för flödes hastigheter som kan förväntas vid brand och valdes då det är ett väl validerat verktyg vid brandtekniska analyser (McGrattan, et.al., 2020). Anledningen till att en CFD-modell valdes framför en tvåzonsmodell är bland annat dess möjlighet att hantera de variationer som uppstår i större utrymmen beroende på avståndet till branden. En två-zonsmodell delar in volymen i en varm (övre) och en kall (nedre) zon, och tar därmed inte hänsyn till dessa variationer.

Geometri och övriga indata byggdes upp och genererades i preprocessorprogrammet Pyrosim version 2020.4.0902 utvecklat av Thunderhead Engineering. Programmet utgör ett verktyg för att generera indata för simulering i FDS.

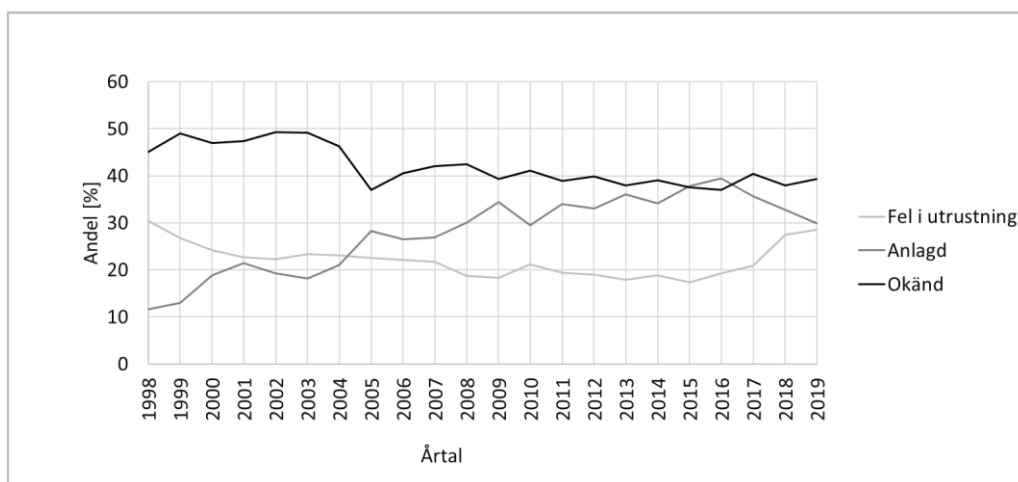
Resultatet av simuleringarna bearbetades i det medföljande postprocessprogrammet Smokeview version 6.7.5 utvecklat av NIST för visualisering av beräkningar av brandmodeller som FDS. Programmet är verifierat enligt *Smokeview Verification Guide* (Forney, 2020). Analys och efterbehandling av den numeriska utdata som genererades under simuleringarna gjordes i programmet Microsoft Excel 365. En okulär analys av slice files och brandgasspridning gjordes i Smokeview.

### 3. TEORI

I följande avsnitt sammanfattas inhämtad teori om bränder i personbilar och i garage, regler och acceptanskriterier, samt om datorprogram som använts för brandsimuleringar.

#### 3.1 Fordonsbränder

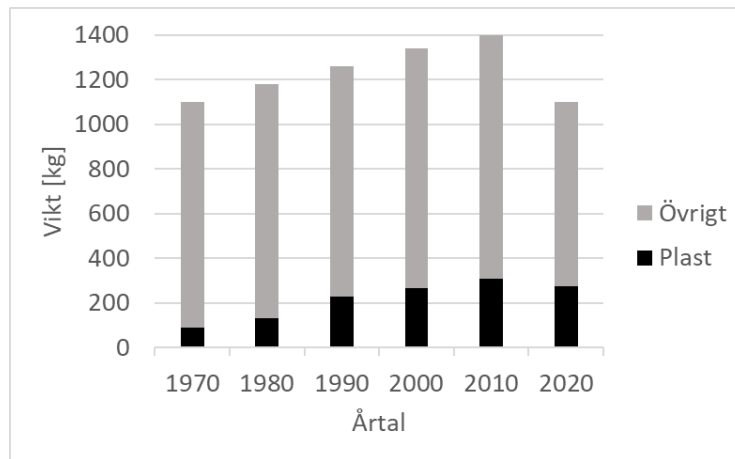
I Sverige inträffar cirka 3500–4000 bränder i personbilar årligen enligt statistik från Myndigheten för Samhällsskydd och Beredskap (2020). Andelen bränder vilka är orsakade av fel i utrustning, anlagda samt uppkommer av okänd anledning presenteras i Figur 1 nedan.



Figur 1. Orsak till bränder i personbilar mellan 1998–2019 i Sverige (Myndigheten för Samhällsskydd och Beredskap, 2020).

Som diagrammet visar har andelen anlagda bränder ökat sedan 1998 medan bränder till följd av fel på utrustning under perioden 1998–2015 minskat. Sedan 2017 har händelserapporteringen förändrats gradvis genom mer detaljerad rapportering. Detta innebär att statistik före och efter 2017 blir svår att jämföra. Den omvända trenden under 2017–2019 tyder med andra ord inte på ett minskat antal anlagda bränder och ökat antal bränder orsakade av fel i utrustning jämfört med tidigare period. Eftersom orsaken till bränder kan vara svår att fastställa kan en del av de okända anledningarna även vara anlagda eller på grund av fel i utrustningen.

Personbilar innehåller enligt Lönnermark & Blomqvist (2006) uppskattningsvis 150–200 kg brännbara material. Bland annat innefattar detta drivmedel, oljor, gummi, batterier och olika plaster (Hsu, et.al., 2017). Många av dessa material bidrar till ett snabbt brandförlopp med hög effektutveckling, och ger vid förbränning en kraftig rökutveckling. Enligt en studie av Emilsson, et.al. (2019) har andelen plast och gummi av totalvikten ökat från cirka 8 % i personbilar från 1970 till cirka 25 % i personbilar från 2020. Samtidigt är den genomsnittliga totalvikten av en personbil ungefär lika stor, 1100 kg. Detta ger en ökning från 88 kg till 275 kg plast, se Figur 2.



Figur 2. Andel plast av den totala genomsnittliga vikten för personbilar tillverkade olika årtionden (Emilsson, et.al., 2019).

De fem vanligaste plasterna i personbilar från 2020 är polypropen (44%), polyuretan (9%), polyamid/nylon 66 (8%), polyeten (7%) och ABS (5%) (Emilsson, et.al., 2019).

Material som plast och gummi ger generellt en kraftig sotproduktion vid förbränning och flera av de ovan nämnda bränslena bidrar även till en snabb brandspridning med hög effektutveckling. Exempelvis har en pölbrand med bensin en effektutveckling på cirka 3290 kW/m<sup>2</sup> (Karlsson & Quintere, 2000). Försök på enskilda personbilsdelar visar vidare bland annat att en vanlig tom bensintank av plast ger en effektutveckling på cirka 500 kW (Ohlemiller & Shields, 1998). Flera försök där fullskaliga brandtester av personbilar har även genomförts och en sammanställning av Babrauskas (2016) visar att effektutvecklingen varierar kraftigt, mellan 1,5–8 MW, men att den vanligtvis uppgår till maximalt 5 MW.

### 3.2 Brandspridning i parkeringsgarage

Fordon parkerade bredvid varandra i parkeringsgarage utgör en risk för brandspridning mellan flera bilar. I öppna parkeringsgarage, dvs där större delen av fasaderna utförs öppna, och således med god ventilation, sker brandspridning främst genom värmestrålning från den först antända bilen samt genom brinnande drivmedel som sprids in under närstående bilar (Haremza, et.al., 2013). Forskning visar även att bränder vanligtvis inte omfattar mer än tre bilar (Mohd Tohir & Spearpoint, 2013). Det finns dock bränder med större omfattning, exempelvis branden i Liverpool 2018 där över 1000 bilar totalförstördes (BBC News, 2018).

I slutna parkeringsgarage, till exempel under mark, är ventilationsmöjligheten mycket sämre. Brandgaser som produceras ansamlas i garaget och dåliga ventilationsförhållanden bidrar till ökad sotproduktion till följd av ofullständig förbränning (Hsu, et.al., 2017). Väggar, tak och golv i garage består ofta av betong som är ett väldigt tätt material och stänger in brandgaser. När varma brandgaser inte ventileras ut ökar temperaturen snabbt i garaget och kan nära brandkällan nå höga temperaturer på upp emot 1000°C (Hsu, et.al., 2017). Detta bidrar till en brandspridning genom att de varma brandgaserna avger strålning. Främst sker spridningen dock genom strålning från flammorna. Varma och täta brandgaser utgör även ett problem för räddningstjänsten och deras släckinsats eftersom dessa innebär en ökad påfrestning på rökdykarna.

Parkeringsgarage utförs ofta även med låg takhöjd för att minska schaktningsarbetet och volymen som behöver rökfyllas innan räddningstjänsten påverkas blir mindre. Flammor från de brinnande bilarna har då även lättare att nå taket och vidare bredas ut. Flamutbredning under taket ger kraftig strålning ner mot närstående bilar och kan bidra till en väldigt snabb spridning, exempelvis som vid en brand i undermarksgarage 1992 där över 100 bilar förstördes och som tros vara på grund av flamspridning under taket (Arvidson, et.al., 1997).

Brandspridning från den först antända bilen till närstående bilar varierar kraftigt från bara några få minuter till över 15 minuter (Schleich, et al., 1999), men genomsnittligt cirka 10–12 minuter. I den forskning som Schleich et al. (1999) hänvisar till sker den snabbaste spridningen då tanken på den första antända bilen smälter och läcker ut drivmedel som rinner in under de närstående bilarna, och kan då spridas redan efter några minuter. Vidare beror även spridning på avstånd till de närmsta bilarna och hur snabbt branden utvecklas i den första bilen.

### 3.3 Byggreglernas brandskyddsnivå för källargarage

Specifika byggnadsregler kring brandskydd för källare, och därmed även för garage under mark, definierades först i SBN 1967 (Sveriges Brandkonsultförening, 2018). Det angavs dock ingen storlek på nödvändig brandgasventilation förrän i SBN 75 där brandgasventilationen från garage skulle utformas med rökluckor om minst 1 m<sup>2</sup> och total area av rökluckorna skulle motsvara minst 0,5 % av den totala golvarean i garaget. Om garaget utfördes med sprinkler kunde brandgasventilationens totala area motsvara 0,1 % av golvytan istället. Kravet på 0,5 % av den totala golvytan gäller även idag vid en brandbelastning i utrymmet på högst 800 MJ/m<sup>2</sup> (BFS 2013:12 - BBRAD 3). Garageporten fick, enligt SBN 75, användas som den enda öppningen för brandgasventilation om avståndet i garaget inte översteg 40 meter från porten någonstans, vilket även gäller i dagens byggregler.

### 3.4 Acceptanskriterier

För att kunna bedöma hur väl en åtgärd påverkar arbetsmiljön i garaget krävs acceptanskriterier. Vid utrymningsdimensionering finns allmänna råd för vad en kritisk exponering för brand och brandgaser vid utrymning innebär (BFS 2013:12 - BBRAD 3). Exempelvis innefattas att sikten under utrymningsförloppet ska vara minst 10 m vid rörelse eller minst 5 m vid köande och temperaturen får inte överstiga 80 °C. Motsvarande kriterier för räddningstjänstens personal vid rökdykning finns ej i de allmänna råden men har tagits fram av Gradén & Liljedahl (2007). Tabell 3 presenterar acceptanskriterier med avseende på temperatur och sikt som är av intresse i detta arbete. Gradén & Liljedahl (2007) har även tagit fram kriterier för bland annat syrekonzentration och kolmonoxidkonzentration.

Tabell 3. Acceptanskriterier för säkerhet vid rökdykning

<b>Temperatur</b>	Max 200 °C, eller 300 °C vid kortare perioder
<b>Sikt</b>	Generellt minst 3 m. Kortare sträcka kan accepteras om det rör sig om en kortare tidsperiod.

## 3.5 Datorprogram

Följande avsnitt presenterar valt beräkningsprogram och tillhörande program för uppbyggnad av geometri samt hantering av resultatet.

### 3.5.1 Computational Fluid Dynamics

Computational Fluid Dynamics (CFD) är en metod för beräkning av flöden av vätskor och gaser, samt egenskaper som energi och massa, anpassad för datorbaserade beräkningar (Versteeg & Malalasekera, 2007). Modellen har många användningsområden, däribland inom sjöfartsindustri vid analys av hydrodynamik för fartyg, inom meteorologi för analys av väderförhållanden samt inom miljöteknik för att analysera spridning av föroreningar.

För att kunna lösa flödesproblem kräver CFD-modeller tre delar; förberedande processer, beräkningar och efterbehandling (Versteeg & Malalasekera, 2007). Förberedande processer syftar till att möjliggöra beräkningar som slutligen sammanställs och redovisas. De förberedande processer som krävs inkluderar bland annat att den geometri som ska analyseras definieras samt att beräkningsnät, så kallad mesh, byggs upp. En mesh delar in den definierade volymen i mindre kontrollvolym, eller celler, där beräkningar för olika kemiska och fysikaliska egenskaper görs (Versteeg & Malalasekera, 2007).

Den vanligaste metoden för beräkningar är med finita volymer där flera flödesvariabler, till exempel hastighet, beräknas för varje kontrollvolym (Versteeg & Malalasekera, 2007). Ekvationerna för flödesberäkningar görs främst med Navier-Stokes ekvationer som är väl anpassade för finita volymer.

### 3.5.2 Fire Dynamics Simulator

Fire Dynamics Simulator (FDS) är en CFD-modell utvecklad av National Institute of Standards and Technology (NIST). Programmet är anpassat för beräkningar av termiskt drivna långsamma flöden upp till 0,3 mach, med fokus på rök- och värmetransport, som skapas vid brand. Beräkningarna löses genom att geometrin delas in i beräkningsnät, så kallat mesh, som består av kubiska beräkningsceller, eller finita volymer. Numeriska lösningar av Navier-Stokes ekvationer görs i varje beräkningscell. Turbulens i FDS löses normalt med Large Eddy Simulation (LES) men kan även göras med Direct Numerical Simulation (DNS) om beräkningsnätet är tillräckligt fint (McGrattan, et.al., 2020; McGrattan, et.al., 2020). Programmet är validerat enligt *Fire Dynamics Simulator Validation Guide* (McGrattan, et.al., 2020) och verifierat enligt *Fire Dynamics Simulator Verification Guide* (McGrattan, Hostikka, Floyd, McDermott, & Vanella, 2020).

Resultatet från beräkningarna i FDS visualiseras i det grafiska programmet Smokeview utvecklat av NIST (Forney, Smokeview, A Tool for Visualizing Fire Dynamics Simulator Data Volume 1: User's Guide, 2020). Smokeview innehåller verktyg som tillåter att grafiskt visa bland annat rökspridning i simulerad volym, eller temperaturen på en specificerad höjd över golvet genom hela geometrin med mera.

### 3.5.3 Pyrosim

Pyrosim är ett program utvecklat av Thunderhead Engineering med verktyg kopplade till Fire Dynamics Simulator (Thunderhead Engineering, 2020). Programmet har ett grafiskt gränssnitt och syftar till att underlätta arbete med FDS därigenom. Vidare innehåller programmet ett flertal verktyg för att underlätta modellering av komplexa geometrier och ange den indata som FDS kräver för att kunna simulera ett brandförlopp. Dessa verktyg innefattar bland annat import av

CAD-filer för automatisk generering av en geometri samt 3D-modellering (Thunderhead Engineering, 2020). När samtliga indata är definierade kan simuleringen antingen köras direkt i programmet genom FDS eller exporteras till ett format som sedan kan köras separat i FDS. Pyrosim har ingen simuleringsfunktion i sig utan använder FDS för att genomföra simuleringar.

Utöver förarbetet och generering av FDS-vänliga indatafiler har Pyrosim verktyg för efterbehandling av simuleringsresultat, vilka innefattar motsvarande funktioner som Smokeview.





## 4. RÄDDNINGSTJÄNST VID GARAGEBRÄNDER

Följande avsnitt presenterar sammanställd information som samlats in under intervjuer, insatsrapporter och olycksutredningar.

### 4.1 Insatsförlopp

Ett insatsförlopp vid brand i garage under mark handlar initialt ofta inte om livräddning. Garage ska enligt lag utrustas med väl uppmärkta utrymningsvägar och är vanligtvis lätt överblickbara vilket underlättar utrymning. Det befinner sig dessutom ofta inte många personer samtidigt under längre stunder i garage. Därför prioriteras istället att skapa sig en bild över området. Trapphus kontrolleras för rökspridning och ventileras vid behov för att bostäder i anslutning till garaget inte ska påverkas. Vidare ger en översiktsbild även läget på eventuella alternativa angreppsvägar och rökluckor.

När det är säkerställt att rökspridning inte sker till trapphus och bostäder ska branden lokaliseras och släckas. Då bränder i fordon genererar stora mängder sot som ansamlas i garaget är sikten ofta näst intill obefintlig. Fläktar kan användas för att trycka in frisk luft via angreppsvägar och att rökluckor eller liknande öppnas för att släppa ut brandgaserna. På så sätt förbättras miljön för rökdykarna genom att sikten förbättras och arbetet kan effektiviseras. För att kunna orientera sig använder rökdykare ofta IR-kameror, men då garaget rökfylls snabbt och sotet i brandgaserna avger värmestrålning kan detta göra att kamerans skärm visar en helt vit bild. IR-kameror blir oanvändbara då detaljer som konturer av objekt som i vanliga fall visas inte går att utläsa. När branden väl är lokaliserad påbörjas släckningsarbetet med diverse släckutrustning och hjälpmedel. Vanligast är att man använder vatten, ibland med inblandning av skumvätska. Även pulver kan användas i vissa fall. Ibland används även skärsläckare för att kyla brandgaser.

### 4.2 Utrustning

Den standardutrustning som används vid de flesta bränder (larmställ, luftapparat och slang med strålrör) skiljer sig inte nämnvärt mellan räddningstjänsterna. Utöver detta används både specialmunstycken för släckning, till exempel förlängda munstycken eller dimspik, skärsläckare och fläktar. Tillgången på fläktar skiljer sig mellan räddningstjänsterna där större förbund kan ha tillgång till större specialfläktar, medan mindre förbund och räddningstjänster främst använder de standardfläktarna som finns i vanliga släckbilar.

Tabell 4 sammanfattar några av de fläktar som motsvarar kapaciteten hos de flesta räddningstjänsterna.

Tabell 4. Urval av fläktar som används av svenska räddningstjänster

Modell	Beskrivning	Kapacitet (m <sup>3</sup> /h)	Typ (El/bensin)
Swefan 24	Större standardfläkt som finns på många släckfordon.	31 000	Bensin
RF 500	Mindre fläkt som finns i många släckfordon.	8 900	El
Leader MT296	Specialfläkt avsedd för större volymer.	96 000	Bensin

### 4.3 Upplevda utmaningar vid räddningsinsatser i garage

Bränder i undermarksgarage medför många utmaningar för räddningstjänsten och kan innebära problem som försvårar och försenar insatsen. Ett stort problem är att sotproduktionen från branden gör att sikten i garaget ofta är nästan helt obefintlig. Räddningspersonalen har inte alltid koll på hur garaget ser ut inuti och utan sikt blir det väldigt svårt att orientera sig. Det blir också svårt att uppskatta hur långt in i garaget det brinner. För att förbättra arbetsmiljön och sikten för rökdykarna använder räddningstjänsten, om möjligt, den brandgasventilation (primärt rökluckor) som finns. Brandgasventilationen är dessutom, utöver räddningstjänstens insatsmöjligheter, viktig för att motverka rökspridning till eventuella trapphus som ansluter till bostäder. I äldre garage har det dock ofta byggts om och byggts nytt omkring garaget, vilket medför att den brandgasventilation som installerades när garaget byggdes inte alltid längre är brukbar. På en del ställen har rökluckor byggts igen eller låsts för ökad inbrottssäkerhet, och försvårar ventilering av garaget.

Utöver dålig sikt är parkeringsgarage ofta väldigt stora, vilket kan ge långa inträngningsvägar för rökdykarna. Garage skiljer sig också från andra typer av byggnader eftersom de saknar direkta riktmärken. Exempelvis har lägenheter en standardutformning där man först kommer in i hallen, som sedan ansluter till ett eller flera andra rum. Garage är istället helt öppna, vilket gör det svårt att navigera sig, speciellt utan att kunna se något. Det finns en del hjälpmedel för att få en bättre överblick över garagets layout från början, till exempel insatsplaner med översiktlig ritning som kan sitta innanför garageporten.

Något som trots ritning vid porten kan ställa till med problem är om parkeringsplatser är omgivna av gallerburar, bland annat för stöldsäkerhet. Dessa gallerburar brukar inte finnas markerade på ritningar och vanligtvis vet inte räddningstjänsten att de finns när de kommer till ett garage. Burarna ställer till med många problem, bland annat försvårar de framkomligheten vilket kan ge längre sträckor för rökdykarna att gå. Det är dessutom svårt att släcka en brand i en bil som står innanför gallret, där rökdykarna först måste ta sig in i buren, vilket innebär en högre risk för att personalen fastnar i buren tillsammans med den brinnande bilen.

En sista stor utmaning är det kraftiga brandförloppet som kan uppstå i garage. På grund av den instängda miljön stängs värme in och brandförloppet kan gå snabbt. Brand i bilar ger även en hög effektutveckling, speciellt när branden sprider sig till flera bilar. Temperaturen i garaget, och främst i närheten av branden, kan bli väldigt hög och försvårar rökdykarnas arbete. Vidare förväntas underventilering av branden inte uppstå under den första tiden på grund av den stora volymen.

## 5. BRANDSIMULERING

### 5.1 Brandegenskaper

I detta avsnitt presenteras de egenskaper hos branden som anges i indata till beräkningarna i FDS. En sammanfattning av samtliga indata redovisas i Bilaga B.

#### 5.1.1 Bränsle

Simulerade egenskaper som temperatur och sikt styrs till stor del av de bränslespecifika indata som definieras. Det är därför viktigt att ange representativa värden på dessa indataparametrar för att resultatet ska spegla verkligheten så bra som möjligt. Att representera exakta bränsleegenskaper för bilar är omöjligt då det finns en stor mängd olika brännbara material, som vidare varierar mellan modeller. Ett av materialen som finns i alla bilmodeller är plast, som vid brand ger hög rökproduktion, och kan därför anses representativt för det aktuella bränslet, där främst sotproduktionen påverkar det resultat som är av intresse. Övriga brännbara material innefattar bland annat drivmedel, som jämfört med plasterna nedan inte ger lika hög sotproduktion (Staffansson, 2010). Det förutsätts därmed att resultatet blir konservativt om drivmedel inte räknas med i bränslets egenskaper då sotproduktionen blir högre.

Personbilar tillverkade 2020 innehåller ca 275 kg plastmaterial (Emilsson, et.al., 2019), som består av en mängd olika sammansättningar med olika egenskaper, där de fem vanligaste typerna i bilar från 2016–2020 presenteras i Tabell 5 tillsammans med bränsleegenskaper intressanta för indata till FDS.

Tabell 5. De fem vanligaste plasterna i bilar från 2016–2020 med specifika brandegenskaper för respektive plast

Plast	Andel <sup>2</sup> [%]*	Sotproduktion <sup>3</sup>	CO- produktion <sup>3</sup>	$\Delta H_c^1$ [MJ/kg]	Atomantal
Polypropen (PP)	44	0,059	0,024	43,4	C: 3; H: 6 O: 0; N: 0
Polyuretan (PUR)	9	0,104–0,227 (0,166)**	0,010–0,051 (0,031)**	22–24 (23)**	C: 3; H: 8 O: 2; N: 1
Polyamid/ Nylon (PA)	8	0,075	0,038	29,58 <sup>4</sup>	C: 12; H: 20 O: 2; N: 2
Polyeten (PE)	7	0,060	0,024	43,6	C: 2; H: 4 O: 0; N: 0
ABS	5	0,105	-	34–40 (37)**	C: 15; H: 17 O: 0; N: 1

Källa: 1 (Tewarson, 2002); 2 (Emilsson, Dahllöf, & Ljunggren Söderman, 2019); 3 (Staffansson, 2010); 4 (Drysdale, 2011)

\*Återstående andelar plast från källan (27 %) inkluderar PBT/PET och övriga mindre kategorier.

\*\* Medelvärde av intervall anges inom parentes.

