



Høgskulen på Vestlandet

Master Thesis (ING5002)

ING5002-MOPPG-2021-VÅR-FLOWassign

Predefinert informasjon

Startdato:	30-03-2021 09:00	Termin:	2021 VÅR
Sluttdato:	01-06-2021 14:00	Vurderingsform:	Norsk 6-trinns skala (A-F)
Eksamensform:	Masteroppgave		
Flowkode:	203 ING5002 1 MOPPG 2021 VÅR		
Intern sensor:	(Anonymisert)		

Deltaker

Kandidatnr.:	202
---------------------	-----

Informasjon fra deltaker

Tittel *:	RSV-beskjutting genom dieseltank inuti ett fordon
Antall ord *:	22133
Engelsk tittel *:	Shaped-charged firing through a diesel tank within a vehicle

Sett hake dersom ja
besvarelsen kan brukes
som eksempel i
undervisning?:

Egenerklæring *: ja
Inneholder besvarelsen nei
konfidensielt
materiale?:

Jeg bekrefter at jeg har ja
registrert
oppgavetittelen på
norsk og engelsk i
StudentWeb og vet at
denne vil stå på
vitnemålet mitt *:

Jeg godkjenner avtalen om publisering av masteroppgaven min *

ja

Er masteroppgaven skrevet som del av et større forskningsprosjekt ved HVL? *

Nei

Er masteroppgaven skrevet ved bedrift/virksomhet i næringsliv eller offentlig sektor? *

Ja, Totalförsvarets forskningsinstitut, Sverige

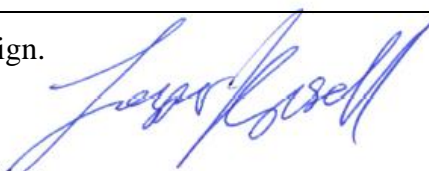
RSV-beskjutting genom dieseltank inuti ett fordon



Jesper Krusell | ING5002 | 31/05-2021

RSV-beskjutting genom dieseltank inuti ett fordon

Masteroppgave i Brannsikkerhet

Forfatter: Jesper Krusell	Forfatter sign. 
Oppgaven uttatt: Hösten 2020	Åpen oppgave
Veileder: Per Fredrik Lennart Hemmingsson Høgskulen på Vestlandet Ekstern veileder: Mats Hartmann Totalförsvarets forskningsinstitut	
Stikk ord: RSV-stråle, stridsfordon, dieseltank, temperatur- og tryckökningar, FLACS	Antall sider: 94 + Vedlegg: 26 Haugesund, 31/05-2021
Dette arbeidet er gjennomført som ledd i masterprogrammet i brannsikkerhet ved Høgskulen på Vestlandet. Studenten står selv ansvarlig for metodene som er anvendt, resultatene som er fremkommet og konklusjoner og vurderinger i arbeidet.	

Förord

Detta mastersarbete är sista steget i masterutbildningen i Brandsäkerhet vid Høgskulen på Vestlandet och har utförts hos Totalförsvarets forskningsinstitut.

Jag vill tacka mina handledare Fredrik Hemmingsson och Mats Hartman för våra dialoger, diskussioner, den konstruktiva kritiken och vägledning som jag har fått för att nå det bästa möjliga resultat. Ni har varit till stort stöd och det betyder mycket för mig att ni har visat intresse i mitt arbete.

Jag vill även passa på att tacka Matilda Ågren för all feedback och hjälp med utformningen av arbetet för att den skulle bli så lättläst som möjligt. Tack till Olof Andersson, Jonas Lundgren och Dan Martelin för hjälpen med uppbyggnaden och utförandet av experimentet.

Till sist vill jag tacka mina föräldrar Jeanette och Johan Krusell samt min syster Johanna Krusell för det moraliska stödet, feedback och förslag som ni har gett mig.

Sammanfattning

Detta arbete har försökt att bedöma hur stor sannolikhet det är för diesel att antändas när en RSV-stråle penetrerar en bränsletank i ett stridsfordon. Om dieseln antänds ska de kartläggas hur stor temperatur- och tryckökningen blir, för att se om personalen i stridsfordonet förblir stridsdugliga eller inte.

Arbetet har analyserat och jämfört data och information från en litteraturstudie med data från experiment, beräkningar och simuleringar för att svara på den ställda problemställningen.

Det visade sig under arbetets gång att det finns begränsat med litteratur om just denna typ av fenomen och att termoelementen, som användes i experimentet för detta arbete, är för lågsamma för att mäta temperaturskillnaderna. En rekommendationerna är att det bör göras fler experiment med fler typer av mätinstrument, med varierande utformningar och med olika typer av brandskydd för att få mer information om hur brandfenomen uppstår och utvecklas.

Utifrån resultaten som är framtagna i detta arbete kan det anses att det är en hög sannolikhet för att dieseln ska antändas. Det uppskattas att det är ca 30 % sannolikhet att personalen blir utslagen p.g.a. de tryckökningar som uppstår. Hur personalen påverkas av temperaturökningarna varierar beroende på om man anser att brandförloppet är kortvarigt (0,2 och 0,7 sekunder) eller långvarigt (sju sekunder). Anses det att brandförloppet är kortvarigt kommer personalen få en liten påverkan men om brandförloppet anses vara långvarigt, kommer påverkan bli större hos personalen.

Summery

This master's thesis has studied the probability for diesel to ignite after a shaped-charge jet has penetrated the fuel tank of a combat vehicle. If the diesel ignites, the temperature and pressure development will be documented to estimate if the personnel in the vehicle are incapacitated or not.

The thesis has analysed and compared data and information from literature studies with data from experiments, calculations, and simulations to answer the problem that's posed.

During the thesis, it turned out to be less than expected amount of literature about the topic. It was noticed was that the thermocouples that were used during the experiments were to slow. It is recommended to perform more experiments with more types of recording instruments, with different of the set ups and with different kinds of fire protection systems to get more information about fire phenomenon, how it acts and the build-up of it.

Based on the results from this thesis it's regarded that the probability of an ignition is high. It is concluded that there is a 30 % probability that the personnel will be incapacitated due to the pressure increases that occurs. Regarding the influence of the temperature on the personnel, it will have different impacts if it's a short (0,3 and 0,7 seconds) or a long (7 seconds) interaction. If it assumed to be a short interaction the impact will be small but if it is a long interaction, the impact will have a bigger effect on the personnel.

Innehållsförteckning

Förord.....	iii
Sammanfattning	v
Summery	vii
Figurlista	xiii
Tabellista.....	xv
Förklaring av förkortningar och begrepp	xix
1. Inledning	1
1.1. Bakgrund.....	1
1.2. Problemställningen	1
1.3. Utförande	2
1.4. Läsanvisning	2
1.5. Avgränsning	3
2. Teori.....	5
2.1. Brand.....	5
2.1.1. Brandfaser	6
Antändningsfasen.....	7
Tillväxtfasen	7
Fullt utvecklade brand	7
Utbränningsfasen	7
2.1.2. Övertändning, backdraft och pulsering.....	7
Övertändning.....	7
Backdraft och pulsering	8
2.1.3. Energiproduktion och energitransport från en brand.....	8
2.1.4. Antändning.....	9
2.1.5. Laminär och turbulent strömning.....	10
2.2. Riktad sprängverkan (RSV).....	12
2.3. Bränslen	14
2.3.1. Diesel	14
2.3.2. Jet A – Fuel	14
2.3.3. Fotogen	14
2.4. Explosion	15

2.4.1.	Explosion av moln av droppar i luften.....	15
2.5.	Skadekriterier for mennesken.....	15
2.5.1.	Termiska strålningskador.....	15
2.5.2.	Tryckökningar.....	16
3.	Data.....	19
3.1.	Minsta antändningsenergin.....	19
3.2.	RSV-skjutning genom bränsletank.....	20
3.3.	RSV-skott mot Pansvarbandvagn 302.....	20
3.4.	Experiment från 2019.....	21
4.	Metod.....	25
4.1.	Litteraturstudie.....	25
4.2.	Experiment.....	25
4.3.	Beräkningar.....	26
4.3.1.	Värmeproduktion, värmefföde och värmeenergi från experimenten.....	27
Experiment 2019.....	29	
Experiment 2021.....	29	
4.3.2.	Mängden diesel som förbränns under brandfenomenet.....	30
4.3.3.	Energi för uppvärmning av luften i trycktanken.....	31
4.3.4.	Värme- och kinetiskenergi hos RSV-strålen.....	32
4.3.5.	Antändningstemperatur i ett droppmoln.....	32
4.4.	Simulering.....	33
4.4.1.	Uppbyggnad av simuleringsmodellerna.....	34
4.4.2.	Inställningar för simuleringarna.....	36
5.	Resultat.....	39
5.1.	Experiment.....	39
5.2.	Beräkningar.....	45
5.2.1.	Värmeproduktion, värmefföde och värmeenergi.....	45
Experimentet från 2019.....	45	
Experimentet från 2021.....	46	
5.2.2.	Mängden diesel som förbränns under brandfenomenet.....	47
5.2.3.	Energi för uppvärmning av luften i trycktanken.....	47
5.2.4.	Värme- och kinetiskenergi från RSV-strålen.....	47

5.2.5.	Antändningstemperatur i ett droppmoln	48
5.3.	Simulering.....	48
5.3.1.	D^* och cellstorlek	49
5.3.2.	FLACS	49
6.	Diskussion.....	57
6.1.	Metod	57
6.1.1.	Litteraturstudien.....	57
6.1.2.	Experiment.....	57
6.1.3.	Beräkningar.....	58
6.1.4.	Simuleringar.....	58
6.2.	Resultat	59
6.2.1.	Litteraturstudien.....	59
6.2.2.	Experimenten	59
6.2.3.	Beräkningar.....	60
6.2.4.	Simuleringar.....	61
6.3.	Tryckökning utan brandförlopp	62
6.4.	Sannolikheten för antändning	62
6.5.	Påverkan på personalen.....	63
7.	Slutsats	65
8.	Vidare arbete	67
9.	Referenser	69
	Bilagor.....	A
	A. Flamhastighet mot hastigheten av bränsledropparna.....	A
	B. Tålighetsgräns mot termisk strålning	C
	C. Temperaturdata från experimentet 2019.....	D
	D. Trycktank.....	K
	E. OKQ8 Diesel Miljöklass 1.....	M
	F. Värderna och resultat från beräkningarna av experimentet 2019	N
	G. Temperaturdata från experimentet 2021	O
	H. Värderna och resultat från beräkningarna av experimentet 2021.....	W
	I. Energi för uppvärmning att luften i trycktanken.....	X
	J. Värme- och kinetiska energi från RSV-strålen.....	X
	K. Simuleringar	Y

Figurlista

Figur 1: Uppbyggnad av experimentet	2
Figur 2: Brandfyrkant	5
Figur 3: Till vänster: diffusionsbrand och till höger: förblandad brand	6
Figur 4: Brandfaser	6
Figur 5: Fördelning av energin från en brand	9
Figur 6: Illustration över LFL och UFL [5]	10
Figur 7: Till vänster; en laminär ström, till höger; en turbulent ström [1].....	10
Figur 8: Fluktuationer i en brand p.g.a. Eddies [2].....	11
Figur 9: Övergången från laminär ström till turbulent ström beroende på hastigheten: till vänster; över en horisontell platta, till höger; vid en vertikal platta [4]	11
Figur 10: Strålbildande RSV-laddning [6].....	12
Figur 11: Utvecklingsserie av en strålbildande RSV vid skott, det gula är RSV-strålen som bildas.	13
Figur 12: Sannolikheten att en soldat förlorar medvetandet i ett bepansrat fordon p.g.a. övertryck [16].....	17
Figur 13: Översikt av placeringar av mätinstrument [18].....	21
Figur 14: Bilder över var och hur mätinstrumenten var placerade i trycktanken [18]	21
Figur 15: Typer av mätinstrument som användes och när dem var kalibrerade [18] ..	22
Figur 16: Temperaturmätningar från experimentet 2019 [18].....	22
Figur 17: Tryckmätningar från experimentet 2019 [18]	23
Figur 18: Utgångshållet i dieseltanken från RSV-strålen från experimentet 2019 [18]	23
Figur 19: Tidsförlopp över förbränningen mellan bränsletanken och reststacken från experimentet 2019 [18]	24
Figur 20: Översikt av placeringar av mätinstrument från experimentet 2021	26
Figur 21: Snittbild av trycktank med illustration över värmeströmmarna i sig.....	27
Figur 22: Uppbyggnaden av trycktankarna för simuleringarna, till höger ser man öppningen för den ”Öppna” trycktanken.	34
Figur 23: Placering av mätpunkter.....	35
Figur 24: Placering och utformning av bränsleområdet	35
Figur 25: Placering av antändningspunkten.....	36
Figur 26: Inställningar för simuleringarna.....	37
Figur 27: Temperaturmätningarna från experimentet 2021	39

Figur 28: Tryckmätningar från experimentet 2021	40
Figur 29: Utgångshållet från RSV-strålen i dieseltanken från experimentet 2021	40
Figur 30: Tidsförlopp över förbränningen mellan bränsletanken och reststacken från kamera 1, experimentet 2021	42
Figur 31: Tidsförlopp över förbränningen mellan bränsletanken och reststacken från kamera 2, experimentet 2021	44
Figur 32: Färg beskrivning över mätpunkterna i graferna	49
Figur 33: Temperatur och tryck från simuleringar med öppningen med cellstorleken 10 cm.....	51
Figur 34: Temperatur och tryck från simuleringar med öppningen med cellstorleken 5 cm.....	52
Figur 35: Temperatur och tryck från simuleringar med öppningen med cellstorleken 2,5 cm.....	53
Figur 36: Temperatur och tryck från simuleringar utan öppning med cellstorleken 10 cm.....	54
Figur 37: Temperatur och tryck från simuleringar utan öppning med cellstorleken 5 cm.....	55
Figur 38: Temperatur och tryck från simuleringar utan öppning med cellstorleken 2,5 cm.....	56
Figur 39: Trycktanken sedd utifrån.....	K
Figur 40: Trycktanken sedd i 3D, till vänster och i snitt till höger	L
Figur 41: Informationsblad om dieseln som används vid FOI	M
Figur 42: Placering av mätpunkter.....	Z

Tabellista

Tabell 1: Antændningstemperatur, Spontanantændningstemperatur och kokpunktintervall for diesel	14
Tabell 2: Antændningstemperatur, spontanantændningstemperatur och kokpunktintervall for fotogen	14
Tabell 3: Exponering av olika grader av termisk strålning [11]	16
Tabell 4: Mængden varmeenergi per kvadratmeter som krævs for att oppnå brænnskador [12]	16
Tabell 5: Minsta antændningsenergi som krævs for att antænda ulike brænnbara vætskor beroende på brænsle/luft-blandning [8]	19
Tabell 6: Brandegenskaper for den diesel som anvænds vid experimenten	25
Tabell 7: Værdene på variabler for ekvation (13) beroende på ReF værdet [4]	28
Tabell 8: Temperaturmætninger frå 1,1 till 1,3 sekunder av branden vid de ulike mætningene, hætmat frå tabell 41	29
Tabell 9: Temperatur som anvænds for TY i berækningarna for experimentet 2019, hætmat frå tabell 41	29
Tabell 10: Temperaturmætninger frå 0,4 till 1,1 sekunder av branden, hætmat frå tabell 44	30
Tabell 11: Temperatur som anvænds for TY i berækningarna for experimentet 2021, hætmat frå tabell 44	30
Tabell 12: Temperaturer for berækning av gjomsnittstemperaturen for $T1$ och $T2$ for experimentet 2019	31
Tabell 13: Temperaturer for berækning av gjomsnittstemperaturen for $T1$ och $T2$ for experimentet 2021	31
Tabell 14: Værdene for den spesifikke værmekapaciteten for luft som anvænds i berækningarna [4]	31
Tabell 15: Kokpunktstemperaturer for ulike diesel och fotogen	33
Tabell 16: Lægste och hægste værde for QC for att berækne $D *$	33
Tabell 17: Værmeproduktionen frå experimentet 2019 beroende på flamhastigheter under brandfenomenets tidsintervall	45
Tabell 18: Værmeflødene frå experimentet 2019 beroende på flamhastigheter under brandfenomenets tidsintervall	45
Tabell 19: Mængden varmeenergi under brandfenomenets tidsintervall frå experimentet 2019	45
Tabell 20: Værmeflødet under brandfenomenets tidsintervall frå experimentet 2019	45

