



LUND UNIVERSITY

Fire safety distances for electric vehicles with damaged battery pack

Wilkens Flecknoe-Brown, Konrad; Runefors, Marcus

2024

Document Version:

Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link to publication](#)

Citation for published version (APA):

Wilkens Flecknoe-Brown, K., & Runefors, M. (2024). *Fire safety distances for electric vehicles with damaged battery pack*. Division of Fire Safety Engineering.

Total number of authors:

2

General rights

Unless other specific re-use rights are stated the following general rights apply:

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

Read more about Creative commons licenses: <https://creativecommons.org/licenses/>

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

LUND UNIVERSITY

PO Box 117
221 00 Lund
+46 46-222 00 00

Säkerhetsavstånd för elfordon med skadat batteripack

Konrad Wilkens Flecknoe-Brown och
Marcus Runefors
BRANDTEKNIK | LTH | LUNDS UNIVERSITET



Säkerhetsavstånd för för elfordon med skadat batteripack

Konrad Wilkens Flecknoe-Brown och Marcus Runefors

Lund 2024

SWE: "Säkerhetsavstånd för elfordon med skadat batteripack"

ENG : "Fire safety distances for electric vehicles (EVs) with damaged battery pack"

Konrad Wilkens Flecknoe-Brown och Marcus Runefors

Rapport 3268

Nyckelord : Säkerhetsavstånd; elektriska fordon; hybridfordon; Bilbränder, Krock

Abstrakt

I takt med att antalet elfordon har ökat så är andelen fordon av denna typ som är inblandade i trafikolyckor också ökat. Eftersom det i dessa fall finns risk för en fördröjd uppkomst av termisk rusning har många länder rekommendationer för säkerhetsavstånd från krockade elfordon till byggnader. Denna rapport är ett led i arbetet med att ta fram liknande vägledning för Sverige som Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (MSB) nu arbetar med. I denna rapport sammanfattas först vägledningar från vissa andra länder, följt av en mer detaljerad beskrivning av den vetenskapliga litteraturen. Analysen ledde till ett förslag på avstånd för personbilar på 4 meter, 8 meter för bussar och 5 eller 12 meter för lastbilar beroende på om de har last eller inte. För bedömning av nödvändig storlek på barriärer föreslogs en siktlinjebaserad metod och en brandklass på EI30. Bedömningarna är behäftade med en betydande osäkerhet på grund av bristen på data i litteraturen, men bedöms vara det bästa som är möjligt att genomföra utifrån tillgänglig information.

© Copyright:

Avdelningen för Brandteknik, Lunds tekniska högskola, Lunds universitet, Lund 2024.

Brandteknik
Lunds tekniska högskola
Lunds universitet
Box 118
221 00 Lund

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
Telephone: +46 46 222 73 60

Innehållsförteckning

1	Bakgrund.....	5
2	Allmän metodik	6
3	Sammanställning av andra länders rekommendationer.....	7
3.1	Tyskland	7
3.2	USA	7
3.3	Storbritannien	8
3.4	Australien	8
3.5	Nederländerna.....	8
4	Grundläggande teori.....	11
5	Sammanställning av vetenskaplig litteratur	12
5.1	Sammanfattning av strålningsnivåer	12
5.2	Sammanfattning av data gällande effektutveckling.....	14
5.3	Sammanfattning av övriga relevanta uppgifter i artiklarna	15
5.4	Data på bussar och lastbilar	16
6	Modeller för att beräkna strålningsnivåer på olika avstånd	17
6.1	Strålningsmodell baserad på branden som punktkälla.....	17
6.2	Strålningsmodell baserad på branden som en solid yta	17
6.3	3D-utveckling av strålningsmodellen för platta-till-punkt	17
6.4	Modell för strålning från fönsterflammar.....	18
6.5	Empirisk modell	18
7	Säkerhetsavstånd för personbilar	19
7.1	Säkerhetsavstånd baserat på strålning från bilbrand.....	19
7.2	Säkerhetsavstånd på grund av jetflammar.....	21
8	Säkerhetsavstånd för bussar och lastbilar	23
8.1	Säkerhetsavstånd för bussar.....	23
8.2	Säkerhetsavstånd från lastbilar	24
9	Barriärer	25
10	Slutsats och rekommendationer	26
11	Framtida forskning.....	27
12	Referenser	28

1 Bakgrund

I takt med att antalet elfordon har ökat på vägarna så är andelen fordon av denna typ som är inblandade i trafikolyckor också ökat. Eftersom det i dessa fall finns risk för en fördröjd uppkomst av termisk rusning utgör detta en utmaning för verkstäder eftersom de avråds från att förvara fordonen i sin verkstad. Även om den förvaras utanför verkstaden finns det en potentiell risk för att branden i fordonet sprider sig till verkstaden vilket gör att ett visst säkerhetsavstånd till byggnader normalt rekommenderas.

Hur långt avstånd som krävs varierar mellan olika aktörer och länder och bakgrunden till rekommendationerna dokumenteras sällan. Därför har Myndigheten för Samhällsskydd och Beredskap (MSB) gett i uppdrag till avdelningen för brandteknisk teknik vid Lunds universitet att undersöka litteraturen och så långt det är möjligt ta fram förslag på evidensbaserade avstånd.

Förslagen bör omfatta både personbilar, lastbilar (utan släp) och bussar. Eftersom risken endast ökar för batteriinducerade bränder bör endast detta scenario utvärderas, men både brand som sprider sig till kupén och jetflammar ska beaktas.

De skyddsvärda objekten är byggnader samt förvaring av brännbart material (för att förhindra eskalering). Rekommendationer om barriärdimensionering och brandklassning bör också ges.

2 Allmän metodik

I den inledande fasen av projektet gjordes en webbsökning efter vägledningar eller rekommendationer från andra länder. Detta var en begränsad sökning eftersom huvudmålet med projektet var att granska den vetenskapliga litteraturen om ämnet.

För sökning i den vetenskapliga litteraturen valdes Lunds bibliotekssystem (LUBsearch) och Scopus-databasen. LUBsearch och Scopus täcker tidskrifter och artiklar från de flesta stora förlag, inklusive de inom det brandtekniska området. Google Scholar och Googles sökmotor används för att komplettera och lokalisera hela texten i tidskriftsartiklar och tekniska rapporter eller vitböcker som inte publicerats på tidskriftsplattformar. En metod baserad på PRISMA- ScR -metoden [1] användes sedan för att kartlägga och filtrera den vetenskapliga litteraturen.

3 Sammanställning av andra länders rekommendationer

Baserat på vägledningen i projektbeskrivningen genomfördes en genomgång av de tyska rekommendationerna (av VDIK – Verband der Internationalen Kraftfahrzeughersteller eV) – ”*Tekniska karantänområden för skadade fordon med litiumjonbatterier* ¹”. Denna granskning utökades sedan och en grundläggande webbsökning gjordes för att undersöka andra länders rekommendationer om detta ämne. Dessa sammanfattas kort i detta kapitel.

3.1 Tyskland

Dokumentet av VDIK – Verband der Internationalen Kraftfahrzeughersteller eV – ”*Tekniska karantänområden för skadade fordon med litiumjonbatterier* ” ger följande allmänna rekommendationer:

- **5m från brännbart material**
- **>1,5m från obrännbar eller brandklassad vägg**
- Gärna utomhus
- Märkning av elfordon och karantänsområde (DGUV-krav)
- Eventuellt uppsamlingskärl för potentiellt läckande vätskor
- Förbud mot rökning och andra antändningskällor

3.2 USA

Dokumentet från National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) – “ *Interim Guidance for Electric and Hybrid-Electric Vehicles Equipped With High Voltage Batteries* ” ger allmän vägledning till olika intressenter som kan vara inblandade eller rycka ut till en trafikolycka som involverar ett elfordon (t.ex. ambulans, räddningstjänst eller polis).

Intressant nog gör NHTSA i början av dokumentet följande uttalande: "*NHTSA tror inte att elfordon utgör en större risk för brand efter en krasch än bensindrivna fordon. Faktum är att alla fordon – både elektriska och bensindrivna – har viss risk för brand vid en allvarlig krock. Elfordon har dock specifika egenskaper som bör göras tydliga för konsumenterna, räddningstjänsten och bärningsbilsoperatörer och lagringsanläggningar...* ”

Allmänna rekommendationer sammanfattas nedan (observera att endast rekommendationer som hänför sig till det aktuella projektintresset, dvs säkerhetsavstånd, sammanfattas här):

Vid olycksplatsen:

- **Flytta dig bort från fordonet och evakuera andra från det omedelbara området** om du upptäcker några ovanliga lukter eller upplever ögon-, näs- eller halsirritation.

Om en brand inträffar:

- Utrym närområdet
- Som vid alla fordonsbränder kan förbränningsprodukterna vara giftiga och alla individer som inte är ordentligt utrustade **bör inte befinna sig i vindriktningen eller nedanför fordonet** och vara ur vägen för mötande trafik.

¹ Sammanfattningen här är baserad på en maskinöversättningsversion av: Technische Quarantäneflächen päls beschädigte Fahrzeuge mit Lithium-Ionen-Batterien , utgiven av: Verband der Internationalen Kraftfahrzeughersteller eV

Efter olyckan:

- Förvara inte ett allvarligt skadat fordon med ett litiumjonbatteri inuti en byggnad **eller inom 50 fot (15 m) från någon byggnad eller fordon.**

Som framgår ovan så presenteras inga konkreta säkerhetsavstånd förutom värdet på 50 fot (cirka 15 m). Istället används termer som "bort från närområdet", "säker omkrets" och "säkert avstånd", som är öppna för tolkning.

3.3 Storbritannien

På GOV.UK-webbplatsen tillhandahåller Department for Transport ett vägledningsdokument med titeln "Recovery operators working with electric vehicles" (uppdaterad den 4:e december 2023) där det framgår följande:

- Aktuell branschvägledning säger att ett fordon som riskerar att hamna i en termisk rusning helst bör **hållas 15 meter från allt annat**. Det bör noteras att faror som projektiler kan finnas inom (och i vissa fall utanför) denna 15-meterszon. Det som ska prioriteras i detta scenario är att vända sig till räddningstjänsten, evakuera alla människor runt fordonet och dra sig tillbaka till en säker plats långt borta från fordonet.
- När du förvarar en elbil med ett misstänkt skadat högspänningssystem bör den helst befinna sig i ett utanför karantänområde, vilket är ett lämpligt avstånd från andra närliggande föremål. Enligt branschvägledning **anses 15 meter för närvarande vara ett säkert förvaringsavstånd mellan fordon**. Detta rekommenderade avstånd kanske inte kan uppnås i praktiken och som sådan bör riskbedömningar göras för att minska risken med att förvara fordon närmare varandra.

3.4 Australien

De olika staterna i Australien kan ge ut egen vägledning. Australian Capital Territory (ACT) och delstaten Queensland ger följande rekommendationer, baserat på dokumentet med titeln: "*Electric Vehicle Safety*" av ACT Emergency Service Agency (ESA) 2019 :

- Håll dig borta från fordonet och varna förbipasserande att hålla sig på säkert avstånd (**minst 30 meter**), även om det inte finns några synliga tecken på rök, ångor eller lågor
- Skadade elbilar bör förvaras på ett öppet område minst **15 meter** från andra fordon, byggnader och/eller andra skyddsvärda objekt.