FDS använder en förenklad bränslemodell där endast ett bränsles egenskaper anges. En kombination av de ovan definierade plasterna beräknas med ekvation 1. Då summan av de angivna andelarna i tabellen endast blir 73 % har andelen för respektive plast i beräkningarna räknats om till andelen av de totala 73 %. Till exempel blir andelen polypropen i det sammansatta bränslet 60 % då 44 utgör cirka 60 % av 73. För de plaster vars egenskaper anges som intervall har medelvärden använts.

$$\sum (\text{Andel} * \text{Egenskap}) \quad (\text{Ekvation 1})$$

Tabell 6 presenterar de kombinerade värdena för produktion av sot och kolmonoxid samt förbränningsentalpin och antal atomer av respektive slag.

Tabell 6. Beräknade egenskaper för ett av de fem vanligaste plasterna kombinerat bränsle

<b>Sotproduktion</b>	0,08
<b>CO-produktion</b>	0,02
<b><math>\Delta H_c</math> [MJ/kg]</b>	38,95
<b>Atomantal</b>	C: 4,7; H: 8,3 O: 0,5; N: 0,4

### 5.1.2 Effektutvecklingskurva

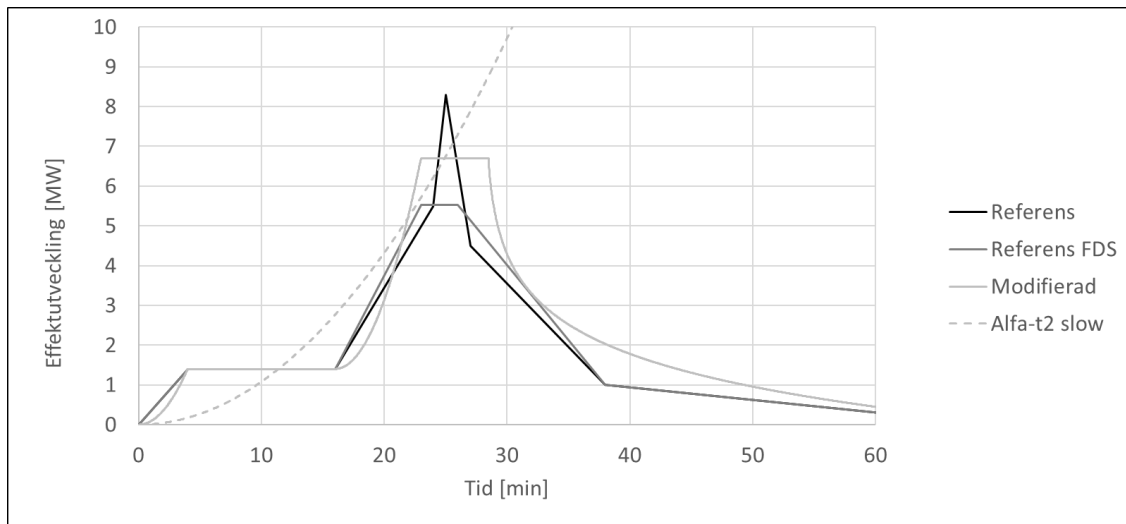
Ett flertal experiment med fullskalig brand i personbil har gjorts, varav ett urval har sammanställts av Li & Spearpoint (2007). Bland de sammanställda kurvorna visas en stor variation i utseende, vilket gör bland annat brandskyddsdimensionering svår att utföra. Därför har Schleich et.al. (1999) skapat en referenskurva baserat på experiment genomförda i slutet av 1990-talet. Referenskurvan finns också med i sammanställningen och motsvarar ungefärligt det utseende som de flesta experimentellt framtagna kurvorna har.

Den maximala effektutvecklingen för både referenskurvan och det fullskaliga försöket som kurvan utgår från är 8,3 MW och uppnås 25 minuter efter antändning, vilket kan jämföras med en  $\alpha^2$ -kurva med långsam tillväxt, dvs  $\alpha$ -värde på 0,003 (Karlsson & Quintere, 2000). Då FDS inte kunde hantera en sådan spetsig topp i effektutvecklingen skapade Schleich et.al. (1999) en anpassad effektutvecklingskurva som istället når 5,5 MW och hålls konstant under några minuter. För dessa kurvor frigörs totalt cirka 6,7 GJ energi, men då det fullskaliga försöket genomfördes med en bil tillverkad på 1990-talet bör energimängden räknas om för att representera nyare bilar. Då plast utgör en stor del av det brännbara materialet antas vikten kunna användas för att beräkna en ny energimängd motsvarande den ökade vikten plast i bilar från 2020. Andelen plast i nytillverkade bilar har sedan 1990-talet ökat från i genomsnitt 18 % till 25 % i bilar från 2020 (Emilsson, et.al., 2019). Den genomsnittliga totalvikten av personbilar har sedan 1990-talet minskat från 1260 kg till 1100 kg. Mängden plast har därmed i genomsnitt ökat från cirka 227 kg till 275 kg. En omräkningsfaktor för att beräkna frigjord energi och maximal effektutveckling tas fram med ekvation 2.

$$f = \frac{m_{2020}}{m_{1990}} = \frac{275}{227} = 1,21 \quad (\text{Ekvation 2})$$

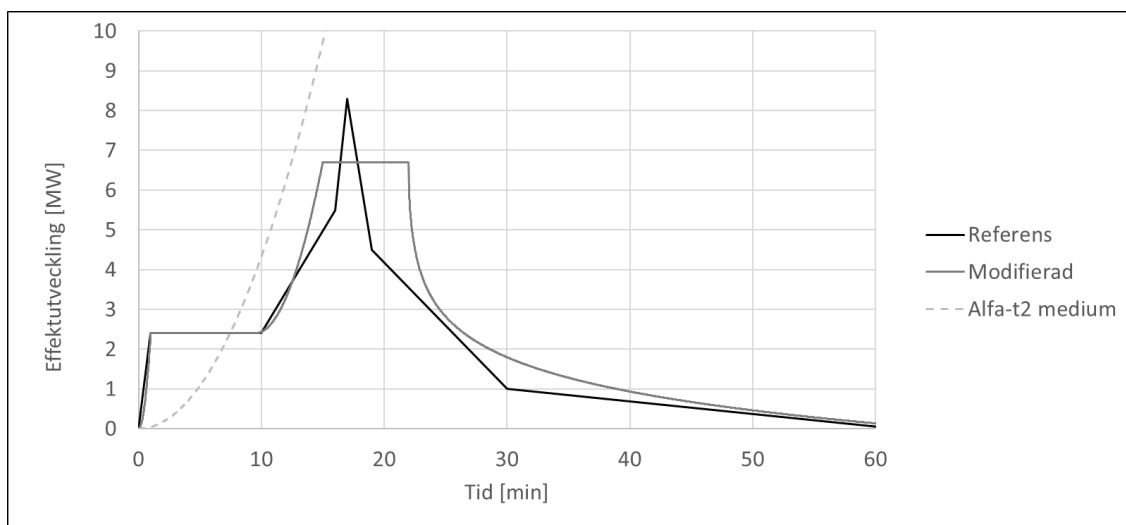
Genom att multiplicera energimängd och maximal effektutveckling i den FDS-anpassade kurvan för bilar från 1990-talet med omräkningsfaktorn 1,21 kan således värden för bilar tillverkade 2020 uppskattas. Den beräknade energimängden blir då cirka 8,1 GJ och den maximala effektutvecklingen blir cirka 6,7 MW. Utöver en ny maximal effektutveckling har effektutvecklingskurvan modifierats för att ge en energimängd på 8,1 GJ genom att bland annat utöka tidsintervallet där effektutvecklingen är maximal. Referenskurvan visas tillsammans med

den FDS-anpassade kurvan och den modifierade kurvan för nyare bilar samt en  $\alpha^2$ -kurva med långsam tillväxt i Figur 3.



Figur 3. Brandkurvor för den initialt antända bilen.

Spridning till bilar parkerade i närheten av den initialt antända bilen sker främst genom strålning, vilket kommer påverka hur brandförloppet i de bilar branden sprids till ser ut. Effektutvecklingskurvan i Figur 3 representerar den initialt antända bilen där det inte finns någon yttre brand som påverkar brandförloppet. Schleich et.al. (1999) har även skapat en spridningsanpassad kurva för de bilar som utsätts för strålning från den initialt brinnande bilen. I den anpassade kurvan är den initiala tillväxten betydligt snabbare och tiden tills branden når maximal effektutveckling är också kortare. Kurvan antas representativ och har modifierats likt den för den initialt antända bilen för att representera bilar från 2020. Figur 4 presenterar kurvan av Schleich et.al. (1999) tillsammans med den modifierade kurvan för bilar från 2020 och en  $\alpha^2$ -kurva med medelsnabb tillväxt, dvs  $\alpha$ -värde på 0,012 (Karlsson & Quintere, 2000).



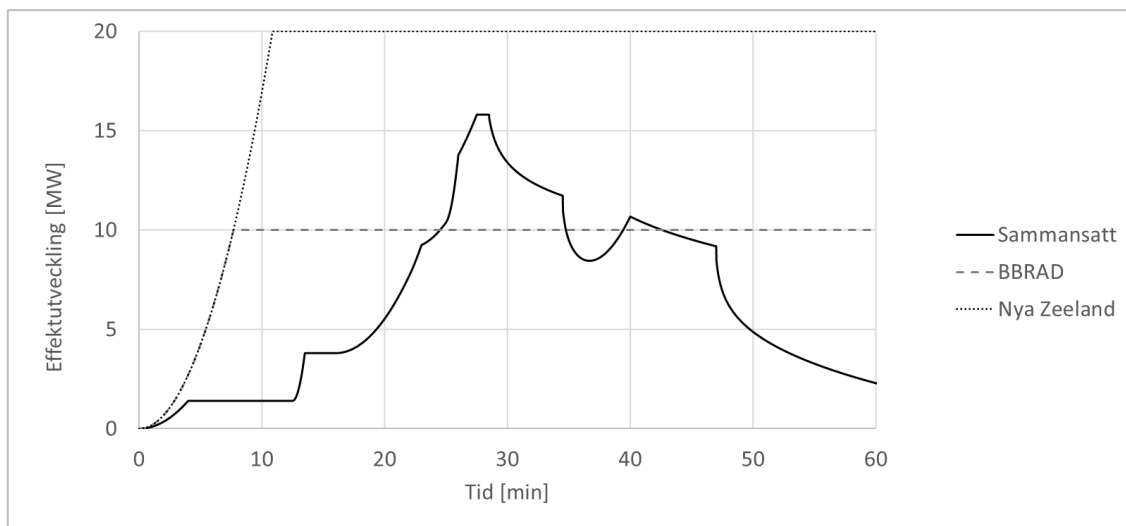
Figur 4. Brandkurvor för brand i en bil som exponeras av en eller flera redan brinnande bilar.

Schleich et.al. (1999) uppskattar utifrån flera olika forskningstillfällen där brandspridning mellan bilar studerats, att spridning i genomsnitt sker med 12,5 minuters intervaller. Detta innebär att vid bränder med flera bilar antänds den andra bilen 12,5 minuter och den tredje bilen

25 minuter efter den första. En fjärde bil skulle antändas 37,5 minuter efter den första som vid den tidpunkten redan avtagit till mindre än hälften av den maximala effektutvecklingen.

Vidare presenterar Mohd Tohir & Spearpoint (2013) statistik från Nya Zeeland där endast 2,2% av de totalt 401 bränderna involverade fler än 3 personbilar. Därav har tre bilar ansetts motsvara ett normalt värsta troligt fall, där spridning till andra bilen sker 12,5 minuter efter den första bilen antänds och till den tredje efter 25 minuter.

Vid projektering enligt analytisk dimensionering används i Sverige BBRAD 3 (BFS 2013:12 - BBRAD 3) där effektutvecklingen i det värsta definierade scenariot, avsett för samlingslokal eller motsvarande, följer en snabb tillväxt upp till maximalt 10 MW. Det finns inget definierat specifikt för garage i BBRAD, men i den nyzeeländska motsvarigheten anges en dimensionerande effektutveckling på maximalt 20 MW (Ministry of Business, Innovation & Employment, 2014). De två effektutvecklingskurvorna för analytisk dimensionering enligt de olika regelverken presenteras tillsammans med en sammansatt kurva för tre bilar i Figur 5.



Figur 5. Effektutvecklingskurvor enligt svenska respektive nyzeeländska riktlinjer samt sammansatt kurva för tre bilar.

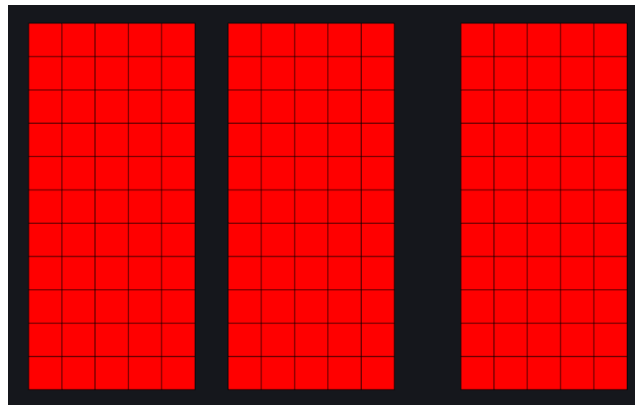
Jämförs den totala frigjorda energin i de tre kurvorna uppgår den sammansatta kurvan för tre bilar till totalt cirka 23 GJ under de första 60 minuterna, medan kurvan enligt BBRAD uppgår till cirka 33 GJ och kurvan enligt nyzeeländska riktlinjer uppgår till cirka 75 GJ. Detta visar att redan med 10 MW ger de svenska riktlinjerna konservativt resultat jämfört med en brand begränsad till tre bilar.

### 5.1.3 Brandyta

I FDS definieras branden över en yta, antingen direkt på ett objekt eller genom en så kallad *vent*. Brandytan anges som brännare (burner) där effektutvecklingen per areaenhet (*HRRPUA*) styr den maximala brandeffekten som branden uppnår. Vidare styrs det simulerade värdet på *HRRPUA* av hur den horisontella brandspridningen över brandytan modelleras. Om ingen spridning modelleras utgår FDS från att hela brandytan antänds direkt, vilket främst under tillväxt underskattar värdet på *HRRPUA* då en låg effektutveckling över en stor yta ger ett lågt värde på *HRRPUA*.

Den horisontella brandspridningen kan lösas på olika sätt, bland annat genom att ange en spread rate, ett värde för vilken hastighet branden ska spridas över brandytan. För effektutvecklingskurvor med fler än en tillväxtperiod är däremot *RAMP*-funktionen mer lämplig. Genom att dela in brandytan i mindre delar och sedan ange individuella *RAMP*-funktioner för respektive del kan spridningen styras och även ge ett rimligt värde på HRRPUA genom hela simuleringen.

I de genomförda simuleringarna delades varje brandyta in i 55 rutor där varje ruta fick en egen *RAMP*-funktion för att möjliggöra horisontell brandspridning över brandytan, se Figur 6. Brandspridningen modellerades sedan genom att varje ruta startade med en fraktion  $F=0$  HRRPUA som sedan ökas vid specifika tidssteg för att följa brandens totala effektutvecklingskurva. Den första bilen antändes vid simuleringens start. Bil nummer två och tre aktiverades 12,5 respektive 25 minuter efter att den första bilen antänds och modellerades sedan på samma sätt för att följa respektive effektutvecklingskurva.



Figur 6. Brandytorna indelade 55 rutor per bil.

Enligt nyzeeländska byggregler (Ministry of Business, Innovation & Employment, 2014) rekommenderas en effektutveckling mellan 500–1000 kW/m<sup>2</sup> vid branddimensionering i parkeringsgarage. Den angivna effektutvecklingen per areaenhet utgick från medelvärdet 750 kW/m<sup>2</sup> och anpassades för att passa brandmeshens dimensioner. Det angivna värdet var 761,36 kW/m<sup>2</sup> vilket ligger inom det rekommenderade intervallet.

## 5.2 Beräkningsdomän

CFD-modellens funktionalitet bygger på både fysiska och kemiska egenskaper samt att domänens gräns och indata definieras korrekt. Detta innefattar bland annat brandkällans area, som beror på effektutvecklingen, där lyftkraft relativt moment måste tas hänsyn till. Förhållande beskrivs med den dimensionslösa effektutvecklingen  $Q^*$  och ges av (Ekvation 3 (Cox & Kumar, 2002)).

$$Q^* = \frac{Q}{\rho_a c_a T_a D^2 \sqrt{gD}} \quad (\text{Ekvation 3})$$

Värdet på  $Q^*$  karakteriserar brandens utseende, där väldigt höga värden anger en hög effektutveckling i relation till brandkällans yta, medan väldigt lågt värde anger en låg effektutveckling i relation till ytan (McGrattan & Miles, 2016). Enligt Cox & Kumar (2002) måste värdet på  $Q^*$  för brandplymer drivna av lyftkraft vara mindre än 2,5. Värden över 2,5 drivs istället av momentkrafter och därmed bildar jetflammar.

Utöver den dimensionslösa effektutvecklingen påverkar beräkningscellernas storlek precisionen i beräkningarna. Denna beskrivs med förhållandet  $D^*/\delta x$  där  $D^*$  är brandkällans karakteristiska diameter, se (Ekvation 4, och  $\delta x$  är sidan på beräkningscellerna (McGrattan, et.al., 2020). Ju högre värde kvoten har desto bättre upplösning har beräkningarna, vilket innebär att en större del av den turbulenta energin kan simuleras istället för att modelleras. Detta värde bör vara minst 5–10, men rekommenderas i en del fall vara 15–20 (Nystedt & Frantzich, 2011).

$$D^* = \left( \frac{\dot{Q}}{\varphi_\infty C_p T_\infty \sqrt{g}} \right)^{2/5} \quad (\text{Ekvation 4})$$

Beroende på vad som är av intresse att undersöka i en simulering varierar behovet av mesh-upplösning. Därför bör en känslighetsstudie av upplösningen, så kallad mesh sensitivity study, genomföras för att bestämma en tillräckligt fin mesh (McGrattan, et.al., 2020). Efter genomförd känslighetsstudie, se avsnitt 7.1, uppfyller en cellstorlek på 0,2 m tillräckligt fin upplösning för de aktuella simuleringarna. Med brandkällans karakteristiska diameter på 2,056 ger kvoten  $D^*/\delta x$  ett värde på 10,281. Beräkningsdomänen är indelad i åtta mesher med samma cellstorlek i samtliga mesher.

Vid beräkningar av tryck använder FDS undermodellen *Fast Fourier Transforms*. Denna modell är mest effektiv om antalet celler i y- och z-led kan divideras med låga primtal (McGrattan, et.al., 2020). Även om det generellt inte påverkar beräkningstiden avsevärt följer samtliga definierade mesher i de genomförda simuleringarna ändå rekommendationen. Vidare är samtliga celler kubiska, vilket rekommenderas i FDS User Guide (McGrattan, et.al., 2020). Mesherna presenteras tillsammans med övriga indata i Bilaga B.

### 5.3 Läckage

Läckage och mindre öppningar finns i verkligheten i alla byggnader förutom i speciella fall. I FDS måste detta anges för att inte riskera orimliga tryckförändringar som leder till numerisk instabilitet. Detta görs genom att definiera meshgränser i domängränsen som öppna (McGrattan, et.al., 2020). Vidare tillåter öppna meshgränser partiklar och energi att passera i båda riktningar, och låter egenskaper som atmosfärstryck och omgivningstemperatur verka. Utöver meshgränsen krävs även öppningar i slutna utrymmen modellerade inom meshen, exempelvis ett undermarksgarage. Sådana läckage kan utföras på olika sätt, bland annat genom hål i väggar, tak eller golv, eller genom programmets inbyggda ventilationsmodell HVAC (McGrattan, et.al., 2020). Även om betong, som ofta används i garage, generellt är tätt och inte bidrar med tryckavlastning sluter exempelvis dörrar och garageport vanligtvis inte helt tätt. Vidare utrustas garage med ventilation för att inte fyllas med avgaser från bilar, som bidrar med tryckavlastning. I de aktuella simuleringarna har hål gjorts i väggarna med respektive dörrs bredd och en höjd om 0,2 m (en cellhöjd).

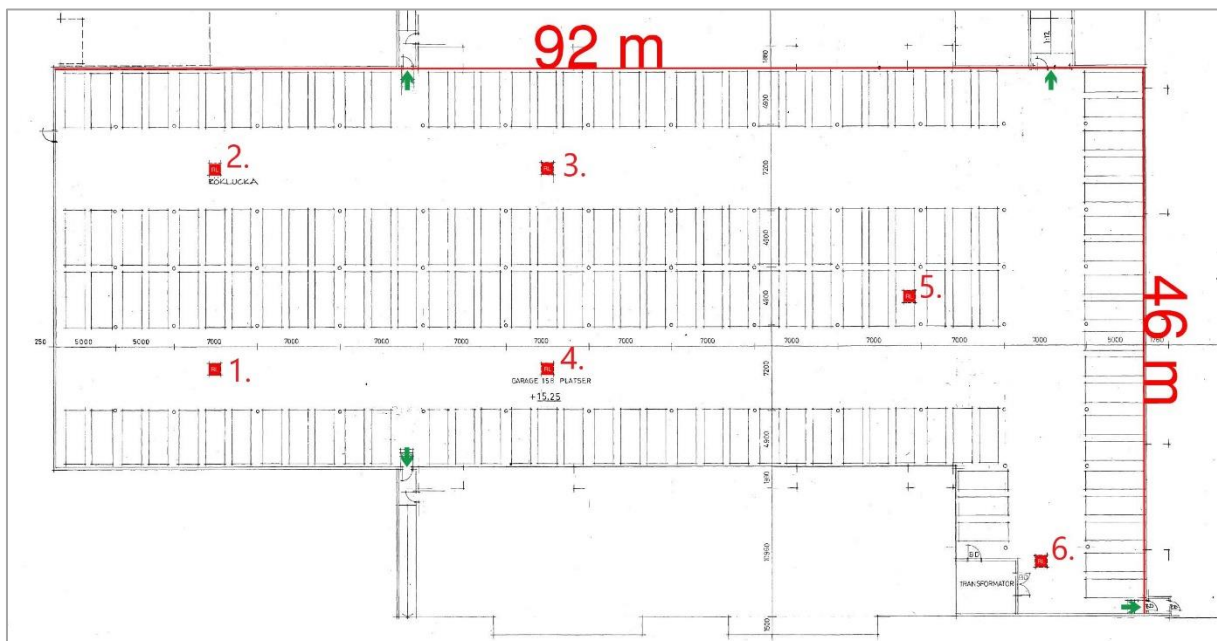


Med avseende på syrenivån i garaget har handberäkning gjorts, se Bilaga A, för att bedöma om simuleringar kan genomföras helt utan läckage. Beräkningarna visar att den tillgängliga syremängden i garaget är tillräcklig för det aktuella brandförloppet under cirka 31 minuter utan att understiga koncentrationer som kan påverka branden. Vidare mättes även syrekoncentrationen i simuleringarna med horisontella slice files och visade att koncentrationen generellt inte understeg 15 %. Ytterligare öppningar för syreinsläpp är därmed inte nödvändiga.

## 5.4 Geometri

Simuleringarna i detta projekt utgår från ett verkligt garage byggt under 1960-talet. Garaget har en total area på 3375 m<sup>2</sup> och takhöjd på 2,4 m motsvarande minimumkravet för garage större än 50 m<sup>2</sup> (BFS 2013:12 - BBRAD 3). Garaget är utfört med två dörrar samt en garageport som leder direkt till det fria. Utöver dessa finns även en dörr som via brandsluss leder in i källaren på ett bostadshus. I samtliga simuleringar hålls dörrarna stängda. Garageporten som antas utgöra räddningstjänstens angreppsväg öppnas vid tidpunkten då räddningstjänsten antas ankomma. Dörrar och garageport utförs med tryckavlastande öppningar motsvarande dörrrens/portens bredd och en höjd om 0,2 m.

Brandgasventilation utgörs av sex manuellt öppningsbara rökluckor på 1,92 m<sup>2</sup> samt garageporten på 6 m<sup>2</sup>. Detta motsvarar totalt 17,52 m<sup>2</sup>, d.v.s. lite över 0,5 % av den totala golvarean, vilket uppfyller kravet på brandgasventilation enligt både SBN 75 och BBR 29, se avsnitt 3.3. Figur 7 visar en översiktlig bild av garaget där rökluckor är markerade med symbol för röklucka och dörrar samt garageport är markerade med gröna pilar.



Figur 7. Översiktlig bild över garaget med rökluckor (röd prick), dörrar och garageport (grön pil) samt mått på garaget.