Tabell 21: Värmeproduksjonen frå experimentet 2021 beroende på flamhastigheter under brandfenomenets tidsintervall.....	46
Tabell 22: Värmeflödet frå experimentet 2021 beroende på flamhastigheter under brandfenomenets tidsintervall.....	46
Tabell 23: Mängden värmeenergi under brandfenomenets tidsintervall med genomsnittstemperaturen frå experimentet 2021.....	46
Tabell 24: Värmeenergiflödet under brandfenomenets tidsintervall frå experimentet 2021.....	46
Tabell 25: Mängden diesel som förbrändes vid de olika flamhastigheterna frå experimentet 2019.....	47
Tabell 26: Mängden diesel som förbrändes vid de olika flamhastigheterna frå experimentet 2021.....	47
Tabell 27: Mängden värmeenergi för att värma upp luften vid 7 sekunder i experimentet 2019.....	47
Tabell 28: Mängden värmeenergi för att värma upp luften vid 7 sekunder i experimentet 2021.....	47
Tabell 29: Värmeenergi och värmeflöde per m ² frå RSV-strålen i form av strålning, experimentet 2019.....	47
Tabell 30: Värmeenergi och värmeflöde per m ² frå RSV-strålen i form av strålning, experimentet 2021.....	48
Tabell 31: Massan som en RSV - stråle måste ha för att uppnå den minsta antändnings energin.....	48
Tabell 32: Antändningstemperaturen för olika diesel och fotogen i droppmoln.....	48
Tabell 33: Rekommenderad cellstorlek beroende på $D *$ för den lägsta värmeproduksjonen (2021).....	49
Tabell 34: Rekommenderad cellstorlek beroende på $D *$ för den högsta värmeproduksjonen (2019).....	49
Tabell 35: Flamhastighet mot hastighet av bränsledropparna [8].....	A
Tabell 36: Flamhastighet mot bränsle/luft blandning med flödes hastighet på 25 m/s [8].....	A
Tabell 37: Flamhastighet mot bränsle/luft blandning med flödes hastighet på 20 m/s [8].....	B
Tabell 38: Jet A- fuel minsta temperatur på en vägg för att antändning ska ske beroende på bränsle/luft-blandning [8].....	B
Tabell 39: Jet A- fuel minsta temperatur på en vägg för att antändning ska ske beroende på flödes hastigheten [8].....	B
Tabell 40: Förväntade skador vid varierende termiska strålningsnivåer [11].....	C

Tabell 41: Temperaturdata från experimentet 2019 [18].....	D
Tabell 42: Värden som användes i beräkningarna med genomsnittstemperaturen.....	N
Tabell 43: Resultaten från beräkningarna med genomsnittstemperaturen.....	N
Tabell 44: Temperaturdata från experimentet 2021.....	O
Tabell 45: Värden som användes i beräkningarna med genomsnittstemperaturen.....	W
Tabell 46: Resultaten från beräkningarna med genomsnittstemperaturen.....	W
Tabell 47: Värden för beräkningarna av energin som behövs för att värma upp luften i trycktanken för båda experimenten.....	X
Tabell 48: Värden för beräkningarna värme- och kinetiska energin från RSV-strålen	X
Tabell 49: Värden för att bestämma D^* och cellstorlekarna, lägsta värmeproduktionen 2021.....	Y
Tabell 50: Värden för att bestämma D^* och cellstorlekarna, högsta värmeproduktionen 2019	Y
Tabell 51: Placering och dimensioner för trycktanken i modellerna.....	Y
Tabell 52: Placering och dimensioner för dieseltanken i modellerna.....	Y
Tabell 53: Placering och dimensioner för reststacken i modellerna	Y
Tabell 54: Placering och dimensioner för bränsleområdet i modellerna	Z

Förklaring av förkortningar och begrepp

RSV	Riktad sprängverkan
HVL	Høgskulen på Vestlandet
FOI	Totalförsvarets forskningsinstitut
FMV	Försvarets materielverk
MSB	Myndigheten för samhällsskydd och beredskap
RSV 3	Strålbildande riktad sprängverkan
LFL	Lower flammable limit
UFL	Upper flammable limit
FFI	Forsvarets forskningsinstitut
MAE	Minsta antändningsenergi
PBV 302	Pansarbandvagn 302
FOA	Försvarets Forskningsanstalt (nu mera FOI)
ASF	Arbetskyddsstyrelsens författningssamling
FLACS	Flame acceleration software
CFD	Computational fluid dynamics
MP	Mätpunkter
\dot{Q}_c	Värmeproduktion [kW]
\dot{m}''	Massförlusttakten per kvadratmeter [g/(m ² ·s)]
\dot{m}	Massförlusttakten [g/s]
A_f	Area av branden [m ²]
ΔH_c	Förbränningsvärme [kJ/g]
χ	Förbränningseffektivitet [-]
\dot{q}''	Värmeflöde [W/m ²]
\dot{q}_{kv}''	Värmeflöde via konvektion [W/m ²]
\dot{q}_{kd}''	Värmeflöde via konduktion [W/m ²]

\dot{q}_S''	Värmefflöde via strålning [W/m ²]
k	Konstant för den termiska ledningsförmågan av materialet [W/(m·K)]
Δx	Tjockleken av materialet [m]
T	Temperatur [K]
ΔT	Temperaturskillnaden [K]
h	Konvektiv värmeöverföringskoefficient [W/(m ² ·K)]
T_Y	Ytans temperatur [K]
T_{Fl}	Fluidets temperatur [K]
ϕ	Konfigureringsfaktor [-]
ε	Emissivitet [-]
σ	Stefan-Boltzmanns konstant [5,67·10 ⁻⁸ W/(m ² ·K ⁴)]
T_F	Brandens temperatur [K]
T_0	Omgivningens temperatur [K]
Re_f	Reynolds tal [-]
\dot{V}	Vätskans/gasens strömningshastighet [m/s]
ν_f	Vätskan/gasen kinematiska viskositet [m ² /s]
L	Karaktäristiska längden [m]
T_{DA}	Antändningstemperatur för droppmoln [°C]
T_K	Kokpunkt för ett bränsle [°C]
λ	Blandningsförhållande [-]
D	Innerdiametern av trycktanken [m]
A_{Kv}	Arealen som är i kontakt mellan fluidet och ytan [m ²]
B	Längden av flamfronten som är i kontakt med trycktanken [m]
ρ_f	Densiteten för en specifik fluid [kg/m ³]
k_f	Värmeledningsförmågan för en specifik fluid [W/(m·K)]
c_p	Specifika värmekapaciteten vid konstant tryck [J/(kg·K)]

η_f	Dynamisk viskositet [kg/(m·s)]
A_C	Trycktankens tvärsnittsarea [m ²]
A_{Fl}	Arealen för flamfronten [m ²]
\dot{q}''	Värmeenergiflöde [kJ/m ²]
Δt	Tidsintervallet för förbränningen [s]
Q	Värmeenergi [kJ]
m	Mängden diesel som förbränts [g]
T_1	Temperaturen vid det första tidssteget [°C]
T_2	Temperaturen vid det andra tidssteget [°C]
ρ_{luft}	Densiteten för den omgivande luften vid temperatur T [kg/m ³]
$V_{Trycktank}$	Trycktankens volym [m ³]
Q_{luft}	Mängden energi som behövs för att värma upp luften [kJ]
t_{RSV}	Tiden det tar för RSV-strålen att träffa reststacken efter att ha penetrerat dieseltanken [ms]
$Q_{Kinetiskenergi}$	Den kinetiska energin från RSV-strålen [kJ]
$m_{RSV-strål}$	Massan av RSV-stråle [g]
Q_{MAE}	Energien som en RSV-stråle bildar när den träffar reststacken [kJ]
$v_{RSV-strål}$	Hastigheten hos en RSV-stråle [m/s]
$\dot{q}''_{Strålning_{RSV-strål}}$	Strålningsenergin från RSV-strålen [kJ/m ²]
D^*	Karaktäristiska branddiametern [m]
T_∞	Temperaturen för den omgivande luften [°C eller K]
ρ_∞	Densiteten för den omgivande luften vid T_∞ och atmosfärisktryck [kg/m ³]
g	Tyngdaccelerationen [9,81 m/s ²]

1. Inledning

Vid beskjutning med riktad sprängverkan (RSV) mot vissa bepansrade fordon kan dessa, i vissa beskjutningsriktningar, bli beskjutna igenom en bränsletank som är placerad inuti fordonet. Då RSV-strålen går ut ur bränsletanken följer det sannolikt med bränsle (i gas eller droppform) som blandas med luften. Det har i vissa fall visat sig att det kan uppstå en kortvarig flamma vid utträdet ur bränsletanken och ett längre (men fortfarande mycket kortvarigt) pulserade förbränningsfenomen då strålen träffar något massivt längre in i fordonet. Fenomenet leder till en tryck- och temperaturökning som kan skada personal i fordonet.

Det behövs mer kunskap om detta fenomen, bland annat under vilka omständigheter det uppträder, vilken påverkan det har på personal i fordonet och om ett brandsläckningssystem kan påverka förloppet eller inte.

Ökad kunskap kan leda till förbättrade simuleringsmodeller som tar hänsyn till fler relevanta parametrar för att beräkna eller bedöma påverkan inuti fordonet. Det behöver även sammanställas kriterier som avgör om effekterna är skadliga för personal eller inte, vilka materiella skador som kan förväntas samt hur påverkan kan variera på olika platser i fordonet. Målet är att använda kunskapen för att hitta sätt att minska påverkan eller, omvänt, hitta egenskaper hos RSV-stridsdelen som kan öka effekterna och därmed verkan som uppnås i fordonet.

1.1. Bakgrund

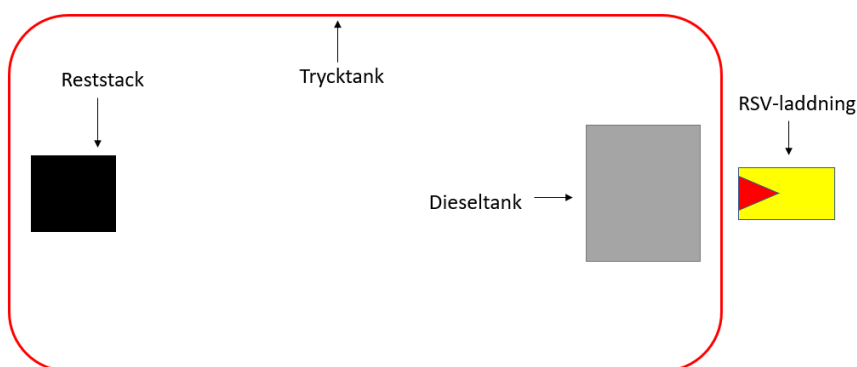
Arbetet har genomförts hos Totalförsvarets forskningsinstitut (FOI). FOI är en svensk statlig myndighet under Forsvarsdepartementet och är ett av Europas ledande forskningsinstitut inom försvar och säkerhet. FOI:s största uppdragsgivare är Forsvarsmakten, Forsvarets materielverk (FMV), Regeringskansliet och Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (MSB).

1.2. Problemställningen

Detta arbete ska beräkna hur stor sannolikheten är för att dieseln antänds när en RSV-stråle penetrerar bränsletanken. Antänds diesel, behöver det kartläggas hur stor temperatur- och tryckökningen blir för att se om personalen i stridsfordonet förblir stridsdugliga eller inte.

1.3. Utförande

För att svara på problemställningen har det gjorts en litteraturstudie (i form av en översiktsstudie, som förklaras i kapitel 4.1), beräkningar, simuleringar och experiment. Experimentet var till viss del en återupprepning av ett experiment som gjordes 2019. Experimenten genomfördes på samma sätt men skiljer sig i insamlingen av data, höghastighetsfilmer samt att olika RSV-stridsdelar användes. Figur 1 visar en enkel skiss över hur experimenten var uppbyggda. RSV-laddningen är placerad utanför en trycktank som simulerar volymen av ett stridsfordon, dieseltanken är placerad i skottlinjen av RSV-laddningen. En reststack (en stapel med tjocka pansarplåtar) är placerad i andra änden av trycktanken. Reststacken är till för att stoppa RSV-strålen efter att den har penetrerat dieseltanken.



Figur 1: Uppbyggnad av experimentet

1.4. Läsanvisning

I detta arbete används flera metoder för att försöka svara på problemställningen. Läsanvisningen är till för att grovt förklara vad varje huvudkapitel innehåller. Varje huvudkapitel kommer i sin tur ha en läsanvisning som förklarar dess innehåll.

Kapitel 2, Teori, förklarar de olika begrepp, ekvationer etc. som behövs för att förstå de beslut, metoder, resultat och diskussioner som kommer senare i arbetet.

Teorikapitlet är en del av litteraturstudien som har utförts,

Kapitel 3, Data, presenterar data från andra rapporter, arbeten eller experiment som används vidare i arbetet. Datakapitlet är också en del av litteraturstudien.

Kapitel 4, Metod, visar hur detta arbete har utförts, förklarar vilken typ av litteraturstudie som har gjorts, beskriver och förklarar genomförandet av experimentet, beräkningarna och simuleringarna.

Kapitel 5, Resultat, presenterar resultaten från experimentet, beräkningarna och simuleringarna.

Kapitel 6, Diskussion, diskuterar de metoder som använts, analysera resultaten från metoderna, jämföra dem med varandra och sedan försöka svara på problemställningen som ställts för detta arbete.

1.5. Avgränsning

Endast information som inte är sekretessbelagd gällande RSV-stridsdelen och fordonen används i det här arbetet, därmed kommer modellbeteckningar för RSV-stridsdelar inte alltid anges och inte heller tjockleken hos plåtar som representerar ett fordons chassi där RSV-strålen träffar.

För att avgränsa arbetet kommer endast brandrelaterade skador behandlas. Andra faktorer som splitter och sekundärsplitter från fordonet kommer inte att tas med i detta arbete.

Det är viktigt att ha i åtanke att de flesta fordonen i Försvarsmakten har någon form av brandskydd installerat och att de olika uniformssystemen som finns ger ett visst skydd. Detta arbete kommer inte ta hänsyn till de olika typer av brandskydd som finns, utan fokusera på det brandfenomen som uppstår och se hur det kan påverka personalen och fordonen.

Vilka exakta skador personal kan få när det uppstår en tryckökning kommer inte heller att analyseras. Fokus kommer att läggas på en bedömning om de är stridsdugliga efter tryckökningen eller inte. Det kan också förekomma andra skador eller påverkansformer på personalen som bländning, giftiga gaser eller metalledamm. Dessa typer av skador eller påverkansformer kommer inte att beaktas i detta arbete.

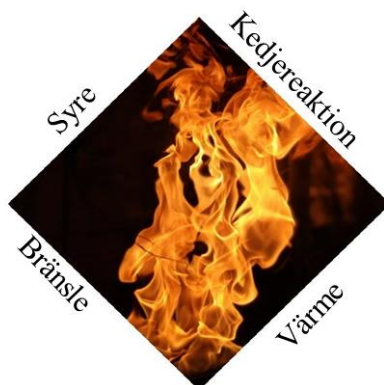
Den här rapporten kommer att fokusera på strålbildande RSV (RSV 3).

2. Teori

Detta kapitel går igenom brandteori, vad en RSV är, jämför olika bränslen som används vid beräkningarna, explosionsförhållanden och skadekriterier för människan.

2.1. Brand

För att en brand ska uppstå och upprätthållas behövs tillgång till syre, bränsle, värme och att det sker en kedjereaktion mellan bränslet och syret. En kedjereaktion är de interna kemiska reaktionerna mellan bränslet och syret som avger värme som i sin tur värmer upp bränslet, vilket omvandlas till brännbara gaser som sedan antänds. Detta kallas för brandfyrkanten, se figur 2. Om en av dessa komponenter tas bort kommer branden varken kunna starta eller upprätthållas [1].



Figur 2: Brandfyrkant

Det finns två olika sorters bränder, *diffusionsbrand* och *förblandad brand*, se figur 3. I en diffusionsbrand sker blandningen mellan syre och bränsle under förbränningen och i en förblandad brand blandas syret och bränslet innan förbränningen [2].