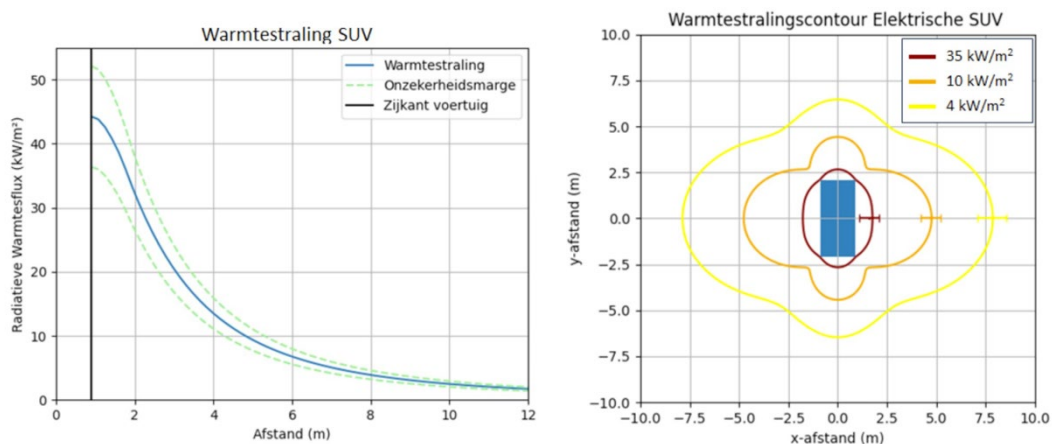
3.5 Nederländerna

Till skillnad från de andra länderna ovan har Nederländerna genom Instituut Publieke Veiligheid (NIPV) har tagit fram ett dokument med titeln: "Model for calculating heat radiation from electric vehicle fires ²".

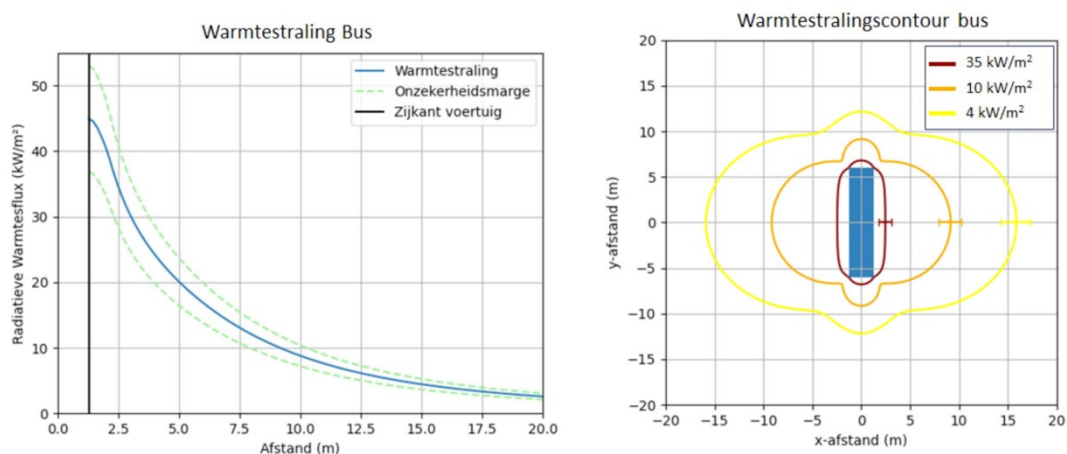
Huvudsyftet med detta projekt verkar vara att upprätta en beräkningsmodell för att beräkna värmestrålningen från elfordonsbränder. Modellen är baserad på indata från brandexperiment (t.ex. maximal effektutveckling) som används för att beräkna värmestrålningen på olika avstånd. Några exempelberäkningar har också utförts för 3 olika fordonstyper; en SUV, en buss och en lastbil med släp. De ger inga rekommendationer om faktiska säkerhetsavstånd, utan ger istället en metod för att

² Titel och sammanfattning här är baserad på en maskinöversättningsversion av: "Model voor het berekenen van de warmestraling van elektrische voertuigbranden" Nederlands Instituut Publieke Veiligheid (NIPV), 2024

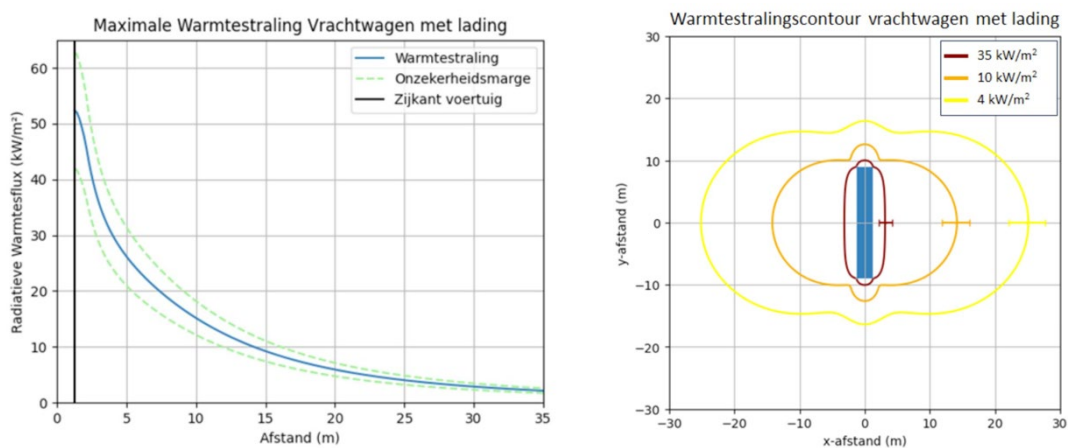
beräkna värmestrålningen vid ett givet avstånd baserat på de valda brandparametrarna. I rapporten återfinns figurer med strålningsnivån på olika avstånd från de tre exempelfordonen samt konturer som visar 4, 10 och 35 kW/m². Dessa återfinns i figur 1 , figur 2 och figur 3 nedan.



Figur 1- Värmestrålning på olika avstånd för en SUV



Figur 2- Värmestrålning på olika avstånd för en buss



Figur 3- Värmestrålning på olika avstånd för en lastad lastbil

Även om det inte tillhandahåller rekommenderat säkerhetsavstånd som sådant tillhandahåller detta dokument en metod för att bestämma säkerhetsavstånd genom att beakta den faktiska situationen snarare än att använda ett fast värde. Beräkningsmetoden bygger på rimliga principer, men har inte validerats mot experimentella data (något som tas upp senare i denna rapport).

4 Grundläggande teori

Huvudsyftet med det aktuella projektet var att sammanställa brandexperiment med både fossila bilar och elbilar i litteraturen för att bedöma risken för brandspridning. När vi undersöker vilka parametrar som påverkar brandspridningen tar vi hänsyn till de två dominerande fenomenen inom brandtillväxt, *antändningstid* och *flamspridningshastighet*.

Den tid det tar för ett material att antändas (t_{ig}) givet de rätta förutsättningarna, styr den initiala risken för att brand ska kunna spridas till andra material/föremål. När den väl antänds kommer flamspridningshastigheten, att dominera brandens tillväxt. Dessa två fenomen styrs av samma fundamentala parametrar, som visas i ekvation 1 och 2 [2].

$$t_{ig} = \frac{\pi}{4} k \rho c \frac{(T_{ig} - T_0)^2}{\dot{Q}_R''^2} \quad \text{- ekvation 1 (tid till tändning)}$$

$$V_f = \frac{\dot{q}_f''^2 \cdot L_p}{k_f \rho_f c_f (T_{ig} - T_0)^2} \quad \text{- ekvation 2 (flamspridningshastighet)}$$

Där variablerna; $k\rho c$, var för sig är kända som värmeledningsförmåga (k), densitet (ρ) och specifik värmekapacitet (c), tillsammans går de under begreppet *termisk tröghet* och är en materialegenskap som styr den hastighet med vilken ett material värms upp och når sin antändningstemperatur (T_{ig}). Inom ramen för detta projekt är dessa egenskaper relaterade till det påverkade materialet (dit branden riskerar att sprida sig) och är svåra att beakta eftersom det kan vara många olika typer av material och föremål.

$\dot{Q}_R''$ eller $\dot{q}_f''$ definieras som det inkommande eller nettovärmeflödet (kW/m^2) materialet i fråga tar emot (i detta fall främst bestående av strålning och därmed kommer begreppet strålning användas framöver). Detta är en parameter som bestäms av branden i elfordonet och är därmed den mest centrala faktorn i denna studie.

För att bestämma ett säkerhetsavstånd måste ett kritiskt värde för strålningen definieras. Ett vanligt val är att basera det på det kritiska värmeflödet för trä, som är väletablerat och funnits vara $12,5 \text{ kW/m}^2 \pm 2 \text{ kW/m}^2$ [3]. Det kan noteras att detta är något under värdet på 15 kW/m^2 som används i de svenska byggreglerna³ och därför mer konservativt. Det är också i linje med värdet för brandspridning mellan byggnader ($2,6 \text{ kW/m}^2$) som föreslås av Law [17]. På grund av detta kommer ett värde på $12,5 \text{ kW/m}^2$ att användas för att bestämma säkerhetsavstånden i denna rapport.

Baserat på diskussionen ovan förfinades sökningen i den vetenskapliga litteraturen för att söka och sammanställa experimentella data från brandexperiment som mätte strålningsnivåer eller effektutvecklingen (HRR), eftersom effektutvecklingen också direkt påverkar hur mycket strålning som avges av en brand.

³ Det kan noteras att Boverket i konsekvensanalysen jämför sitt värde med förslaget på $12,6 \text{ kW/m}^2$ i lag (1963) och skriver att det är lägre (SIC!) och därmed mer konservativt. (Boverket, 2018)

5 Sammanställning av vetenskaplig litteratur

Sökningar genomfördes i databaserna LUBsearch och Scopus med hjälp av söktermer som "electric AND vehicle OR car OR truck OR bus AND heat AND release AND rate" vilket ledde till att totalt cirka 294 tidskriftsartiklar identifierades. Dessa sammanställdes sedan till en Excel-databas och i enlighet med PRISMA-protokollet [1] filtrerades dessa och data ur de relevanta artiklarna extraherades för en mer detaljerad analys. Notera: användningen av "AND" betyder att ordet före och efter båda måste finnas i sökresultaten. Användning av ordet "OR" betyder att antingen det ena ordet eller det andra ordet kan finnas i dokumentet.

Tabell 1- nyckelord som används vid sökning och det resulterande antalet hittade dokument

Nyckelord som används	Sökkriterier	Antal artiklar
electric AND vehicle AND fire AND spread	Artikeltitel, Sammanfattning, Nyckelord	51
AND flux	Artikeltitel, Sammanfattning, Nyckelord	11
electric AND vehicle AND heat AND release AND rate	Artikeltitel, Sammanfattning, Nyckelord	110
electric AND vehicle OR car OR truck OR bus AND heat AND release AND rate	Artikeltitel, Sammanfattning, Nyckelord	122

De identifierade artiklarna från ovanstående sökningar laddades ner som referenslistor och sammanställdes sedan i Excel vilket resulterade i totalt cirka 299 artikelreferenser. Funktionen "ta bort dubletter" i Excel användes sedan för att ta bort alla dubletter i den sammanställda listan, vilket minskade den totala listan till cirka 180 artiklar.

Granskning av abstracts och hela artiklar.

I detta skede granskas abstracts i de återstående artiklarna och de relevanta artiklarna markerades och granskades därefter i fulltext. Efter granskningen av abstracts reducerades de 180 artiklarna till 62 och efter granskningen av artiklarna i fulltext bedömdes totalt 25 artiklar innehålla användbara data.