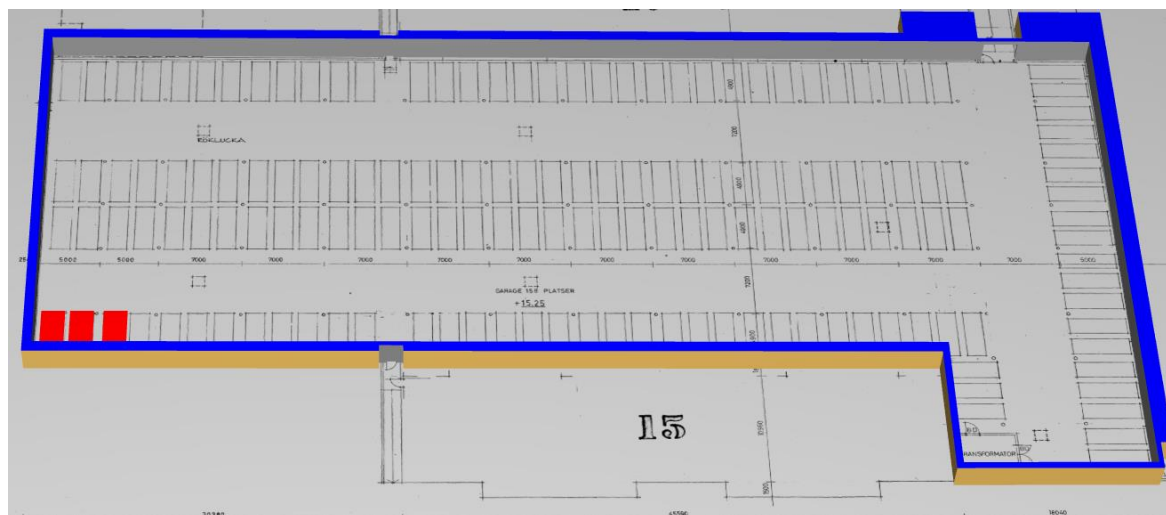
Väggar, tak och golv antas bestå av betong med termiska egenskaper enligt Tabell 7 nedan. Materialet i rökluckor, dörrar och garageport antas inte påverka beräkningarna då de utgör en väldigt liten del av garagets totala ytskiktsarea, och har därför inte definierats i simuleringarna. För de data som anges med intervall har ett genomsnittligt värde använts och anges inom parentes.

Tabell 7. Termiska data för betong (Karlsson & Quintere, 2000)

Värmeledningsförmåga, $k$ [W/mK]	0,8–1,4 (1,1)*
Värmekapacitet, $c$ [J/kgK]	880
Densitet, $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	1900–2300 (2100)*

\* Genomsnittligt värde anges inom parentes.

Figur 8 visar den simulerade geometrin samt placeringen av bränderna. I figuren är taket borttaget.



Figur 8. Simulerad geometri med brandens placering.

## 5.5 Fläktar

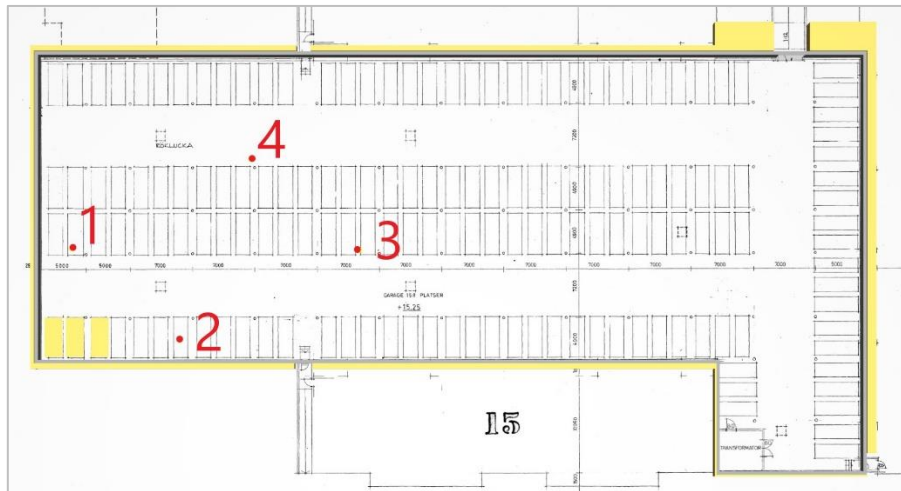
Modellering av fläkt och ventilationssystem kan ske på olika sätt i FDS, där det enklaste sättet är att definiera en vent med flödes hastighet. Genomförda experiment där övertrycksfläktar med motsvarande kapacitet som svenska räddningstjänsten använder visar det sig att trots en initial lufthastighet på cirka 30 m/s avtar den snabbt med avståndet från fläkten. Lufthastigheten på ett avstånd av cirka 3 m har reducerats till 3–5 m/s. Vidare ger fläktar ett konformat luftflöde med en spridningsvinkel på 20° (Kumm & Ingason, 2014; Kerber, 2006).

I FDS har en vent med en area på 3,64 m<sup>2</sup> använts för att motsvara en fläkt, där flödet och lufthastigheten stämmer överens med de genomförda experimenten av Kumm & Ingason (2014) och Kerber (2006). För att kunna återskapa en sådan spridning helt krävs en finare mesh än vad som använts, även om det simulerade flödet fått en viss spridning. Resultatet förutsätts däremot inte påverkas nämnvärt då både luftflöde och hastighet motsvarar experimentellt framtagna värden, och hela garageportens öppning täcks in i luftflödet.

Vidare modellerades inblandning av vattendimma genom att ange en massfraktion för water vapor av den totala massan luft som tillförs. Massfraktionen beräknades till 0,088 utifrån ett vattenflöde på cirka 60 l/min (Coldcut Systems, 2020), se Bilaga A. Vattendimma, eller water vapor, finns fördefinierat i FDS med korrekt termiska data, däribland förångningstemperatur och förångningsvärme. Samtliga indata som definierats i FDS redovisas i Bilaga B.

## 5.6 Utdata

Vid rökdykning förutsätts rökdykare navigera sig med hjälp av väggar, och i detta fall även parkerade bilar, i utrymmen med dålig sikt. Fyra mätpunkter för temperatur respektive sikt är placerade där rökdykare kan tänkas befinna sig under kortare och längre tidsperioder under insats, se Figur 9. Mät punkt 1 och 2 är placerade 8 m i x- och y-led från närmaste brinnande bil. I dessa punkter antas rökdykare kunna påbörja släckinsats och utgör därför en punkt där de kan befinna sig under längre tid. Mät punkt 3 och 4 är placerade längs vägbanan intill parkeringsplatser ytterligare 20 m bort i x-led och 10 m i y-led, där rökdykare kan tänkas förflytta sig mot branden.



Figur 9. Placering av mätpunkter (röd prick) för temperatur och sikt i garaget i relation till brandens placering.

Samtliga mätpunkter är placerade 1,5 m över golvet. Garaget innebär långa inträngningsvägar och temperaturen förutsätts vara relativt låg i den största delen av garaget. Därmed antas rökdykare inte krypa utan endast huka sig något, och 1,5 m kan därför antas representera ögonhöjd. Utöver mätpunkterna visualiseras sikt, temperatur och gasernas flödes hastighet med horisontella slice files på en höjd av 1,5 m genom hela garaget. Även vertikala slice files användes i mindre omfattning för att komplettera resultatet.

Vid beräkning av sikt kräver FDS att ett värde på konstanten visibility factor anges. Försök där personer fick bedöma sikten i ett rökfyllt utrymme genom en glasruta resulterade i att ett värde på 3 ungefär motsvarar sikten mot en reflekterande och ett värde på 8 motsvarar sikt mot en lysande skylt (Mulholland, 2002). I de genomförda simuleringarna ansätts ett värde på 3, vilket också är standard i FDS, då detta generellt är det lägsta värdet som används. Vidare innefattar FDS beräkningar av sikt större osäkerheter vilka diskuteras i avsnitt 8.4.

## 5.7 Scenarier – Räddningstjänsten

Detta avsnitt behandlar parametrar som påverkas direkt av räddningstjänstens agerande vid insats, vilket innefattar ankomsttid och vilken utrustning som används. Samtliga simuleringar utgår från tidigare definierad geometri. Resultat presenteras i avsnitt 6.

### 5.7.1 Scenario 1 – Naturlig brandgasventilation

Scenario 1 utgör ett utgångsläge för variabler som i de kommande scenarierna varierar. Brandgasventilationen utgörs av sex rökluckor samt garageporten med en total area motsvarande 0,5 % av golvets area. Räddningstjänstens insatstid är 10 minuter och vid ankomst öppnas all brandgasventilation direkt.

Följande parametrar användes:

- Brandgasventilation: Garageport om 6 m<sup>2</sup> samt 6 rökluckor om 1,92 m<sup>2</sup> vardera
- Räddningstjänstens insatstid: 10 minuter

### 5.7.2 Scenario 2 – Forcerad tilluft PPV

I scenario 2 undersöks användningen av fläkt vid tilluftsöppningen. Räddningstjänsten använder en PPV-fläkt placerad i garageportens öppning och startas samtidigt som brandgasventilationen öppnas. Frånluft utgörs av rökluckor i motsvarande storlek och mängd som i scenario 1. Se avsnitt 5.5 för mer information om hur fläktarna definierades i simuleringarna.

Följande parametrar användes:

- Brandgasventilation: Tilluft i garageporten kompletteras med övertrycksfläkt
- Fläktens kapacitet: 31 000 m<sup>3</sup>/h (8,61 m<sup>3</sup>/s)

### 5.7.3 Scenario 3 – Forcerad tilluft högt flöde

I scenario 3 undersöks användning av större fläkt vid tilluftsöppningen. Räddningstjänsten använder en fläkt avsedd för ventilering av stora anläggningar placerad i garageportens öppning, och startas samtidigt som brandgasventilationen öppnas. Fläkten definieras i FDS på samma sätt som i scenario 2, men med ett högre luftflöde. Frånluft utgörs av rökluckor i motsvarande storlek och mängd som i scenario 1.

Följande parametrar används:

- Brandgasventilation: Tilluft i garageporten kompletteras med övertrycksfläkt
- Fläktens kapacitet: 96 000 m<sup>3</sup>/h (26,67 m<sup>3</sup>/s)

### 5.7.4 Scenario 4 – Vattendimma i tilluft

I scenario 4 undersöks användning av PPV fläkt i kombination med vattendimma från skärsläckare. Räddningstjänsten använder en PPV-fläkt placerad i garageportens öppning och startas samtidigt som brandgasventilationen öppnas. Fläkten definieras i FDS på samma sätt som i scenario 2, men med inblandning av vattendimma.

Följande parametrar används:

- Brandgasventilation: Tilluft i garageporten kompletteras med övertrycksfläkt
- Fläktens kapacitet: 31 000 m<sup>3</sup>/h (8,61 m<sup>3</sup>/s)
- Vattendimma med flöde på 60 l/min från skärsläckare blandas med tilluft

### 5.7.5 Scenario 5 – Fördröjd ankomst/start på insats

Tiden från att branden startar tills räddningstjänsten ankommit och påbörjat insats varierar, och beror till stor del på tiden till branden uppmärksammas och räddningstjänsten larmas. Alla garage har inte automatiskt brandlarm och för att räddningstjänsten då ska larmas krävs att en person uppmärksammar att det brinner, till exempel på grund av röklukt, och därefter larmar räddningstjänsten. Detta scenario undersöker vilken effekt en fördröjning på 30 minuter har på förhållandena som räddningspersonalen under inledande insats utsätts för.

Följande parametrar används:

- Räddningstjänstens insattid: 30 minuter

## 5.8 Scenarier – Byggnadstekniska egenskaper

Detta avsnitt behandlar parametrar som inte kan påverkas direkt av räddningstjänsten under insats, bland annat takhöjd och mängden tillgänglig brandgasventilation. Räddningstjänst påbörjar insats 10 minuter efter antändning av första bilen.

### 5.8.1 Scenario 6 – Högre takhöjd

I scenario 6 undersöks påverkan av högre takhöjd. I grundscenariot är takhöjden 2,4 m vilket ökas till 3,0 m i detta scenario. Brandgasventilationen öppnas vid räddningstjänstens ankomst och utgör samma mängd och storlek som i scenario 1.

### 5.8.2 Scenario 7 – Inga rökluckor

I scenario 7 utgörs brandgasventilationen endast av garageporten. Vid intervjuerna framkom att det vid flera tillfällen saknats rökluckor och liknande brandgasventilation av olika anledningar. I detta scenario undersöks påverkan då brandgasventilation inte finns, dock med en garageport på 6 m<sup>2</sup> då garageporten inte går att ta bort av förklarliga orsaker.

### 5.8.3 Scenario 8 – Dubbel brandgasventilationsarea

I scenario 8 undersöks en större area brandgasventilation än vad byggreglerna kräver. Brandgasarean som undersöks motsvarar 1 % av garagets golvarea, totalt cirka 33,75 m<sup>2</sup>. Anledningen är för att undersöka om en större mängd brandgasventilation ger betydande förbättringar vid insats. Normalt bör till- och frånluftsöppningarnas storlek ha ett förhållande på 1:1, och helst 2:1 (Svensson, 2020), där tilluftsöppningarna är lika stora eller större än frånluftsöppningarna. Vid användning av övertrycksfläkt i tilluftsöppningarna är det dock tvärtom rekommenderat att frånluftsöppningarna är större än tilluftsöppningarna. I garage under mark kan det vara svårt att få till öppningar för tilluft. I detta scenario undersöks därför en större area på rökluckorna, medan tilluften endast består av garageporten som hålls konstant.

- Brandgasventilation:
  - 1 garageport á 6 m<sup>2</sup>
  - 3 rökluckor á 4,4 m<sup>2</sup>
  - 3 rökluckor á 4,84 m<sup>2</sup>



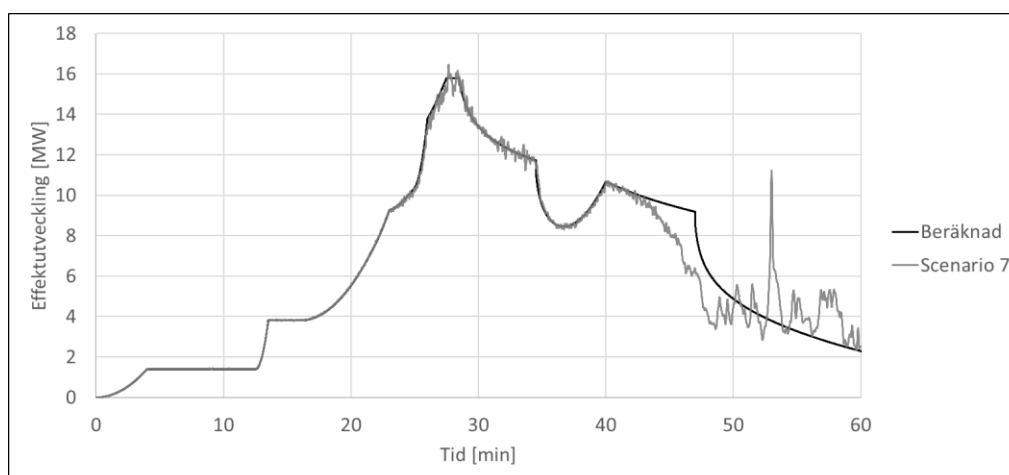
## 6. ANALYS AV SIMULERINGRESULTAT

Resultatet från simuleringarna analyseras i följande avsnitt. Det första avsnittet är kopplat till räddningstjänstens insats där räddningstjänstens insatstid samt användning av fläkt med och utan tillsats av vattendimma undersöks. Det andra avsnittet är kopplat till byggnadens egenskaper som inte kan påverkas under insats utan som måste behandlas tidigare, exempelvis i projektering av nybyggnation eller ändringar i en befintlig byggnad.

### 6.1 Allmänt om resultatet

Samtliga kurvor för temperatur och sikt är filtrerade där varje punkt utgör fem punkters glidande medelvärde. Detta eftersom temperaturen kan variera kraftigt mellan närliggande tidpunkter vilket gör kurvorna väldigt svårästa när rådata från FDS används.

Effektutvecklingen följer den beräknade kurvan i alla scenarier utom scenario 7 där brandgasventilationen endast består av garageport. Figur 10 presenterar beräknad effektutvecklingskurva samt den simulerade i scenario 7. Branden blir underventilerad efter cirka 42 minuter vilket resulterar i antändning av oförbrända brandgaser där syre kommer in. Topparna efter cirka 48 minuter representerar dessa spökflammar, vilka i verkligheten inte hade funnits då temperaturen i dessa punkter är för låg för att antända brandgaserna.



Figur 10. Angiven effektutvecklingskurva för brandförloppet i simuleringarna samt den simulerade i scenario 7.

### 6.2 Räddningstjänst

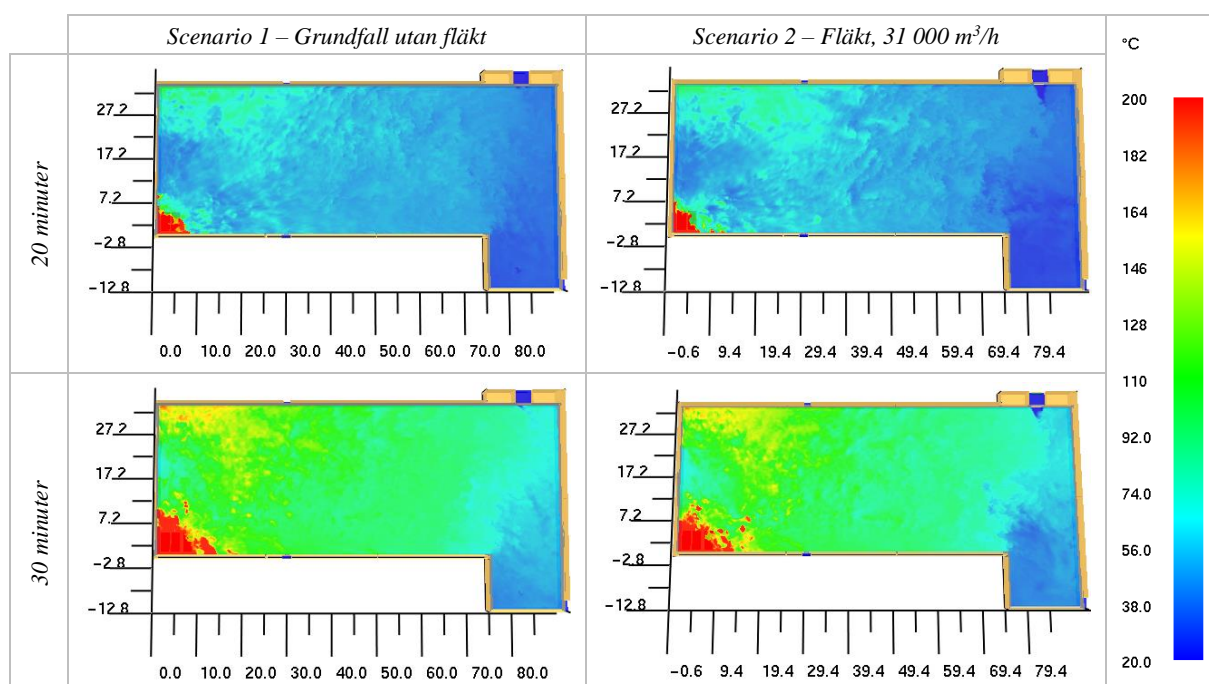
I följande avsnitt analyseras resultatet från simuleringarna kopplat till räddningstjänstens insatstid samt val att använda fläkt. Tabell 8 presenterar maximalt uppmätt temperatur i scenario 1–5 i varje mätpunkt. Uppmätt temperatur visar att acceptanskriteriet med avseende på temperatur uppfylls i alla scenarier, vilket betyder att temperaturen generellt inte utgör en större risk för räddningspersonalens säkerhet i garaget i något av de undersökta scenarierna.

Tabell 8. Maximal uppmätt temperatur i respektive mätpunkt i scenario 1–5

	Beskrivning	Mät punkt 1 [°C]	Mät punkt 2 [°C]	Mät punkt 3 [°C]	Mät punkt 4 [°C]
<b>Scenario 1</b>	Grundfall	166	179	109	132
<b>Scenario 2</b>	Mindre fläkt	135	181	113	142
<b>Scenario 3</b>	Större fläkt	124	171	101	118
<b>Scenario 4</b>	Fläkt med vattendimma	138	202	109	143
<b>Scenario 5</b>	Längre insatstid	197	188	113	145

### 6.2.1 Påverkan av användning av fläkt (Scenario 1–4)

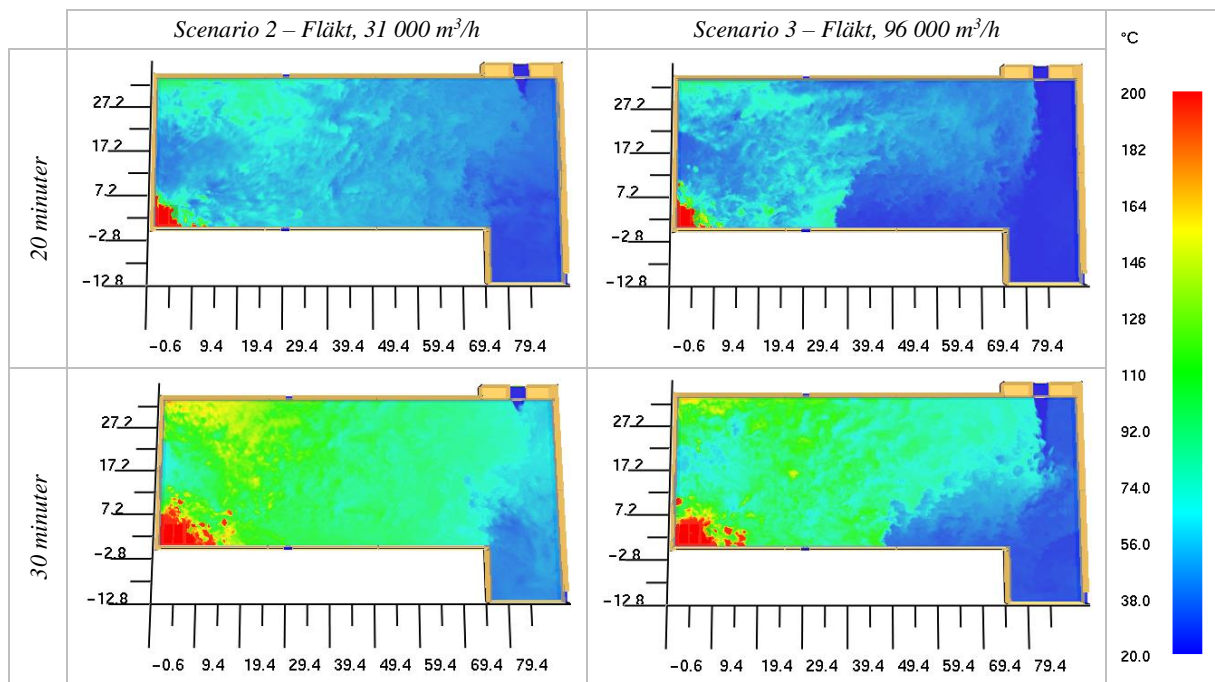
Figur 11 presenterar horisontella slice files med temperatur på höjden 1,5 m över golvet 20 respektive 30 minuter efter simuleringens start, eller 10 respektive 20 minuter efter att brandgasventilationen öppnats och fläkten startats. I figurerna visar streckade markeringar dimensionerna på garaget, där origo ligger i det nedre vänstra hörnet.



Figur 11. Temperatur på höjden 1,5 m över golv i scenario 1–2 vid två tidpunkter.

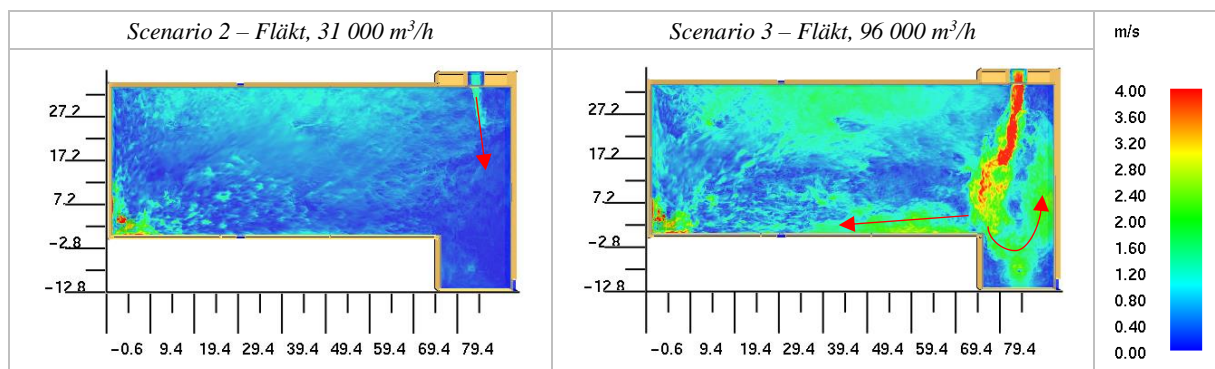
Generellt ger fläkten ingen påverkan i garaget, förutom rakt innanför garageporten. Detta beror på att brandgaserna har transporterats långt och kylts längs vägen, dvs temperaturskillnaden mellan brandgaserna och tilluften inte är så stor. 30 minuter efter simuleringens start har branden växt och temperaturen har ökat avsevärt i hela garaget. Skillnaden mellan scenario 1 och 2 är dock fortfarande väldigt liten, och koncentrerad nära garageporten. Detta beror på att luftflödet inte är tillräckligt stort för att pressa in tillräckligt mycket luft för att brandgaserna ska hinna kylas. Detta kan jämföras med scenario 3, se Figur 12, där en fläkt med högre flöde simulerats.