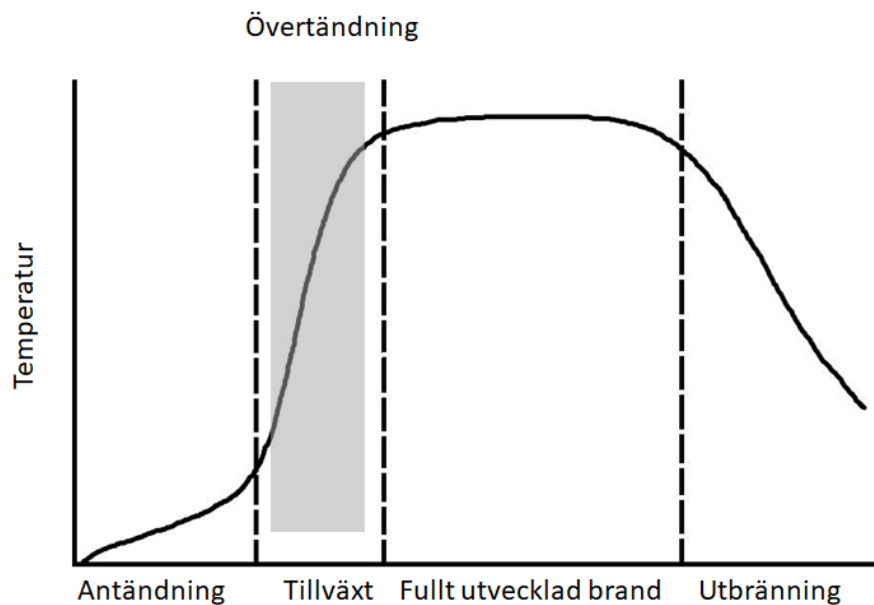
Genom att blanda syre och bränsle innan blandningen antänds får man en mer stökiometrisk förbränning än om man blandar syre och bränsle under förbränningen. Det leder till att restprodukterna från en förblandad brand huvudsakligen består av koldioxid, CO_2 , och vatten, H_2O , och att sotproduktionen blir låg. När bränslet och luften blandas vid förbränningen i en diffusionsbrand blir förbränningen inte stökiometrisk, vilket i sin tur leder till en ökad produktion av kolmonoxid, CO , och sot. Den ökade produktionen av sot leder till att diffusionsflamman kommer att ha en högre radiell värmestrålning än en förblandad flamma. Ett exempel på en förblandad brand är en svetslåga och en diffusionsbrand är t.ex. ett ljus som brinner [1].



Figur 3: Till vänster: diffusionsbrand och till höger: förblandad brand

2.1.1. Brandfaser

En brand kan beskrivas med fyra faser, *antändning*, *tillväxt*, *fullt utvecklad brand* och *utbränning*. Figur 4 ger en överblick över temperaturen i de olika faserna. Om branden får brinna ostört med god tillgång på bränsle och syre kommer den att gå igenom alla fyra faserna [1].



Figur 4: Brandfaser

Antändningsfasen

En brand startar genom att ett bränsle antänds. Värmeenergin som behövs för en antändning beror på vilket material som används som bränsle. Bränslet kan antändas antingen från en extern källa t.ex. från en gnista, från en tändsticka, att bränslet värms upp till en tillräckligt hög temperatur som gör att det spontanantänder eller att bränslet producerar tillräckligt mycket energi att det självantänder. Detta gör det svårt att simulera själva antändningsfasen eftersom denna kan variera mycket i tid beroende på om bränslet är i fast-, vätske-, eller gasform [1].

Tillväxtfasen

Tillväxtfasen avgör om branden kommer växa, brinna konstant eller slockna av sig själv. Det är många faktorer som avgör vad som händer med branden. Den första är hur mycket bränsle som branden har tillgång till. En annan faktor är i vilket tillstånd bränslet är i, är det i fast-, vätske-, eller gasform. Det går åt olika mycket energi till att göra om bränsle till gas beroende på om det är i fast- eller vätske-form. Branden är bränslekontrollerad i tillväxtfasen. När branden förbrukar mer brännbar gas än vad den kan producera går den till utbränningsfasen och slocknar. Om branden producerar mer brännbar gas än vad den förbrukar kommer den istället att växa. [1].

Fullt utvecklad brand

En fullt utvecklad brand är mer avhängig av syretillgången (ventilationskontrollerad) än tillgången på brännbart bränsle. Detta leder till att en fullt utvecklad rumsbrand inte kan bli större utan att sprida sig till ett annat rum. Röken från en brand, som är innehåller oförbrända gaser kan antändas när den kommer i kontakt med nytt syre. Detta sker p.g.a. att röken fortfarande innehåller oförbrända gaser, med en tillräckligt hög temperatur att de kan spontanantända när de kommer i kontakt med det nya syret [1].

Utbränningsfasen

Utbränningsfasen inträder när branden inte kan upprätthålla sin produktion av brännbara gaser. Eftersom energiproduktionen minskar kommer temperaturen att sjunka. Själva utbränningsfasen kan pågå under en väldigt lång tid [1].

2.1.2. Övertändning, backdraft och pulsering

Vid brand finns det tre brandbegrepp som kan beskriva olika brandsituationer. Dessa är *övertändning*, *backdraft* och *pulsering*.

Övertändning

Övertändning är en snabb övergång från tillväxtfasen till en fullt utvecklad brand, se figur 4. Kännetecknet för en övertändning är att alla brännbara ytor och röklagret antänder samtidigt vilket bildar ett väldigt snabbt brandförlopp. Under en övertändning blir det en kraftig ökning av värmeproduktionen. För att en övertändning ska kunna ske måste minst ett av nedanstående kriterier uppfyllas [2]:

- röklagret har en temperatur över 500 °C
- värmestrålningen från röklagret till rummets golv överstiger 20 kW/m²
- lågor kan observeras på utsidan av rummet som brinner.

Backdraft och pulsering

När en brand i ett slutet utrymme har producerat brännbara gaser med hög temperatur, kan dessa inte antändas när det inte finns tillräckligt med syre i utrymmet. När en öppning sker sugas nytt syre in i utrymmet och trycker ut den varma röken som innehåller oförbrända gaser. När de varma gaserna kommer i kontakt med det nya syret, antänds de igen med en mer aggressiv brand- och tryckutveckling som pressar ut lågorna genom öppningen [1].

Backdraft och pulsering uppstår när branden befinner sig i ett underventilerat rum. Om en brand sker i ett rum med otillräcklig ventilation kommer branden minska både i storlek, i yta och/eller intensitet och temperatur eftersom den inte får tillräckligt med syre för att upprätthålla sig. Det blir ett undertryck i rummet vilket leder till att det sugas in nytt syre som i sin tur gör att branden växer igen och kan då pulsera ut från öppningarna in till rummet [1].

2.1.3. Energiproduktion och energitransport från en brand

Värme(energi)produktionen, \dot{Q}_C , från en brand kan beräknas via ekvation (1) eller (2). Där används massförlusttakten, \dot{m} , eller massförlusttakten per m², \dot{m}'' och arean av branden A_f , med förbränningsvärmets ΔH_c , och förbränningseffektiviteten, χ , som har ett värde mellan 0 och 1 (vanligen mellan 0,6 och 0,8) för att bestämma \dot{Q}_C [3].

$$\dot{Q}_C = \chi \cdot \dot{m}'' \cdot A_f \cdot \Delta H_c \quad (1)$$

$$\dot{Q}_C = \chi \cdot \dot{m} \cdot \Delta H_c \quad (2)$$

Värme från en brand kan transporteras på tre olika sätt; via *konduktion*, *konvektion* eller *värmestrålning*.

Konduktion eller värmeledning är när ett solitt material är i direktkontakt med värmekällan och leder värmen vidare i eller via materialet [1].

Konvektion eller värmeström är när ett fluid med en högre temperatur transporteras genom ett kallare fluid [1].

Värmestrålning är elektromagnetisk strålning från ett material som har en högre temperatur än den absoluta nollpunkten [1].

Ekvationerna (3), (4) och (5) beskriver de tre metoderna för värme flöde, \dot{q}'' . För att kunna beräkna \dot{q}'' via *konduktion* behöver man veta den termiska ledningsförmågan, k , hos materialet, hur tjockt lagret/lagerna, Δx , av materialet/materialen är samt

temperaturskillnaden, ΔT , mellan sidorna av materialet. Vid beräkning av \dot{q}'' via *konvektion* använder man sig av den konvektiva värmeöverföringskoefficienten, h , temperaturen av ytan där fluidet passerar, T_Y , och fluidets temperatur, T_{FL} .

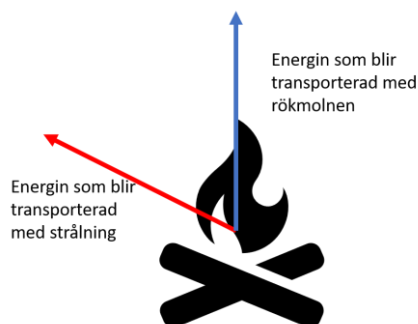
Vid beräkning av \dot{q}'' via *värmestrålning* behöver man veta konfigurationsfaktorn, ϕ , som varierar beroende på utformningen av branden samt var mätpunkten är placerad, vilken emissivitet, ε , materialet har, Stefan-Boltzmanns konstant, σ , och temperaturskillnaden mellan branden, T_F , och omgivningen, T_0 [1] [3].

$$\text{Konduktion:} \quad \dot{q}''_{Kd} = -k \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (3)$$

$$\text{Konvektion:} \quad \dot{q}''_{Kv} = h \cdot (T_Y - T_{FL}) \quad (4)$$

$$\text{Värmestrålning:} \quad \dot{q}''_S = \phi \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_F^4 - T_0^4) \quad (5)$$

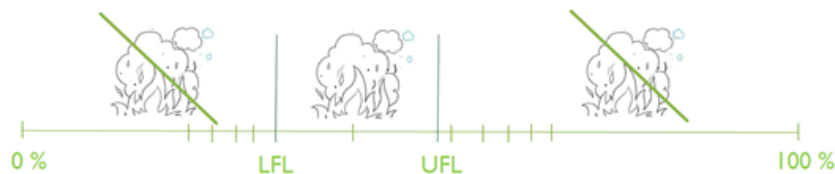
Figur 5 visar hur energin från en brand fördelas. Energin som transporteras via strålning uppskattas till att vara 30 – 40 % (röd) av den totala energin och energin som transporteras via rökmolnet uppskattas till att vara 60 – 70 % (blå). Om branden ökar i storlek till yta och/eller intensitet kommer det att göra att en mindre andel energi avges via strålning p.g.a. att röken kommer blockera/förhindra strålningen från lågorna. Detta gäller också om bränslet avger mer rök/sot när det förbränns, t.ex. om det är en syrefattig brand [4].



Figur 5: Fördelning av energin från en brand

2.1.4. Antändning

För att ett material ska antändas måste det upphettas tills att det börjar producera brännbara gaser. Antändningstemperaturen varierar mellan olika material. För det här arbetet används diesel som reaktant vilket beskrivs mer i kapitel 2.3. När materialet väl har börjat producera den brännbara gasen måste förhållandet mellan gas och luft vara inom ett specifikt blandningsförhållande för att gasen ska kunna antändas. Detta definieras av den nedre brännbarhetsgränsen (*lower flammable limit*, LFL) respektive den övre brännbarhetsgränsen (*upper flammable limit*, UFL) som överskrids om det bildas för mycket brännbara gaser, se figur 6. Om UFL överskrids antänds inte gasen p.g.a. för låg tillgång på syre. Om förhållandet för gas och syre ligger mellan LFL och UFL kommer gasen antändas om den får ett energitillskott, som till exempel från en öppen flamma eller gnista från en elektrisk eller mekanisk källa [4].

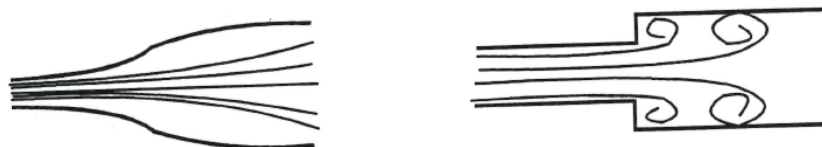


Figur 6: Illustration over LFL och UFL [5]

Ett material kan antändas utan en extern antändningspunkt, genom självantändning eller spontanantändning. Om ett material självantänder är det för att materialet producerar mer energi än vad som transporteras bort och därmed får en temperaturökning. Materialet antänds när det uppnår sin antändningstemperatur. Temperaturökningen kan orsakas av kemiska reaktioner i materialet eller av t.ex. bakterier, då kan materialet bara nå en temperatur i intervallet 50 – 70 °C, högre temperaturer tar död på bakterierna. Vid en spontanantändning utsätts materialet för en extern värmestrålskälla som leder till att materialet börjar avge brännbara gaser. När gaserna når en temperatur som är högre än spontanantändningstemperaturen kommer gaserna att antändas [1].

2.1.5. Laminär och turbulent strömning

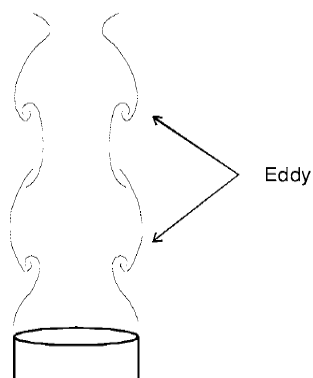
När det brinner produceras rök och luften omkring värms upp. Det leder till att röken och luften vill ”strömma”/förflytta sig eftersom de har en lägre densitet än omgivningen. Strömningen kan ske laminärt eller turbulent, beroende på vilken typ av brand det är och vilken hastighet de varma gaserna har. Figur 7 visar hur en laminär och en turbulent ström kan se ut. Reynolds talet, Re_f , används för att avgöra om en strömning är laminär eller turbulent. Det är en turbulent ström i ett rör om Re_f har ett högre värde än ca 2300 och för en platta om värdet ca 10^5 eller högre. För att beräkna Re_f används ekvation (7), där man multiplicerar fluidets strömningshastighet, \dot{V} , med den karakteristiska längden, L , som man dividerar med fluidets kinematiska viskositet, ν_f . L varierar beroende på vilken utformning objektet har som vätskan/gasen strömmar över eller igenom. För en platta är det längden av plattan och om det är ett rör är det innerdiametern av röret [1] [2].



Figur 7: Till vänster; en laminär ström, till höger; en turbulent ström [1]

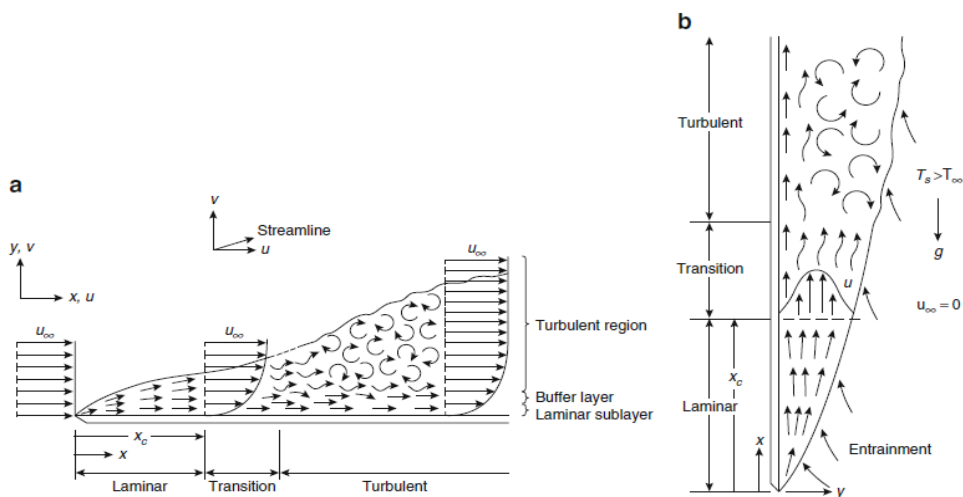
$$Re_f = \frac{\dot{V}L}{\nu_f} \quad (7)$$

I turbulenta bränder kommer lågorna fluktuera och bildar då en så kallad *Eddy*. Detta uppkommer p.g.a. instabiliteten som uppstår mellan det varma fluidet från branden och den kalla luften som omger branden och rökpelaren. Figur 8 visar hur en Eddy kan se ut, det är den som virvlar sig utifrån rökpelaren och då drar med sig luft in i rökpelaren igen. Detta gör att det brännbara gaser som inte har förbränts i rökpelaren får frisk luft och kan då förbrännas. Det kan ske som en diffusions brand eller som en förblandad brand [2] [4].