Artiklarnas relevans för detta projekt kan kategoriseras i tre huvudämnesområden:

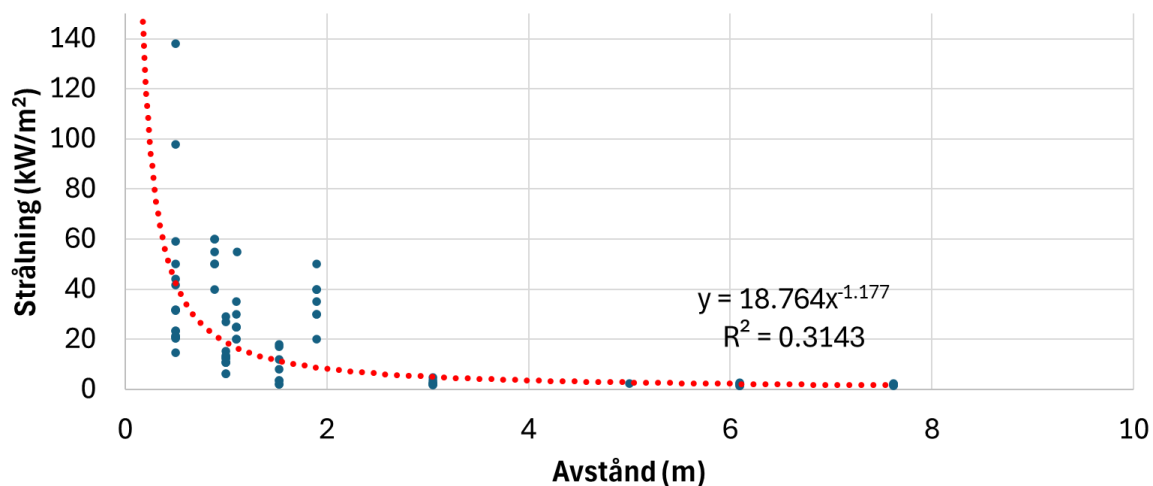
1. Artiklar som innehåller strålningsnivåer från fordonsbränder.
2. Artiklar som innehåller effektutveckling från fordonsbränder
3. Artiklar som ger ytterligare information som är användbar för studien (t.ex. jetflammar).

En fullständig lista över artiklar som inkluderades återfinns i bilaga A och ett urval av den mest relevanta informationen inom dessa tre kategorier från de insamlade artiklarna beskrivs nedan:

5.1 Sammanfattning av strålningsnivåer

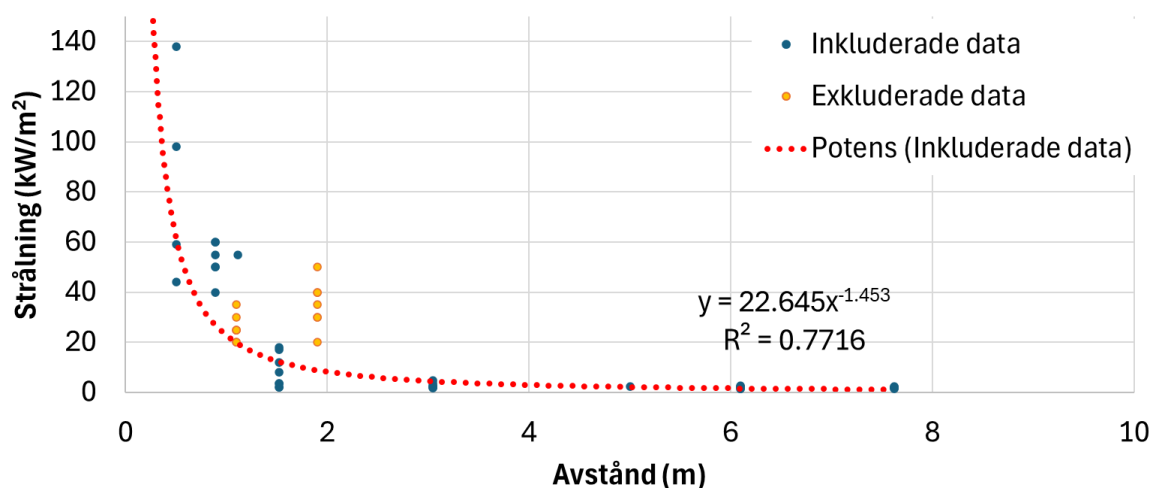
Av de 25 artiklarna hade fem artiklar ([4], [5], [6], [7], [8]) användbara strålningsnivåer som kunde extraheras. Detta sammanställdes till ett Excel-kalkylblad (se bilaga 2), tillsammans med metadata om de experimentella förutsättningarna, t.ex. avstånd från brandkälla, höjd över golvnivå för strålningsmätning, position jämfört med bilen etc. detta ledde till cirka 60 datapunkter med värmestrålning.

Figur 4 nedan visar dessa strålningsnivåer för olika avstånd från brandkällan. Det bör noteras att denna figur sammanställer all data som erhållits, dvs endast avståndet från brandkällan beaktades. Andra förutsättningar såsom position till bilen (t.ex. sida, fram eller bak) och höjden på strålningsmätaren beaktas inte.



Figur 4– Värmestrålning (blå punkter) för olika avstånd från brandkällan (röda punkter är den regression som bäst representerar de experimentella datamaterialet)

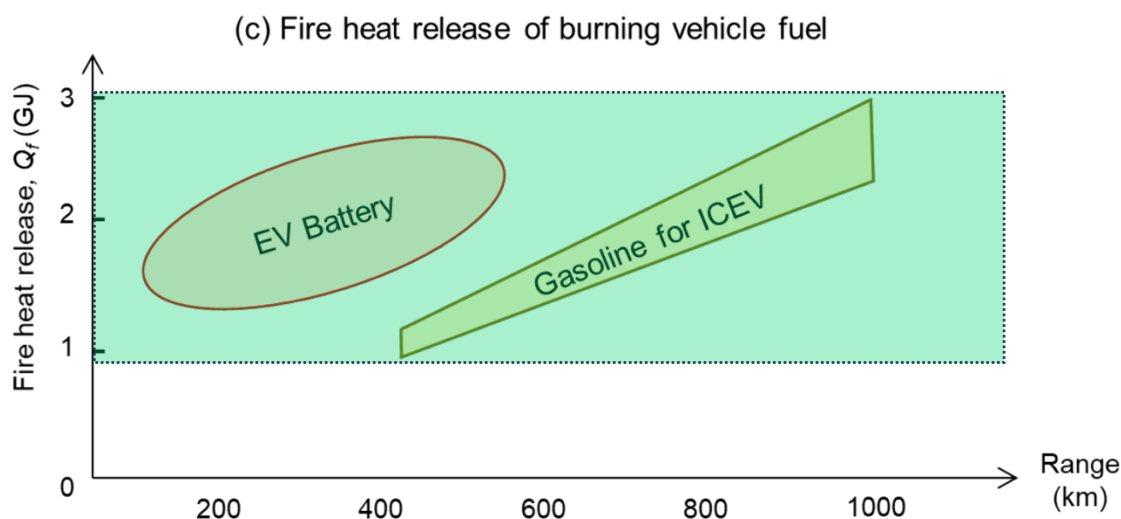
Efter att ha granskat resultatet som presenteras i figur 4 uteslöts en uppsättning datapunkter från uppsättningen (ca 14 datapunkter) på grund av att experimentella förhållanden i [8] skiljde sig från övriga och inte ansågs vara relevant då tändningen skedde med en mycket stor brännare som simulerade en pölbrand under fordonet vilket ledde till en simultan termisk rusning över stora delar av batterimodulen. Sammanställningen efter dessa data exkluderades återfinns i figur 5 nedan.



Figur 5 – inkluderade strålningsdata (blå punkter) och exkluderade data kontra avstånd från brandkällan (röda punkter är en potenskurva som passar bäst)

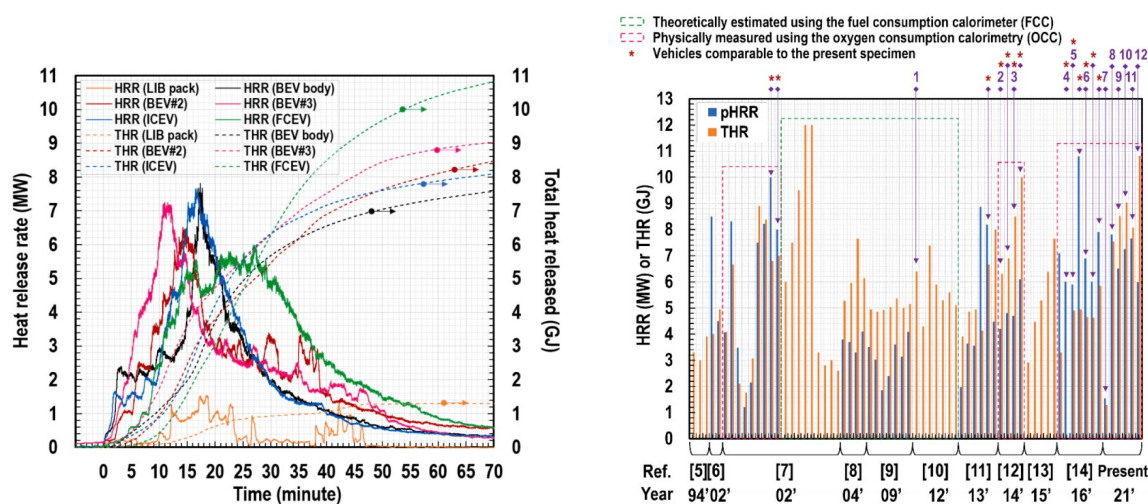
5.2 Sammanfattning av data gällande effektutveckling

Det finns redan flera review-artiklar i litteraturen som sammanställer data på effektutveckling för elfordon. När man analyserar dessa data och jämför med motsvarande för förbränningsmotorer verkar det för närvarande råa samsyn på att det inte finns någon skillnad i vare sig maximal effektutveckling eller total energiavgivning och som framgår i figur 6 så faller båda typerna av fordon ha energiavgivning på mellan 1-3 GJ. Med tanke på att de flesta materialen är likartade för både förbrännings och elfordon [7] innebär detta att brandstorlekarna också bör vara likartade och den största skillnaden mellan de båda typerna förefaller vara svårigheterna att släcka bränder i elfordon på grund av att batterimodulerna är mer otillgängliga [9].



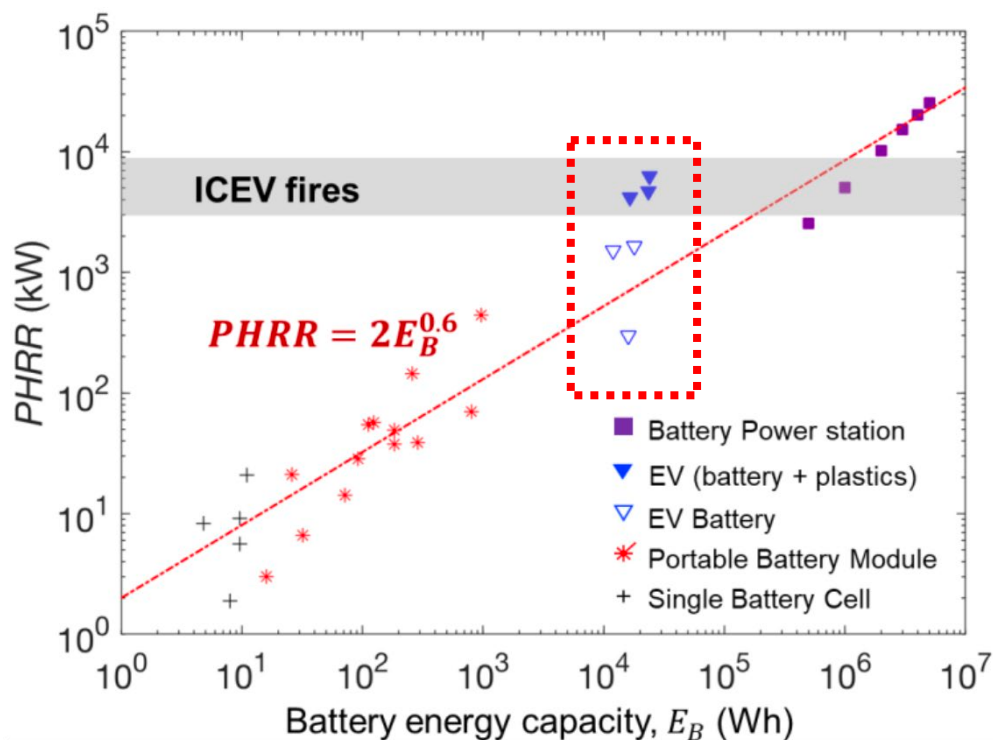
Figur 6– Jämförelse av total energiavgivning vid brand i förbränningsfordon jämfört med elfordon (tagen från [9])

Likheterna i brandbeteende mellan elfordon och fossila fordon kan även illustreras med exempelgraferna i figur 7 nedan.