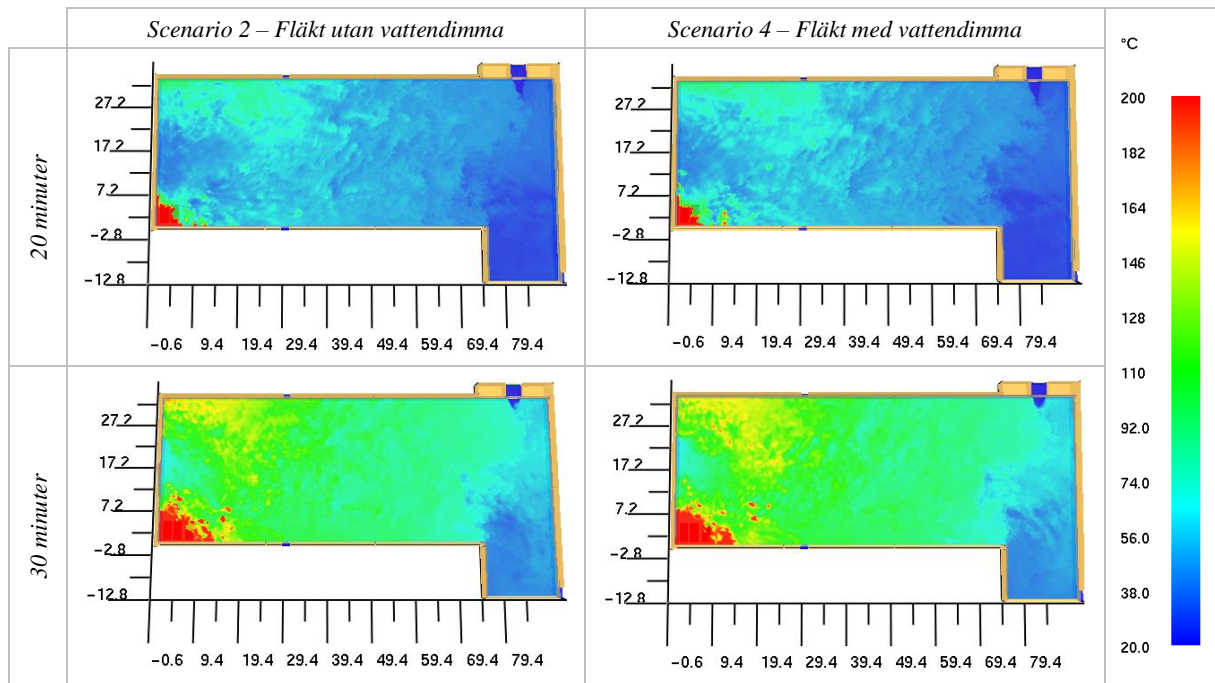
Figur 12. Temperatur på höjden 1,5 m över golv i scenario 2-3 vid två tidpunkter.

Luftflödet i scenario 3 är betydligt högre och når hela vägen till den bakre väggen i garaget. Där vänder luftflödet och transporteras tillbaka längs den högra väggen i bilderna, se Figur 13. Återflödet skapar en virvel som styr luftflödet från fläkten inåt i garaget. Detta innebär att luftflödet styrs så att det når hörnet på väggen och delas i två riktningar, en inåt i garaget och en som vänder och ger ett fortsatt återflöde. Orsaken till den stora temperaturförändringen inne i garaget är alltså att luftflödet från fläkten ändrar riktning och flödar in längs den nedre väggen i bilderna.



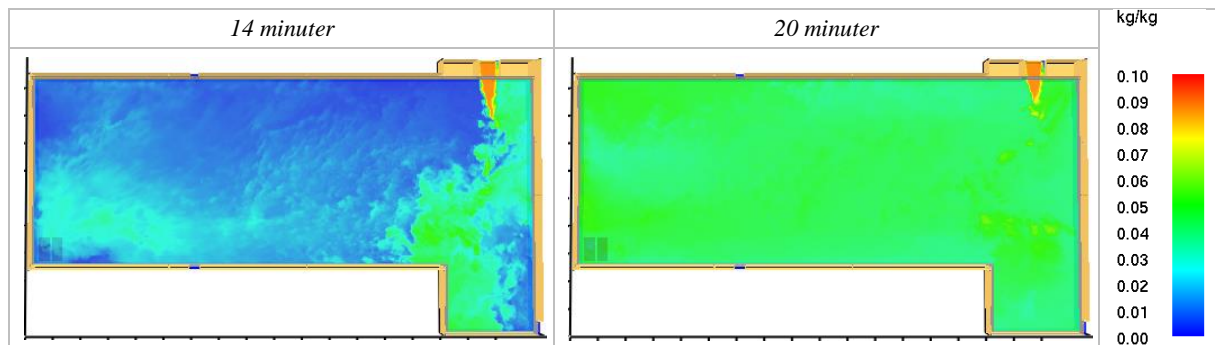
Figur 13. Lufthastighet i scenario 2 och 3 vid 14 minuter.

Figur 14 presenterar temperaturen på höjden 1,5 m i scenario 2 och 4 vid tiden 20 respektive 30 minuter. Bilderna visar ingen temperaturskillnad vid inblandning av vattendimma.



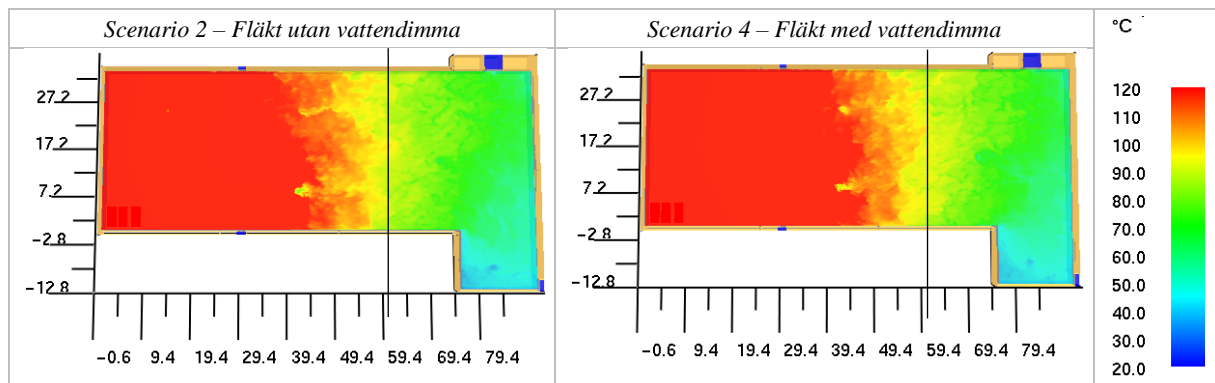
Figur 14. Temperatur på höjden 1,5 m ovan golv vid olika tidpunkter i scenario 2 och 4.

Detta trots att vattendimman från tilluften sprids i hela garaget, se Figur 15. Troligen beror det på att vattnet långsamt värms upp under transport och blandas med brandgaserna, och därmed inte medför någon avsevärd kylningseffekt.



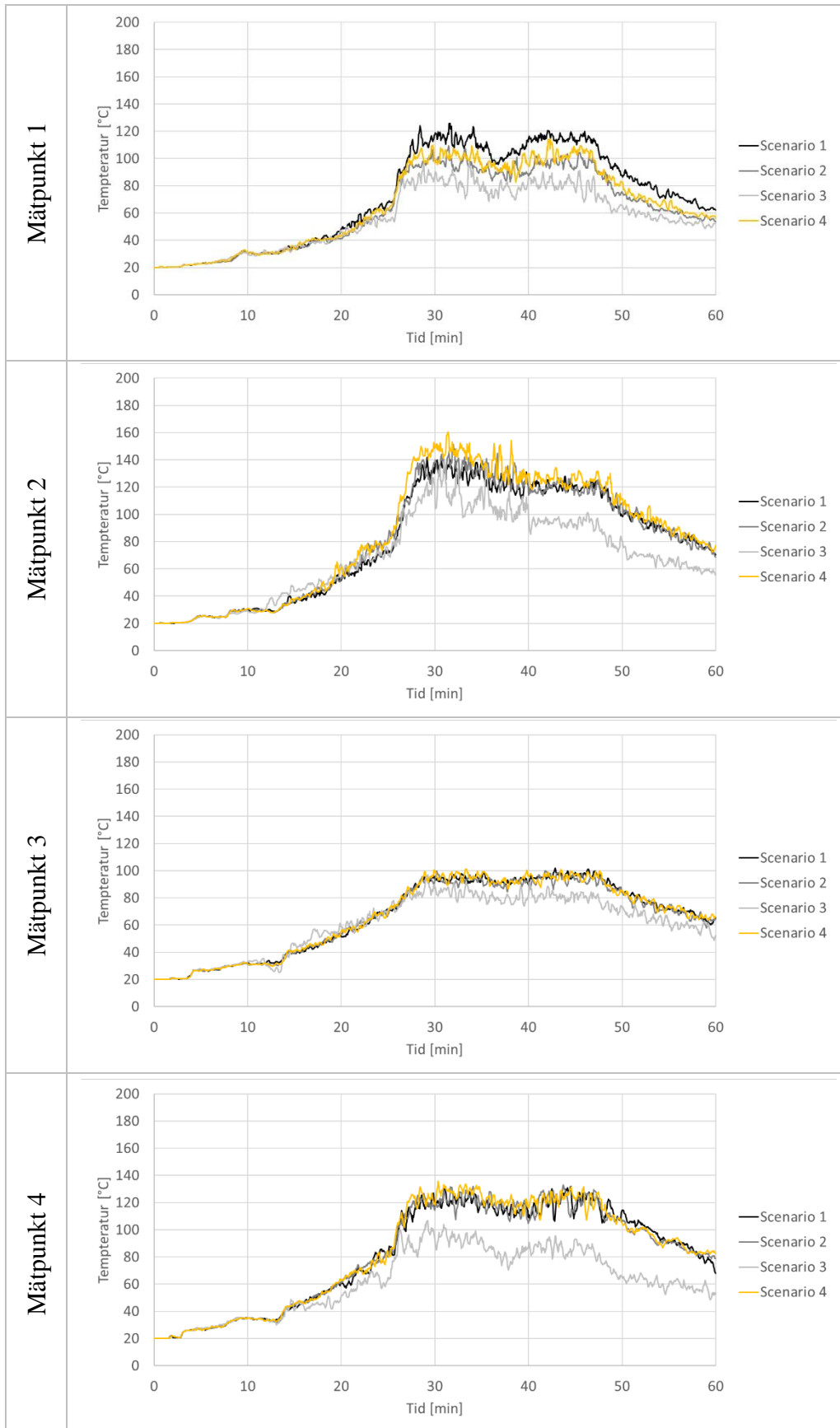
Figur 15. Massprocent tillförd vattenånga i luften.

Figur 16 att temperaturen understiger 100 °C i en rak linje genom hela garaget och att det inte skiljer sig avsevärt mellan scenario 2 och 4. Detta beror troligtvis på att vattnets kyleffekt är effektivare vid snabb förångning, vilket främst sker när det värms upp till över 100 °C, även om det även vid lägre temperatur förångas för att höja den relativa luftfuktigheten.



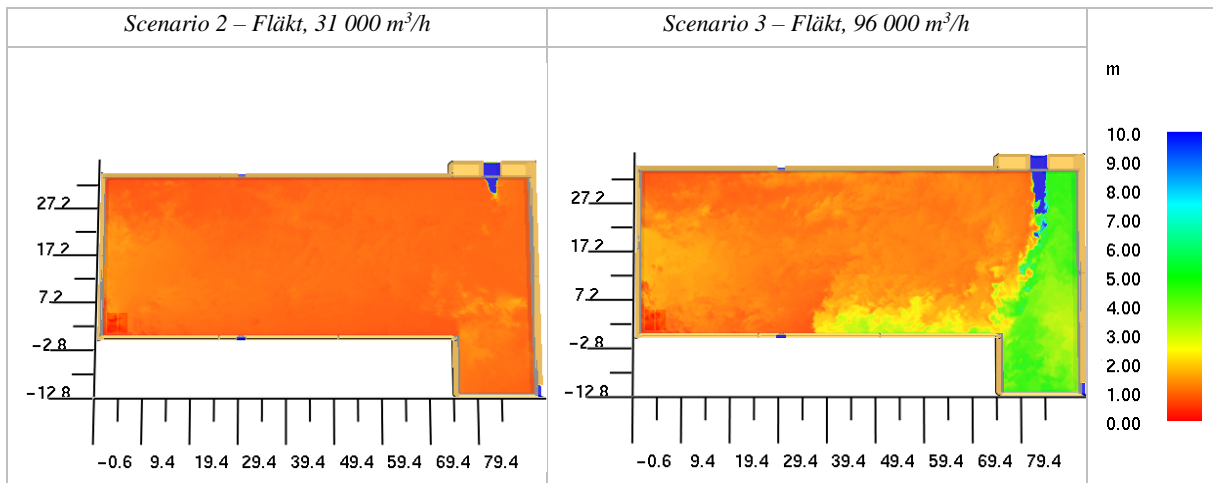
Figur 16. Temperatur på höjden 2,1 m ovan golvet vid tiden 30 minuter.

Även uppmätt temperatur i mätpunkterna visar på en viss kyleffekt vid användning av fläktar, se Figur 17.



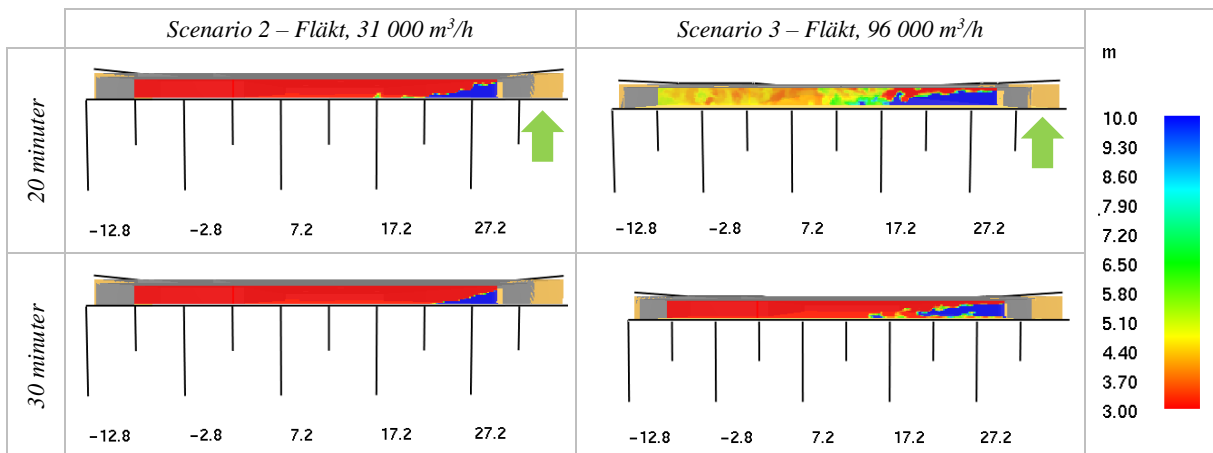
Figur 17. Temperatur i respektive mätpunkt för scenario 1–4.

Hur mycket sikten påverkas beror på hur stort luftflöde fläkten ger, och påverkas dessutom främst direkt innanför garageportens öppning, se Figur 18.



Figur 18. Sikt på höjden 1,5 m ovan golvet.

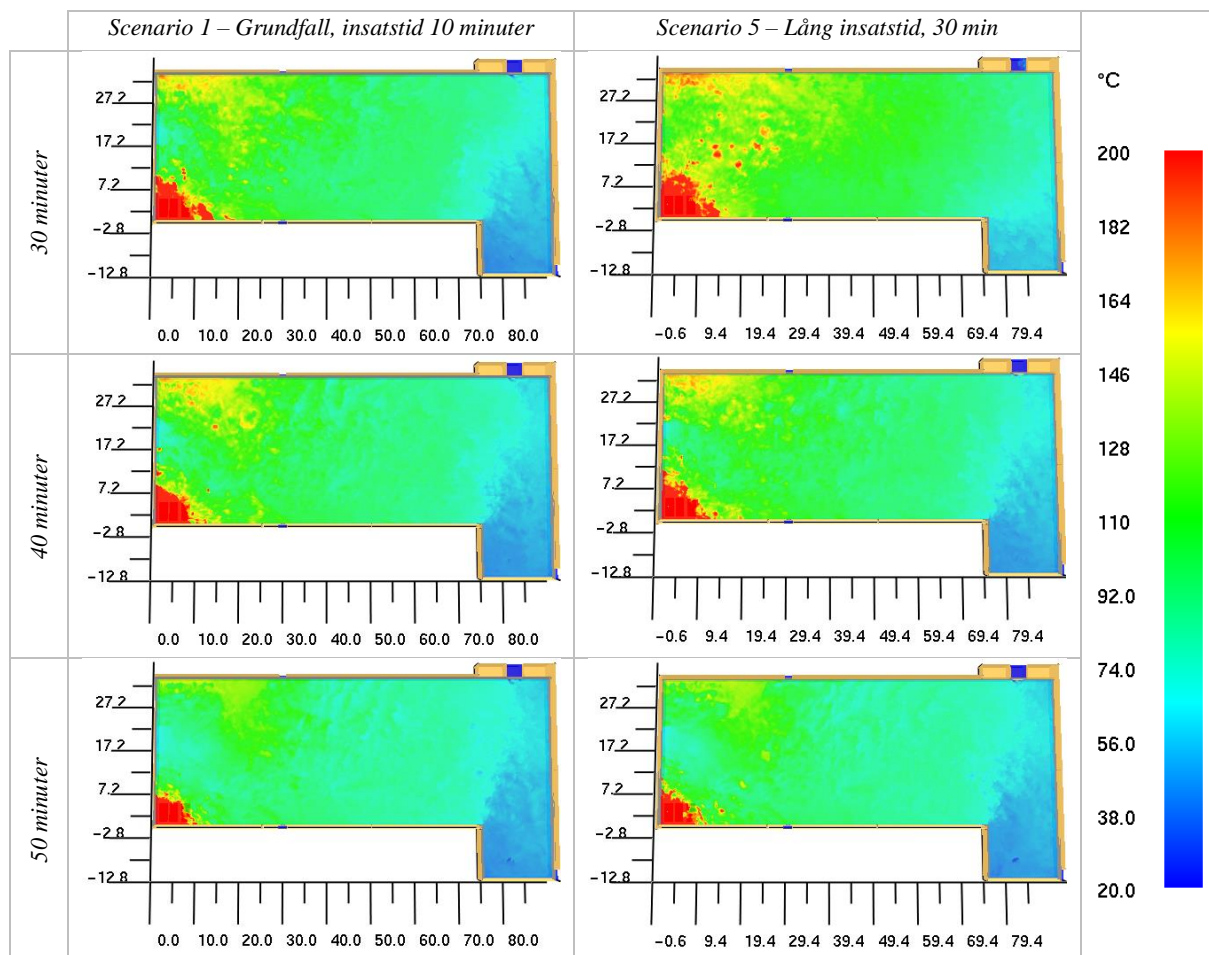
Vidare visar Figur 19 en vertikal slice file placerad i mitten av porten hur luftflödet skapar ett kilformat flöde som pressar upp brandgaserna mot taket innanför garageporten. Detta förbättrar sikten en bit in i garaget, dock endast cirka 10 m i scenario 2. I scenario 3 är sikten något bättre hela vägen till den motsatta väggen efter 20 minuter, men minskar även där när branden får växa lite till.



Figur 19. Sikt sett från sidan med markering för garageporten.

## 6.2.2 Påverkan av insatstid (Scenario 5)

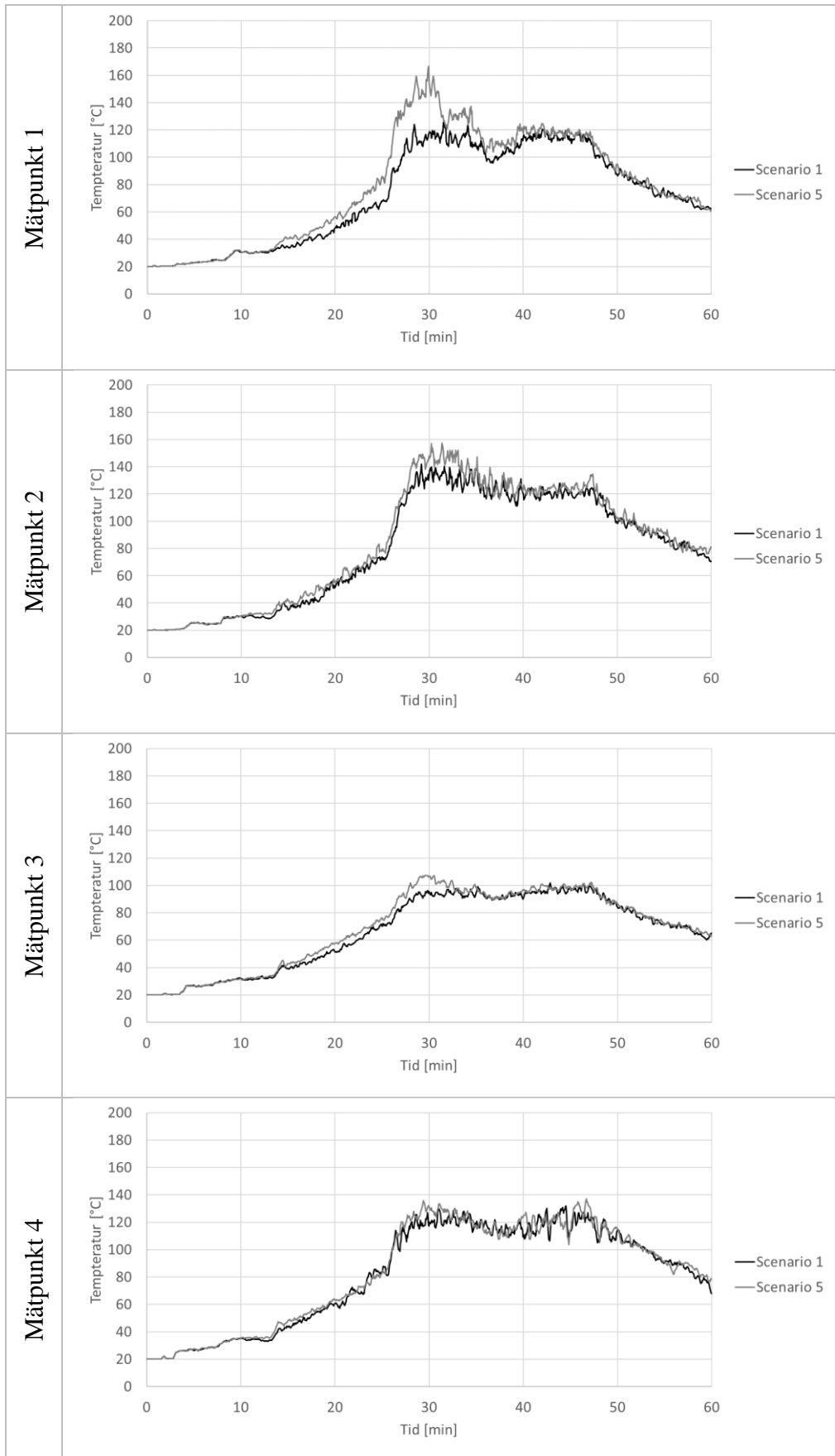
Figur 20 presenterar tvärsnittsytor med temperatur på en höjd av 1,5 m ovan golvet vid 30, 40 och 50 minuter i scenario 1 respektive 5. I figurerna visar streckade markeringar dimensionerna på garaget, där origo ligger i det nedre vänstra hörnet.