Figur 8: Fluktuationer i en brand p.g.a. Eddies [2]

Övergången från en laminär ström till en turbulent ström beror på strömningshastigheten. En laminär ström kräver mindre volym än en turbulent vilket illustreras i figur 9 där man ser övergången från laminär ström till turbulent ström, beroende på strömningshastigheten över en horisontell- och en vertikal platta [4].



Figur 9: Övergången från laminär ström till turbulent ström beroende på hastigheten: till vänster; över en horisontell platta, till höger; vid en vertikal platta [4]

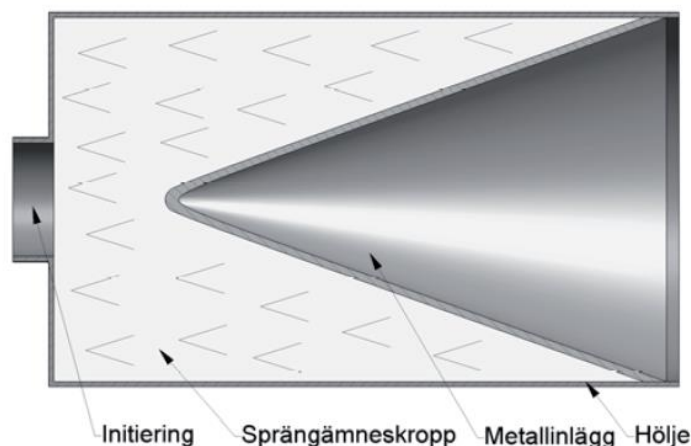
2.2. Riktad sprängverkan (RSV)

Riktad sprängverkan är en vanlig verkansform i stridsdelar avsedda för att kunna penetrera t.ex. välskyddade, bepansrade fordon. Som nämnts i avgränsningarna i kapitel 1 kommer den här rapporten bara att fokusera på strålbildande RSV, i Sverige även kallad RSV 3 [6].

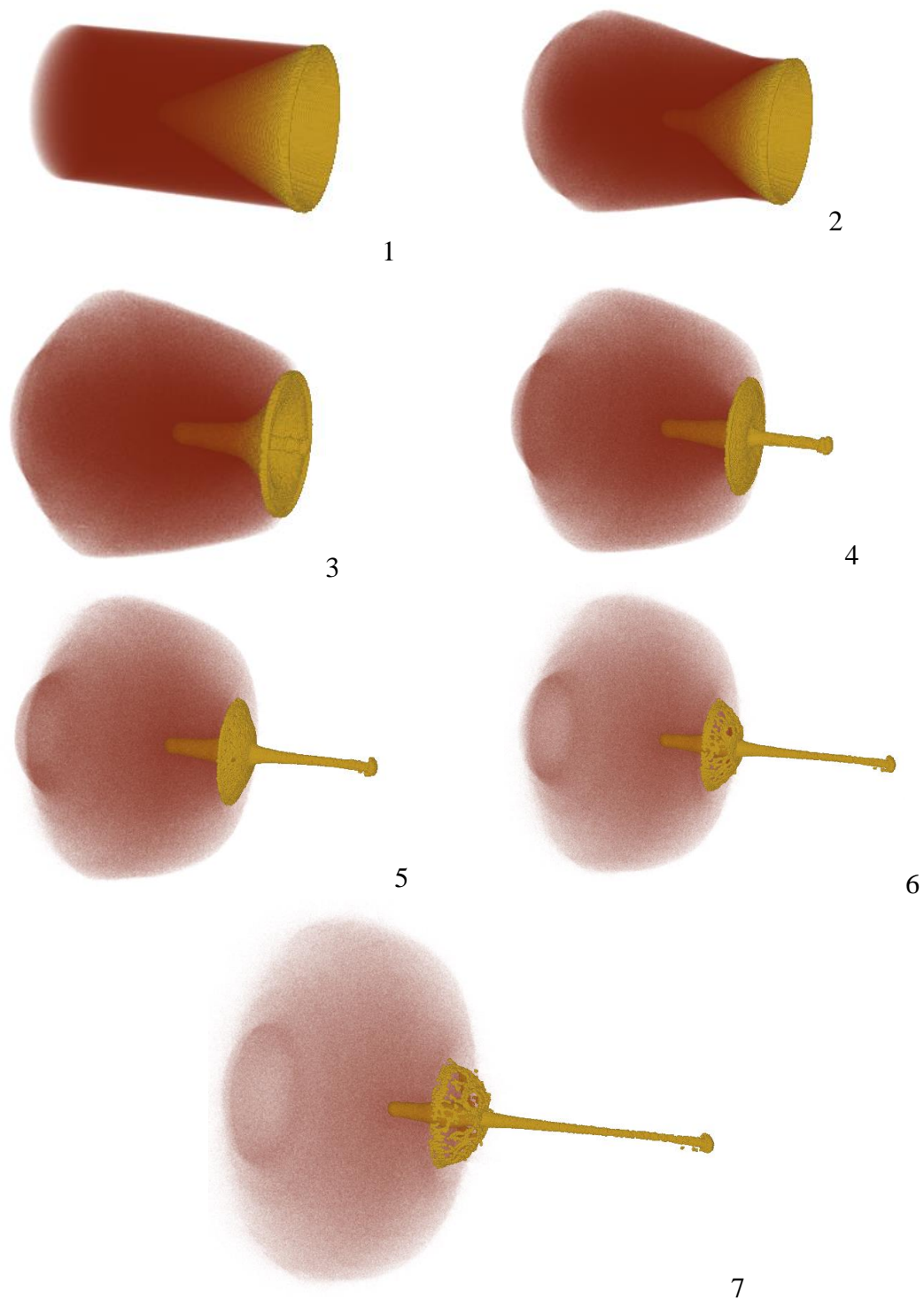
I boken *Lärobok i Militärteknik, vol. 4; Verkan och skydd* beskrivs en strålbildande RSV-stridsdels som [6]:

”Strålbildande RSV-stridsdelar har en penetrator i form av en mycket lång metallstråle, upp mot en meter lång, som rör sig med extremt hög hastighet, 5000–10 000 m/s”.

Penetratorn bildas då sprängämnet detonerar och pressar samman det koniskt formade metalliska inlägget (även kallad liner) [6]. Figur 10 visar hur en RSV 3 är uppbyggd och figur 11 visar en utvecklingsserie av en RSV 3 laddning, från initiering till en utvecklade stråle.



Figur 10: Strålbildande RSV-laddning [6]



Figur 11: Utvecklingsserie av en strålbildande RSV vid skott, det gula är RSV-strålen som bildas.

2.3. Bränslen

Det här arbetet har jämfört diesel med fotogen och Jet A-fuel. Kvaliteten hos diesel varierar mellan olika leverantörer och årstider vilket gör det svårt att hitta fasta brandegenskaper hos dieseln. Fotogen och Jet fuel-A tillverkas vid ungefär samma temperatur som dieseln från råolja och har liknande brandegenskaper. Anledningen till att man jämför de olika bränslena är för att kunna göra beräkningar och simuleringar, för de brandegenskaper om dieseln som behövs inte finns dokumenterat. Kapitel 2.3.1 - 2.3.3 kommer beskriva de olika egenskaperna hos de bränslen som nämnts ovan.

2.3.1. Diesel

I tabell 1 redovisas några antändningstemperaturer, spontanantändningstemperaturer och kokpunktintervall för diesel [4] [7] [8].

Tabell 1: Antändningstemperatur, Spontanantändningstemperatur och kokpunktintervall för diesel

Källa	Antändningstemperatur	Spontanantändningstemperatur	Kokpunktintervall
[4]	≈ 60 °C	≈ 225 °C	-
[7]	≈ 62 °C	≈ 256 °C	-
[9]	>55 °C	-	180 – 360 °C

2.3.2. Jet A – Fuel

I [8] anges det att Jet A – Fuel har en antändningstemperatur på minimum 38 °C och ett kokpunktintervall mellan 150 °C och 240 °C [8]. I [4] står det att ΔH_c för jet fuel ligger mellan 43,0 och 43,5 kJ/g [4].

Jet A – Fuel har en densitet på 800 kg/m³ [9].

2.3.3. Fotogen

I tabell 2 visas antändningstemperatur, spontanantändningstemperatur och kokpunktintervall för fotogen. Antändningstemperaturen från [4] är från ett slutet system, antändningstemperaturer i öppet system saknas. Antändningstemperaturen från [8] varierar beroende på vilken typ av fotogen som används, den högre temperaturen är för premiumklassad fotogen och den lägre är för vanlig fotogen [2] [4] [7] [8].

Tabell 2: Antändningstemperatur, spontanantändningstemperatur och kokpunktintervall för fotogen

Källa	Antändnings-temperatur	Spontanantändnings-temperatur	ΔH_c	Kokpunktintervall
[4]	≈ 49 °C	210 °C	43,3 kJ/g	-
[7]	≈ 50 °C	≈ 220 °C	-	-
[8]	38/43 °C	-	-	150 – 300 °C
[2]	-	-	43,2 kJ/g	-

2.4. Explosion

I boken *Lärobok i Militärteknik, vol. 4; Verkan och skydd* [6] beskrivs en explosion som:

”Fasta eller flytande ämnen som kan bringas till en snabb kemisk reaktion, varvid energi frigörs i form av tryck-volymsarbete och/eller värme”.

En explosion frigör energi genom antingen deflagration eller detonation. Deflagration betyder att explosionen har en förbränningshastighet som är lägre än ljudhastigheten dvs. underljudshastighet. Detonation betyder att explosionen har en förbränningshastighet som är snabbare än ljudhastigheten dvs. överljudshastighet. Ljudets hastighet i luft är ca 340 m/s [6].

2.4.1. Explosion av moln av droppar i luften

Ett moln eller dimma av flytande droppar som kommer från en brännbar vätska kan vara explosiv beroende på tryck- och temperaturförhållanden. Vid normalt atmosfäriskt tryck och temperatur är molnet/dimman explosiv om droppdiameter av vätskan är mindre än 100 μm och den har en masskoncentration i området 100–500 g/m^3 [8].

För mer detaljerade beskrivningar av antändningskriterier, flamhastighet etc. se bilaga A.

Antändningstemperaturen, T_{DA} , för ett droppmoln kan beräknas utgående från kokpunktstemperaturen, T_K , enligt ekvation (8) [10].

$$T_{DA} = 0,74T_K - 70 \text{ °C} \quad (8)$$

2.5. Skadekriterier för människan

För att kunna bestämma om personalen är stridsduglig efter brandfenomenet som uppstår behöver man veta människans tålighet för temperatur- och tryckökningar. Skadekriterierna för höga temperaturer utgår från hur mycket värmeenergi personalen blir utsatt för.

2.5.1. Termiska strålningsskador

I detta arbete antas det att en person klarar av lika mycket värmeeffekt som strålningseffekt. Tabell 3 visar hur stor strålningseffekt en person tål och vilka konsekvenser som kan uppstå när huden är exponerad. Det är viktigt att tänka på hur länge en person är exponerad för den termiska strålningen. Mer detaljer om termiska strålningsskador finns i bilaga B.

Tabell 3: Exponering av ulike grader av termisk stråling [11]

Strålingseffekt [kW/m ²]	Månsklig eksponeringsgräns (exponerad hud)
35 – 37,5	100 % dødlighet etter 1 min; 1 % dødlighet etter 10 sekunder
25,0	100 % dødlighet etter 1 min; betydnande skador etter 10 sekunder
12,5 – 15,0	1 % dødlighet etter 1 min; førstegradsbrännskada etter 10 sekunder
9,5	Smærtröskel nås etter 8 sekunder
4,0 – 5,0	Tillräckligt för att orsaka smärta om personalen inte kan nå skydd inom 20 sekunder; det är troligt att blåsor i huden kan uppstå (andragradsbrännskador), 0 % dødlighet
1,6	Orsakar inget obehag vid längre exponering

Tabell 4 presenterar mængden värmeenergi per kvadratmeter som behövs för att uppnå de olika graderna för brännskador [12].

Tabell 4: Mængden värmeenergi per kvadratmeter som krävs för att uppnå brännskador [12]

Första gradens brännskada	85 kJ/m ²
Andra gradens brännskada	170 kJ/m ²
Tredjegradsens brännskada	250 kJ/m ²

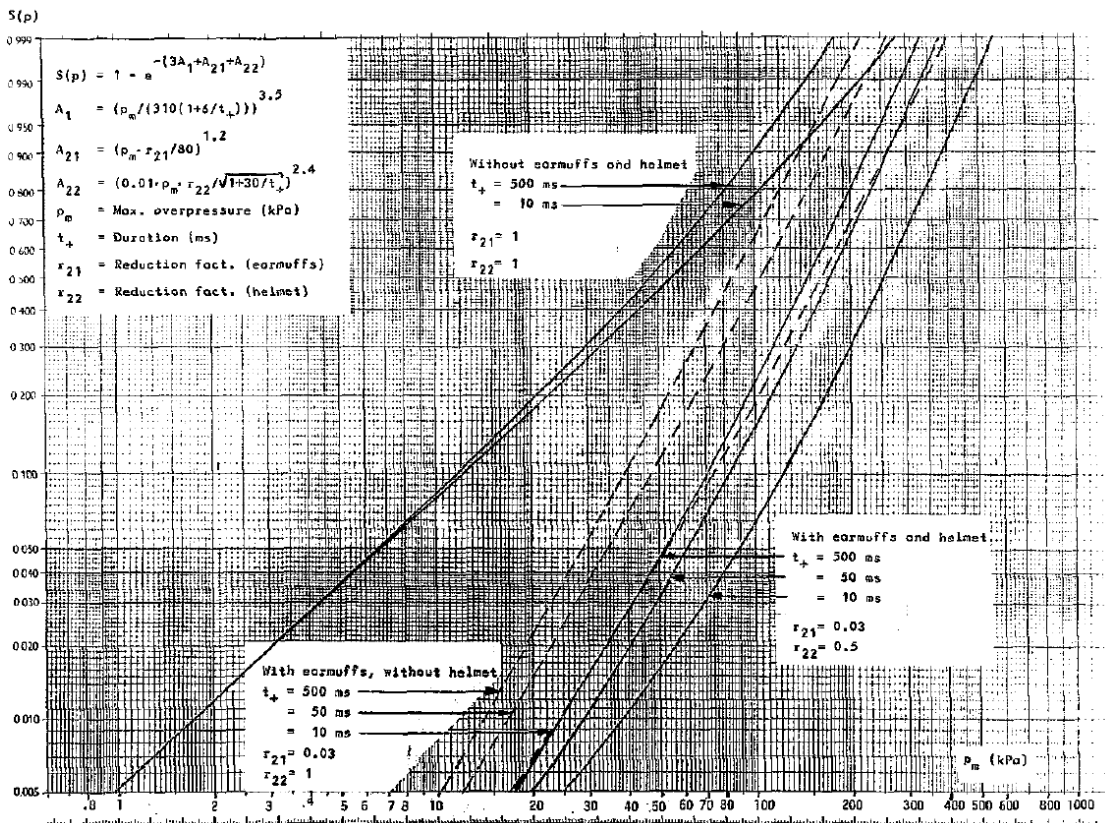
2.5.2. Tryckökningar

I rapporten ”*Estimate of man’s tolerance to the direct effects of air-blast*” [13], redovisas experiment på olika djur för att kunna bedöma hur mycket en människa tål. Rapporten kom fram till att kroppsmassan är den enda parametern som har en påverkan på hur väl man hanterar en luftstöt/tryckvåg [13].

En annan metod för att se påverkan av en luftstöt eller en tryckvåg, även i en komplex miljö med stötsvågsreflexer är Axelssons metod. Den beskriver en persons bröstorg som ett enaxligt massa - fjädersystem där man använder sig av bröstorghastigheten för att bedöma påverkan [14].

2011 skrev Forsvarets forskningsinstitut (FFI) en rapport om liknande metoder som Axelssons, men som kräver färre mätpunkter, för att kunna bestämma tryckvågs skador. Axelssons kräver fyra mätpunkter och FFI gjorde flera försök med olika metoder där man bara behöver använda en mätpunkt för att uppnå liknande resultat som med Axelssons [15].