Figur 7– Exempel av olika experimentella resultat som visar maximal effektutveckling och total energiavgivning för elbilar och förbränningsbilar (hämtade från [6])

I den omfattande review-artikeln från Sun et al. [9] sammanställer de en stor mängd resultat gällande maximal effektutveckling i relation till batterikapacitet och kunde därmed härleda ett samband mellan batteriets kapacitet (Wh) och den maximala effektutvecklingen vid brand (kW). Denna styrker ytterligare likheten mellan förbränningsmotorer och elfordon och återges i figur 8 nedan.



Figur 8– samband mellan batterikapacitet och topp HRR, även jämfört med ICEV-bränder (markering i streckad röd ruta). [9]

5.3 Sammanfattning av övriga relevanta uppgifter i artiklarna

Ytterligare fenomen av intresse med avseende på elbilsbränder inkluderar observationer av jetbränder från batterimodulerna, gasmolnsexplosioner och produktion av giftiga arter. När det gäller riskerna för brandspridning kan jetbränder vara en bidragande orsak och observeras ofta vid försök [10].

Experimentella data om detta fenomen är dock mycket ovanliga [11].

Endast två referenser med mer detaljerad information om jetflammar (t.ex. avseende längd) kunde hittas i litteraturen [12], [13] och dessa innehöll totalt fyra observationer vilka sammanfattas i tabell 2 nedan.

Tabell 2– observationer av flammors varaktighet och längd [12], [13]

Biltyp	Riktning	Observation	Varaktighet (s)	Längd
BEV	Sida	Jetbrand	3	<2 m
BEV	Sida	Jetbrand	11	<2 m
BEV	Bak	Jetbrand	26	2,5 m
BEV	Sida	Jetbrand	Okänd	2,564 m



Figur 9– Den längsta jetlågor som observerades i [13]

5.4 Data på bussar och lastbilar

Experimentell data gällande bussar och lastbilar saknas nästan helt i litteraturen [14], [15]. En uppskattning baserat på de knappa uppgifterna är enligt nedan.

- Bussar: 30-35MW
- Lastbil med last: upp till 70MW (mycket beroende av last)

6 Modeller för att beräkna strålningsnivåer på olika avstånd

Detta avsnitt beskriver kortfattat de modeller som används för att beräkna strålningsnivån på olika avstånd.

Modellen från NIPV-dokumentet (*Model voor het berekenen van de warmtestraling van elektrische voertuigbranden*) Nederlands Instituut Publieke Veiligheid (NIPV), 2024)) inkluderas också här för att kunna jämföra denna mot övriga modeller och det insamlade experimentella datamaterialet.

6.1 Strålningsmodell baserad på branden som punktkälla

Punktkällamodellen [16] är ett förenklat tillvägagångssätt för att uppskatta värmestrålningen från bränder. Den förutsätter att hela branden avger strålning som om den vore en enda punktkälla och att branden strålar jämnt i alla riktningar (isotrop emission). Atmosfärisk dämpning och hinder mellan branden och observationspunkten försummas.

$$q'' = \frac{\dot{Q} \cdot \chi_r}{4\pi R^2}$$

I ekvationen är $\dot{Q}$ effektutvecklingen (kW), χ_r är strålningsandelen (vanligtvis antagen som 30-35%) och R är avståndet från flamans centrum till målets närmaste punkt.

6.2 Strålningsmodell baserad på branden som en solid yta

Modellen baserad på solida flammor [16] är ett mer detaljerat tillvägagångssätt jämfört med punktkällasstrålningsmodellen som syftar till att bättre approximera geometrin hos flammen och strålningsbeteendet för riktiga bränder. Detta är särskilt viktigt relativt nära branden (dvs vid höga strålningsnivåer som är mest relevant för antändning).

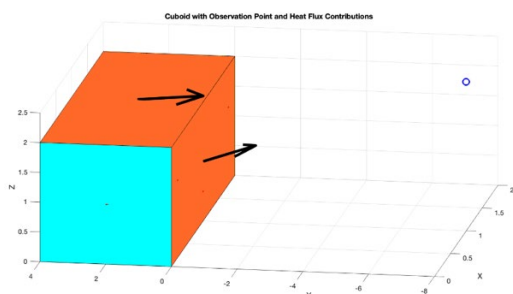
Branden representeras som en geometrisk form, och flamytan behandlas som en kontinuerlig strålände yta, med en specificerad avgiven strålning per ytenhet.

$$q'' = E_s \cdot F$$

Där E_s är ytans avgivna strålning (kW/m²) och F är synfaktorn beräknad från den geometriska form som valts för att representera elden och avståndet till målet. Vanligen används en approximation baserad på cylinder, men även kon förekommer.

6.3 3D-utveckling av strålningsmodellen för platta-till-punkt

Ett MATLAB-skript baserat på standardstrålningsmodellen platta-till-punkt-modell utvecklades inom detta projekt. Platta-till-punkt-modellen är en metod för att uppskatta strålningsvärmeflödet från en plan yta (platta) till en specifik punkt, liknande modellen med solida lågor. Den strålände ytan är approximerad som en plan, ändlig platta med en enhetlig avgiven strålning eller med en angiven temperatur. Den största skillnaden för denna modell är att den är baserad på plattor i tre dimensioner för att bilda en typ av strålände "låda". Strålningen på en given punkt kan därefter beräknas genom att summera bidragen från respektive sida som ligger inom synvinkel från punkten i fråga, se figur 9.



Figur 10– MATLAB-modell, med 3D-värmeplattor för att modellera strålning från EV, svarta pilar indikerar värmefflödesvektorer från de strålande ytor som påverkar mätpunkten (blå cirkel placerad till höger om figuren).

6.4 Modell för strålning från fönsterflammar

En populär variant av solid-flame-modellen är modellen baserad på fönsterarea utvecklad av Law [17] där en viss nivå av avgiven strålning per fönsterarea antas. Denna modell används i flera länders byggregler för att beräkna avstånd mellan byggnader (inklusive den svenska).

Modellen anger att avgiven strålningen per fönsterarea är 167 kW/m^2 ($4 \text{ cal/cm}^2\text{s}$) om inte brandbelastningen är under 25 kg/m^2 golv- eller fönsterarea⁴ och i så fall är den utgående strålningen 84 kW/m^2 ($2 \text{ cal/cm}^2\text{s}$). Den inkommande strålningen beräknas sedan genom användning av platta-till-punkt-modellen som beskrivs ovan.

Även om den är utvecklad för byggnader snarare än fordon, kan den ses som en första approximation i situationer med brist på data.

6.5 Empirisk modell

Alla analytiska modeller bygger på antaganden som i många situationer kan vara relativt grova. Därför är ett alternativ att basera minskningen av strålningen genom en regression av experimentella data kompletterat med säkerhetsfaktorer.

En empirisk modell baserad på uppmätt strålning över avstånd har också utvecklats inom IRIS-projektet brandspridningsrisker i informella bosättningar [18], [19], [20], [21]. Baserat på deras experimentella data föreslås korrelationen [18]:

$$q'' = 4.26 + 123.8e^{-1.3589d}$$

Där; d är avståndet från brandkällan till den aktuella punkten, q är det infallande värmeflödet till punkten.

⁴ Ytan avser fönsteryta om utrymmet är väl ventilerat och i annat fall golvytan.

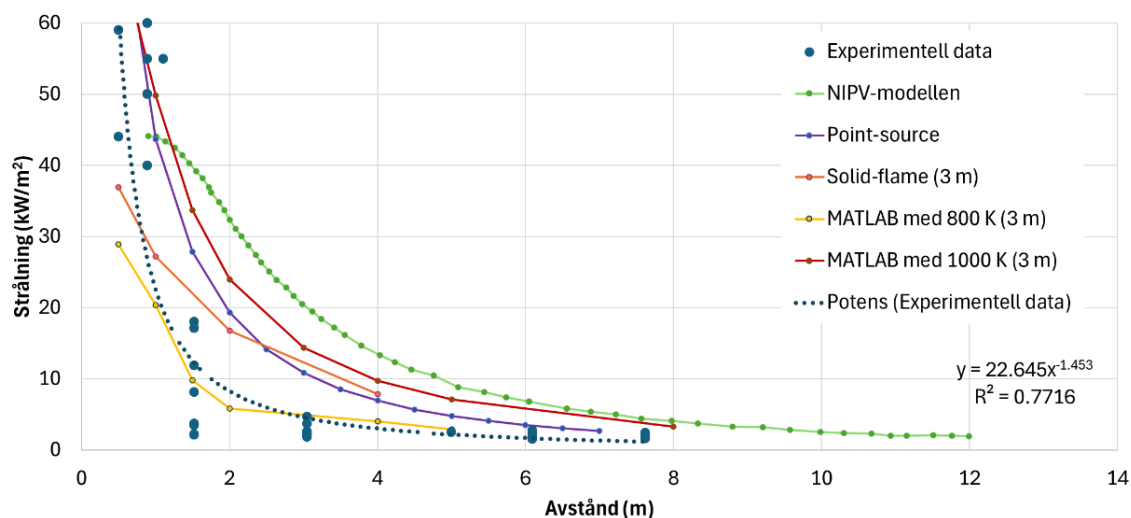
7 Säkerhetsavstånd för personbilar

För att ta fram en metod för att uppskatta säkerhetsavståndet för personbilar jämför vi först de olika beräkningsmetoderna med de sammanställda experimentella data för att göra en bedömning av de olika modellernas prediktiva förmåga för fordon av personbilsstorlek.

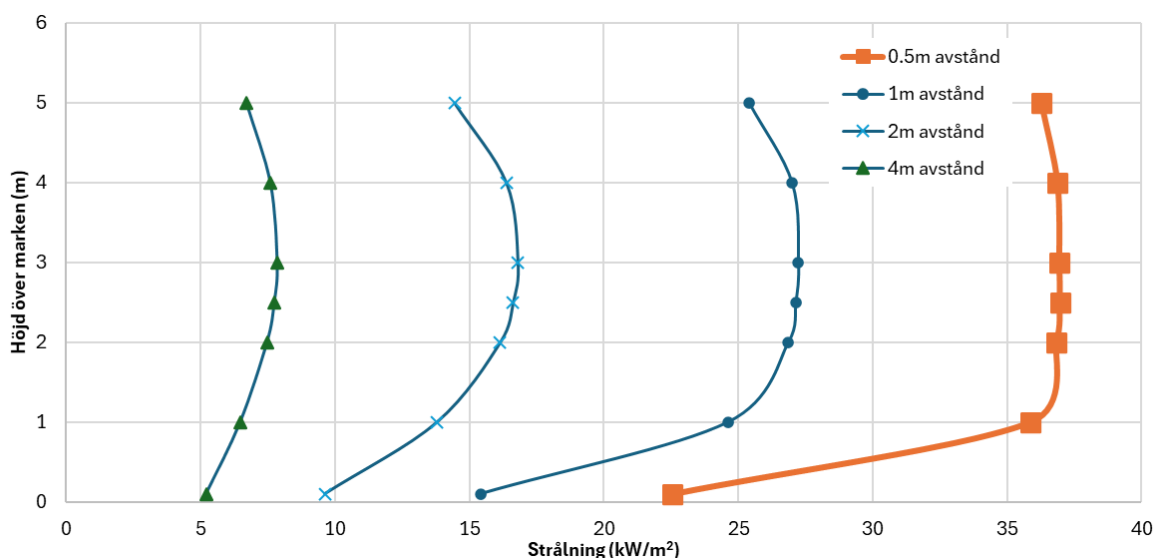
7.1 Säkerhetsavstånd baserat på strålning från bilbrand

Indata till de olika modellerna valdes på två olika sätt. För att jämföra punktkälla och solid-flammodellerna med NIPV-modellen användes liknande indata som de valde i den rapporten. Detta innebär att en brandstorlek på 7,2 MW används vilket är konservativt, men inom det identifierade intervallet för maximal effektutveckling. För MATLAB-modellen testades en platttemperatur på 800 och 1000 K.