Figur 20. Tvärsnitt med temperatur i scenario 1 och 5 vid tre tidpunkter.

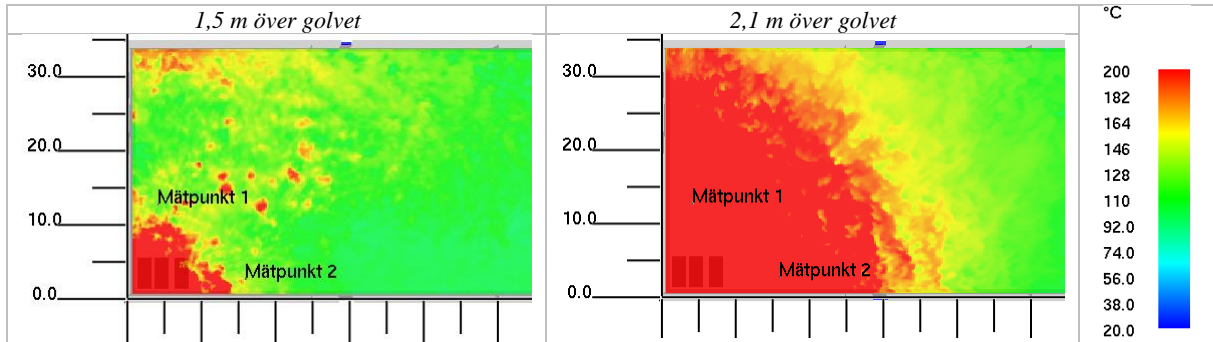
Efter 30 minuter är temperaturskillnaden mellan scenarierna tydlig, där temperaturen i garaget är högre i scenario 5. Vid tidpunkten har brandgasventilationen i scenario 1 varit öppen i 20 minuter vilket har låtit brandgaser ventileras ut under brandens tillväxt. Temperaturskillnaden mellan scenarierna minskar sedan snabbt och 10 minuter efter att brandgasventilationen öppnas i scenario 5 ser temperaturen ut att ha återgått till samma nivå som vid samma tidpunkt i scenario 1.

Precis som ovan visar temperaturkurvorna för respektive mät punkt i Figur 21 en temperaturskillnad fram till cirka 40 minuter. Därefter har temperaturkurvorna jämnat ut sig och en jämvikt i brandgaslagret uppstått. Den största skillnaden kan ses i mät punkt 1, placerad närmast branden, precis innan brandgasventilationen öppnas i scenario 5.



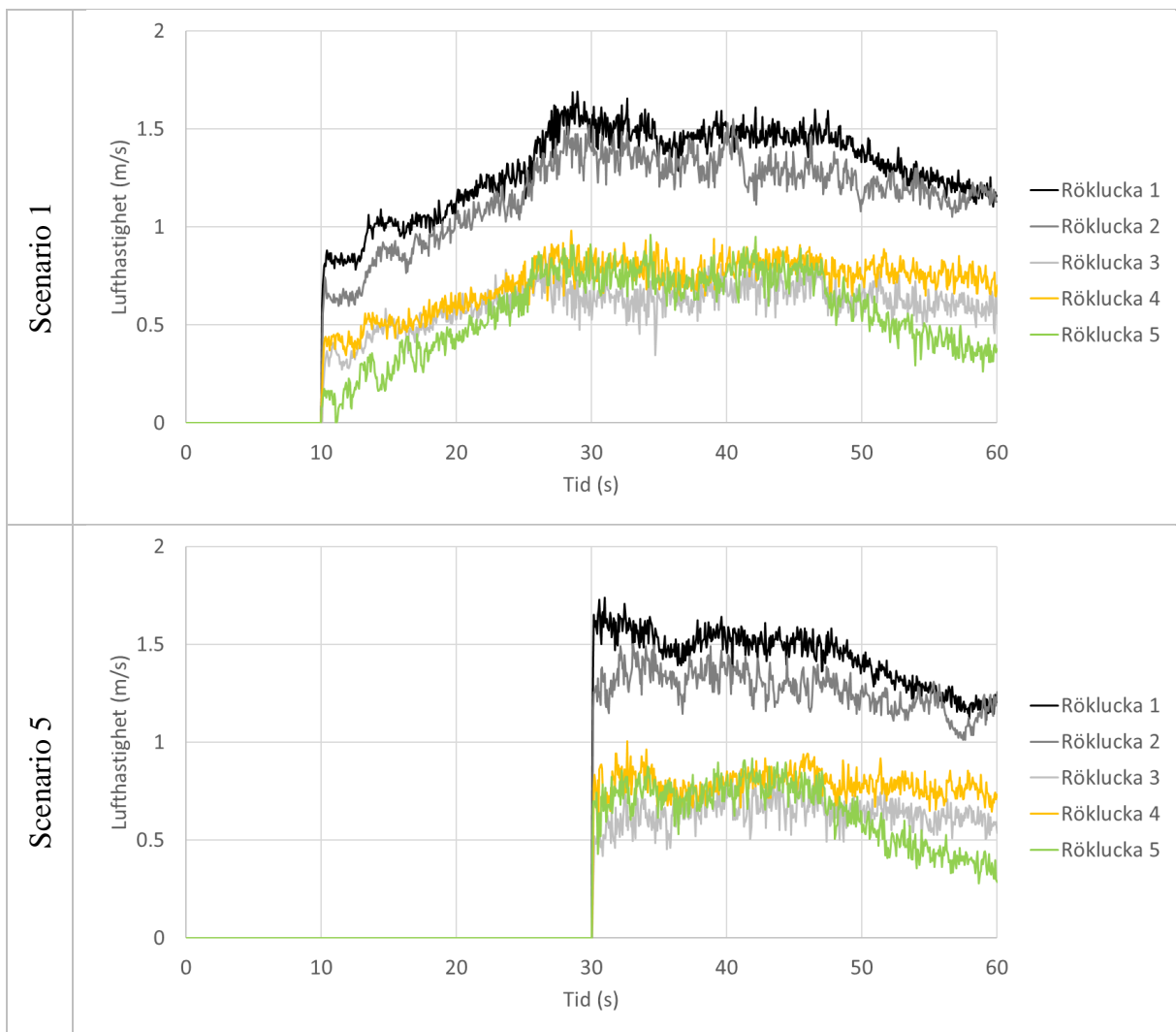
Figur 21. Temperaturkurvor i respektive mät punkt för scenario 1 och 5.

Den stora skillnaden mellan mätpunkt 1 och 2 beror dels på att mätpunkt 1 är placerad närmare de två vid tidpunkten brinnande bilarna, dels på placeringen i förhållande till väggarna. Figur 22 visar att temperaturen är högre längs den vänstra väggen generellt, både 1,5 m och 2,1 m över golvet, vilket tyder på att väggarna till höger och uppe i bilden påverkar brandgasernas temperatur i området nära mätpunkt 1.



Figur 22. Temperatur i del av garaget nära branden efter 30 minuter på olika höjd.

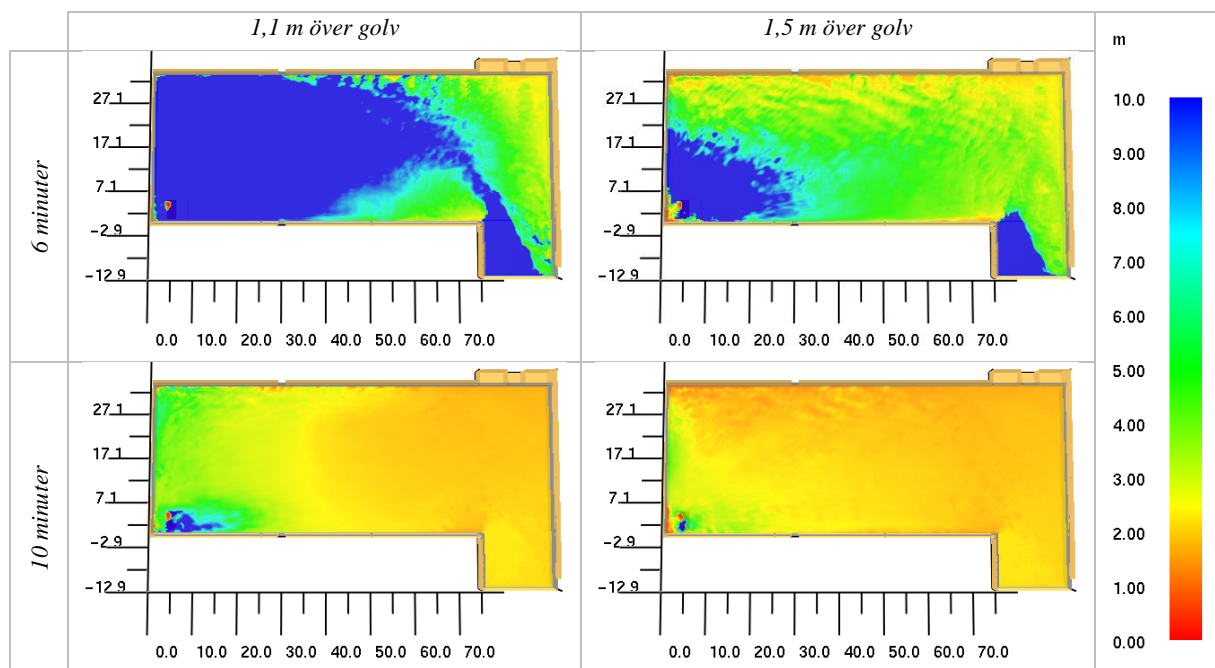
Lufthastigheten genom rökluckorna i garaget skiljer sig inte nämnvärt mellan scenarierna, se Figur 23.



Figur 23. Hastighet genom rökluckorna i scenario 1 och 5.

Den snabba temperaturminskningen kan därför förklaras genom att värmeöverföringen från ett varmt till ett kallt medium beror på temperaturskillnaden. Är skillnaden stor sker överföringen snabbare, vilket också stämmer för brandgaserna i scenario 5. Efter 10 minuter har temperaturen avtagit till ungefär samma nivå som i scenario 1 och därmed även temperaturskillnaden mellan luften och brandgaserna, vilket gör att värmetransporten blir långsammare. En jämvikt uppstår sedan där mängden energi som ventileras och överförs till kall luft motsvarar mängden energi som produceras. Mot slutet av simuleringen avtar brandförloppet och därmed energin som tillförs brandgaserna, vilket vidare gör att temperaturen sjunker ytterligare. Denna återgång till jämvikt påvisar att temperaturen vid motsvarande brand kommer återgå till mindre än 200 grader generellt i garaget när brandgasventilation motsvarande 0,5 % av golvets area finns.

Figur 24 visar sikten på höjden 1,1 m samt 1,5 m efter 6 respektive 10 minuter, där sikten först försämras längs väggarna.

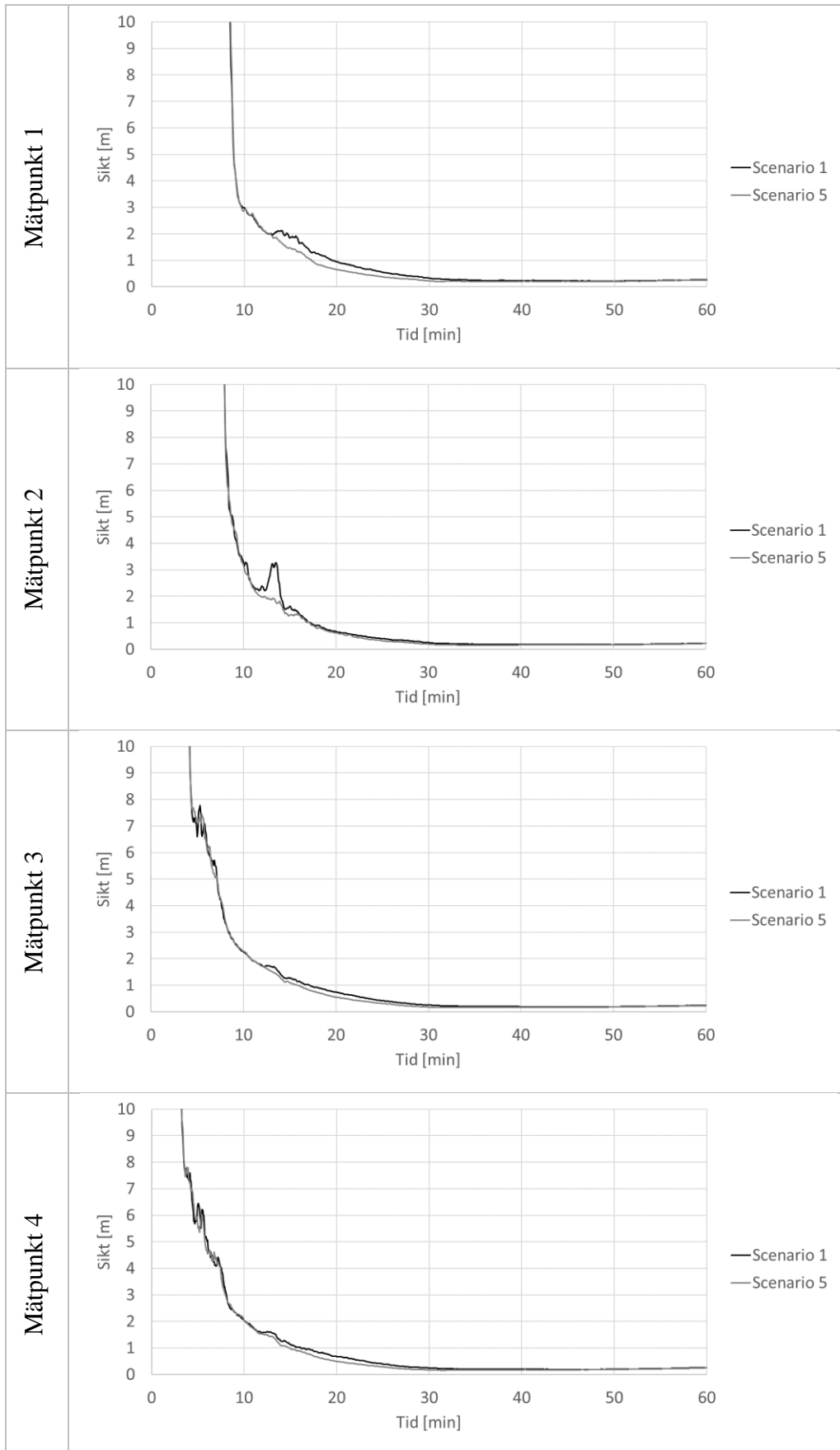


Figur 24. Sikt på olika höjd vid tiden 6 respektive 10 minuter i scenario 1.

Brandgaserna transporteras inledningsvis längs taket då de har en hög temperatur och därmed hög lyftkraft. Ju längre bort från branden de transporterats desto mer kall luft har blandats med brandgaserna och ju mer värme har transporterats genom takets material. Detta gör att brandgaslaget sjunker vilket kan utläsas i bilderna vid 1,1 m över golvet. När brandgaserna når en vägg pressas de dessutom neråt vilket skapar en virvel som vidare sprider brandgaser på lägre höjd utåt från väggarna. De blandas då med ännu mer luft vilket sänker temperaturen ytterligare och skapar en homogenare blandning genom hela garagets höjd. Detta betyder även att sikten försämras tidigare längs väggar och längre från branden.

Sikten i respektive mätpunkt presenteras i Figur 25, där påverkan från brandgasventilationen visas. Den ger dock ingen nämnvärd förbättring och endast under en kort tidsperiod. I scenario 5 kan ingen förbättring utläsas i kurvorna. Acceptanskriteriet på minst 3 m sikt uppfylls inte, och även om lägre sikt kan accepteras i det aktuella utrymmet sjunker sikten under 1 m redan efter knappt 20 minuter och förbättras därefter inte under resterande simuleringstid.





Figur 25. Siktcurvor i respektive mätpunkt för scenario 1 och 5.

## 6.3 Byggnadsegenskaper

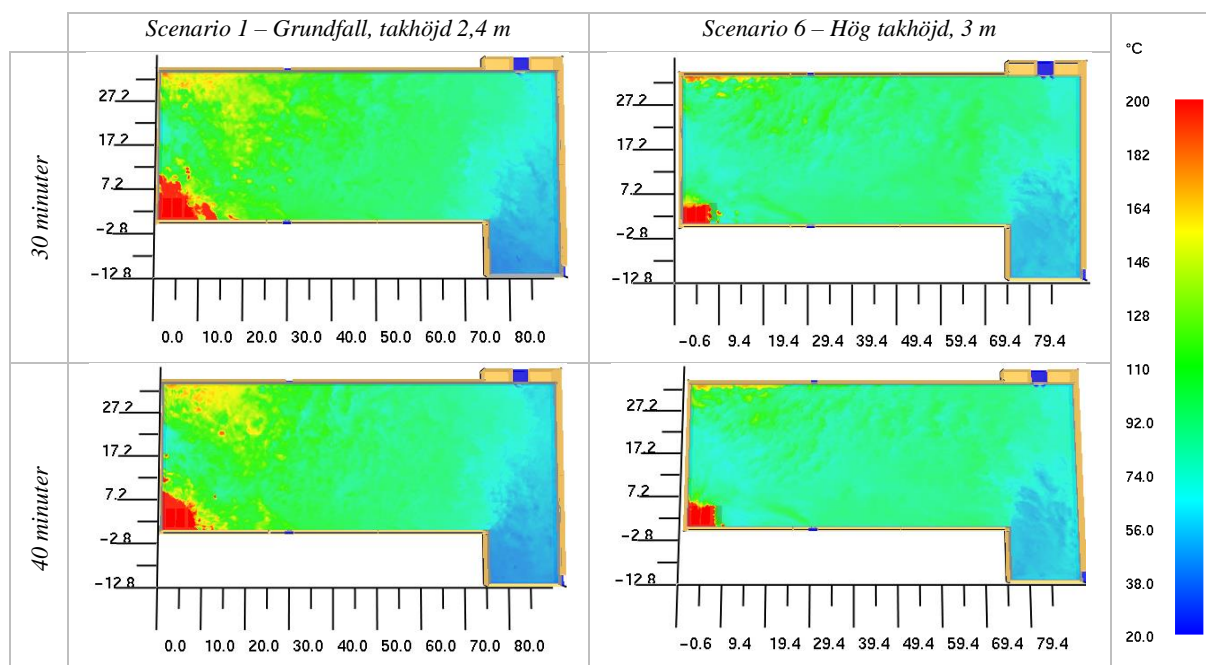
I följande avsnitt presenteras resultat kopplat till byggnadens takhöjd samt mängden brandgasventilation. Tabell 9 presenterar maximal uppmätt temperatur i respektive mätpunkt i scenario 1 samt 6–8. Uppmätt temperatur visar att acceptanskriteriet med avseende på temperatur uppfylls i alla scenarier, vilket betyder att temperaturen generellt inte utgör en större risk för räddningspersonalen i garaget i något av de undersökta scenarierna.

Tabell 9. Maximal uppmätt temperatur i respektive mätpunkt i scenario 1 samt 6–8

	BESKRIVNING	MÄT- PUNKT 1 [°C]	MÄT- PUNKT 2 [°C]	MÄT- PUNKT 3 [°C]	MÄT- PUNKT 4 [°C]
<b>SCENARIO 1</b>	Grundfall	166	179	109	132
<b>SCENARIO 6</b>	Högre takhöjd	85	95	86	107
<b>SCENARIO 7</b>	Inga rökluckor	194	205	141	166
<b>SCENARIO 8</b>	Större rökluckor	144	167	94	126

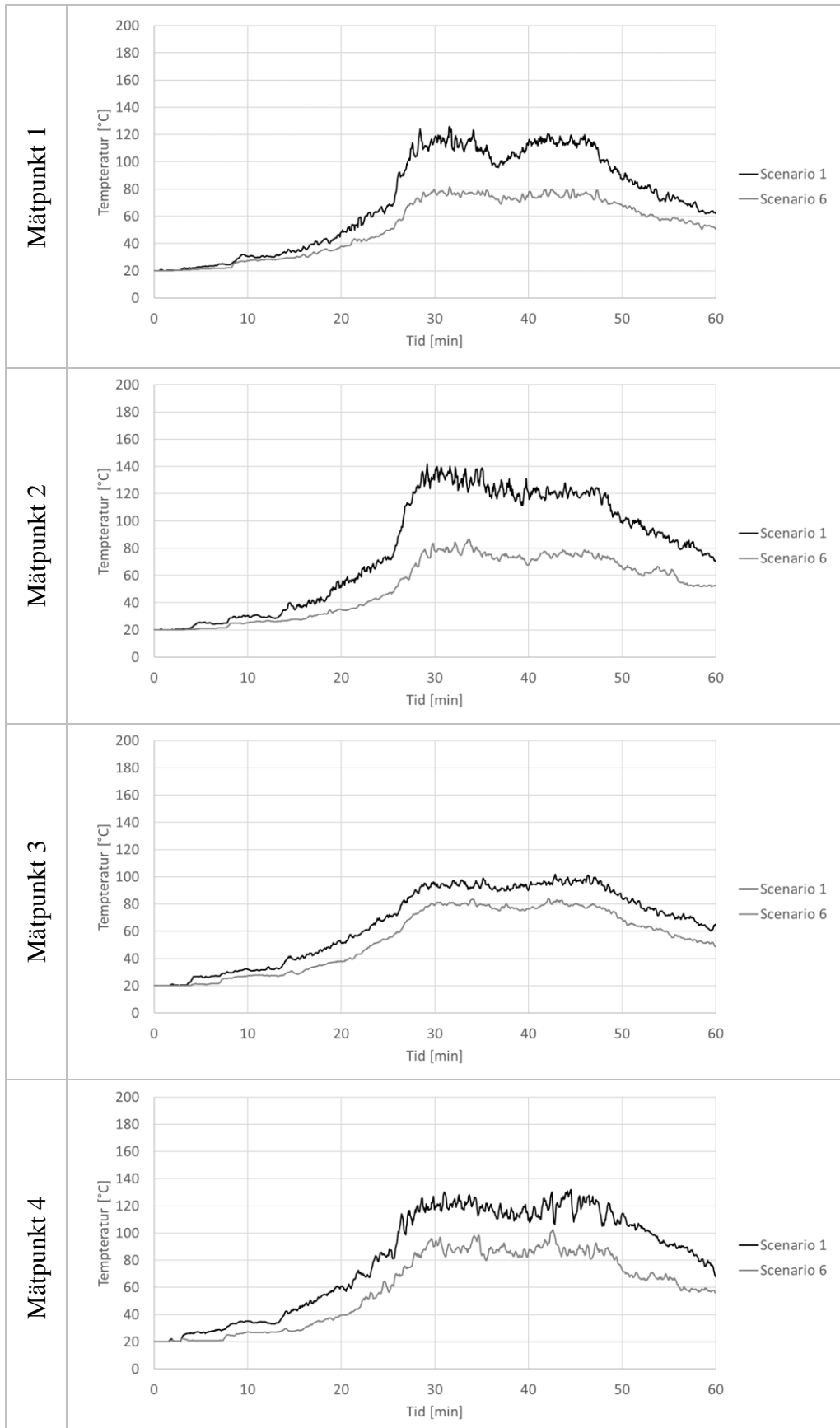
### 6.3.1 Påverkan av högre takhöjd (Scenario 6)

Figur 26 presenterar temperatur på höjden 1,5 m över golvet vid tiden 30 och 40 minuter i scenario 1 och 6. I figurerna visar streckade markeringar dimensionerna på garaget, där origo ligger i det nedre vänstra hörnet.



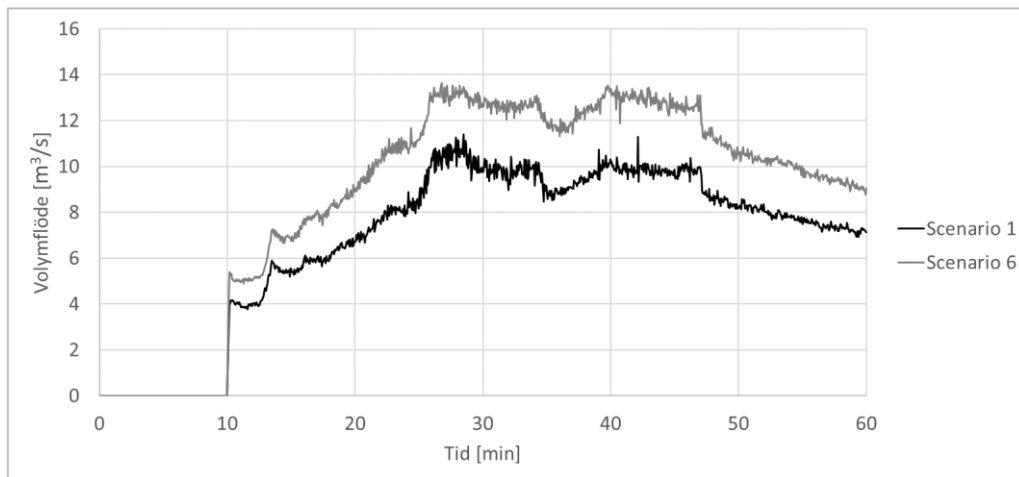
Figur 26. Temperatur på höjden 1,5 m över golvet i scenario 1 och 6.