Figur 12 presenterar sannolikheten för att en soldat ska bli utslagna p.g.a. övertryck och hur sannolikheten varierar beroende på om soldaten har på sig hörselskydd och hjälm eller inte [16].



Figur 12: Sannolikheten att en soldat förlorar medvetandet i ett bepansrat fordon p.g.a. övertryck [16]

Eftersom tryckpåverkningar kommer att ha olika påverkan på olika individer kommer fokus vara på om personalen är stridsdugliga vid en tryckökning, som nämnt i kapitel 1.5.

3. Data

Detta kapitel går igenom den data som har funnits via litteraturstudien. Det beskriver vilken minsta antändningsenergi olika bränslen behöver för att kunna antändas, tidigare skott med RSV genom bränsletankar och RSV-skott som inte har gått igenom bränsletankar för att se påverkningar av enbart RSV-strålen samt ett tidigare experiment utfört hos FOI (som experimentet för detta arbete baseras på).

3.1. Minsta antändningsenergin

Beroende på vilket blandningsförhållande, λ , det är mellan bränslet och luften krävs det olika mycket energi för att få det att antända. Tabell 5 visar den minsta antändningsenergin (MAE) som behövs för att antända diesel och fotogen vid normalt atmosfäriskt tryck och temperatur, med varierande blandningsförhållande och med droppdiametern på $100 \mu\text{m}$ [8].

Tabell 5: Minsta antändningsenergi som krävs för att antända olika brännbara vätskor beroende på bränsle/luft-blandning [8]

Droppdiameter	Bränsle	Blandningsförhållande	MAE
100 μm	Diesel	$\approx 0,4$	$\approx 400 \text{ mJ}$
		$\approx 0,5$	$\approx 60 \text{ mJ}$
		$\approx 0,6$	$\approx 40 \text{ mJ}$
		$\approx 0,7$	$\approx 25 \text{ mJ}$
		$\approx 0,8$	$\approx 20 \text{ mJ}$
		$\approx 0,9$	$\approx 15 \text{ mJ}$
	Fotogen	$\approx 0,4$	$\approx 200 \text{ mJ}$
		$\approx 0,5$	$\approx 40 \text{ mJ}$
		$\approx 0,6$	$\approx 30 \text{ mJ}$
		$\approx 0,7$	$\approx 20 \text{ mJ}$
		$\approx 0,8$	$\approx 10 \text{ mJ}$
		$\approx 0,8$	$\approx 10 \text{ mJ}$
		$\approx 0,9$	$\approx 10 \text{ mJ}$
		$\approx 0,9$	$\approx 10 \text{ mJ}$

3.2. RSV-skjutning genom bränsletank

I rapporten *Fuel Tank Vulnerability to Shaped Charge Jet* [7] gjordes åtta test, fyra utomhus och fyra i en tryckkammare, där man sköt med en RSV-laddning genom bränsletankar fyllda med diesel eller fotogen (JP8). Vid dessa experiment blev slutsatsen att [7]:

- det blir en mer aggressiv utsprutning av vätskedroppar när RSV-strålen går igenom den vätskefyllda delen av bränsletanken,
- vid genomskjutning i det gasfyllda området i bränsletanken blev det ytterligare en brand vid reststacken utöver den första branden som antändes när strålen kom ut ur tanken,
- i tryckkammaren pulserar branden fram p.g.a. tryckreflektionerna som bildas i det slutna utrymmet,
- det är mer diesel som förbränns än fotogen, då det dokumenterades högre tryck i tryckkammaren vid skjutningar genom vätskelagret när bränsletanken var fylld med diesel än när den var fylld med fotogen,
- RSV-strålen drar alltid med sig bränsle och att bränslet alltid antänds.

3.3. RSV-skott mot Pansvarbandvagn 302

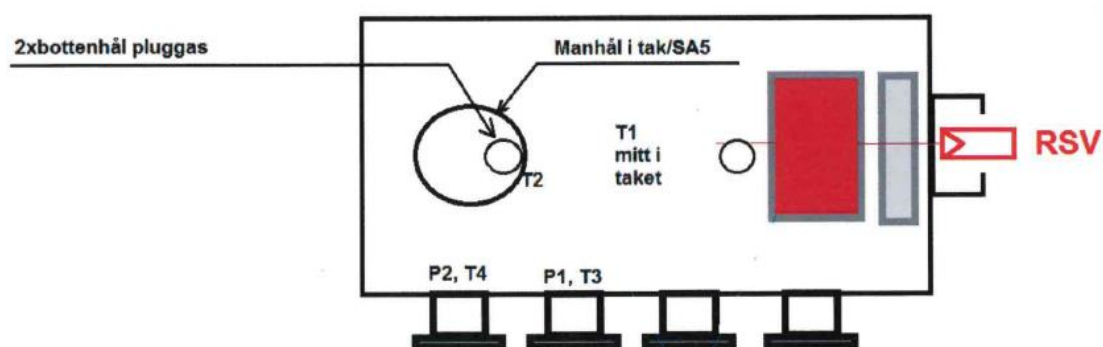
1994 blev två svenska pansarbandvagn 302 (PBV 302) träffade av pansarvärnsrobotar med RSV-verkan. Dessa händelser medförde att Försvarets Forskningsanstalt (FOA) i samarbete med FMV gjorde kontrollskjutningar för att studera hur besättningen påverkas av tryck, gas, rök och ljus från roboten. Den robot som användes vid försöken var av typen rb 53 Bantam, kaliber 105 mm vars stridsdel är en RSV-laddning som innehåller 1,1 kg hexotol och har en genomslagskropp av koppar. Utifrån rapporten framkommer det ett uppmätt P_{max} på ca 60 kPa men rapporten säger också att det var ett P_{max} vid förarens bålparti som var ca 229 kPa och att vid andra platser i bandvagnen låg P_{max} upp emot 70 kPa [17].

Dessa försök omfattar inte genomskjutningar av dieseltank men har tagits med för att få en uppskattning om tryckökningen från en RSV-beskjutning utan ett brandfenomen.

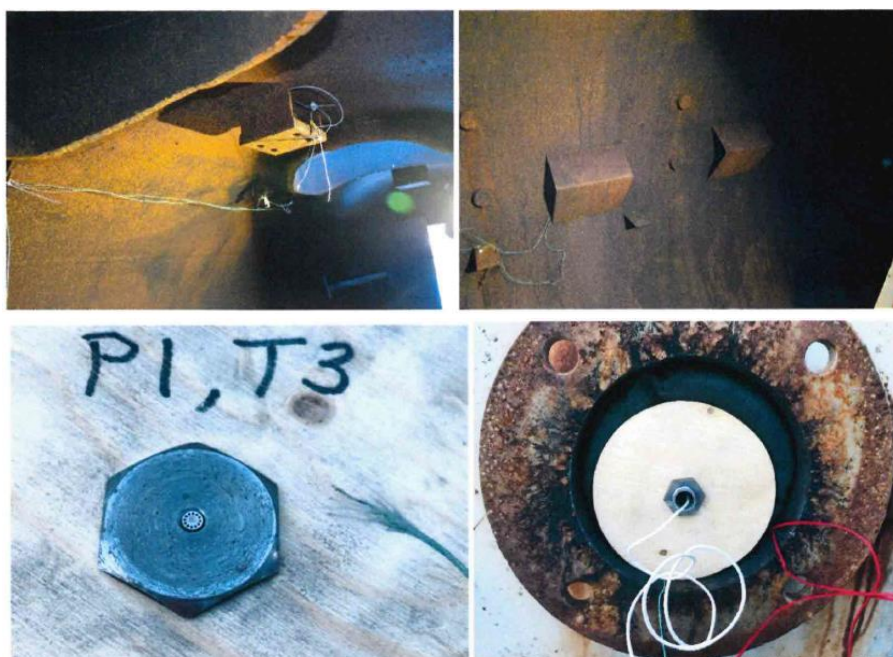
3.4. Experiment från 2019

Data gällande den RSV-laddningen som användes vid detta experiment är sekretessbelagd och kommer inte anges i rapporten.

Experimentet genomfördes under perioden januari-februari 2019 och utomhustemperaturen var dokumenterad till $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Temperaturen i trycktanken mättes med termoelementen, vilka innan skott visar att temperaturen var $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Det finns ingen dokumentation som visar vilken temperatur dieseln hade, dieseltanken fylldes från en dieseldunk som stod på en bil utomhus och det uppskattas att temperaturen hos dieseln kan ha varit runt $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ när experimentet inleddes. Figur 13 visar var mätinstrumenten var placerade i experimentet och figur 14 visar hur de var skyddade/upphängda inne i trycktanken. Figur 15 visar vilken sorts mätinstrument som användes och när de var kalibrerade innan experimentet [18].



Figur 13: Översikt av placeringar av mätinstrument [18]



Figur 14: Bilder över var och hur mätinstrumenten var placerade i trycktanken [18]

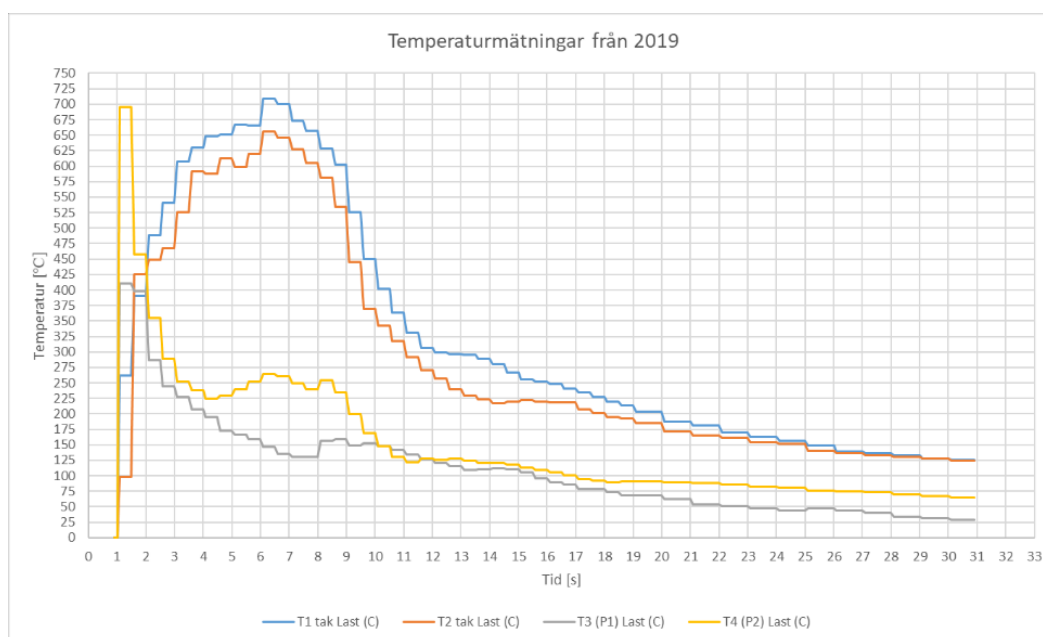
Instrument	Serienummer	Kalibrerad
Temperaturlogger Picolog TC08	AO015/812	2018-06-27
Förstärkare Dewetron 30-4 (kanal 3 och 4)	K2000877	2018-02-07
Registreringsutrustning GEN2i	IEY1100243	2018-06-20
Mätkort Gen2i 8-kanaler, 200kS/s, SW7.14	IDK1101579	2018-06-20
Tryckgivare P1 Kulite XTL-190 7,5 barA (k=13,35mV/bar)	H98-33	2019-02-07 ¹⁾
Tryckgivare P2 Kulite XTL-190 7,5 barA (k=14,32mV/barA)	R99-30	2019-02-07 ¹⁾
Termometer Microtherma II	D07360452	2018-11-29
Termoelement T1 (deviation +0,1 °C)	T1	2019-02-07 ²⁾
Termoelement T2 (deviation +0,5 °C)	T2	2019-02-07 ²⁾
Termoelement T3 (deviation +0,2 °C)	T3	2019-02-07 ²⁾
Termoelement T4 (deviation ±0 °C)	T4	2019-02-07 ²⁾
Tryckkalibrator FLUKE 719 100G, 8bar	2092045	2019-01-10

¹⁾ Egen mätkedjekalibrering mot tryckkalibrator

²⁾ Egen mätkedjekalibrering vid RT, och varmt vatten 80 °C. Deviationen vid 80 °C angiven. Positiv deviation innebär att termoelementet visar för mycket jämfört med referensinstrumentet. Kalibrering i respektive kanal på picologger.

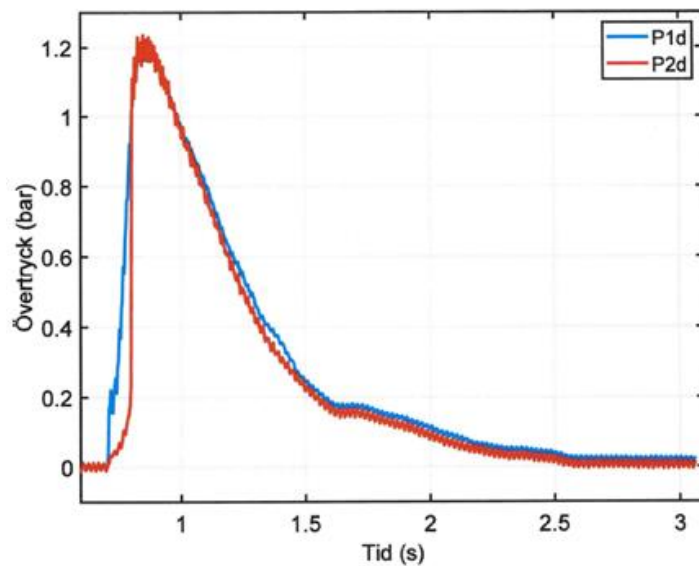
Figur 15: Typer av mätinstrument som användes och när dem var kalibrerade [18]

Temperaturmätningarna från experimentet presenteras i figur 16, dessa finns även i tabell 41, bilaga C. Det framgår att den maximala temperaturen som registrerades i brandfenomenets tidsintervall var 695 °C i mätpunkt T4. Det framkommer också att temperaturmätningarna från de andra mätpunkterna får en snabb ökning som i T4 men T1 och T2 når sin maximala temperatur utanför tidsintervallet till brandfenomenet. T3 når sin maximala temperatur samtidigt som T4.



Figur 16: Temperaturmätningar från experimentet 2019 [18]

Figur 17 viser tryckutvecklingen från experimentet 2019, som får ett max övertryck på ca 1,2 bar efter ca 1 sekund. Trycket avtar snabbt i ca 0,5 sekunder för att sedan avta långsammare tills det avklingat efter ca 3 sekunder.



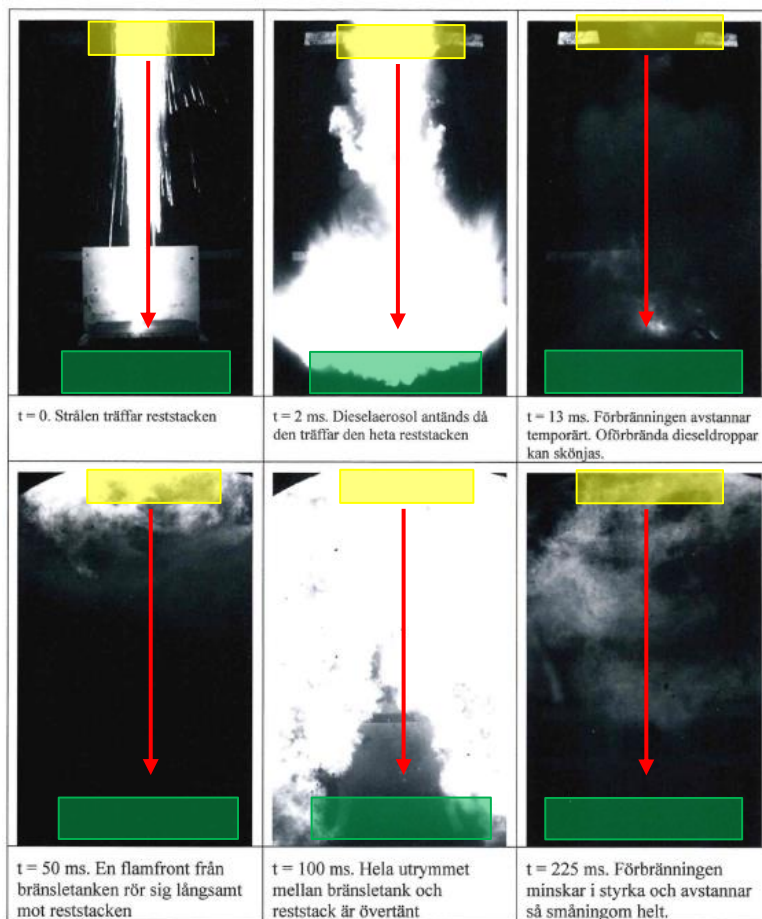
Figur 17: Tryckmätningar från experimentet 2019 [18]

Figur 18 visar utgångshållet i dieseltanken som RSV-strålen skapade. Utgångshållet är lokaliserat i den nedre halvan av dieseltanken och är någorlunda cirkulärt men det finns ingen dokumentation om utgångshållets diameter.