Avståndet varierar i beräkningarna för att kunna jämföra resultatet med experimentserien (se *Figur 10*). För modeller där höjden från marknivå också behöver anges (solid-flame-modellen och MATLAB-modellen) valdes 3m baserat på en beräkning av strålningsnivån på olika höjder och olika avstånd som presenteras i *figur 11*. Det framgår att de analytiska modellerna genomgående ger väsentligt högre strålningsnivåerna än det experimentella datamaterialet.



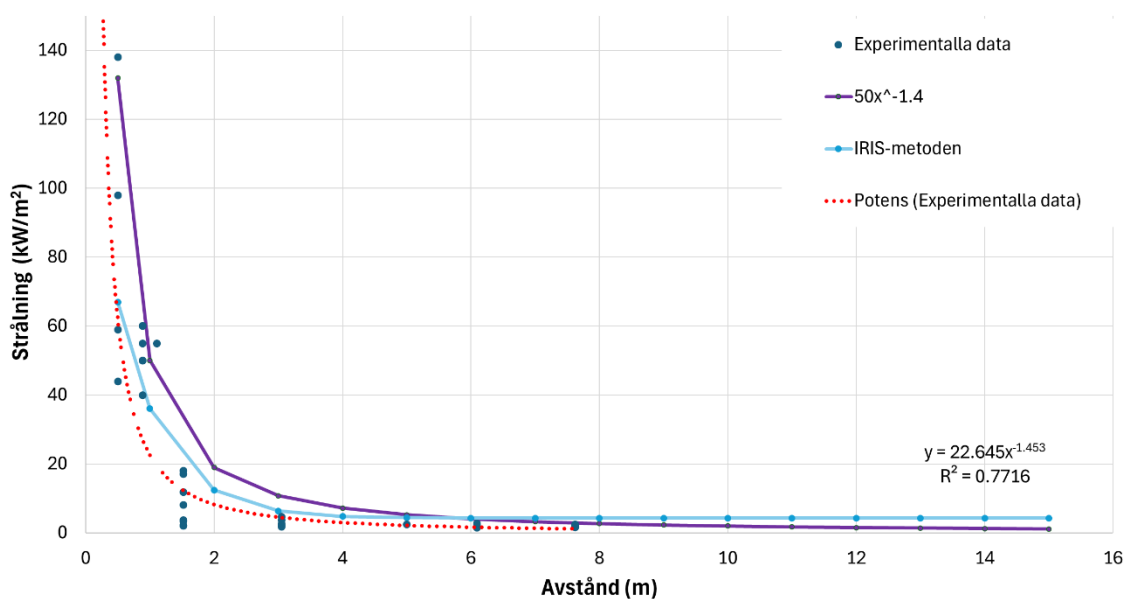
Figur 11– experimentella data jämfört med beräknat resultat. (Notera att 3m betyder att beräkningen gjordes på en höjd av 3m över golvnivån)



Figur 12– Värmestrålning för olika höjder över marknivå (baserat på modell med solid flamma).

Tre empiriska modeller testas också där den första är en grundläggande regression av experimentdata med en potensmodell. Detta ger dock ett medelvärde mellan experimentpunkterna och kan därför anses vara något icke-konservativt. För att hantera detta inkluderades ytterligare en kurva (se den lila linjen in *Figur 12*) som är baserad på den initiala kurvanpassningen, men med en säkerhetsfaktor. Fördelen med denna är att den medvetet gjordes mer konservativ för att täcka majoriteten av experimentella datapunkter som samlats in. Korrelationen från IRIS-projektet [18] läggs också till och jämförs i *figur 12* .

Fördelarna med dessa modeller är i deras enkelhet eftersom allt som krävs för att beräkna värmestrålningen på vilket avstånd som helst är själva avståndsmätningen (i meter). Detta möjliggör mycket mer praktisk tillämpning av denna beräkningsmetod och minskar också behovet av antaganden som behövs för de teoretiska modellerna.



Figur 13– Strålningsnivå från bilbränder för olika avstånd baserat på empiriska modeller

Baserat på analysen ovan föreslås följande empiriska samband för strålning på olika avstånd från personbilar.

$$q'' = 50x^{-1.4}$$

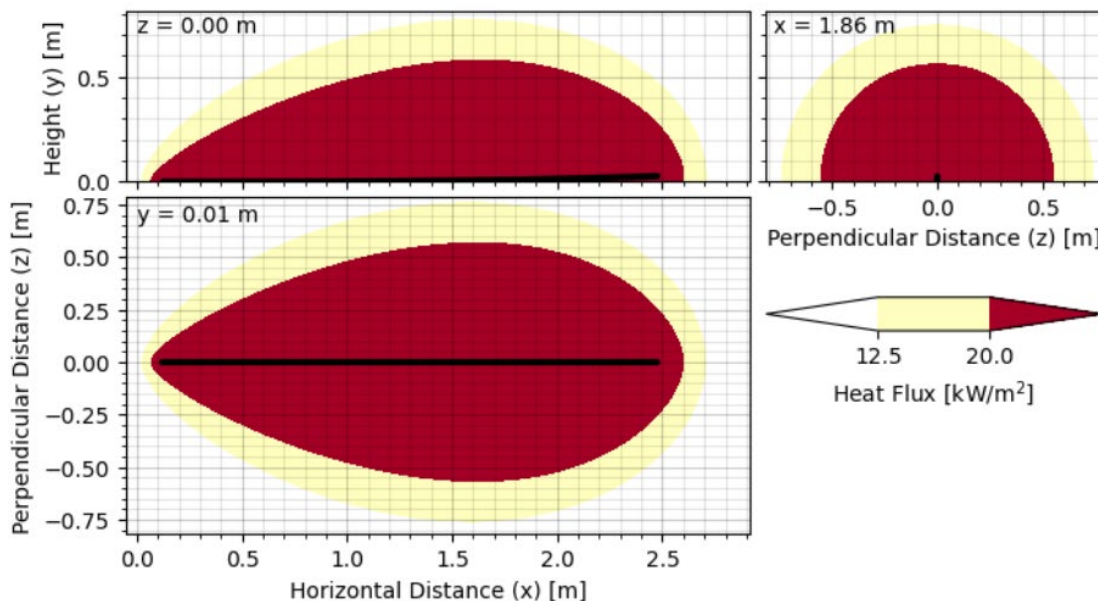
Där q'' är den infallande värmestrålningen x meter från brandkällan. Denna bedöms ha den mest praktiska att använda samtidigt som den ger rimliga värden. Om denna modell används för att beräkna avståndet till den föreslagna kritiska strålningsnivån på $12,5 \text{ kW/m}^2$ blir resultatet enligt nedan.

$$12.5 = 50x^{-1.4} \rightarrow x \approx 2.7 \text{ m} \rightarrow x \approx 3 \text{ m (avrundat till närmsta heltal ovan resultatet)}$$

Utifrån denna analys föreslås ett säkerhetsavstånd på 3 m för strålning från personbilsbrand. Denna siffra är även liknande de som erhålls med övriga modeller förutom NIPV-modellen som ger längre avstånd.

7.2 Säkerhetsavstånd på grund av jetflammar

Som beskrivs i avsnitt 5.3 är litteraturen om jetflammar mycket knapphändig, och de två referenserna som hittats indikerar att jetflammar kan sträcka sig upp till ca 2,5 m till sidan av fordonet. Om vi utgår från en förenklad gassammansättning för termisk rusning bestående av väte, metan och koldioxid i lika proportioner och väljer värden på tryck och hålorlek för att efterlikna flammen som beskrivits i litteraturen, kan följande strålningsnivåer beräknas med hjälp av datorprogrammet HyRAM framtagen av Sandia National Laboratories.



Figur 14– Strålningsnivåer runt en jetflamma från en termisk rusning

Det kan ses att strålningsnivån understiger de identifierade kritiska nivåerna bara strax efter flamlängden (<10%). Detta beror på en kombination av faktorer, inklusive följande;

- Temperaturen är högst (och därmed strålningen starkast) på cirka 60-70 % av lågans längd.
- Synfaktorn är liten eftersom flammen liknar en liten cirkel sett nedströms lågan
- Flera av de vanliga gaserna i batterigaser har en låg strålningsandel.

Det bör också noteras att nedströms flammen är gashastigheterna är mycket höga och syrehalterna låga. Det förstnämnda leder till en utspädning av pyrolysgaserna som bildas vid uppvärmningen av

det skyddsvärda objektet och de låga syrenivåerna försvårar antändning. Det är därför troligt att antändning endast kan ske på avstånd understigande flammans längd. Detta antagande saknar dock empirisk verifiering och detta tillsammans med den begränsade tillgången på empiriska data och den samma utvecklingen inom batteriteknik gör en konservativ analys nödvändig.

Därför rekommenderas en säkerhetsfaktor på 50 % i förhållande till ovanstående innebär ett föreslaget säkerhetsavstånd på 4 meter (2,7 x 1,5) för personbilar.

8 Säkerhetsavstånd för bussar och lastbilar

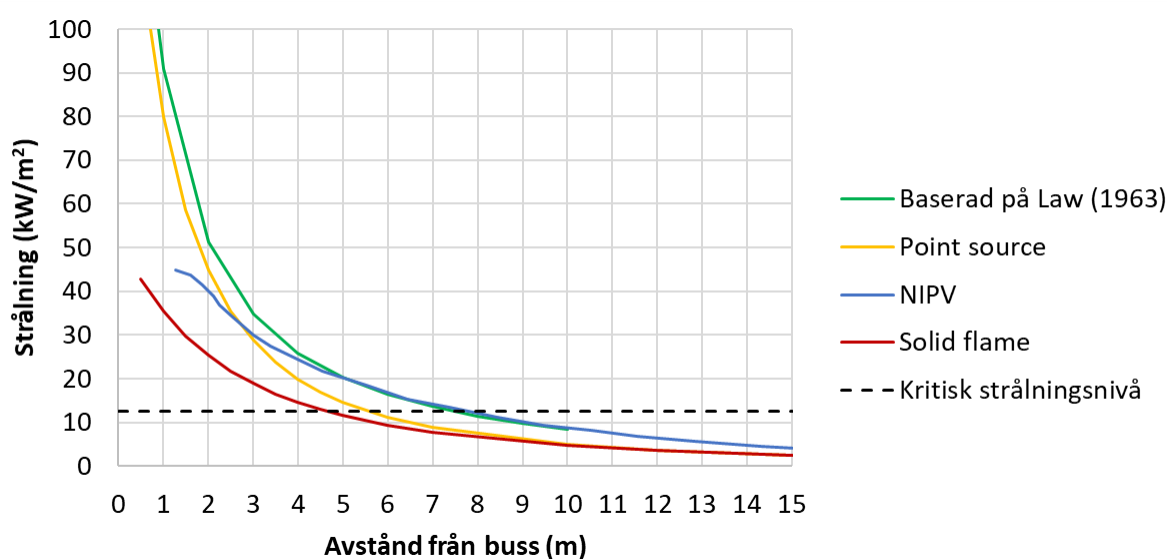
8.1 Säkerhetsavstånd för bussar

Även om ett fåtal fullskaliga experiment med brinnande bussar har identifierats i litteraturen (t.ex. Andersson et al. [22]) inkluderade ingen av dessa strålningsmätningar. Topptemperaturen i utrymmet visade sig dock vara något under 1000°C (Andersson et al., [22]) och en visuell undersökning av bilderna tyder på att lågor sträcker sig 3-4 meter åt sidan (eftersom det verkar vara en blåsig dag).