Temperaturen är i genomsnitt lägre i hela garaget, vilket även visas i temperaturkurvorna i Figur 27. Detta beror på att en högre takhöjd innebär större volym och vidare en större mängd kall luft som kan blandas med brandgaserna. Dessutom ökar avståndet mellan taket och mätpunkterna vilket innebär att mer brandgaser måste produceras för att brandgaslagret ska nå hela vägen ner.



Figur 27. Temperaturkurvor i respektive mät punkt för scenario 1 och 6.

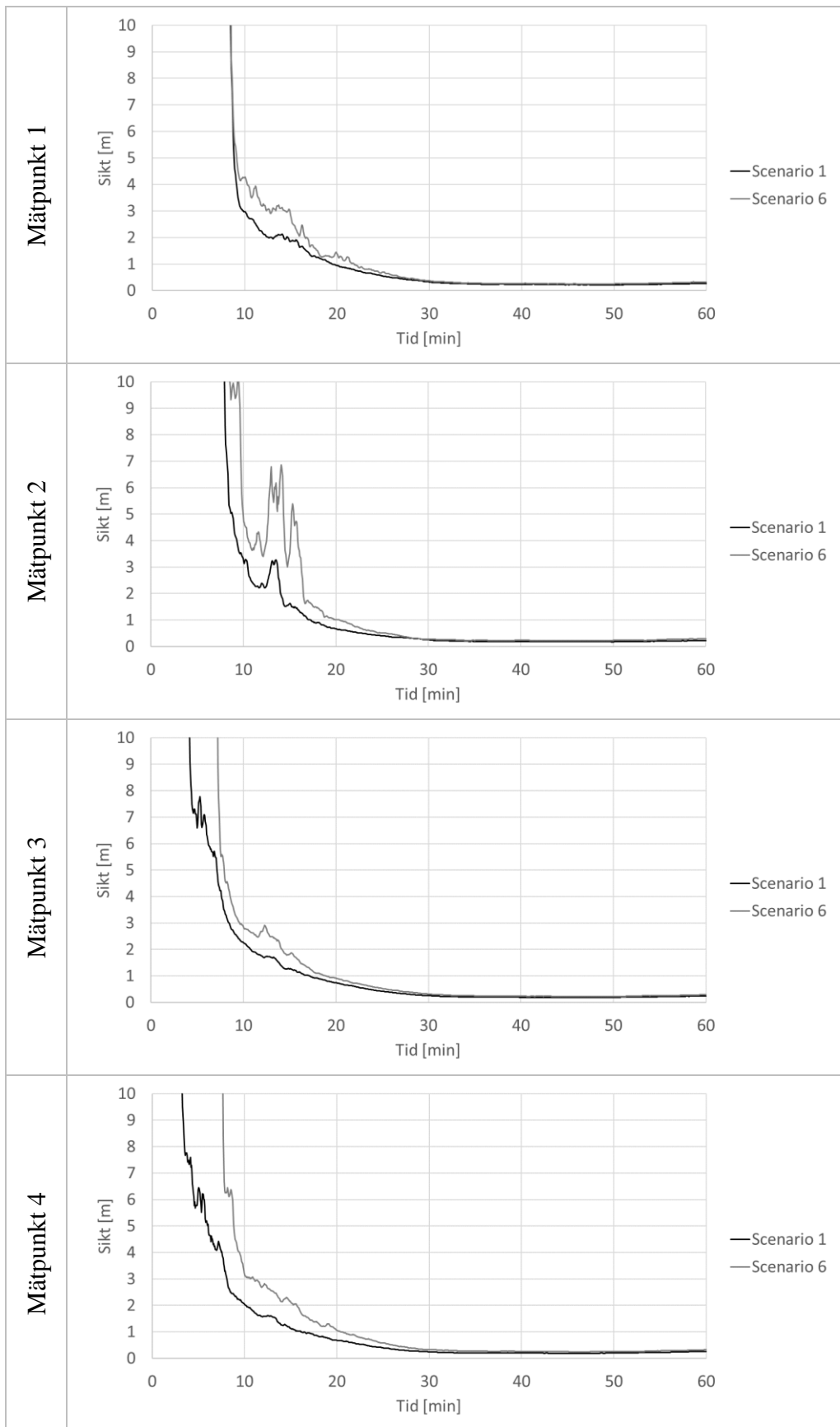
Utöver att större volym innebär mer kall luft som blandas in ökar även flödet genom brandgasventilationen då tryckskillnaden över rökluckorna delvis beror på takhöjden, vilket Figur 28 visar.



Figur 28. Totalt volymflöde genom rökluckorna.

Det ökade flödet genom rökluckorna beror på att tryckskillnaden över öppningarna, som bland annat beror på takhöjden, ökar. Vidare bidrar ett ökat utflöde till ett ökat inflöde av kall luft genom garageporten och därmed bidrar till lägre brandgastemperatur.

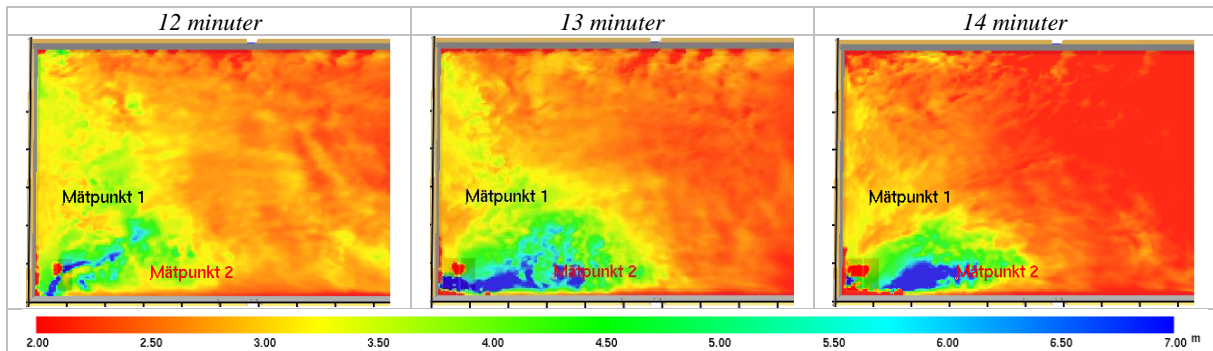
Även sikten påverkas, se Figur 29, även om den efter cirka 30 minuter fortfarande är nästan obefintlig. Anledningen till den förbättrade sikten är som för temperaturminskningen dels att det finns en betydligt större mängd lust som blandas in, dels att flödet av brandgaserna genom rökluckorna ökar.



Figur 29. Sikt kurvor i scenario 1 och 6 i respektive mät punkt.

Att sikten fortfarande blir nästan obefintlig beror på att ventilationen trots ökningen inte kan ventilera ut brandgaser i tillräcklig omfattning. Vidare kan temperaturminskningen också ha viss påverkan, där kallare brandgaser inte har samma lyftkraft och därmed sjunker mot golvet istället för att samlas längs taket.

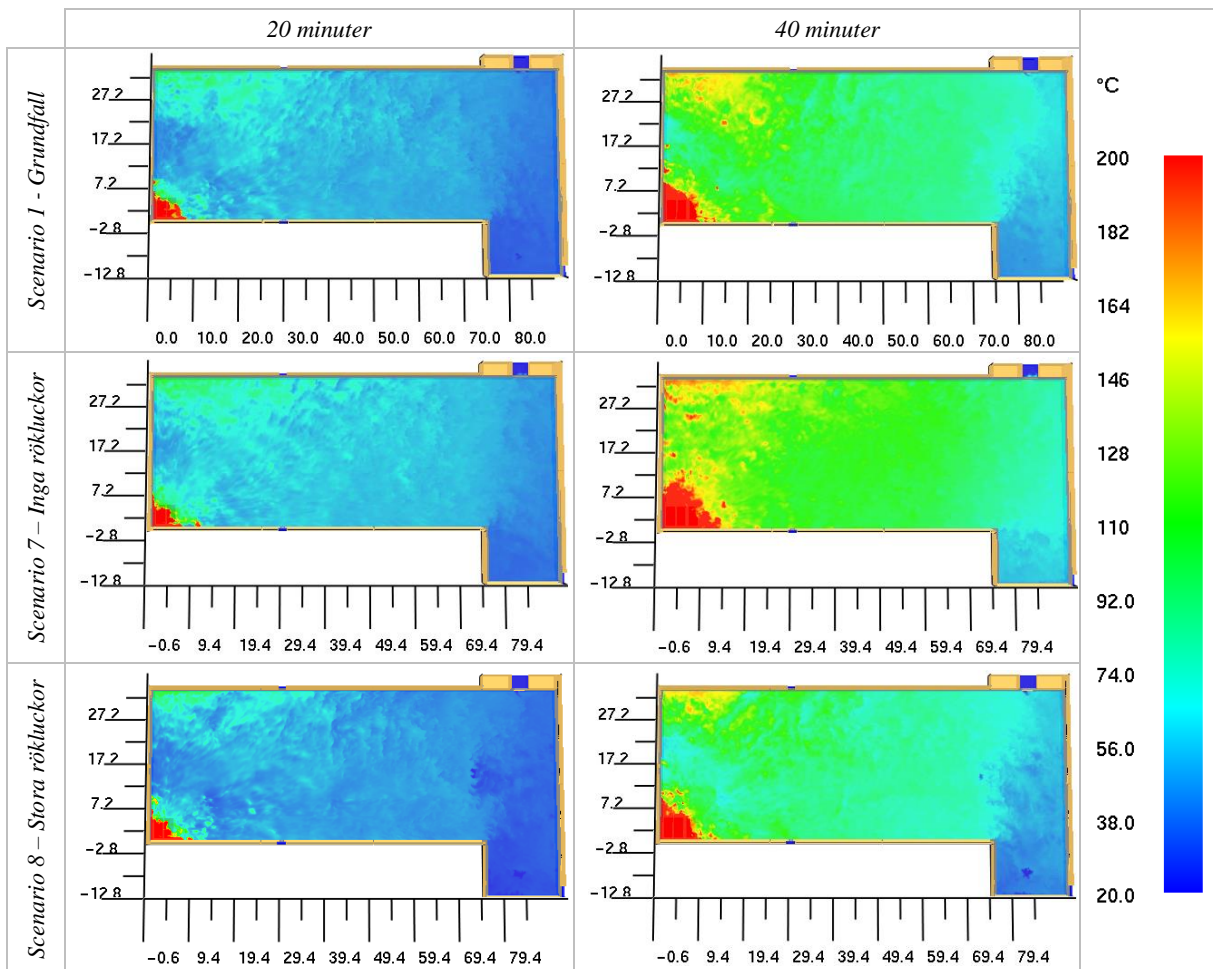
I mät punkt 2 hoppar kurvan kraftigt i scenario 6 vilket beror på ett luftflöde som förbättrar sikten lokalt i mät punkt 2, se Figur 30.



Figur 30. Sikt vid tre olika tidpunkter nära mät punkt 1 och 3 i scenario 6.

### 6.3.2 Påverkan av olika mängd brandgasventilation (Scenario 7–8)

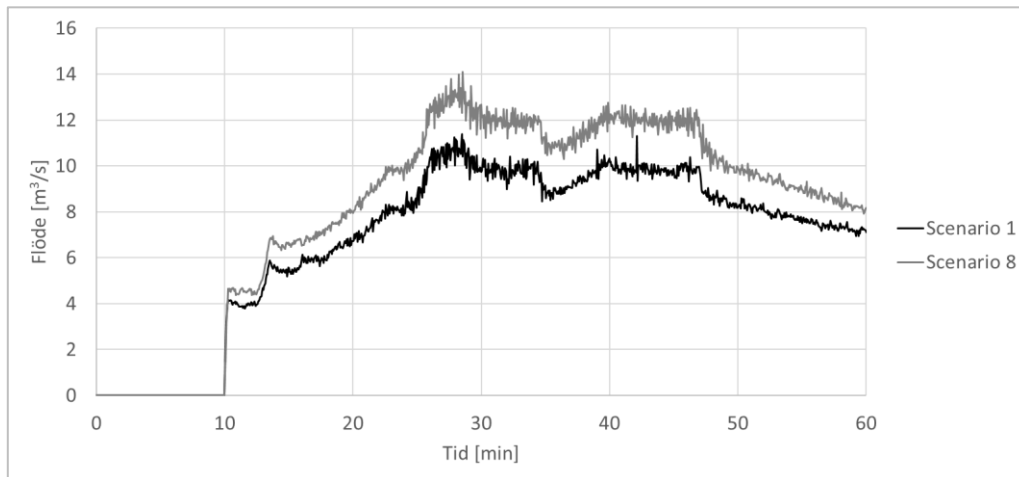
Figur 31 presenterar temperatur på höjden 1,5 m över golv vid tiden 20 respektive 40 minuter i scenario 1, 7 och 8. I figurerna visar streckade markeringar dimensionerna på garaget, där origo ligger i det nedre vänstra hörnet.



Figur 31. Tvärsnitt med temperatur i scenario 1, 7 och 8 vid två tidpunkter.

Figuren visar tydligt en försämring av temperaturen i scenario 7 där brandgasventilation endast utgörs av garageport, eftersom nästan inga brandgaser ventileras ut. Trots den dåliga ventilationen överstiger temperaturen i den största delen av garaget inte 200 °C och uppfyller alltså kriteriet för temperatur med avseende på räddningspersonalens säkerhet.

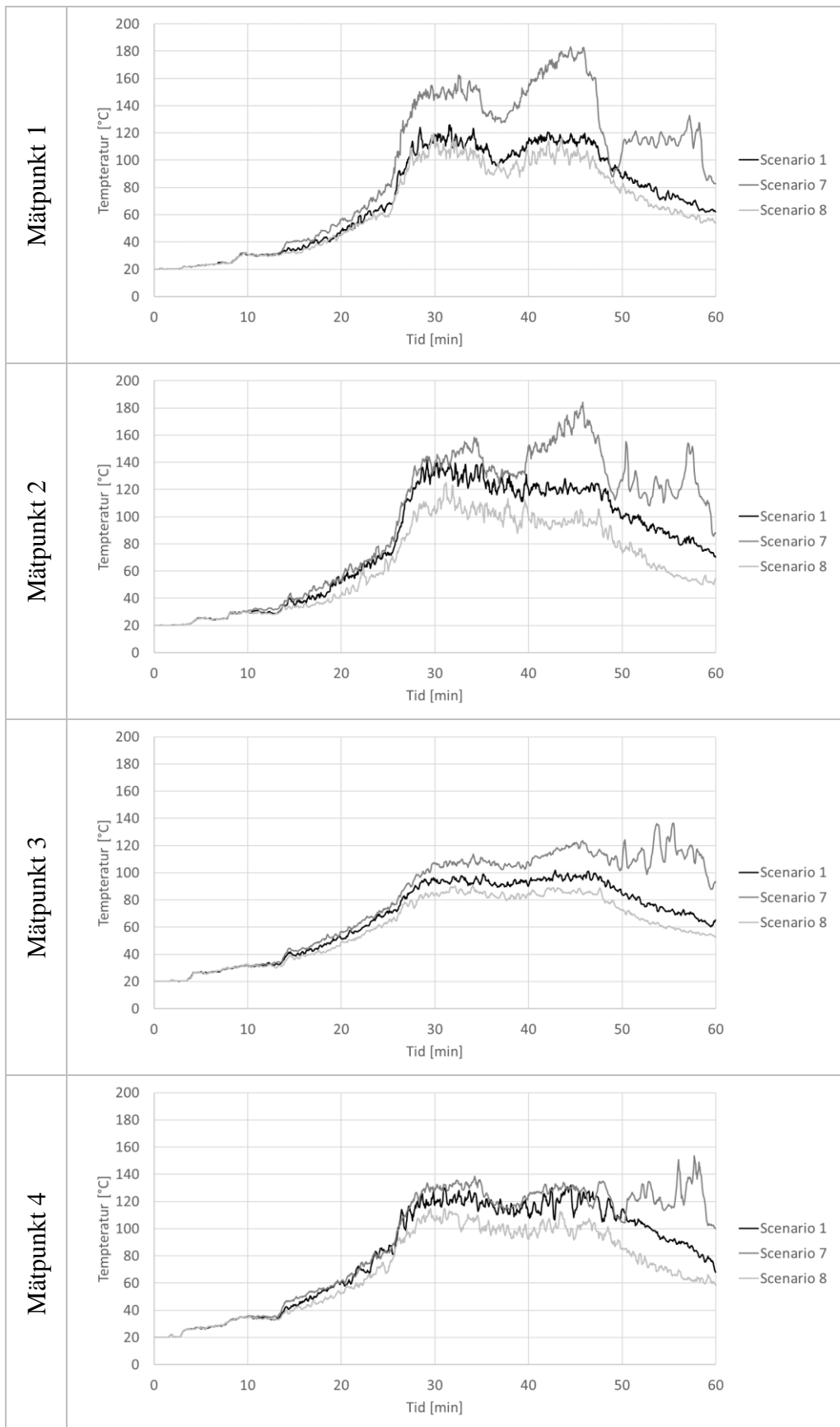
I scenario 8 är temperaturen något lägre, där brandgasventilationen utgör minst 1% av den totala golvytan. Temperaturen påverkas av det ökade flödet genom brandgasventilationen, se Figur 32, där brandgaserna kyls genom inblandning av mer kall luft i kombination med att varma brandgaser ventileras ut i större omfattning.



Figur 32. Totalt flöde ut genom rökluckorna i scenario 1 och 8.

Flödet genom brandgasventilationen beror bland annat på förhållandet mellan till- och frånluftsöppningarnas storlek som generellt brukar sägas vara optimalt mellan 1:1 och 2:1 där tilluftsöppningarnas storlek är upp till dubbelt så stor som frånluftsöppningarna.

Temperaturen presenteras vidare i kurvor för respektive mätpunkt i Figur 33, där skillnaden mellan scenario 1 och 8 visas vara liten, vilket förklaras av att förhållandet mellan till- och frånluftsöppningarnas storlek inte är optimalt.

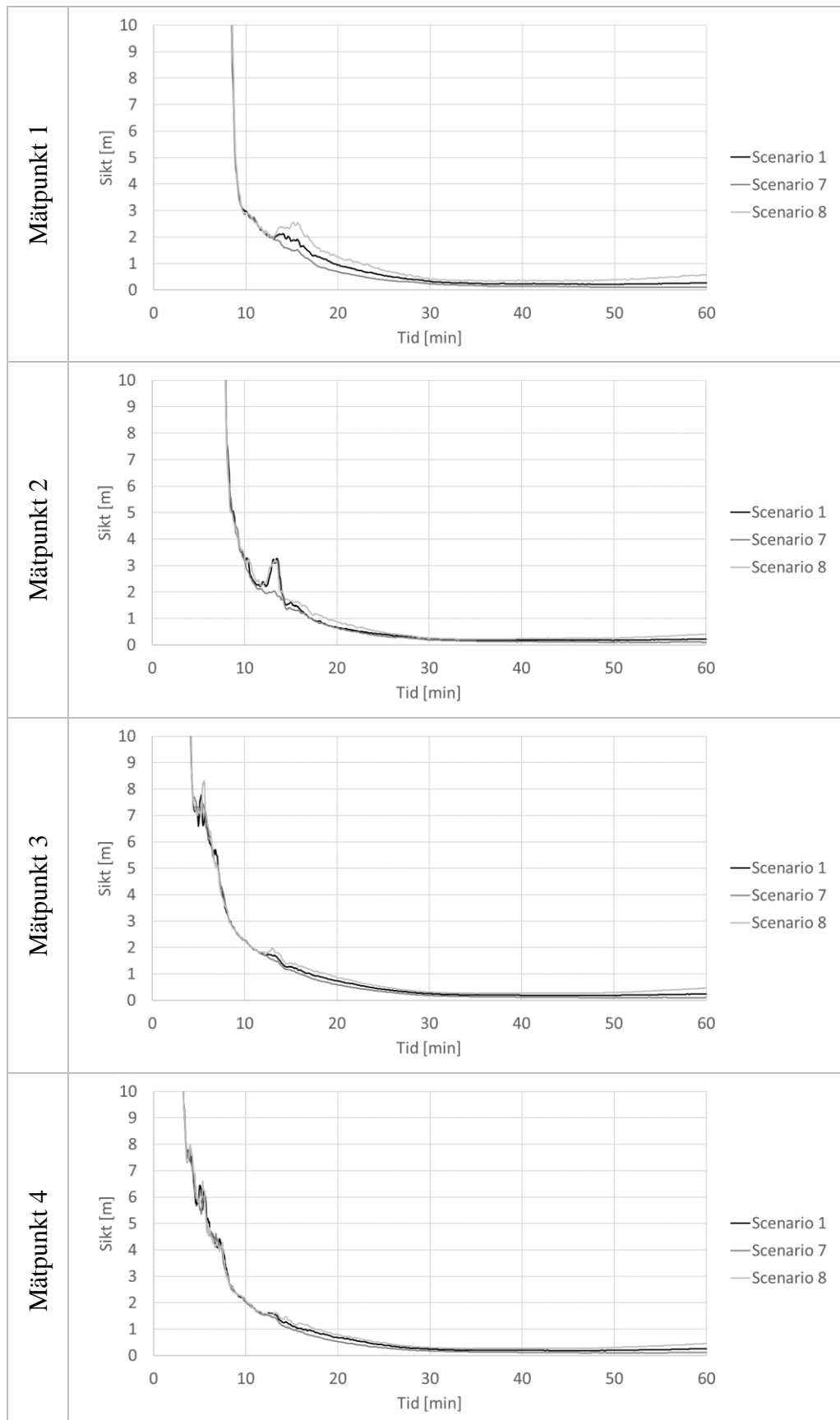


Figur 33. Temperaturkurvor i scenario 1, 7 och 8 i respektive mät punkt.

Likt övriga scenarier påverkas inte heller sikten avsevärt vid mät punkterna, se Figur 34. I scenario 7 försämras sikten något snabbare på grund av uteblivna rökluckor och i scenario 8



förbättras sikten något på grund av större rökluckor, men i övrigt blir sikten nästan obefintlig och förbättras inte nämnvärt genom resten av simuleringen.



Figur 34. Siktcurvor i scenario 1, 7 och 8 i respektive mätpunkt.

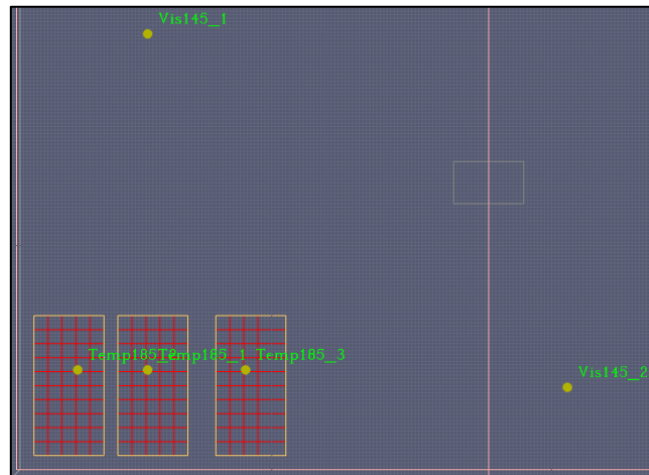


## 7. KÄNSLIGHETSANALYS

I följande avsnitt presenteras känslighetsanalys av ett litet urval modellspecifika parametrar som tros kunna påverka simuleringsresultatet. Simulering av varierade parametrar jämförs med scenario 1 (grundscenario).