Figur 18: Utgångshållet i dieseltanken från RSV-strålen från experimentet 2019 [18]

Figur 19 viser hur RSV-strålen antänder dieselaresolet. De röda pilarna visar hur RSV-strålen och branden rör sig. Den gula rektangeln visar var dieseltanken är placerad i förhållande till reststacken som är markerad med den gröna rektangeln. I bildtexten för $t = 2\text{ms}$ står att att dieselaresolet antänds när den träffar den heta reststacken. Det är viktigt att veta att reststacken inte är förupphettad utan värms upp av då den träffas av RSV-strålen.



Figur 19: Tidsförlopp över förbränningen mellan bränsletanken och reststacken från experimentet 2019 [18]

4. Metod

Detta kapitel beskriver hur arbetet har genomförts, vilka värden som har använts i beräkningarna, vilket simuleringsprogram som har använts, hur modellen var uppbyggd och vilka värden som modellen använde.

4.1. Litteraturstudie

Det här arbetet använder sig av en översiktsstudie (scoping review) som metod för litteraturstudiedelen. En översiktsstudie beskrivs i boken *Att göra systematiska litteraturstudier* som [19]:

”Översiktsstudier kan göras i syftet att få en bild av existerande forskning inom ett område och besluta om det är möjligt att göra en heltäckande, systematisk studie. De kan också göras för att identifiera områden där ingen eller lite forskning finns.”

Metoden valdes eftersom det finns väldigt lite öppen publicerad forskning om problemställningen som tas upp i den här rapporten. Med den här metoden går det att läsa och evaluera liknande problemställningar, jämföra dem med problemställningen för det här arbetet och experiment för att sedan implementera data från dem in i det här arbetet.

Det här arbetet har analyserat drygt ett 40-tal olika rapporter, dokument och böcker. Endast de som är upptagna i referenslistan har använts i rapporten.

4.2. Experiment

I experimenten används en trycktank med volymen 10 m³ för att simulera ett stridsfordon med samma volym [20]. Experimentet gjordes hos FOI på skjutplats 11 på Grindsjön, 2021-02-15. Trycktanken är placerad utomhus. Dieseltanken har en volym på 206,25 liter och fylldes med 187,5 liter diesel med specifikationer enligt kapitel 2.3.1. I bilaga D visas fler bilder av trycktanken.

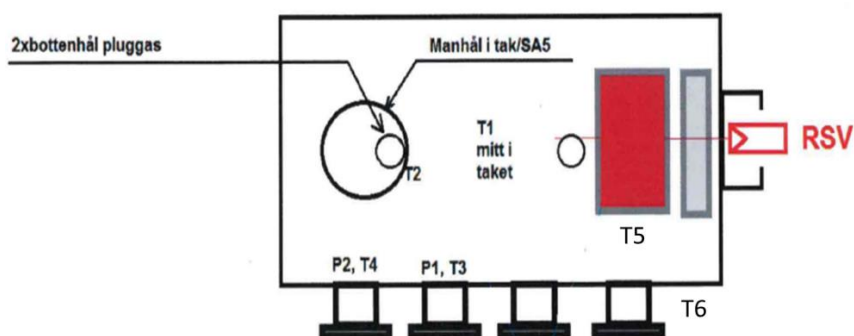
Vid experimenten används OKQ8s *Diesel B0 – Miljöklass 1*, med brandegenskaper enligt tabell 6. För mer information, se bilaga E [21].

Tabell 6: Brandegenskaper för den diesel som används vid experimenten

Diesel B0 – Miljöklass 1	
Densitet vid 15 °C	815 kg/m ³
Begynnelsekokpunkt	185 °C
Flampunkt	70 °C

RSV3-laddningen som användes i detta experiment väger 450 g som ger RSV-strålen en starthastighet på ca 7300 m/s och en temperatur runt 550 – 600 °C. Laddningen var placerad i ett hål i trycktanken som har en diameter på 0,31 m.

Utomhustemperaturen var $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$, temperaturen inne i trycktanken ca $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ och dieseltanken hade en temperatur på $11\text{ }^{\circ}\text{C}$ vid experimenttilfallet. Det användes samma typer av mätinstrument, se figur 15, placerat på samma platser som experimentet 2019 förutom termoelement T5 och T6, se figur 20. T5 var placerad på dieseltanken för att mäta temperaturen på dieseln innan skott. Det antas att dieseltanken som är av metall, kommer ha samma temperatur som dieseln och efter skott blir det ytterligare en mätpunkt för temperaturutvecklingen i trycktanken. T6 var placerad på utsidan av trycktanken för att mäta utetemperaturen. T5 och T6 var samma typ av termoelement som de andra.



Figur 20: Översikt av placeringar av mätinstrument från experimentet 2021

4.3. Beräkningar

I alla beräkningar antas det att trycktanken är cylindrisk, trots att den i verkligheten är avrundad i ändorna. Det leder till att den totala längden hos trycktanken antas vara $3,18\text{ m}$ och att innerdiametern är $2,00\text{ m}$ [20].

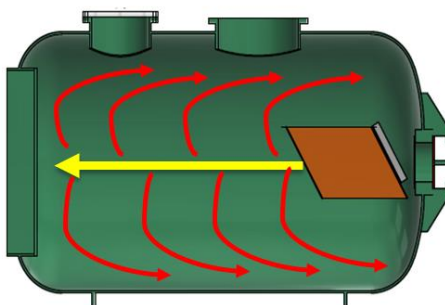
Det är fem delkapitel som fokuserar på olika typer beräkningar. Alla beräkningar baseras på resultat från experimenten på FOI som visas i kapitel 3.4 och 5.1 Kapitel 4.3.1 behandlar värmeproduktionen och värmeflödet, 4.3.2 mängden diesel som antas förbrännas, 4.3.3 mängden energi som krävs för uppvärmning av luften i trycktanken, 4.3.4 energier från RSV-strålen och 4.3.5 antändningstemperaturen av olika bränslen i droppmoln.

4.3.1. Värmeproduktion, värmeflöde och värmeenergi från experimenten

För att ta reda på hur stor påverkan brandfenomenet har på personalen behöver man veta värmeproduktionen, \dot{Q}_C , och värmeflödet, \dot{q}'' . Beräkningarna för båda experimenten görs med utgångspunkt från medeltemperaturen.

Vid experimenten användes bara termoelement för att mäta temperaturen och som figur 14 visar, sitter de skyddade av en tunn metallvägg. Det antas att den totala värmeenergin kan beräknas med ekvation (4) (värmeenergi via konvektion) multiplicerat med arean som är i kontakt mellan det varma fluidet och ytan av trycktanken, A_{Kv} som då ger ekvation (11). Detta eftersom strålningen inte kommer åt termoelementen och förloppet anses vara för snabbt för att konduktionen ska ha någon påverkan på temperaturmätarna.

$$\dot{Q}_C = \dot{q}''_{Kv} \cdot A_{Kv} = A_{Kv} h (T_Y - T_{Fl}) \quad (11)$$



Figur 21: Snittbild av trycktank med illustration över värmeströmmarna i sig

Figur 21 visar en snittbild av trycktanken, den bruna romben illustrerar dieseltanken, den gula pilen är RSV-strålen och de röda pilarna är värmeströmmarna som uppstår från brandfenomenet. (De utritade värmeströmmarnas riktning kan variera, dessa är bara till för att illustrera de värmeströmmar som uppstår och sprider sig ut i trycktanken.) Flera bilder av trycktanken finns i bilaga D.

A_{Kv} beräknas via ekvation (12), där D , är innerdiametern av trycktanken och B , är längden av trycktanken.

$$A_{Kv} = \pi D B \quad (12)$$

För att beräkna den konvektiva värmeöverföringskoefficienten h , används ekvation (13) [1] [4]:

$$h = \frac{C Re_f^n \cdot \left(\frac{c_{Pv} \rho_f}{k_f} \right)^{1/3} \cdot k_f}{L} \quad (13)$$

C och n är variabler som beror av Re_F , se tabell 7. ρ_f är densiteten för det fluiden, k_f är dess värmeledningsförmåga och c_p som är den specifika värmeledningsförmågan hos fluidet. Ekvation (13) tar inte hänsyn om det är laminärt eller turbulent flöde genom röret.

Tabell 7: Värderna på variabler för ekvation (13) beroende på Re_F värdet [4]

Re_F	C	n
0,4 – 4	0,989	0,330
4 – 40	0,911	0,385
40 – 4000	0,683	0,446
$4 \cdot 10^3 - 4 \cdot 10^4$	0,193	0,618

Re_F beräknas enligt ekvation (7).

Det finns ingen data om hastigheten hos flamfronten. Därför kommer beräkningarna utföras med olika antagna hastigheter, från 50 m/s till 340 m/s med 50 m/s intervall, (sista intervallet blir från 300 m/s till 340 m/s). Anledningen till att 340 m/s väljs är för att det är ljudhastigheten i luft. Det antas att denna explosion är en deflagration.

Som nämndes i kapitel 2.3 kommer det här arbetet jämföra diesel mot Jet A – fuel och fotogen. Eftersom det inte har hittats någon information om k_f , c_p och v_f för diesel kommer konvektionsberäkningarna använda information om Jet A – fuel.

Det antas då att det är en uppvärmd gas/moln-ström av Jet A – fuel som passerar mätpunkterna i experimenten.

ρ_{Diesel} är 815 kg/m^3 och $\rho_{Jet A-Fuel}$ är 800 kg/m^3 [9]. Det antas därför att de olika gas/moln-strömmarna kommer uppföra sig likt varandra inuti trycktanken och att det blir samma mängd Jet A – Fuel som förbränns som mängden diesel.

Som nämnts i kapitel 2.3.2 är ΔH_C för Jet A - Fuel $43,5 \text{ kJ/g}$.

I rapporten ”The Potential for Fuel Tank Fire and Hydrodynamic Ram From Uncontained Aircraft Engine Debris” [9] finns det information om Jet A – fuel i gas/moln – fas beroende på vilken temperatur den har. k_f , c_p och v_f beräknas genom ekvationerna (14), (15) och (16). I ekvation (15) ges c_p i enheten $[\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})]$ men i arbetet används den i enheten $[\text{J}/(\text{g}\cdot\text{K})]$, därav korrigeras enheten och v_f beräknas genom att dividera den dynamiska viskositeten, η_f , med ρ_f för Jet A – fuel [9].

$$k_f = 8,1 \cdot 10^{-5} \cdot T - 0,014 \quad (14)$$

$$c_p = \frac{3,01 \cdot T + 729}{1000} \quad (15)$$

$$v_f = \frac{\eta_f}{\rho_f} = \frac{1,18 \cdot 10^{-5} \cdot T + 1,28 \cdot 10^{-6}}{\rho_f} \quad (16)$$

\dot{q}'' beräknas via ekvation (12) men divideras med trycktankens tvärsnittsarea, A_C , som ger ekvation (17). A_C kommer i det här fallet vara lika stor som A_F då trycktanken hindrar arean av branden att bli större. Anledningen till att man räknar ut \dot{q}'' det här sättet, är för att ta reda på hur stort värmeflödet är i horisontalplanet.

$$\dot{q}'' = \frac{\dot{Q}_C}{A_C} = \frac{A_{Kv}h(T_Y - T_{FL})}{A_C} \quad (17)$$

För att ta reda på hur mycket värmeenergin, Q , som bildas under brandförloppet multipliceras \dot{Q}_C med Δt , som är tiden för brandförloppet. Detsamma kommer att göras med \dot{q}'' för att ta reda på hur stor värmeenergiflödet är i horisontalplanet, q'' .

Experiment 2019

De temperaturer som används för att beräkna medeltemperaturen som används för T_{FL} visas i tabell 8, vid beräkningarna är temperaturerna uttryckta i Kelvin.

Tabell 8: Temperaturmätningar från 1,1 till 1,3 sekunder av branden vid de olika mätpunkterna, hämtat från tabell 41

	Mätpunkter			
Tid	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C)
1,1	262	98	411	695
1,2	262	98	411	695
1,3	262	98	411	695

Δt kommer antas vara 0,2 sekunder eftersom det är under den tiden som det syns ett brandförlopp i bilderna från experimentet 2019, se figur 19.

De temperaturer som används för att beräkna medeltemperaturen som används för T_Y visas i tabell 9, vid beräkningarna är temperaturerna uttryckta i Kelvin.

Tabell 9: Temperatur som används för T_Y i beräkningarna för experimentet 2019, hämtat från tabell 41

Mätpunkter			
T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C)
0	0	0	0

Placeringen av mätpunkterna visades i figur 13, kapitel 3.4.

Beräkningarna och de värdena som har använts för att beräkna värmeproduktionen och värmeflödet för experimenten visas i bilaga F.

Experiment 2021

De temperaturer som används för att beräkna medeltemperaturen för T_{FL} , visas i tabell 10, hämtat från bilaga F, vid beräkningarna är temperaturerna uttryckta i Kelvin.

Δt kommer vara 0,7 sekunder eftersom det är under den tiden som det syns ett brandförlopp i höghastighetsfilmerna från experimentet 2021.

T1 kommer inte att användas för att beräkna medeltemperaturen, då det inte finns några värden att använda, se kapitel 5.2.1 och 6.1.3 för förklaring samt diskussion om detta. Termoelementet, T5, som var placerat på utsidan av dieseltanken har också registrerat brandförloppet. T6 var placerat på utsidan av trycktanken för att mäta utetemperaturen. Temperaturmätningar för T6 kommer därmed inte att användas för att beräkna medeltemperaturen.

Tabell 10: Temperaturmätningar från 0,4 till 1,1 sekunder av branden, hämtat från tabell 44

Tid (s)	Mätpunkter					
	T1 Tak Last (°C)	T2 Manhål Last (°C)	T3 vid P1 Last (°C)	T4 vid P2 Last (°C)	T5 Dieseltank Last (°C)	T6 Utetemp Last (°C)
0,4		245	5	15	18	-4
0,5		245	5	15	18	-4
0,6		245	5	15	18	-4
0,7		967	10	49	68	-4
0,8		967	10	49	68	-4
0,9		967	10	49	68	-4
1,0		967	10	49	68	-4
1,1		967	10	49	68	-4

De temperaturer som används för att beräkna genomsnittstemperaturen för T_Y , visas i tabell 11, vid beräkningarna är temperaturerna uttryckta i Kelvin.

Tabell 11: Temperatur som används för T_Y i beräkningarna för experimentet 2021, hämtat från tabell 44

Mätpunkter			
T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C)	T5 (°C)
6	3	2	11

Beräkningarna och de värden som har använts för att beräkna värmeproduktionen och värmeflödet för experimenten visas i bilaga H.

4.3.2. Mängden diesel som förbränns under brandfenomenet

För att kunna bestämma massflödet i simuleringarna görs en beräkning för att bedöma hur mycket diesel som har förbränts under brandfenomenets tidsförlopp. Genom att omstrukturera ekvation (2) och multiplicera den med tiden för förbränningen kan man räkna ut hur mycket diesel som har förbränts enligt ekvation (19). Detta görs med resultaten från genomsnittstemperaturen från båda experimenten.

$$m = \dot{m}'' \cdot A_f \cdot \Delta t = \dot{m} \cdot \Delta t = \frac{\dot{Q}_c}{\chi \Delta H_C} \cdot \Delta t \quad (19)$$

De värden som har använts och beräknats för att ta fram mängden bränsle visas i bilaga F och H.