På grund av bristen på experimentella data föreslås ett analytiskt tillvägagångssätt. I Law [17] föreslås att en avgiven strålning på 167 kW/m^2 baserat på fönsterarean. Detta motsvarar en gastemperatur på 1100°C , vilket är liknande, men något högre än det experimentella värdet som nämnts ovan.

Fönsterytan baseras på en ledad Volvo 7900 elbuss som är lika med $17,5\text{ m} \times 1,3\text{ m}$ (den icke-ledade bussen ger väldigt lika avstånd).

Utifrån detta kan följande samband härledas.

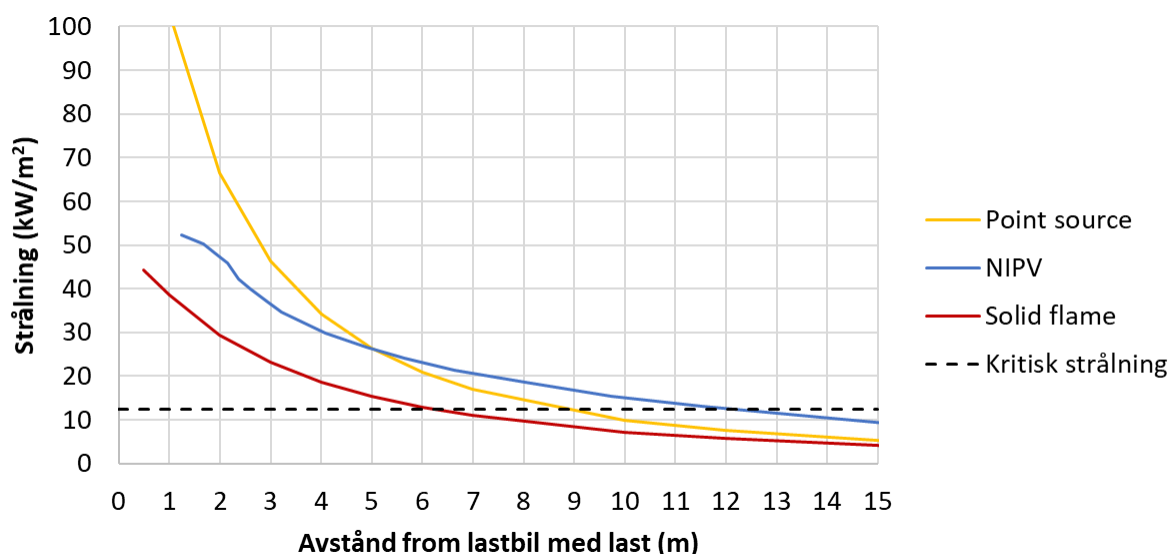


Figur 15– Avstånd till kritisk värmestrålning för bussar med streckad linje vid $12,5\text{ kW/m}^2$.

Metoden utvecklad av Law [17] och NIPV-metoden ger båda säkerhetsavstånd på cirka 7,5 meter medan punktkällmodellen ger cirka 5,5 meter vilket liknar solid-flame-modellen. På grund av osäkerheten och bristen på experimentella data föreslås ett konservativt värde på 8 meter. Detta är också betydligt längre än lågorna som syns på bilder från bränder i bussar.

8.2 Säkerhetsavstånd från lastbilar

Även för lastbilar är litteraturen om strålning knapphändig, vilket kräver användning av uteslutande analytiska modeller. Resultaten hittar du nedan.



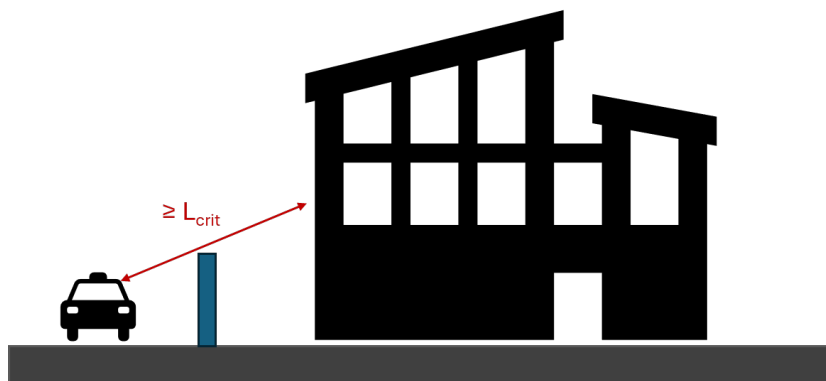
Figur 16– Avstånd till kritisk strålningsnivå för lastbilar med last baserat på olika modeller inklusiv streckad linje vid 12,5 kW/m².

Alla modeller utom NIPV-modellen ger säkerhetsavstånd något under 10 m, medan NIPV-modellen ger 12 meter. Eftersom NIPV-modellen tidigare har visat sig ge överkonservativa värden rekommenderas ett säkerhetsavstånd på 10 m.

För en olastad lastbil användes metoden som utvecklats av Law [17] och utifrån en fönsterarea på framrutan 2,5x0,9 m baserat på datablad för en modern elektrisk lastbil erhöles ett avstånd till kritisk strålning på 3 meter. Men på grund av bristen på experiment och relativt stora batterier som potentiellt kan resultera i längre jetflammar, rekommenderas ett något mer konservativt värde på 5 meter.

9 Barriärer

En barriär med tillräcklig brandklassning kommer att begränsa strålningen mot det skyddsvärda objektet genom att blockera siktlinjen. Barriärens exakta påverkan på strålningen är ganska komplex eftersom perspektivet på fordonet, och därmed flammorna, kommer att variera. Även om det är teoretiskt möjligt att ta fram modeller som beaktar detta så innebär osäkerheten i beräkningarna i tidigare kapitel och behovet av ett praktiskt tillämpbart resultat att det inte bedöms vara lämpligt. Istället rekommenderas en förenklad metod baserat på siktlinjen där den närmaste siktlinjen mellan fordonet och byggnaden ska vara lika med värdena i tidigare kapitel.



Figur 17– Illustration av siktlinjemetoden för barriärdimensionering.

En relaterad fråga är behovet av brandklassificering. Om barriären är nära fordonet kommer lågor att slå in i barriären vilket ger en betydande termisk påverkan på barriären. Om barriären är längre från fordonet är den termiska påverkan mindre, men för att göra rekommendationen praktiskt användbar föreslås en enda brandklassificering. Även i detta avseende finns en betydande osäkerhet, men en brandklassning på EI 60 har visat fungera mycket bra i de flesta brandscenarier och kan därför ses som ett konservativt val. På grund av exponeringens relativt korta varaktighet kan dock en sänkning till EI30 motiveras utan att detta ökar risken. Denna bedöms kunna motstå både påverkan från det brinnande fordonet och eventuella jetflammar⁵. Barriärer utan isolering (t.ex. stålplåt) skulle kunna användas i kombination med säkerhetsavstånd vinkelrätt mot barriären men bör verifieras genom beräkningar.

Oavsett val av klass behöver materialen väljas så att barriären kan motstå både väder, förväntad mekanisk påverkan från verksamheten och släckvatten. Barriären bör även ha ett avstånd till fordonet så att en släckinsats kan utföras på samtliga sidor av fordonet.

⁵ Det finns begränsad tillgång på försök med jetflammar och barriärmaterial, men indikativa experiment utförda av Runefors[23] tyder på att en EI30-konstruktion kan motstå en vätgasjetflamma under mer än 10 minuter. Med tanke på att en jetflamma från ett batteri förväntas ha både lägre temperatur och kortare varaktighet så bedöms EI30 även kunna motstå jetflammar från fordon.

10 Slutsats och rekommendationer

Litteraturgenomgången resulterade i 25 artiklar med relevanta från fordonsbränder som – alla för personbilar. Resultaten visade ingen indikation på skillnad på den maximala strålningen mellan el- och fossilfordon och därmed kombinerades båda typerna i analysen. Trots att de experimentella förhållanden varierade mellan försöken härleddes en användbar empirisk modell för strålningen för olika avstånd och denna gav ett kortare avstånd än de rent analytiska modellerna.

För bussar och lastbilar hittades inga användbara försök, men eftersom de analytiska modellerna visade sig vara konservativa för personbilar användes samma typ av modeller även för bussar och lastbilar. Detta förväntas ge längre avstånd än experimentdata, men eftersom rekommendationer behövs och antalet fordon är färre sågs detta som acceptabelt i väntan på experimentella data.

Uppgifterna om jetflammar från fordon var ännu mer begränsade och endast två artiklar kunde identifieras som båda indikerade jetflammar i storleksordningen 2,5 m för personbilar medan inga data hittades för lastbilar eller bussar. För personbilar förordades det att en säkerhetsfaktor på 50 % användas bör användas för potentiell antändning av jetflammar från bilar vilket innebär ett säkerhetsavstånd på 4 m (att jämföras med 3 m för endast kupébrand). För bussar och lastbilar med last bedömdes att avståndet från brand i passagerarutrymmet respektive lasten (8 resp 12 m) var längre än eventuella jetflammar. För lastbilar utan last bedömdes dock det strålningsbaserade avståndet på 3 meter vara icke-konservativt för jetflammar. Eftersom experimentella data på jetflammar från lastbilar helt saknas valdes ett avstånd på 5 meter då batterierna är större än personfordon och därmed troligen även de potentiella jetflammorna. Detta är dock ett grovt antagande som bör undersökas närmare i framtiden.

Analysen resulterade i följande rekommenderade avstånd för att förhindra att en potentiell brand i ett krockat elfordon sprider sig till en närliggande byggnad eller lager av brännbart material baserat på en kritisk strålningsnivå på $12,5 \text{ kW/m}^2$.

- Personbil – 4 m
- Buss – 8 m
- Lastbil (utan last) – 5 m
- Lastbil (med last) – 12 m

Avståndet mäts från närmaste yta på fordonet. Om en barriär (EI30) placeras mellan fordonet och byggnaden bör avståndet i närmaste siktlinje mellan fordonet och byggnaden nå detta värde, se figur 15.

11 Framtida forskning

På grund av de spridda resultaten i litteraturen och bristen på experiment (inte minst för bussar och lastbilar) har ett konservativt tillvägagångssätt behövts. Det rekommenderas därför att ytterligare experiment utförs för att ge mer exakta data som med största sannolikhet skulle resultera i en minskning av avstånden som föreslagits ovan.

Dessutom är de flesta av modellerna som testas i denna rapport analytiska modeller och ingen mer komplex modell så som till exempel CFD användes eftersom de var utanför detta projekts ram. Det skulle vara relevant att undersöka några mer komplexa modeller och jämföra resultaten med dem i denna rapport.