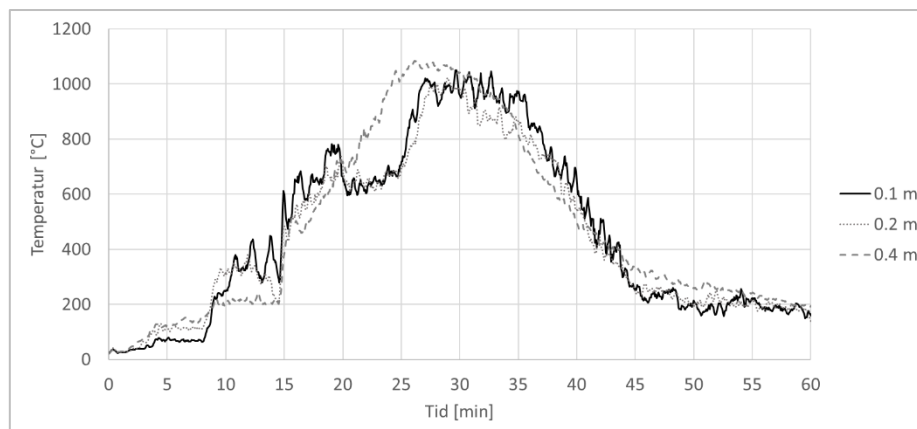
### 7.1 Mesh Sensitivity Study

En känslighetsstudie för att bestämma en lämplig cellstorlek för meshen genomfördes, där cellstorlekarna 0,1 m, 0,2 m samt 0,4 m undersöktes. Mätpunkter för temperatur och sikt placerades enligt Figur 35 för jämförelse mellan simuleringar av de tre cellstorlekarna. Mätpunkter för temperatur placerades 1,85 m över golv och för sikt 1,45 m över golv.



Figur 35. Placering av mätpunkter i känslighetsstudien.

Temperaturkurvor i mätpunkt 1 presenteras för de tre cellstorlekarna i Figur 36.



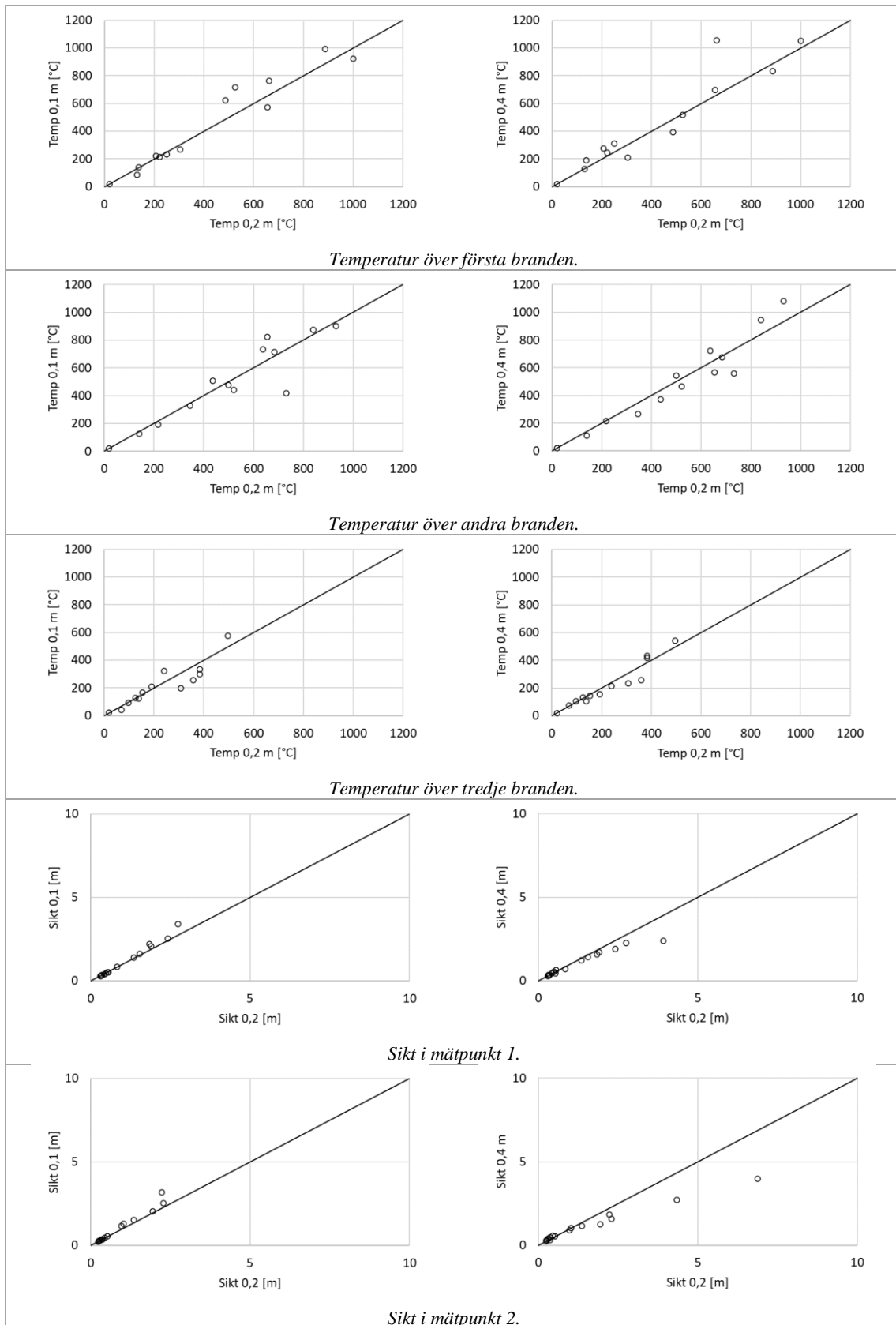
Figur 36. Temperaturkurvor för cellstorlekarna.

Tabell 10 presenterar den maximala temperaturen för varje mätpunkt och cellstorlek.

Tabell 10. Maximal temperatur uppmätt under känslighetsstudien av beräkningsnätet samt simuleringstid

CELLSTORLEK [M]	MAX. TEMP. BIL 1 [°C]	MAX. TEMP. BIL 2 [°C]	MAX. TEMP. BIL 3 [°C]	SIMULERINGSTID
0.1	1090	1100	644	5 dagar 14 h
0.2	1031	1039	670	1 dag 21 h
0.4	1114	1123	628	4 h

Värden på temperatur respektive sikt i varje mätpunkt uppmätta var 100:e sekund jämförs i diagrammen i Figur 37. Punkter placerade exakt på linjen som går genom diagrammet innebär att värdet på temperatur eller sikt är exakt lika i de jämförda scenarierna i samma tidpunkt.

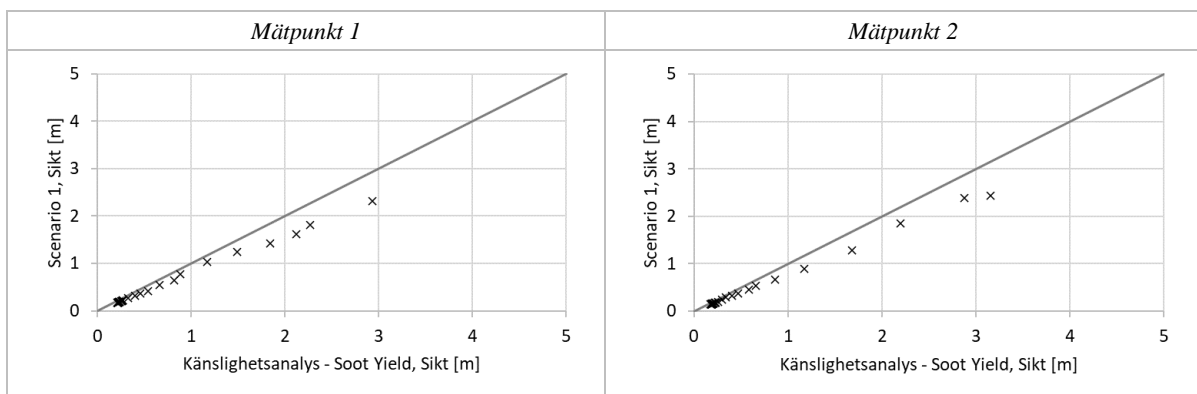


Figur 37. Spridningsdiagram för temperatur och sikt i respektive mätpunkt.

Figurerna visar ett varierat resultat, men generellt konvergerar mätvärdena bäst mellan cellstorlek 0,1 m och 0,2 m, och tyder därmed på att en cellstorlek på 0,2 m ger ett tillfredställande resultat. Vidare påverkas simuleringstiden avsevärt ju mindre cellerna är. För aktuella simuleringar antas därmed 0,2 m cellstorlek vara tillfredställande både med avseende på simuleringstid och resultat.

## 7.2 Soot Yield

Sotproduktion, eller soot yield, anger hur stor andel av den avbrunna massan bränsle som blir sot. Då sotproduktionen endast används i beräkningar kopplat till sikt i FDS förutsätts temperaturen inte påverkas. Ett värde på 0,1 istället för 0,08 undersöks i detta scenario för att kontrollera hur stor påverkan soot yield har på siktförhållanden i garaget. Värden på sikt i varje mätpunkt uppmätta var 100:e sekund jämförs i diagrammen i Figur 38. Punkter placerade exakt på linjen som går genom diagrammet innebär att värdet på sikt är exakt lika i de jämförda scenarierna i samma tidpunkt.



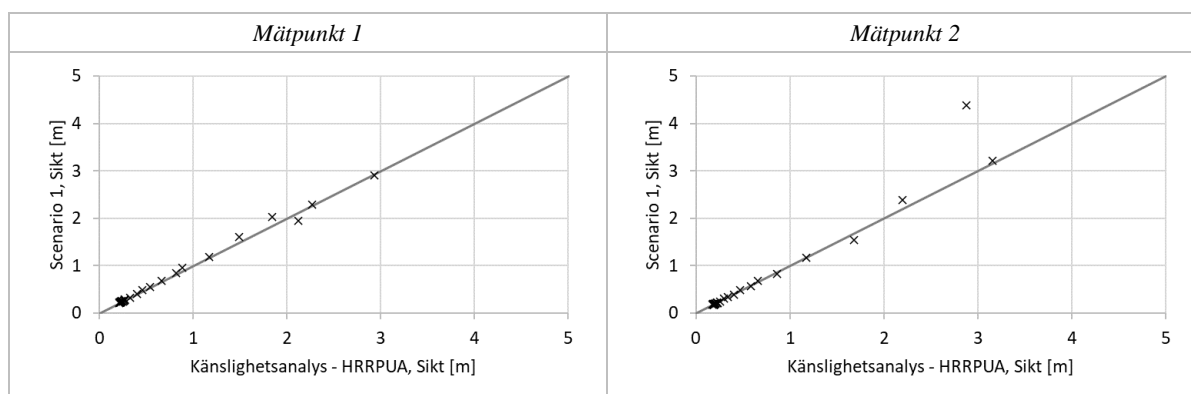
Figur 38. Spridningsdiagram för sikt i mätpunkt 1 och 2.

Resultatet visar att en högre soot yield försämrar sikten något. Den sämre sikten var förväntad då högre sotproduktion innebär fler sotpartiklar och därmed tjockare brandgaser.

### 7.3 HRRPUA & brandkällans storlek

Effektutvecklingen per areaenhet, *HRRPUA*, påverkar bland annat hur flammorna simuleras. Hög *HRRPUA* över en liten yta ger jetflammar, och då garaget har låg takhöjd innebär detta att flammorna och blandplymen snabbare når taket. *HRRPUA* förutsätts därmed kunna påverka brandgasernas spridningshastighet längs taket, och vidare då även temperatur och sikt i garaget. Med utgångspunkt i intervallet angivet i avsnitt 5.1.3 anges ett värde på  $930,6 \text{ kW/m}^2$ , vilket utgår ifrån det maximala värdet på  $1000 \text{ kW/m}^2$  i intervallet och har anpassats till brandmeshen.

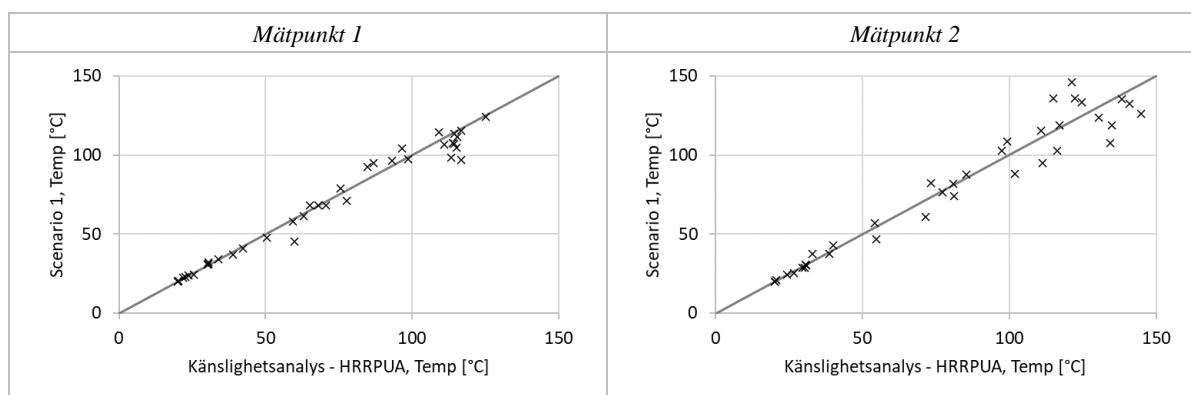
Värden på sikt i varje mätpunkt uppmätta var 100:e sekund jämförs i diagrammen i Figur 39. Punkter placerade exakt på linjen som går genom diagrammet innebär att värdet på sikt är exakt lika i de jämförda scenarierna i samma tidpunkt.



Figur 39. Spridningsdiagram för sikt i mätpunkt 1 och 2.

Resultatet visar generellt ingen större skillnad mellan de två scenarierna. Den något större spridningen i mätpunkt 2 beror på brandgasernas rörelse. För just den tidpunkten som markeras har brandgaserna lokalt rört sig på en lägre höjd. Generellt visas i övrigt ingen större skillnad.

Figur 40 presenterar spridning i uppmätt temperatur i mätpunkt 1 och 2 var 100:e sekund. Resultatet visar på en generell spridning, men någon trend för högre eller lägre temperatur kan inte utläsas.



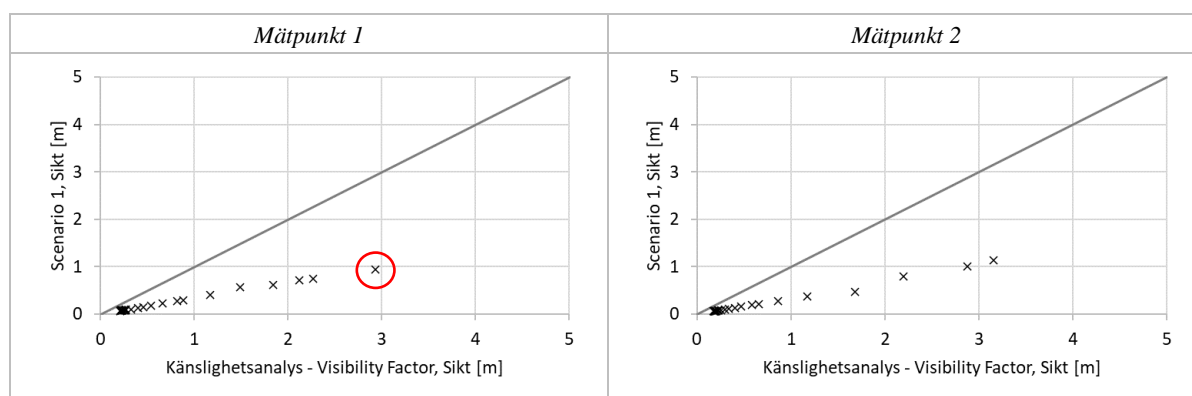
Figur 40. Spridningsdiagram för temperatur i mätpunkt 1 och 2.

Genomförd känslighetsanalys med ökat värde på *HRRPUA* visar ingen större skillnad med avseende på sikt eller temperatur.

## 7.4 Visibility factor

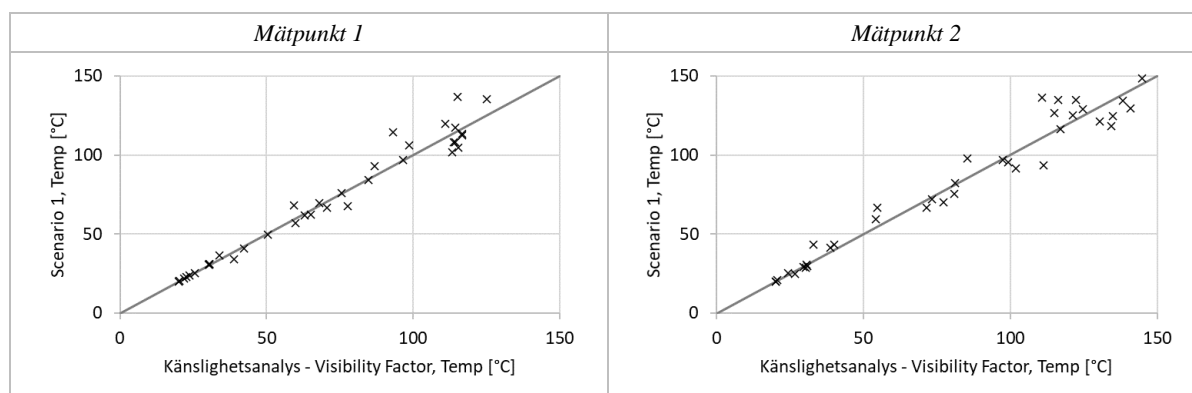
Visibility factor anges i FDS som en konstant vid beräkningar av sikten mot ljuskällor. Ett värde på 3 motsvarar sikt mot en reflekterande skylt och ett värde på 8 motsvarar sikt mot en genomlyst skylt (Mulholland, 2002). Konstanten används endast vid beräkning av sikt och påverkar därmed inte temperaturen i garaget. Eftersom visibility factor bygger på siktmätning mot en referenspunkt med varierande reflekterande förmåga är det av intresse att undersöka föremål med ytterligare sämre reflekterande förmåga. I känslighetsanalysen jämförs scenario 1 där visibility factor har ett värde på 3 med ett scenario där visibility factor har ett värde på 1 för att undersöka hur detta påverkar sikten i garaget.

Värden på sikt i varje mätpunkt uppmätta var 100:e sekund jämförs i diagrammen i Figur 41. Punkter placerade exakt på linjen som går genom diagrammet innebär att värdet på sikt är exakt lika i de jämförda scenarierna i samma tidpunkt. Resultatet visar som väntat en stor skillnad i sikten mellan visibility factor 1 och 3 där sikten är betydligt sämre där visibility factor är satt till 1. Exempelvis kan detta utläsas från den markerade punkten där sikten vid visibility factor 3 är närmare 3 meter och där visibility factor 1 är knappt 1 meter.



Figur 41. Spridningsdiagram för sikt i mätpunkt 1 och 2.

Figur 42 presenterar spridning i uppmätt temperatur i mätpunkt 1 och 2. Resultatet visar på viss spridning i temperaturen, men någon trend för högre eller lägre temperatur kan inte utläsas.



Figur 42. Spridningsdiagram för temperatur i mätpunkt 1 och 2.

Genomförd känslighetsanalys med lägre värde på visibility factor visar en stor påverkan på sikten, men inte på temperaturen.





## 8. DISKUSSION

I följande avsnitt diskuteras resultatet från simuleringarna i FDS utifrån information från intervjuer samt utifrån de kriterier som presenteras i avsnitt 3.4.

### 8.1 Räddningstjänst

I större städer med heltidsbrandstation förutsätts räddningstjänsten generellt vara på plats inom 10 minuter efter larm inkommit. Detta innebär att den största påverkan på insatstiden generellt är tiden innan branden uppmärksammas och räddningstjänsten larmats. Resultatet av genomförd analys med avseende på insatstid visar att en senare ankomst inte utgör någon större risk för räddningstjänstens personal utifrån acceptanskriterier för temperatur. Temperaturen är till exempel högre inledningsvis vid längre insatstid, men kort efter att en insats påbörjats återgår den till ungefär samma nivåer som vid kortare insatstid. Det är dock viktigt att förstå begränsningar i simuleringsmodellen och de avgränsningar som gjorts kring brandens omfattning. En längre insatstid ökar i verkligheten risken för brandspridning till fler än tre bilar, och kan innebära att räddningstjänsten vid ankomst måste hantera en betydligt svårare situation. Resultatet visar bland annat att för räddningstjänstens möjlighet att tidigt efter ankomst göra en säker insats underlättar en snabb branddetektering, exempelvis genom automatiskt brandlarm.

Väl under insats visar intervjuerna att det är vanligt med användning av fläkt placerad vid någon öppning, och på så sätt försöka trycksätta garaget. Resultatet från simuleringarna tyder på att effekten detta har beror på hur stort garaget är och hur stor kapacitet fläkten har. Stora garage kräver större kapacitet för att ge någon effekt över huvud taget. Vidare påverkar troligtvis även placeringen av frånluftsöppningar. I de genomförda simuleringarna öppnades samtliga rökluckor, som var jämnt utplacerade i hela garaget. Om endast rökluckor nära branden skulle öppnats istället skulle eventuellt fläkten ge en större påverkan. Även placeringen av fläkten gör troligen skillnad. I de genomförda simuleringarna är fläktarna placerade i garageporten, som är långt ifrån branden. Fläkten förbättrar främst sikten direkt innanför garageportens öppning, och om branden kan lokaliseras skulle därför sikten kunna förbättras nära branden genom att välja en ingång som är närmare. En placering närmare branden, eller en komplettering med fläkt inne i garaget för att hjälpa till att styra luftflödet skulle kunna ge en bättre effekt på både sikt och temperatur. Detta är något som bör undersökas vidare i en djupare analys.

I fallet där tilluft kompletteras med vattendimma har Räddningstjänsten Syd vid insatser där taktiken använts upplevt en god effekt, både på temperaturen och genom att branden begränsats. De genomförda simuleringarna visar däremot ingen större effekt jämfört med om endast en fläkt med lika kapacitet används. Troligtvis beror detta dels på avståndet till branden, dels på hur simuleringen av vattendimman definierades. Vattendropparnas kyleffekt på brandgaserna är bättre ju varmare brandgaserna är och då brandgaserna redan hunnit kylas när de når öppningen där vattendimman tillförs ger vattendimman inte så stor effekt. Om vattendimman istället skulle tillföras genom en öppning närmare branden skulle brandgaserna vara varmare, och vattnet skulle därför ge en bättre kyleffekt. Vidare definierades vattendimman som en gas från början efter samtal med en expert inom FDS (J. Wahlqvist, personlig kommunikation, 2020-08-06). Vattendimman skulle även kunna simuleras som partiklar vilket skulle kunna ge annorlunda resultat, men eftersom en del av vattnet då troligen faller till golvet blir troligen effekten ytterligare mindre än i det aktuella fallet där allt vatten stannar i gasen. En vidare analys av olika möjligheter att simulera vattendimma och dess effekt på brandgastemperatur rekommenderas därför, och eventuellt även genomföra experiment för jämförelse.

De genomförda simuleringarna innebär vidare en del förenklingar som utgör en osäkerhet när resultatet jämförs med troliga verkliga fall. Effektutvecklingen simuleras utifrån en fördefinierad effektutvecklingskurva och påverkas endast om tillgången till syre sjunker under angiven lägsta nivå. Eventuell släckverkan från räddningstjänstens insats tas inte hänsyn till. Branden är även begränsad till maximalt tre bilar för att spegla ett generellt värsta troligt fall, medan uteblivna eller sena släckförsök och sen ankomst i verkligheten skulle kunna innebära betydligt fler inblandade bilar och därmed betydligt svårare situationer för räddningstjänsten.

Utöver de undersökta fallen framkom det under intervjuerna att det ofta underlättar mycket om det finns orienteringsritningar lätt tillgängliga, exempelvis innanför garageporten, som visar övergripande hur garaget är utformat. Givet att information om ungefär var branden befinner sig förväntas sådana ritningar även underlätta vid beslut om placering av och nödvändig storlek på eventuella fläktar. Det rekommenderas därför att orienteringsritningar upprättas för garage i så stor omfattning som möjligt för att ge räddningstjänsten en bättre möjlighet att planera och vidta lämpliga åtgärder så tidigt som möjligt.

## 8.2 Byggnadsegenskaper

Som förväntat gav en högre takhöjd lägre temperatur, och även om sikten inte förbättrades avsevärt fördröjdes siktnevgången med flera minuter. Detta visar att volymen har en stor påverkan på förhållandena, och att de åtgärder och taktiska val som här undersökts främst förhåller sig till den undersökta geometrin. Skulle volymen på garaget vara mindre kan slutsatsen dras att temperaturen generellt kommer vara högre, och sikten snabbare försämrats.