4.3.3. Energi for oppvarming av luften i trycktanken

För att kontrollera mængden värmeenergi, Q , från beräkningarna i kapitel 4.3.1 för båda experimenten, beräknas hur mycket energi det behövs för att värma upp luften i trycktanken. Beräkningarna görs vid ca 7 sekunder för båda experimenten då det är då det är högst temperatur för de flesta mätpunkterna. Beräkningen görs med medeltemperaturen, T_2 , för varje experiment. Från experimentet 2021 kommer data från mätpunkt T6 inte att tas med då den är placerad utanför trycktanken. Beräkningen görs enligt ekvation (20), ρ_{luft} beräknas via ekvation (21) där man använder sig av temperaturen på luften innan RSV – laddningen skjuts, T_1 . Volymen på trycktanken, $V_{Trycktank}$, som är nämnt tidigare i kapitel 4.2 är 10 m^3 . c_p för luften hämtas från [4] vid T_1 för båda experimenten. De värden som används för T_1 och T_2 visas i tabell 12 och 13 är angivna i Kelvin och för c_p i tabell 14.

$$Q_{luft} = \frac{\rho_{luft \text{ vid } T_1}}{c_p \text{ vid } T_1} \cdot V_{Trycktank} \cdot (T_2 - T_1) \quad (20)$$

$$\rho_{luft} = \frac{353}{T_1} \quad (21)$$

Tabell 12: Temperaturer för beräkning av genomsnittstemperaturen för T_1 och T_2 för experimentet 2019

2019					
Mät punkt	T1	T2	T3	T4	Genomsnitt
T_1	0 °C	0 °C	0 °C	0 °C	273 K
T_2	700 °C	646 °C	136 °C	260 °C	709 K

Tabell 13: Temperaturer för beräkning av genomsnittstemperaturen för T_1 och T_2 för experimentet 2021

2021						
Mät punkt	T1	T2	T3	T4	T5	Genomsnitt
T_1	6 °C	6 °C	3 °C	2 °C	11 °C	279 K
T_2	634 °C	617 °C	466 °C	349 °C	120 °C	710 K

Tabell 14: Värden för den specifikaste värmekapaciteten för luft som används i beräkningarna [4]

	250 K	300 K
c_p	1,006 kJ/kg·K	1,007 kJ/kg·K

Det görs en interpolation mellan värdena för c_p som presenteras i tabell 14, det värde som används vidare i arbetet är 1,0065 [kJ/kj K].

Dividerar man sen Q_{luft} med 7 sekunder får man det genomsnittliga värmeflödet som behövs för att värma upp luften från T_1 till T_2 för båda experimenten.

De värden som har använts och beräknats för att ta fram mängden värmeenergi som behövs för att värma upp luften i trycktanken visas i bilaga I.

4.3.4. Värme- och kinetiskenergi hos RSV-strålen

För att se om värmeenergin hos RSV-strålen har någon påverkan på resultaten från experimenten används ekvation (5) som sedan multipliceras med tiden som det tar för strålen att färdas från dieseltanken till reststacken, t_{RSV} , ekvation (22). Det görs också ett antagande om att all kinetisk energi, $Q_{Kinetisk\ energi}$, ekvation (23), från RSV-strålen omvandlas om till värmeenergi när strålen träffar reststacken. Detta görs för att se hur mycket en RSV-stråle måste väga, $m_{RSV-stråle}$, för att uppnå den minsta antändningsenergin (MAE), Q_{MAE} , samt hur mycket energi en RSV-stråle har, ungefär, med vikt som är närmare verkligheten. För beräkna hur mycket en RSV-stråle måste väga, $m_{minsta\ RSV-stråle}$, för att uppnå MAE, hämtas data från tabell 5 och ekvation (23) görs om till ekvation (24). MAE varierar med blandningsförhållandet och beräkningarna kommer göras på alla blandningsförhållanden med dieseln som är presenterad i tabell 5.

Baserat på bilderna från höghastighetskamerorna i figur 19 samt figurerna 30 och 31, antas det att t_{RSV} är ca 1,5 millisekunder. ϕ antas vara 1 då det är i samma rum. ε antas vara 0,79, hämtat från [4] utifrån att insidan av trycktanken är oxiderat stål, temperaturen på RSV-strålen, T_F , antas vara 600 °C och T_0 hämtas från tabell 12 och 13 beroende på vilket experiment man räknar på. I beräkningarna anges temperaturerna i Kelvin. Hastigheten hos RSV-strålen, $v_{RSV-stråle}$, i trycktanken, uppskattas från experimenten att vara ca 4500 m/s och $m_{RSV-stråle}$ antas vara runt 20 – 30 g.

$$\dot{q}_{Strålning_{RSV-strålen}} = \phi \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_F^4 - T_0^4) \cdot t_{RSV} \quad (22)$$

$$Q_{Kinetiskenergi} = \frac{m_{RSV-stråle} \cdot v_{RSV-stråle}^2}{2} \quad (23)$$

$$m_{minsta\ RSV-stråle} = \frac{2 \cdot Q_{MAE}}{v_{RSV-stråle}^2} \quad (24)$$

De värden som har använts och beräknats för att ta fram mängden värme- och kinetiskenergi för RSV-strålen visas i bilaga J.

4.3.5. Antändningstemperatur i ett droppmoln

Antändningstemperaturen i ett droppmoln, T_{DA} , beräknas med ekvation (8). De värden som har använts i beräkningarna visas i tabell 15. Litteraturen beskriver inte varför det är en sådan temperaturskillnad för kokpunkten för de olika bränslena. En anledning kan vara att tillverkningsprocessen är lite annorlunda och som leder till att kokpunktstemperaturen höjs.

Tabell 15: Kokpunktstemperaturer for ulike diesel og fotogen

Bränsle	Kokpunktstemperatur (T_K)	Källa
Diesel	185 °C	[21]
Diesel	180 °C	[8]
Diesel	230 °C	[8]
Diesel	280 °C	[8]
Diesel	330 °C	[8]
Diesel	360 °C	[8]
Fotogen	150 °C	[8]
Fotogen	200 °C	[8]
Fotogen	250 °C	[8]
Fotogen	280 °C	[8]

4.4. Simulering

Simuleringarna baserar på data från experimenten utförda 2019 och 2021. De görs med simuleringssprogrammet FLACS-CFD som står för *Flame Acceleration Software* (FLACS) och är ett strömningsmekaniskt beräkningsprogram (Computational fluid dynamics (CFD)). FLACS-CFD är skapat av Gexcon AS. Detta arbete använder version 20.2. och kommer använda modulen *FLACS-GasExplosion* [22].

Innan man kör simuleringarna är det viktigast att göra en gridcell-storleksanalys. Detta görs genom att beräkna den karaktäristiska branddiametern, D^* , med ekvation (25). Värdet för \dot{Q}_C hämtas från bilaga F och H. Gridcell-storleksanalysen görs på det högsta och lägsta värdet av \dot{Q}_C från beräkningarna för båda experimenten, se tabell 16, för att kunna avgöra vilka gridcell-storlekar man ska börja med. Temperaturvärdena för T_∞ hämtas från tabell 12 och 13. T_∞ antas vara genomsnittstemperaturen för T_1 . Densiteten för den omgivande luften, ρ_∞ , beräknas via ekvation (21) och tyngdaccelerationen, g , antas ha ett värde på 9,82 m/s² [4] [22] [23].

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}_C}{\rho_\infty c_p T_\infty \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}} \quad (25)$$

Tabell 16: Lägsta och högsta värde för \dot{Q}_C för att beräkna D^*

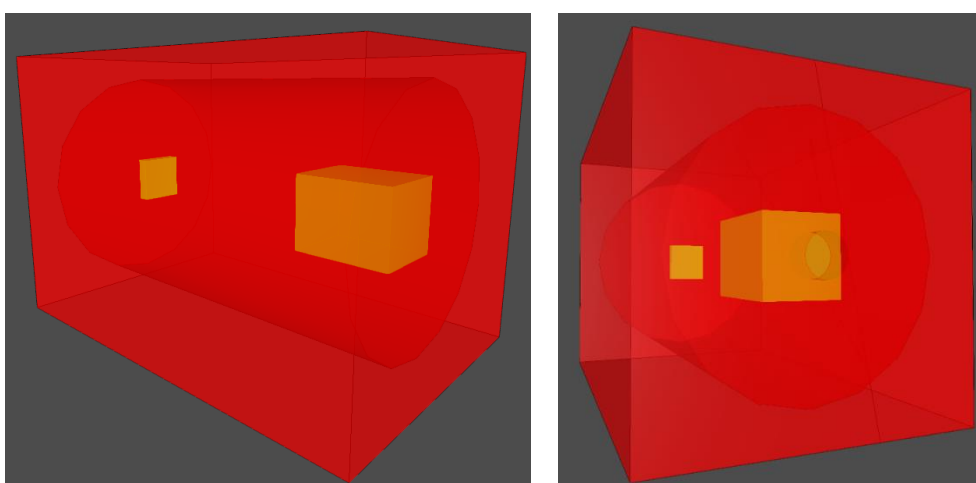
Lägsta \dot{Q}_C (2021)	3611,63 [kW]
Högsta \dot{Q}_C (2019)	13079,93 [kW]

När D^* är beräknad dividerar man den med 5, 10 och 20 för att få förslag på hur stora gridcellerna i simuleringssprogrammet bör vara. Detta görs för att spara tid, och för att hitta en rimlig startstorlek på gridcellerna. Efter att man har gjort simuleringar med den största rekommenderade gridcell-storleken görs simuleringar med en mindre gridcell-storlek. Om resultatet har en stor variation från den grövre cellstorleken fortsätter man med att minska cell-storleken tills variationen av resultaten går att acceptera [4] [22] [23].

De värden som har använts och beräknat D^* visas i bilaga K.

4.4.1. Uppbyggnad av simuleringsmodellerna

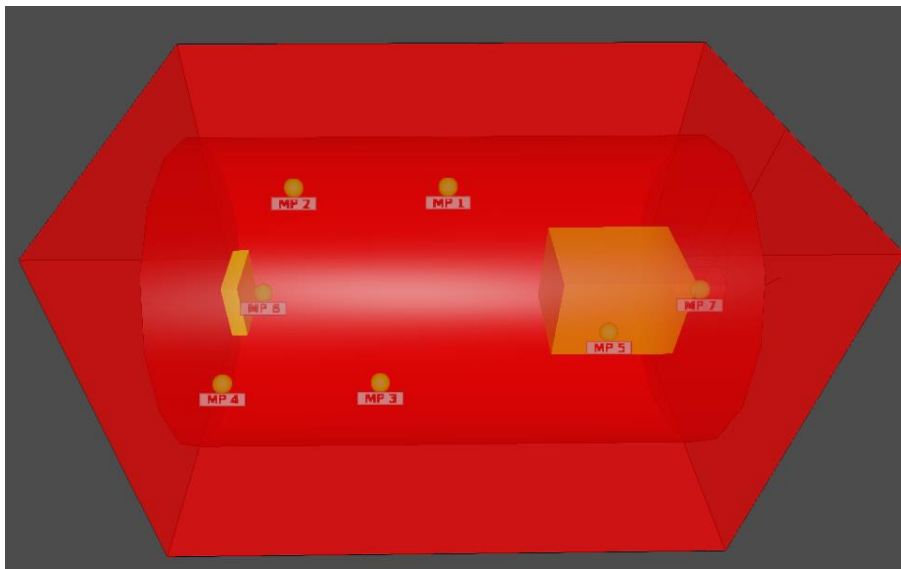
Det görs två modeller av trycktanken, den ena har en öppning på 31 cm bakom dieseltanken, i övrigt är modellerna identiska. Modellerna är gjorda genom att skära ut en cylindrisk volym på 10 m^3 ur ett större rektangulärt block. Detta görs för att FLACS ska förstå att det inte sker någon förbränning eller explosion utanför den cylindriska volymen. FLACS ser det utanför som fast material och kommer inte göra några beräkningar där. För att underlätta uppbyggnaden av modellerna valdes det att inte bygga borden som reststacken och dieseltanken står på. Därför hänger de fritt i trycktanken. Figur 22 visar hur modellerna som detta arbete har använt sig av ser ut. Den röda rektangeln visar trycktanken, den orange rektangeln till höger är dieseltanken och den gula kvadraten till vänster visar reststacken.



Figur 22: Uppbyggnaden av trycktankarna för simuleringarna, till höger ser man öppningen för den "Öppna" trycktanken.

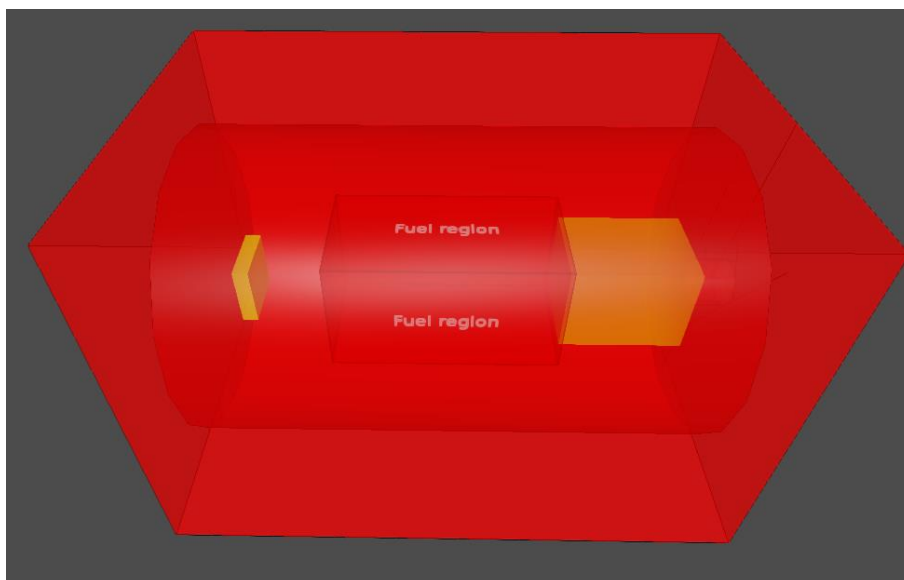
Figur 23 visar var mätpunkterna (MP) är placerade i modellerna, mätpunkterna har samma placering för båda modellerna förutom MP 7 som bara är med i den öppna modellen. Den är placerad i öppning. Mätpunkterna är inställda på att samla in data på temperatur- [K] och tryckutvecklingen [barg^1] från explosionen. Valet att enbart samla in data om temperatur- och tryckökningen gör för att de kan jämföras med de experimentella resultaten.

¹ Barg har enheten [bar]. Barg används vid mätningar av övertryck där man inte tar hänsyn till det atmosfäriska trycket.



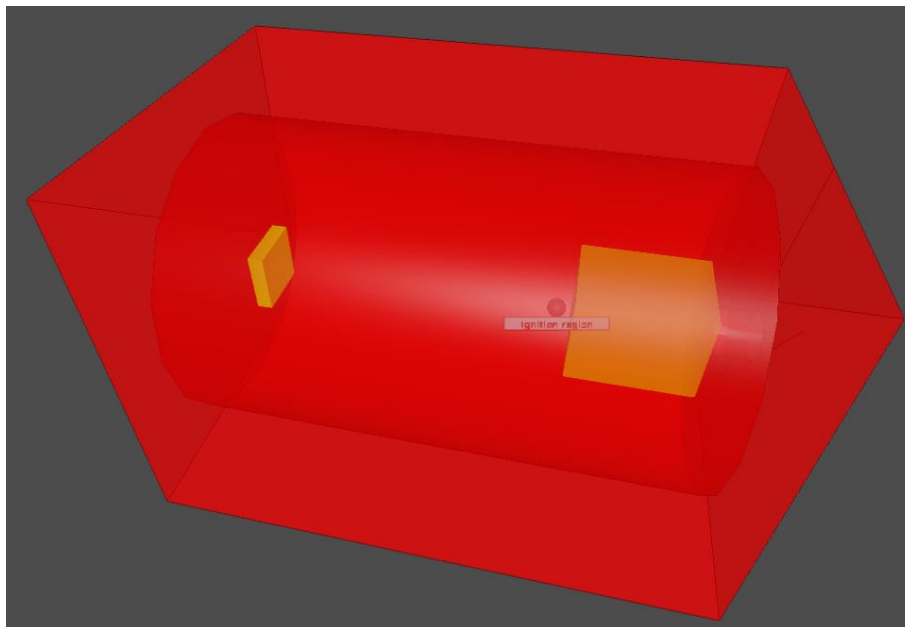
Figur 23: Placering av måtpunkter

Figur 24 viser var bränsleområdet är placerat i modellerna. Den versionen av FLACS som detta arbete använder har inte diesel, fotogen eller Jet A – Fuel i sitt bränslebibliotek. FLACS:s handbok [22] rekommenderar att använda dodekan istället för diesel. I modellerna antas att det bara är dodekan som har ett blandningsförhållande med luften på 1,05 (rekommenderas av [22] när det görs explosionssimuleringar) i bränsleområdet.