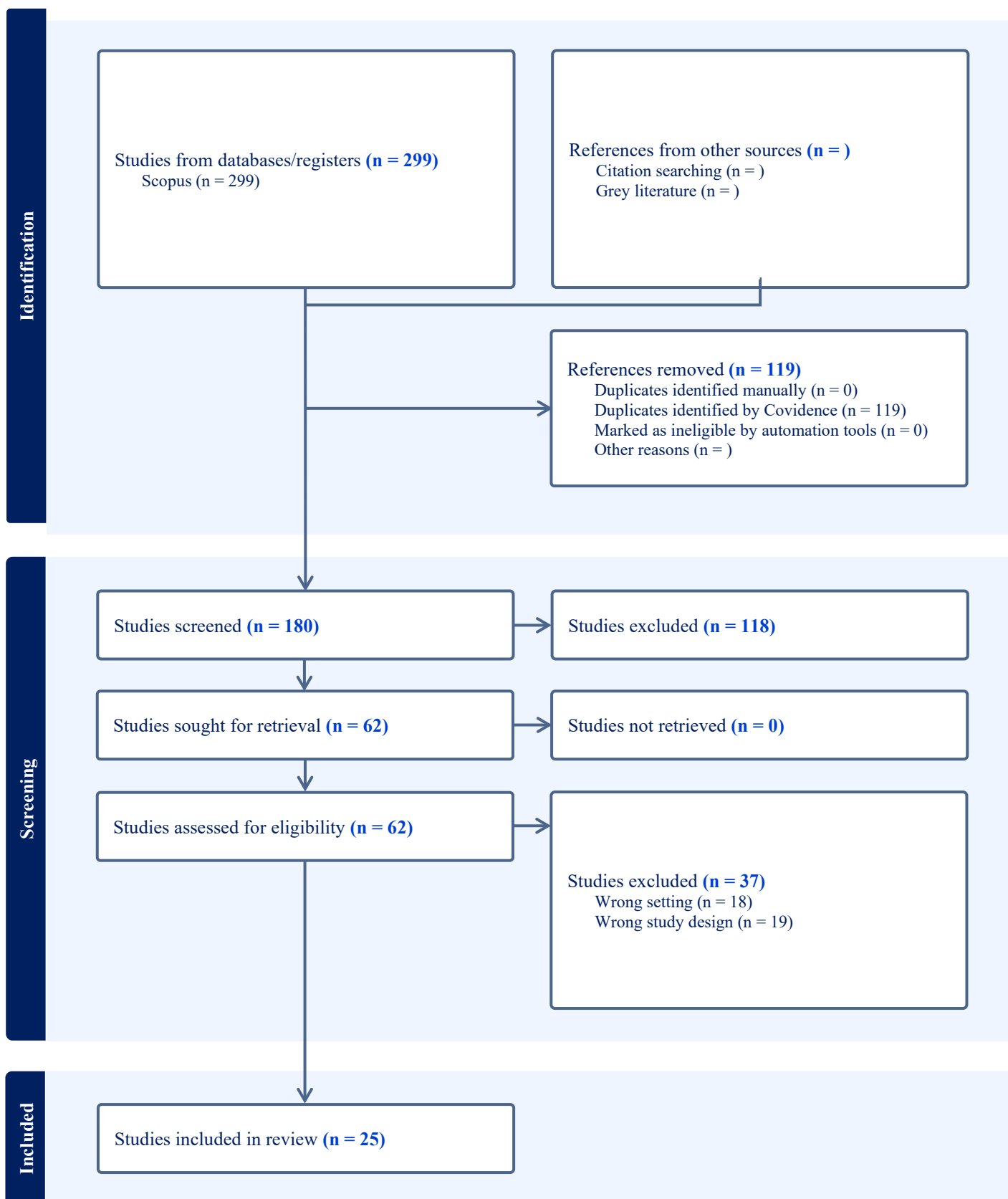
Studier av jetflammar är mycket få i litteraturen och bör få ökad uppmärksamhet i framtiden. Detta inkluderar både experiment med fordon för att bedöma form och värmeöverföring från jetlågor samt mer generella studier om antändning av material från jetlågor.

12 Referenser

- [1] A. C. Tricco *et al.*, “PRISMA Extension for Scoping Reviews (PRISMA-ScR): Checklist and Explanation,” *Ann Intern Med*, vol. 169, no. 7, pp. 467–473, Oct. 2018, doi: 10.7326/M18-0850.
- [2] D. Drysdale, *An Introduction to Fire Dynamics*, 2nd ed. Chichester: John Wiley & Sons, 1998.
- [3] A. I. Bartlett, R. M. Hadden, and L. A. Bisby, “A Review of Factors Affecting the Burning Behaviour of Wood for Application to Tall Timber Construction,” *Fire Technol*, vol. 55, no. 1, pp. 1–49, Jan. 2019, doi: 10.1007/s10694-018-0787-y.
- [4] M. Arvidson and Ö. Westlund, “Water Spray Fire Suppression Tests Comparing Gasoline-Fuelled and Battery Electric Vehicles,” *Fire Technol*, vol. 59, no. 6, pp. 3391–3414, 2023, doi: 10.1007/s10694-023-01473-w.
- [5] D. Zhang, G. Huang, H. Li, Q. Deng, and X. Gao, “A Study of the Factors Influencing the Thermal Radiation Received by Pedestrians from the Electric Vehicle Fire in Roadside Parking Based on PHRR,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 13, no. 1, 2023, doi: 10.3390/app13010609.
- [6] S. Kang, M. Kwon, J. Yoon Choi, and S. Choi, “Full-scale fire testing of battery electric vehicles,” *Appl Energy*, vol. 332, 2023, doi: 10.1016/j.apenergy.2022.120497.
- [7] R. Thomas Long Jr, C. F. Andrew Blum, C. J. Thomas Bress, and C. R. Benjamin Cotts, “Best Practices for Emergency Response to Incidents Involving Electric Vehicles Battery Hazards: A Report on Full-Scale Testing Results Final Report,” 2013. [Online]. Available: www.nfpa.org/Foundation
- [8] C. Lam, D. MacNeil, Ryan Kroeker, Gary Lougheed, and Ghislain Lalime, “Full-Scale Fire Testing of Electric and Internal Combustion Engine Vehicles,” in *Fourth International Conference on Fire in Vehicles*, P. Andersson and B. Sundstrom, Eds., Baltimore: RISE, Aug. 2016, pp. 95–106.
- [9] P. Sun, R. Bisschop, H. Niu, and X. Huang, “A Review of Battery Fires in Electric Vehicles,” *Fire Technol*, vol. 56, no. 4, pp. 1361–1410, 2020, doi: 10.1007/s10694-019-00944-3.
- [10] Fredrik. Larsson, *Lithium-ion battery safety : assessment by abuse testing, fluoride gas emissions and fire propagation*. Chalmers University of Technology, 2017.
- [11] Jonna Hynynen *et al.*, “Electric Vehicle Fire Safety in Enclosed Spaces,” Borås, 2023.
- [12] Y. Cui, J. Liu, B. Cong, X. Han, and S. Yin, “Characterization and assessment of fire evolution process of electric vehicles placed in parallel,” *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 166, pp. 524–534, 2022, doi: 10.1016/j.psep.2022.08.055.
- [13] C. Zhao, W. Hu, D. Meng, W. Mi, X. Wang, and J. Wang, “Full-scale experimental study of the characteristics of electric vehicle fires process and response measures,” *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 53, p. 103889, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.csite.2023.103889.
- [14] H. Raza and S. Li, “The impact of battery electric bus fire on road tunnel,” in *Expanding Underground - Knowledge and Passion to Make a Positive Impact on the World- Proceedings of the ITA-AITES World Tunnel Congress, WTC 2023*, 2023, pp. 3280–3288. doi: 10.1201/9781003348030-397.

- [15] P. Xu, D. Zhu, L. Li, K. Chen, B. Lin, and L. Li, "Study on the key parameters of vehicle fires for the growth stage in road tunnels," *Fire Mater*, vol. 48, no. 1, pp. 128–137, Jan. 2024, doi: 10.1002/fam.3172.
- [16] M. J. Hurley *et al.*, Eds., *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 5th ed. 2016. doi: 10.1016/S0379-7112(97)00022-2.
- [17] M. Law, "Heat Radiation from Fires and Building Separation," Great Britain, 1963.
- [18] Y. Wang, L. Gibson, M. Beshir, and D. Rush, "Determination of Critical Separation Distance Between Dwellings in Informal Settlements Fire," *Fire Technol*, vol. 57, no. 3, pp. 987–1014, May 2021, doi: 10.1007/s10694-020-01075-w.
- [19] N. de Koker *et al.*, "20 Dwelling Large-Scale Experiment of Fire Spread in Informal Settlements," *Fire Technol*, vol. 56, no. 4, pp. 1599–1620, Jul. 2020, doi: 10.1007/s10694-019-00945-2.
- [20] A. Cicione, R. S. Walls, and C. Kahanji, "Experimental study of fire spread between multiple full scale informal settlement dwellings," *Fire Saf J*, vol. 105, pp. 19–27, Apr. 2019, doi: 10.1016/j.firesaf.2019.02.001.
- [21] A. Cicione *et al.*, "The Effect of Separation Distance Between Informal Dwellings on Fire Spread Rates Based on Experimental Data and Analytical Equations," *Fire Technol*, vol. 57, no. 2, pp. 873–909, Mar. 2021, doi: 10.1007/s10694-020-01023-8.
- [22] P. Andersson, J. Brandt, and O. Willstrand, "Full scale fire-test of an electric hybrid bus," 2016.

Bilaga 1: Covidence PRISMA-filtreringsprocess:



Bilaga B – Sammanställd experimentell data

Titel	Objekt	Placering	Typ av sensor	Höjd ovan mark (m)	Avstånd från föremålet	värde	Enhet	(E) experiment eller (M) Model
Water Spray Fire Suppression Tests Comparing Gasoline-Fuelled and Battery Electric Vehicles	ICEV1 2022	vänster sida	värmeflödesmätare	1,125	0,5	138	kW/m ²	E
		rida sida	värmeflödesmätare	1,125	0,5	98	kW/m ²	E
	ICEV2 2021	vänster sida	värmeflödesmätare	1,125	0,5	59	kW/m ²	E
		rida sida	värmeflödesmätare	1,125	0,5	44	kW/m ²	E
	BEV1 2022	vänster sida	värmeflödesmätare	1,125	0,5	6	kW/m ²	E
		rida sida	värmeflödesmätare	1,125	0,5	7	kW/m ²	E
	BEV2 2021	vänster sida	värmeflödesmätare	1,125	0,5	6	kW/m ²	E
		rida sida	värmeflödesmätare	1,125	0,5	5	kW/m ²	E
A Study of the Factors Influencing the Thermal Radiation Received by Pedestrians from the Electric Vehicle Fire in Roadside Parking Based on PHRR	simulerade bil	sida	simulering	1.1	2.3	10	kW/m ²	M
		x			1.3	4.5	kW/m ²	M
		y			2.8	4.5	kW/m ²	M
		vertikal		1.1	4.5	10	kW/m ²	M

		parallell			3	10	kW/ m ²	M
		vetical	strålning beräknat	1.1	3.4	10	kW/ m ²	M
		parallell			3	10	kW/ m ²	M
		vertikal	punktkälla modell	1.1	1.4	10	kW/ m ²	beräkn
		parallell			3	10	kW/ m ²	beräkn
DETERMINATI ON OF FIRE PROTECTION DISTANCES DURING A TESLA MODEL S FIRE IN A CLOSED PARKING LOT		flank	fds modell av vikarier		10	220	°C	M
		främre	fds modell av vikarier		6	220	°C	M
Full-scale fire testing of battery electric vehicles, Kang et.al.	BEV	främre	värmefflödesm ätare	1,27	1.11	110	kW/ m ²	E
		ytterdörr	värmefflödesm ätare	1,27	0,89	55	kW/ m ²	E
		bakdörr	värmefflödesm ätare	1,27	0,89	40	kW/ m ²	E
		bak-	värmefflödesm ätare	1,27	0,89	60	kW/ m ²	E
	ICE	främre	värmefflödesm ätare	1,27	1.11	55	kW/ m ²	E
		ytterdörr	värmefflödesm ätare	1,27	0,89	50	kW/ m ²	E
		bakdörr	värmefflödesm ätare	1,27	0,89	60	kW/ m ²	E
		bak-	värmefflödesm ätare	1,27	0,89	50	kW/ m ²	E
Flame spread and smoke temperature of full-scale fire test of car fire			värmefflödesm ätare	0,75	5	2.5	kW/ m ²	E
Best Practices for Emergency Response to Incidents Involving Electric Vehicles Battery Hazards: A Report on	EV batteri endast		värmefflödesm ätare		5 fot	17.1	kW/ m ²	E