Vad gäller brandgasventilationen var det också väntat att dåliga ventilationsmöjligheter ger högre temperatur, medan bättre ventilationsmöjligheter ger lägre. Här undersöktes dock endast en större area på rökluckorna, alltså frånluften. Ett rekommenderat förhållande på 2:1 (Svensson, 2020) mellan till- och frånluft uppfylldes aldrig, inte heller i grundscenariot. Det är generellt svårare att öppna upp garage under mark, främst för tilluften som ofta består av garageport och eventuella dörrar. I bostadsområden är dörrarna dessutom ofta placerade i anslutning till trapphus i bostadshus och kan där inte användas för brandgasventilering. Om tilluften istället hade öppnats, exempelvis fler öppna dörrar, hade troligen flödet genom rökluckorna blivit bättre och därmed hade brandgasventilationen gett en bättre effekt. Här hade det varit intressant att undersöka hur större tilluftsöppningar påverkar brandgasventilationen.

Som Svensson (2020) nämner gäller det omvända förhållandet vid användning av övertrycksfläkt, dvs upp till dubbelt så stora frånluftsöppningar som tilluftsöppningar. I det aktuella garage ger ventilationsöppningarna dubbelt så stor area på frånluftsöppningarna som tilluftsöppningarna vilket tyder på att brandgasventilationen är tänkt med övertrycksfläkt. Detta förklarar effekten av fläktarna som tydligt ger bättre effekt än större rökluckor med naturlig ventilation, även om de fortfarande är beroende av fläktens kapacitet.

Vidare visar resultatet vid utebliven brandgasventilation att förhållandena inte uppgår till kritisk temperatur i större omfattning, trots en tydlig temperaturökning. Detta beror främst på att volymen fortfarande är väldigt stor, och i mindre garage hade temperaturen troligtvis blivit betydligt högre i hela garaget. En intressant effekt av den begränsade ventilationen är dock hur syrenivån i garaget påverkas. Utan ett bra tillflöde av syre blir branden lättare ventilationskontrollerad, vilket kan ses i avsnitt 6.3.2 med resultat för scenario 7. En positiv aspekt med ventilationskontrollerad brand är att den begränsas, och vid dålig syretillförsel kan det antas att branden inte kommer kunna spridas vidare till fler bilar, eller åtminstone att det blir svårare.

Däremot visar forskning att brand i bilar generellt inte självslocknar, se avsnitt 3.1. Istället produceras en mängd oförbrända brandgaser som sedan kan antända när syre tillkommer. Detta kan bli problematiskt för räddningstjänstens personal när risken för en snabb övertändning av brandgaserna, liknande backdraft, ökar. Om branden får fortgå underventilerad ansamlas stora mängder oförbrända brandgaser i garaget, vilka blandas med frisk luft när räddningstjänsten öppnar för att gå in. För garage i motsvarande volym som den simulerade måste detta dock pågå under en lång tid och är osannolikt, men för garage med mindre volym finns en större risk då det krävs en mindre mängd brandgaser för att fylla utrymmet.

### 8.3 Osäkerheter kopplat till indata

Resultatet från analysen beror på den indata som anges och vidare de förenklingar som måste göras. Brand i bilar kräver stora förenklingar då materialet, och därmed bränselegenskaper, varierar både i bilen och även mellan modeller och årtal. De angivna värdena för bland annat soot yield och förbränningsentalpin är uppskattningar för att representera bilar i allmänhet. Detta innebär vidare osäkerheter för resultatet, som i verkligheten skulle variera.

Känslighetsanalysen visar att soot yield ger en viss påverkan, men att den inte är avsevärt stor, och temperaturen påverkas inte avsevärt. Soot yield kan därför inte antas utgöra en särskilt stor osäkerhet, speciellt inte om det jämförs med modellspecifika osäkerheter som värdet på visibility factor. Att visibility factor påverkar beräkningarna av sikten är givet då konstanten utgör en uppskattning för hur sikten uppfattas gentemot olika ljusstarka objekt. De två riktvärdena anger uppskattade värden för lysande skylt samt reflekterande skylt, men i verkligheten varierar detta, dels beroende på var i utrymmet man befinner sig, dels beroende på åt vilket håll man är vänd mot. Dessutom spelar belysning och föremål en stor roll för hur sikten upplevs. Siktresultatet bör därför endast tolkas som en riktlinje, och inte som en definitiv bild av hur det skulle vara i verkligheten.

Likt sotproduktion påverkar även förbränningsentalpin mängden sot i brandgaserna genom kopplingen till massavbrinningen för bränslet, och medför därmed osäkerheter i resultatet som måste tas hänsyn till. Givet att effektutveckling och mängd sot i brandgaserna är konstanta påverkar förbränningsentalpin massavbrinning i lika stor omfattning som sotproduktionen gör. Känslighetsanalys genom simulering av olika värden på förbränningsentalpin förutsattes inte ge vidare kunskap och gjordes därför inte.

Spridningshastigheten till bilar i närheten kan också tänkas ha en viss effekt på förhållandena. Spridningen beror på många faktorer, däribland om tanken för drivmedel läcker, vilket i genomförda experiment ger den kortaste tiden till spridning. De undersökta fallen utgör en generalisering vilket innebär att det i verkligheten kan se väldigt olika ut. En varierande tid till spridning, om denna inte varierar väldigt mycket, förutsätts främst påverka vid vilken tidpunkt

effektutvecklingen är som störst. En kortare tid till maximal effektutveckling för den totala branden innebär att branden tidigare börjar avta, och därmed antas inte resultatet påverkas avsevärt.

Utöver de parametrar som utgör osäkerheter har en del förenklingar gjorts för att göra beräkningarna möjliga. Till exempel har taket simulerats som helt plant. I verkligheten sticker balkar och fasta installationer som ventilation och avlopp ner, vilket i lokala punkter skulle kunna påverka resultatet. Eftersom sådana variationer är oregelbundna och varierar mellan garage är det svårt att skapa ett representativt fall och där undersöka hur mycket det påverkar resultatet. I samråd med handledare (L. Andersson, personlig kommunikation, 2020-11-25) som undersökt hur balkar i tak påverkar brandgasspridning visar det sig krävas en stor omfattning föremål i taket för att påverka brandspridning och de delar av resultatet som i detta arbete är av intresse.

Ytterligare felkällor som avgränsats för att möjliggöra representativa fall är bland annat brandspridning genom att drivmedel läcker ut och rinner till andra bilar parkerade i närheten. Genomförda experiment visar på att sådan brandspridning bidrar till mycket korta tider till spridning, men då detta endast skedde i enstaka fall förutsätts dessa inte utgöra ett generellt fall. Vidare sker brandspridning i de genomförda simuleringarna till en bil i taget. I verkligheten skulle det kunna spridas till två bilar samtidigt om dessa står parkerade tillräckligt nära den initialt antända bilen. En sådan spridning skulle bidra till en hög effektutveckling tidigare i brandförloppet och utgöra en större risk för spridning till fler än tre bilar. Vid ett fall där brandspridningen begränsas till endast tre bilar förutsätts detta främst ge svåra förhållanden inledningsvis eftersom effektutvecklingen efter knappt 30 minuter i de genomförda simuleringarna börjar avta. Även om den maximala effektutvecklingen skulle bli högre förutsätts resultatet mot slutet av simuleringen inte skilja avsevärt. Detta är främst ett fall som skulle vara intressant om spridning till fler än tre bilar undersöks.

## 8.4 Modellosäkerheter

Utöver de parametersäkerheter som diskuterats ovan innehåller själva beräkningsmodellen i FDS flertalet osäkerheter. I FDS Validation Guide (McGrattan, et.al., 2020) sammanfattas flertalet genomförda jämförelser mellan experiment och beräkningar i syfte att undersöka modellosäkerheter i FDS. Bland dessa sammanställda parametrar utgör den beräknade koncentrationen brandgaser, vilket bland annat siktberäkningar beror av, en av de med störst genomsnittlig standardavvikelse och därmed utgör en stor osäkerhet. Både äldre och nyare jämförelser visar på en överskattning på upp till fem gånger högre beräknad brandgaskoncentration i FDS än i experimentellt uppmätta data. Detta innebär en stor osäkerhet i resultatet av de genomförda simuleringarna med avseende på sikt. Resultatet bör därför främst användas för att jämföra effekten mellan de undersökta scenarierna än att jämföra med acceptanskriterier. Resultatet speglar troligen väldigt dåligt hur det skulle vara i verkligheten.

Vidare innebär även temperaturberäkningar vissa osäkerheter, om än betydligt mindre. Av de temperaturrelaterade beräkningar och jämförelser som presenteras i FDS Validation Guide (McGrattan, et.al., 2020) är plymtemperaturen den kvantiteten med störst genomsnittlig standardavvikelse. Det ska dock nämnas att det inte är en avsevärd skillnad mot andra temperaturrelaterade kvantiteter och att FDS generellt är bra på att förutspå temperatur.

## 9. SLUTSATS

Utifrån den genomförda analysen och de avgränsningar och begränsningar som denna innefattar har följande slutsatser dragits:

- Insattiden påverkar förhållandena något, främst inledningsvis under påbörjad insats, inte avsevärt längre in i insatsförloppet. Däremot utgör sen ankomst en risk för vidare spridning om branden inte begränsas till tre bilar. System för tidig upptäckt, exempelvis automatiskt brandlarm, är därför en rekommendation för att räddningstjänsten ska få goda möjligheter att tidigt begränsa.
- Räddningstjänstens taktiska val att använda fläkt är begränsad och den nödvändiga kapaciteten för att få önskad effekt bedöms bero på garagets storlek. Stora volymer kräver större kapacitet för att ge effekt. Effekten av fläkt, både med och utan inblandad vattendimma i tilluften, beror vidare på placering av tilluftsöppningen i relation till branden.
- Generellt utgör temperaturen inte en större risk utifrån de angivna acceptanskriterierna för räddningstjänstens säkerhet vid rökdykning. Garagets volym förutsätts däremot ha en stor påverkan, och vid mindre volymer kan temperaturen överstiga de angivna acceptanskriterierna.
- Sikten är generellt dålig oavsett vidtagna åtgärder, men då FDS innefattar stora osäkerheter blir resultatet i jämförelse med verkligheten opålitligt. Vid jämförelse av räddningstjänstens åtgärder ger fläkt med stor kapacitet den bästa effekten på sikten. Av de byggnadstekniska åtgärderna ger takhöjd den bästa effekten.



## 10. FRAMTIDA FORSKNING

Intresset för bilar med alternativa bränslen som el och gas ökar, och i framtiden kommer det troligen finnas betydligt fler sådana fordon. Detta innebär nya risker vid brand, som till exempel explosioner av gasflaskor och väldigt svårsläckta batteribränder. Just nu görs stora forskningsinsatser för att undersöka hur bränder i fordon med alternativa bränslen skiljer sig från bränder i bilar med vanligare drivmedel. En vidare undersökning av bränder i fordon med alternativa bränslen skulle därför vara en bra fortsättning på detta arbete.

Resultatet från de genomförda simuleringarna visar på en väldigt liten effekt vid användning av fläkt, som troligtvis beror på placeringen. Då garage i verkligheten har olika utformning och möjligheter för tilluft skulle det vara intressant att undersöka hur placeringen av fläkten och tilluftsöppningen i förhållanden till branden påverkar effekten på temperatur och sikt. Vidare skulle exempelvis en kompletterande fläkt placerad inne i garaget vara intressant att undersöka, då denna kan hjälpa till att styra luftflödet rätt om möjligheten till tilluft är begränsad.

I motsats till vad räddningstjänsten upplevt visar simuleringen med vattendimma i tilluften ingen vidare effekt på temperatur och sikt. En vidare undersökning av denna strategi, exempelvis genom olika sätt att simulera vattendimma, eller en jämförelse med verkliga försök, skulle kunna visa på ett annorlunda resultat.

Även användningen av rökluckorna skulle kunna variera, exempelvis genom att man endast öppnar rökluckorna närmast branden och håller resten stängda. Detta är en strategi som bland annat används vid ventilering av trapphus, där man endast öppnar fönster eller lucka i toppen av trapphuset. Vidare skulle även olika brandgasventilationssystem här kunna undersökas, exempelvis med inbyggd brandgasfläkt, eller liknande. Eftersom mängden bilar med alternativa bränslen ökar kan detta resultera i krav på mer omfattande brandgasventilation, och rökluckor kanske inte ger tillräckligt bra effekt i framtiden.

Utöver detta undersöktes endast garage av en storlek, vilket troligen påverkar hur förhållandena blir vid brand. Mindre volymer innebär mindre mängd kall luft och mindre kylande ytor, vilket troligen ger betydligt högre temperatur snabbare. En vidare undersökning av hur strategier skulle påverka förhållandena i mindre volymer skulle därför komplettera det genomförda arbetet och ge en bredare kunskap i ämnet.





## REFERENSER

- Arvidson, M., Ingason, H., & Persson, H. (1997). *Water Based Fire Protection Systems for Vehicle Decks on Ro-Ro Passenger Ferries*. Borås: Swedish National Testing and Research Institute.
- Babrauskas, V. (2016). Heat Release Rates. i M. Hurley, D. Gottuk, J. Hall Jr, K. Harada, E. Kuligowski, M. Puchivsky, . . . C. Wieczorek, *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering 5th Edition* (ss. 870-875). New York: Springer-Verlag.
- BBC News. (den 21 11 2018). Liverpool car park fire: Hundreds of burnt-out vehicles removed. Hämtat från <https://www.bbc.com/news/uk-england-merseyside-46290095> den 27 07 2020
- Boverket. (u.d.). *BFS 2013:12 - BBRAD 3*. Hämtat från Boverkets allmänna råd om analytisk dimensionering av byggnaders brandskydd: <https://rinfo.boverket.se/BBRAD/PDF/BFS2013-12-BBRAD3.pdf>
- Coldcut Systems. (den 05 03 2020). *Products: Coldcut Cobra*. Hämtat från Coldcut Systems: <https://www.coldcutsystems.com/products/c360hls-kit> den 16 11 2020
- Cox, G., & Kumar, S. (2002). Modeling Enclosure Fires Using CFD. i P. J. DiNenno, D. Drysdale, C. L. Beyler, W. D. Walton, R. L. Custer, J. R. Hall, & J. M. Watts Jr, *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering 3rd Edition* (ss. 3-194-3-218). Quincy: National Fire Protection Association.
- Drysdale, D. (2011). *An Introduction to Fire Dynamics*. (3rd, Red.) Chichester: John Wiley & Sons.
- Emilsson, E., Dahllöf, L., & Ljunggren Söderman, M. (2019). *Plastics in passenger cars*. Stockholm: IVL Swedish Environmental Research Institute.
- Forney, G. P. (2020). *Smokeview, A Tool for Visualizing Fire Dynamics Simulator Data Volume I: User's Guide*. National Institute of Standards and Technology.
- Forney, G. P. (2020). *Smokeview, A Tool for Visualizing Fire Dynamics Simulation Data Volume III: Verification Guide*. National Institute of Standards and Technology.
- Gradén, M., & Liljedahl, J. (2007). *Räddningsmanskapets säkerhet under insats - kriterier för analytisk dimensionering*. Lund: Department of Fire Safety Engineering, Lund University.
- Greif, H. (den 21 april 2020). personlig kommunikation.
- Haremza, C., Santiago, A., & Simões da Silva, L. (2013). Design of open steel and composite car parks under fire. *Advanced Steel Construction*, 9(4), 321-339.
- Hsu, M.-W., Lee, S.-K., Huang, L.-L., Chen, Y.-K., & Wu, C.-M. (2017). The Simulation of Fires in Underground Parking Floors by Fire Dynamic Simulator. *Sensors and Materials*, 29(4), 429-443.
- Karlsson, B., & Quintere, J. G. (2000). *Enclosure Fire Dynamics*. New York: CRC Press LLC.

- Kerber, S. (2006). *Evaluation of the Ability of Fire Dynamic Simulator to Simulate Positive Pressure Ventilation in the Laboratory and Practical Scenarios*. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology.
- Kumm, M., & Ingason, H. (2014). Entrainment in a Free Jet Generated by a Positive Pressure Ventilator. *Fire Technology*(50), 1499-1515.
- Li, Y., & Spearpoint, M. (2007). Analysis of Vehicle Fire Statistics in New Zealand Parking Buildings. *Fire Technology*, 43(2), 93-106.
- Lönnermark, A., & Blomqvist, P. (2006). Emissions from an automobile fire. *Chemosphere*, 62(7), 1043-1056.
- Lönnermark, A., Vylund, L., Ingasson, H., Palm, A., Palmkvist, K., Kumm, M., . . . Fridolf, K. (2015). *Rekommendationer för räddningsinsatser i undermarksanläggningar (SP Rapport)*. Borås: SP Fire Research.
- McGrattan, K., & Miles, S. (2016). Modeling Fires Using Computational Fluid Dynamics (CFD). i M. Hurley, D. Gottuk, J. Hall Jr, K. Harada, E. Kuligowski, M. Puchivsky, . . . C. Wiecek, *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering 5th Edition* (ss. 1034-1065). New York: Springer-Verlag.
- McGrattan, K., Hostikka, S., Floyd, J., McDermott, R., & Vanella, M. (2020). *Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide Volume 2: Verification*. National Institute of Standards and Technology.
- McGrattan, K., Hostikka, S., Floyd, J., McDermott, R., & Vanella, M. (2020). *Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide Volume 3: Validation*. National Institute of Standards and Technology.
- McGrattan, K., Hostikka, S., McDermott, R., Floyd, J., & Vanella, M. (2020). *Fire Dynamics Simulator User's Guide*. National Institute of Standards and Technology.
- McGrattan, K., McDermott, R., Vanella, M., Hostikka, S., & Floyd, J. (2020). *Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide Volume 1: Mathematical Model*. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology.
- Ministry of Business, Innovation & Employment. (2014). *Verification Method: Framework for Fire Safety Design*. Wellington: Ministry of Business, Innovation & Employment, New Zealand.
- Mohd Tohir, M., & Spearpoint, M. (2013). Distribution analysis of the fire severity characteristics of single passenger road vehicles using heat release rate data. *Fire Science Review*.
- Mulholland, G. W. (2002). Smoke Production and Properties. i P. J. DiNenni, D. Drysdale, C. L. Beyler, W. D. Walton, R. L. Custer, J. R. Hall Jr., & J. M. Watts, *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* (3rd uppl., ss. Section 2 - 258-268). Quincy, Massachusetts: National Fire Protection Association.
- Myndigheten för Samhällsskydd och Beredskap. (den 30 03 2020). Bränder i fordon utomhus. Karlstad. Hämtat från <https://ida.msb.se/ida2#page=d2f0f800-ecc6-409a-bee9-0055ef69e16c> den 07 07 2020

- Nystedt, F., & Frantzich, H. (2011). *Kvalitetsmanual för brandtekniska analyser vid svenska kärntekniska anläggningar*. Lund: Department of Fire Safety Engineering and Systems Safety, Lund University.
- Ohlemiller, T. J., & Shields, J. R. (1998). *Burning Behaviour of Selected Automotive Parts from a Minivan*. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology.
- Schleich, J.-B., Cajot, L.-G., Pierre, M., Brasseur, M., Franssen, J.-M., Kruppa, J., . . . Aurtenetxe, G. (1999). *Development of design rules for steel structures subjected to natural fires in closed car parks*. Bryssel: European Commission.
- Staffansson, L. (2010). *Selecting design fires*. Lund: Department of Fire Safety Engineering and Systems Safety, Lund University.
- Svensson, S. (2020). *Brandgasventilation*. Myndigheten för samhällsskydd och beredskap.
- Sveriges Brandkonsultförening. (den 31 Januari 2018). *Syfteshandboken: 47 BBR 5:732 - Brandgasventilation av källare*. Hämtat från Sveriges Brandkonsultförening: <https://www.brandkonsultforeningen.se/syfteshandboken/47-bbr-5732-brandgasventilation-av-kallare/> den 03 Augusti 2020
- Tewarson, A. (2002). Generation of Heat and Chemical Compounds in Fires. i P. J. DiNenno, D. Drysdale, C. L. Beyler, W. D. Walton, R. L. Custer, J. R. Hall Jr, & J. M. Watts, *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering 3rd Edition* (ss. 82-161). Quincy: National Fire Protection Association.
- Thunderhead Engineering. (den 16 11 2020). *Pyrosim User Manual*. Hämtat från Thunderhead Engineering: <https://files.thunderheadeng.com/support/documents/pyrosim-user-manual-2020-5.pdf>
- Trafikanalys. (2020). *Fordon 2019*. Trafikanalys.
- Versteeg, H., & Malalasekera, W. (2007). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics*. Upper Saddle River: Pearson Education.

## **I författarens ägo**

- Informant A, brandingenjör vid Räddningstjänsten Syd. 2020. Intervju den 5 augusti.
- Informant B, brandingenjör vid Räddningstjänsten Storgöteborg. 2020. Intervju den 9 juli.
- Informant C, brandingenjör vid Räddningstjänsten Storgöteborg. 2020. Intervju den 30 juli
- Informant D, brandingenjör vid Storstockholms brandförsvaret. 2020. Intervju den 7 juli.
- Informant E, brandingenjör vid Räddningstjänsten Östra Blekinge. 2020. Intervju den 24 juli.
- Informant F, brandingenjör vid Uppsala brandförsvaret. 2020. Intervju den 17 juli.



# BILAGA A

## Beräkning av tid till syrenivån påverkar brand

Total volym av garaget enligt ritningar

$$V_{tot} = 3375 \text{ m}^2 * 2,4 \text{ m} = 8100 \text{ m}^3$$

Luftens densitet vid 20 °C ger en total massa luft

$$m_{luft} = 8100 * 1,205 = 9760,5 \text{ kg}$$

23 vikt-% syre i luften ger

$$m_{ox} = 9760,5 * 0,23 = 2245 \text{ kg syre}$$

Kritisk syrenivå i luften är enligt Drysdale (2011) 15 vikt-% vid låg temperatur

$$m_{ox,crit} = 9760,5 * 0,15 = 1464 \text{ kg syre}$$

Maximal mängd syre i förbränning innan syrenivån börjar påverka branden blir då

$$\Delta m_{ox} = 2245 - 1464 = 781 \text{ kg}$$

Med förbränningsentalpi 13,1 kJ/g för syre ges en total frigjord energi enligt

$$Q_{tot} = 13,1 * 781000 = 10231100 \text{ kJ} \approx 10,2 \text{ GJ}$$

Total energi som garaget helt slutet klarar innan branden blir ventilationskontrollerad är alltså cirka **10,2 GJ**, dvs betydligt mer än en bil som enligt brandkurvan ger cirka **8,1 GJ** under hela brandförloppet. För den kombinerade branden har syremängden sjunkit till 15 vikt-% efter cirka 31 minuter.

## Beräkning av massfraktion vatten i tilluft

Totalt volymflöde på 31000 m<sup>3</sup>/h ger med luftens densitet vid 20 °C ett massflöde enligt

$$m_{f\_luft} = 31000 * 1,205 = 37355 \text{ kg/h} = 10,38 \text{ kg/s}$$

Totalt volymflöde på 60 l/m ger massflöde på

$$m_{f\_vatten} = 60 \text{ l/min} = 60 \text{ kg/min} = 1 \text{ kg/s}$$

Massfraktionen fås genom

$$\frac{1}{10,38 + 1} = 0,088$$

För inblandning av vatten med flöde 60 l/m i luft med flöde 31000 m<sup>3</sup>/h är massfraktionen för vatten 0,088.



# BILAGA B

## Indata till FDS-beräkningar

Generella simuleringsinställningar				
Simuleringstid	3600 s			
Visibility Factor	3			
Bränsle				
Atomsammansättning	C=4.7	H=8.3	O=0.5	N=0.4
CO_YIELD	0.02			
SOOT_YIELD	0.08			
HEAT_OF_COMBUSTION	38 950 kJ/kg			
Material – Betong				
SPECIFIC_HEAT	0.88 W/mK			
CONDUCTIVITY	1.1 J/kgK			
DENSITY	2100.0 kg/m <sup>3</sup>			
Branden				
HRRPUA	761.36			
Mesh				
Cellstorlek	0.2 m			
Antal celler/mesh	180 000 – 184 320			
Antal mesher	8			
Fläktar				
VOLUME FLOW *	8,61 m <sup>3</sup> /s			
VOLUME FLOW **	23,7			
MASS_FRACTION ***	0,088			

\* Scenario 2 & 4, se avsnitt 5.7.2 & 5.7.4

\*\* Scenario 3, se avsnitt 5.7.3

\*\*\* Scenario 4, se avsnitt 5.7.4

Exempel på RAMP (nerskalad till var 5:e sekund):

Time (s)	Fraction (F=)
0.0	0.0
5.0	0.0050
10.0	0.0200
15.0	0.0449
20.0	0.0798
25.0	0.1247
30.0	0.1796
35.0	0.2444
40.0	0.3192
45.0	0.4040
50.0	0.4588
55.0	0.6036
60.0	0.7183
65.0	0.8430
70.0	0.9777
71.0	1.0