Full-Scale Testing Results								
			värmefflödesmätare		10 fot	4.7	kW/m ²	E
			värmefflödesmätare		5 fot	18	kW/m ²	E
			värmefflödesmätare		10 fot	3.7	kW/m ²	E
	modellversion av EV		värmefflödesmätare		5 fot	3.5	kW/m ²	E
			värmefflödesmätare		10 fot	2.6	kW/m ²	E
			värmefflödesmätare		20 fot	2	kW/m ²	E
			värmefflödesmätare		25 fot	1.6	kW/m ²	E
	modellversion av EV test2		värmefflödesmätare		5 fot	3.7	kW/m ²	E
			värmefflödesmätare		10 fot	2.2	kW/m ²	E
			värmefflödesmätare		20 fot	1.6	kW/m ²	E
			värmefflödesmätare		25 fot	1.8	kW/m ²	E
	modellversion av EV test3		värmefflödesmätare		5 fot	11.9	kW/m ²	E
			värmefflödesmätare		10 fot	2.4	kW/m ²	E
			värmefflödesmätare		20 fot	2	kW/m ²	E
			värmefflödesmätare		25 fot	2.2	kW/m ²	E
	modellversion av EV test4		värmefflödesmätare	1,524	5 fot	2.2	kW/m ²	E
			värmefflödesmätare	3,048	10 fot	2.1	kW/m ²	E
			värmefflödesmätare	6,096	20 fot	1.5	kW/m ²	E
			värmefflödesmätare	7,62	25 fot	1.7	kW/m ²	E
	modellversion av EV test5		värmefflödesmätare		5 fot	2.1	kW/m ²	E
			värmefflödesmätare		10 fot	1.8	kW/m ²	E
			värmefflödesmätare		20 fot	2.7	kW/m ²	E
			värmefflödesmätare		25 fot	2	kW/m ²	E
	modellversion av EV test6		värmefflödesmätare		5 fot	8.1	kW/m ²	E
			värmefflödesmätare		10 fot	2.1	kW/m ²	E
			värmefflödesmätare		20 fot	2.4	kW/m ²	E

			värmefflödesmätare		25 fot	2.4	kW/m ²	E
Full-Scale Fire Testing of Electric and Internal Combustion Engine Vehicles	ICEV	bak-	värmefflödesmätare	1.2	3,9 (från brännare mitten)	30	kW/m ²	E
		passagerare sida	värmefflödesmätare	1.2	3.1 (från brännare mitten)	25	kW/m ²	E
	A-EV-100	bak-	värmefflödesmätare	1.2	3,9 (från brännare mitten)	40	kW/m ²	E
		passagerare sida	värmefflödesmätare	1.2	3.1 (från brännare mitten)	20	kW/m ²	E
	A- EV-85	bak-	värmefflödesmätare	1.2	3,9 (från brännare mitten)	35	kW/m ²	E
		passagerare sida	värmefflödesmätare	1.2	3.1 (från brännare mitten)	25	kW/m ²	E
	ICEV B	bak-	värmefflödesmätare	1.2	3,9 (från brännare mitten)	40	kW/m ²	E
		passagerare sida	värmefflödesmätare	1.2	3.1 (från brännare mitten)	30	kW/m ²	E
	B-EV	bak-	värmefflödesmätare	1.2	3,9 (från brännare mitten)	20	kW/m ²	E
		passagerare sida	värmefflödesmätare	1.2	3.1 (från brännare mitten)	20	kW/m ²	E
	C	bak-	värmefflödesmätare	1.2	3,9 (från brännare mitten)	30	kW/m ²	E
		passagerare sida	värmefflödesmätare	1.2	3.1 (från brännare mitten)	25	kW/m ²	E
	D	bak-	värmefflödesmätare	1.2	3,9 (från brännare mitten)	50	kW/m ²	E
		passagerare sida	värmefflödesmätare	1.2	3.1 (från brännare mitten)	35	kW/m ²	E

					e mitten)			
Characterization and assessment of fire evolution process of electric vehicles placed in parallel	BEV	sida	jet eld	varaktig het 3s	<2m längd			
	BEV	sida	jet eld		varaktig het 11s	<2m läng d		
	BEV	bak-	jet eld	varaktig het 26s	2,5m längd			

Bilaga C Fullständig lista över inkluderade artiklar

Title	Authors	Year	Journal	Volume	Issue	Pages	DOI	Covidence #
Full-Scale Experimental Study on the Combustion Behavior of Lithium Ion Battery Pack Used for Electric Vehicle	Li, H.; Peng, W.; Yang, X.; Chen, H.; Sun, J.; Wang, Q.	2020	Fire Technology	56	6	2545-2564	10.1007/s10694-020-00988-w	#2
DETERMINATION OF FIRE PROTECTION DISTANCES DURING A TESLA MODEL S FIRE IN A CLOSED PARKING LOT	Gavryliuk, A.; Yakovchuk, R.; Chalyy, D.; Lemishko, M.; Tur, N.	2023	Eastern-European Journal of Enterprise Technologies	2	10-122	39-46	10.15587/1729-4061.2023.277999	#25
Thermal Modeling of the Electric Vehicle Fire Hazard Effects on Parking Building	Gavryliuk, A.; Yakovchuk, R.; Ballo, Y.; Rudyk, Y.	2023	SAE International Journal of Transportation Safety	11	3	421-434	10.4271/09-11-03-0013	#28
Numerical simulation analysis of combustion of electric sport utility vehicles	Guo, Q.; Tao, L.; Ma, Z.; Gu, Y.; Wang, Y.	2024	Energy Storage Science and Technology	13	3	1000-1008	10.19799/j.cnki.2095-4239.2023.0762	#30
Full-scale experimental study of the characteristics of electric vehicle fires process and response measures	Zhao, C.; Hu, W.; Meng, D.; Mi, W.; Wang, X.; Wang, J.	2024	Case Studies in Thermal Engineering	53			10.1016/j.csite.2023.103889	#32
Full-scale experimental study on suppressing lithium-ion battery pack fires from electric vehicles	Cui, Y.; Liu, J.; Han, X.; Sun, S.; Cong, B.	2022	Fire Safety Journal	129			10.1016/j.firesaf.2022.103562	#37
Fire risk of electric vehicles and fuel-driven vehicles in open car parks. Part 1: Fire scenarios and fire effects	Sander, L.; Zehfuß, J.; Meyer, P.; Schaumann, P.	2021	Stahlbau	90	7	486-497	10.1002/stab.202100039	#39
Explosion hazards due to failures of lithium-ion batteries	Marr, K.C.; Somandepalli, V.; Horn, Q.	2013	AIChE Annual Meeting, Conference Proceedings					#48
Fire extinguishment tests of electric vehicles in an open sided enclosure	Funk, E.; Flecknoe-Brown, K.W.; Wijesekere, T.; Husted, B.P.; Andres, B.	2023	Fire Safety Journal	141			10.1016/j.firesaf.2023.103920	#50
Characterization and assessment of fire evolution process of electric vehicles placed in parallel	Cui, Y.; Liu, J.; Cong, B.; Han, X.; Yin, S.	2022	Process Safety and	166		524-534	10.1016/j.proep.2022.08.055	#51

			Environmental Protection					
Design fire scenarios for hazard assessment of modern battery electric and internal combustion engine passenger vehicles	Hodges, J.L.; Salvi, U.; Kapahi, A.	2024	Fire Safety Journal	146			10.1016/j.firesaf.2024.104145	#70
Fire Tests on E-vehicle Battery Cells and Packs	Sturk, D.; Hoffmann, L.; Ahlberg Tidblad, A.	2015	Traffic Injury Prevention	16		S159-S164	10.1080/15389588.2015.1015117	#85
Analysis of combustion gases from large-scale electric vehicle fire tests	Hynynen, J.; Willstrand, O.; Blomqvist, P.; Andersson, P.	2023	Fire Safety Journal	139			10.1016/j.firesaf.2023.103829	#87
Dataset of fire tests with lithium-ion battery electric vehicles in road tunnels	Sturm, P.; Fritzsche, P.; Fruhwirt, D.; Heindl, S.F.; Heger, O.; Galler, R.; Wenighofer, R.; Krausbar, S.	2023	Data in Brief	46			10.1016/j.dib.2022.108839	#88
Water Spray Fire Suppression Tests Comparing Gasoline-Fuelled and Battery Electric Vehicles	Arvidson, M.; Westlund, M.	2023	Fire Technology	59	6	3391-3414	10.1007/s10694-023-01473-w	#94
A Review of Battery Fires in Electric Vehicles	Sun, P.; Bisschop, R.; Niu, H.; Huang, X.	2020	Fire Technology	56	4	1361-1410	10.1007/s10694-019-00944-3	#95
Experimental study on the thermal runaway and fire behavior of LiNi _{0.8} Co _{0.1} Mn _{0.1} O ₂ battery in open and confined spaces	Liu, P.; Sun, H.; Qiao, Y.; Sun, S.; Wang, C.; Jin, K.; Mao, B.; Wang, Q.	2022	Process Safety and Environmental Protection	158		711-726	10.1016/j.psep.2021.12.056	#106
Analysis of fire hazards associated with the operation of electric vehicles in enclosed structures	Dorsz, A.; Lewandowski, M.	2022	Energies	15	1		10.3390/en15010011	#107
Influence of the state of charge on the heat release rate of Li-ion batteries	Biteau, H.; Somandepalli, V.	2015	Fire and Materials 2015 - 14th International Conference and Exhibition, Proceedings			87-102		#126
CFD-analysis of the Sensible Enthalpy Rise Approach to determine the heat release rate of electric-vehicle-scale lithium-ion battery fires	Voigt, S.; Strubig, F.; Palis, S.; Kwade, A.; Knaust, C.	2020	Fire Safety Journal	114			10.1016/j.firesaf.2020.102989	#136
Fire tests with lithium-ion battery electric vehicles in road tunnels	Sturm, P.; Fritzsche, P.; Fruhwirt, D.; Galler, R.; Wenighofer, R.; Heindl, S.F.; Krausbar, S.; Heger, O.	2022	Fire Safety Journal	134			10.1016/j.firesaf.2022.103695	#139

Calculating Heat Release Rates from Lithium-Ion Battery Fires: A Methodology Using Digital Imaging	Wise, M.S.; Christensen, P.A.; Dickman, N.; McDonald, J.; Mrozik, W.; Lambert, S.M.; Restuccia, F.	2023	Fire Technology	59	6	3565-3587	10.1007/s10694-023-01484-7	#143
A Study of the Factors Influencing the Thermal Radiation Received by Pedestrians from the Electric Vehicle Fire in Roadside Parking Based on PHRR	Zhang, D.; Huang, G.; Li, H.; Deng, Q.; Gao, X.	2023	Applied Sciences (Switzerland)	13	1		10.3390/app13010609	#151
Full-scale fire testing of battery electric vehicles	Kang, S.; Kwon, M.; Yoon Choi, J.; Choi, S.	2023	Applied Energy	332			10.1016/j.apenergy.2022.120497	#153
The impact of battery electric bus fire on road tunnel	Raza, H.; Li, S.	2023	Expanding Underground - Knowledge and Passion to Make a Positive Impact on the World- Proceedings of the ITA-AITES World Tunnel Congress, WTC 2023			3280-3288	10.1201/9781003348030-397	#211