Figur 24: Placering och utformning av bränsleområdet

Figur 25 visar var antändningspunkten är placerad i simuleringarna. Den är placerad centralt fem cm utanför dieseltanken, placeras antändningspunkten utanför bränsleområdet kommer det inte bli en antändning.



Figur 25: Placering av antændningspunkt

Detaljerad information om modellerna ges i bilaga K.

4.4.2. Inställningar för simuleringarna

Alla simuleringar som är utförda i detta arbete har samma inställningar, förutom när det kommer till cellstorleken i gridsystemet. Cellstorleken har bestämts utifrån D^* i kapitel 5.3.1. För att få tillräckligt många beräkningspunkter har det valts att varje cell ska vara kubformad och sidorna på kuben kommer att ha längderna 10 cm, 5 cm och 2,5 cm för simuleringarna. Anledningen till att ha med 2,5 cm är som nämnts tidigare till för att se om cellstorleken har någon påverkan på resultaten. Det leder till att det totalt kommer att bli sex simuleringar, tre för varje modell av trycktanken med varierande cellstorlekar.

Majoriteten av inställningarna är förinställda av FLACS när man väljer vilket scenario man simulerar. Som nämnt tidigare kommer dessa simuleringar använda sig av scenariot *GasExplosion*. Det leder till att gränsvillkoren beräknas utifrån *Euler ekvationer*. Figur 26 presenterar vilka inställningar som skiljer sig från grundinställningarna som FLACS rekommenderar. Den första skillnaden är *Maximum time*. Grundinställningen för den är -1 som leder till att simuleringen kommer upphöra när ett utav dessa två kriterier uppfylls [22],

- minst 90 % av bränslet har förbränts eller lämnat området,
- minst 50% av bränslet har förbränts eller lämnat området och genomsnittstrycket blir negativt.

I detta arbete har *Maximum time* satts till 5 sekunder för att förhindra att simuleringarna tar onödigt lång tid och lagringsplats. Det innebär att resultaten från simuleringarna kommer att ha olika tidsaxlar. Den andra skillnaden är i *DTPLOT*, som är frekvensen för beräkningarna under simuleringen. Den har ingen påverkan på

resultatet utan ger bara mer data från simuleringarna. Arbetet har valt en frekvens på en millisekund.

Property	Value
Solver mode	TRANSIENT
Maximum time	5 s
Last timestep	-1
CFLC	5
CFLV	0.5
MODD	1
NPLOT	5
DTPLOT	0.001

Figur 26: Inställningar för simuleringarna

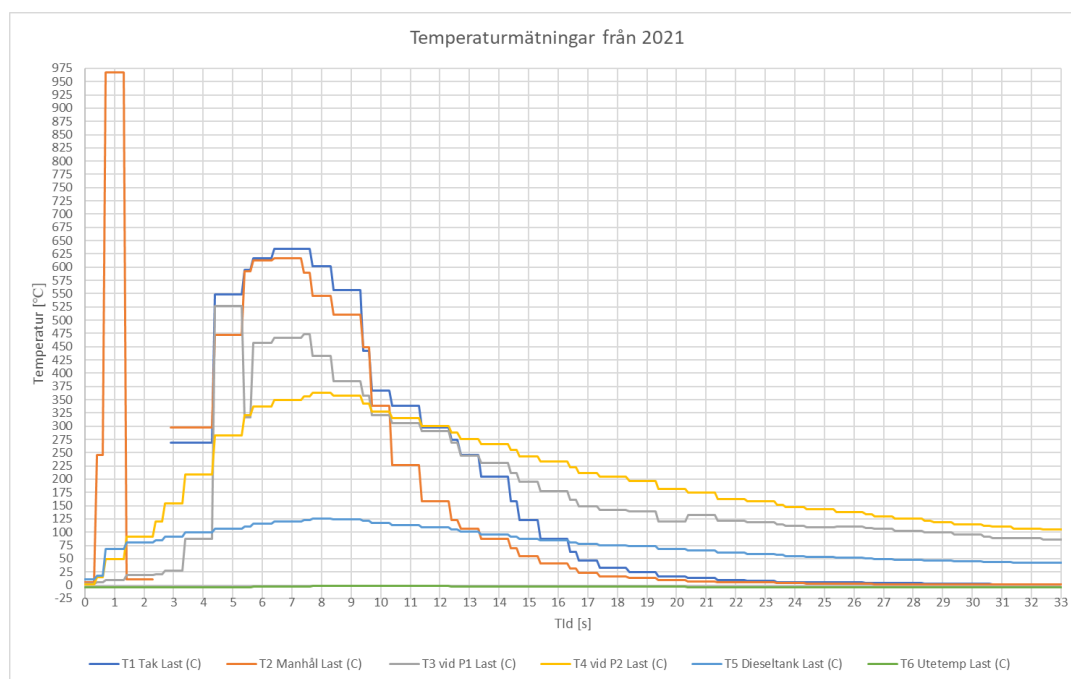
5. Resultat

Det här kapitlet presenterar arbetets resultat.

5.1. Experiment

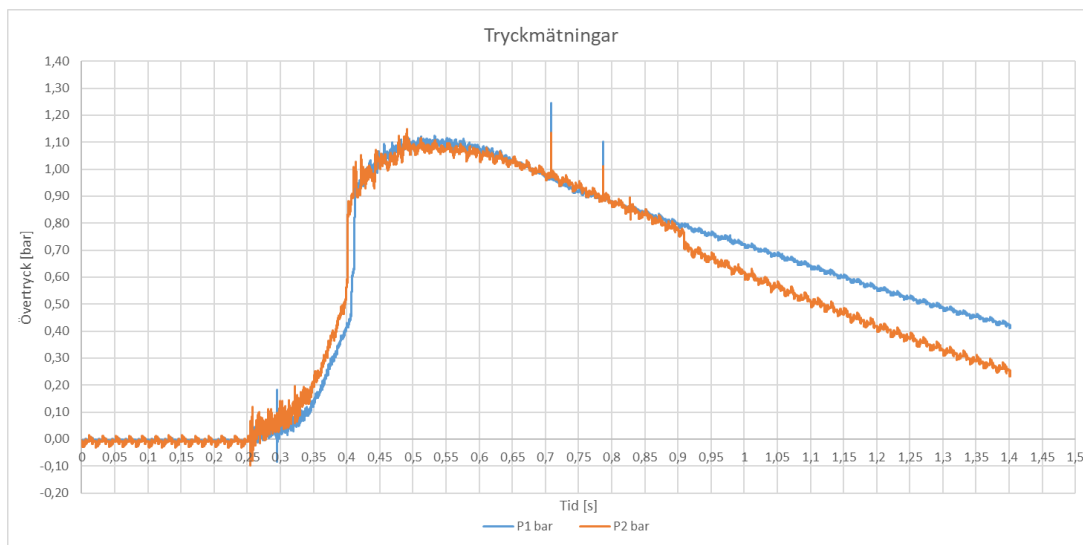
Inom ramen för arbetet har ett experiment genomförts på FOI.

Temperaturmätningarna från experimentet presenteras i figur 27, och även i tabell 44, bilaga F. Det framgår att något har gått fel med termoelementen vid mätpunkterna T1 och T2. T1 registrerar inget förrän efter ca 3 sekunder och T2 får troligtvis en kortslutning efter ca 1,5 sekunder och kommer tillbaka vid ca 3 sekunder samtidigt som T1. Med tanke på hur temperaturmätningarna ser ut i figur 16 antas det att mätningarna från T2 är användbar ändå. Den maximala temperaturen som registrerades i tidsintervallet för brandfenomenet var från T2 med en temperatur på 967 °C. De andra mätpunkterna når sina maxtemperaturer vid ca 7 sekunder.



Figur 27: Temperaturmätningarna från experimentet 2021

Figur 28 viser trykkutvecklingen från experimentet 2021, som får ett maximalt övertryck på ca 1,1 bar efter ca 0,3 sekunder från att trycket började öka vid 0,25 sekunder. Trycket avtar sedan stadigt fram tills mätningarna upphör vid 1,4 sekunder. Vid ca 0,9 sekunder börja P2 att avta lite snabbare än P1.



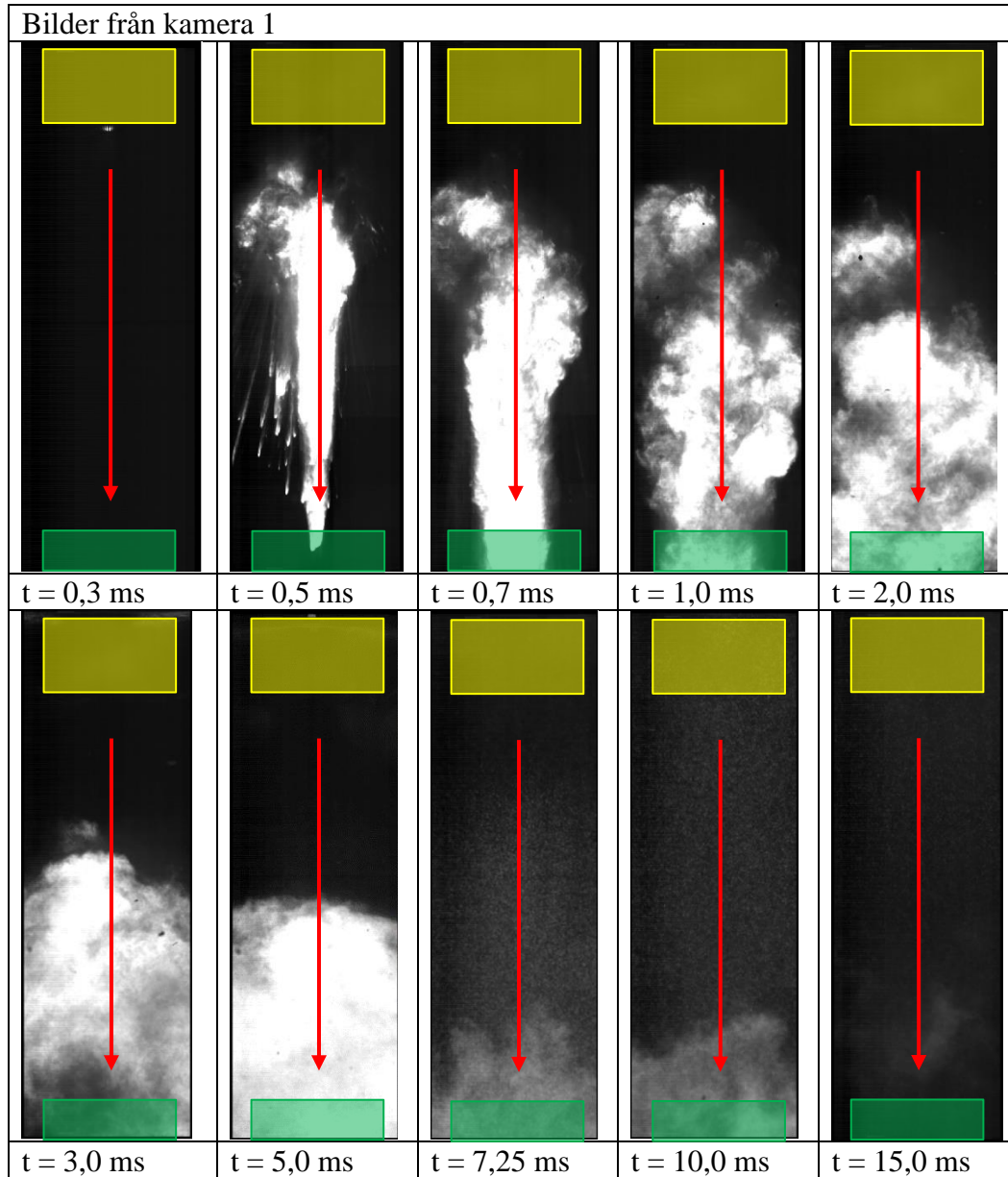
Figur 28: Tryckmätningar från experimentet 2021

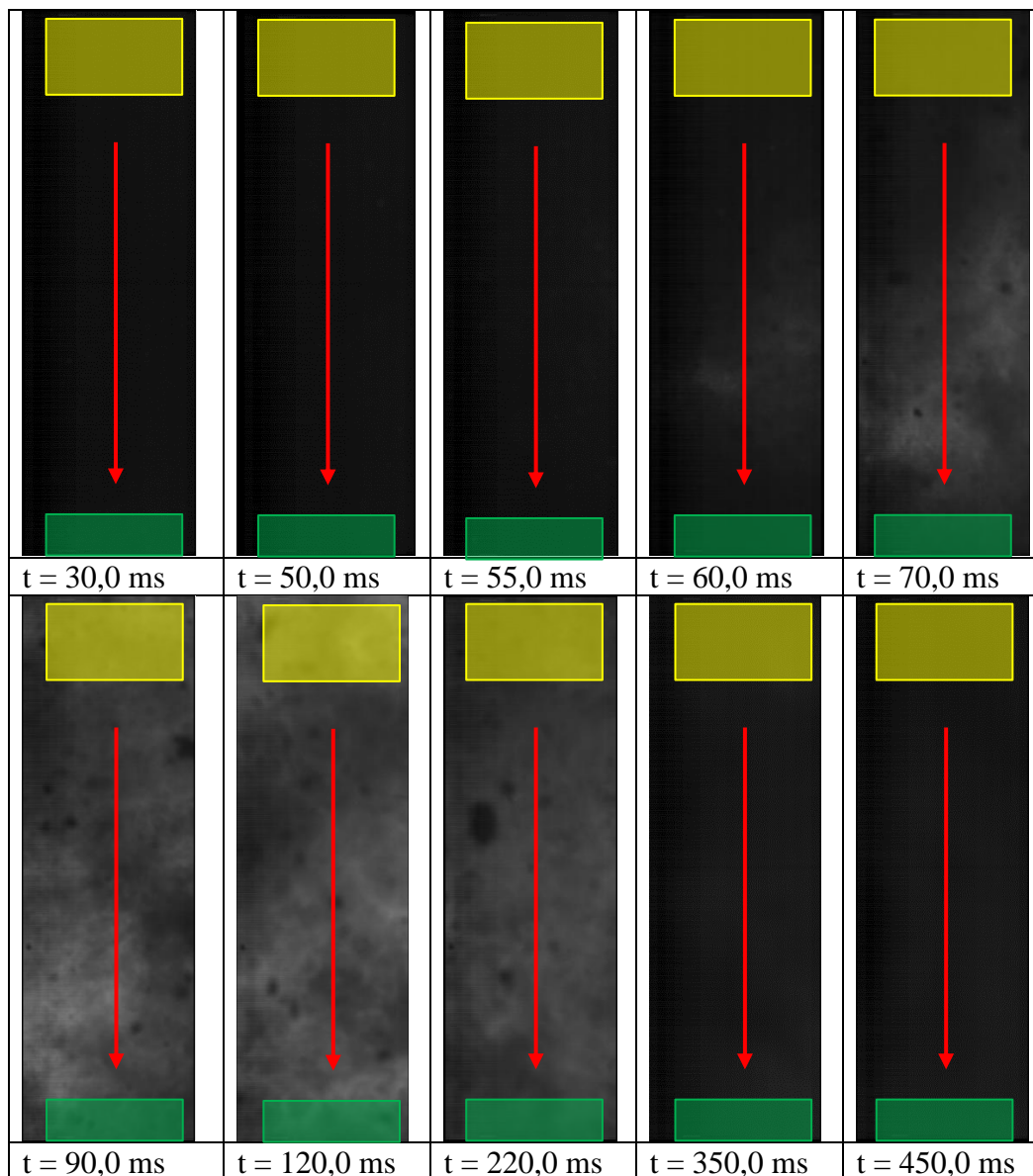
Utgångshållet från RSV-strålen i bränsletanken, se figur 29, har en bredd på ca 1,5 cm och en höjd på ca 5 cm.



Figur 29: Utgångshållet från RSV-strålen i dieseltanken från experimentet 2021

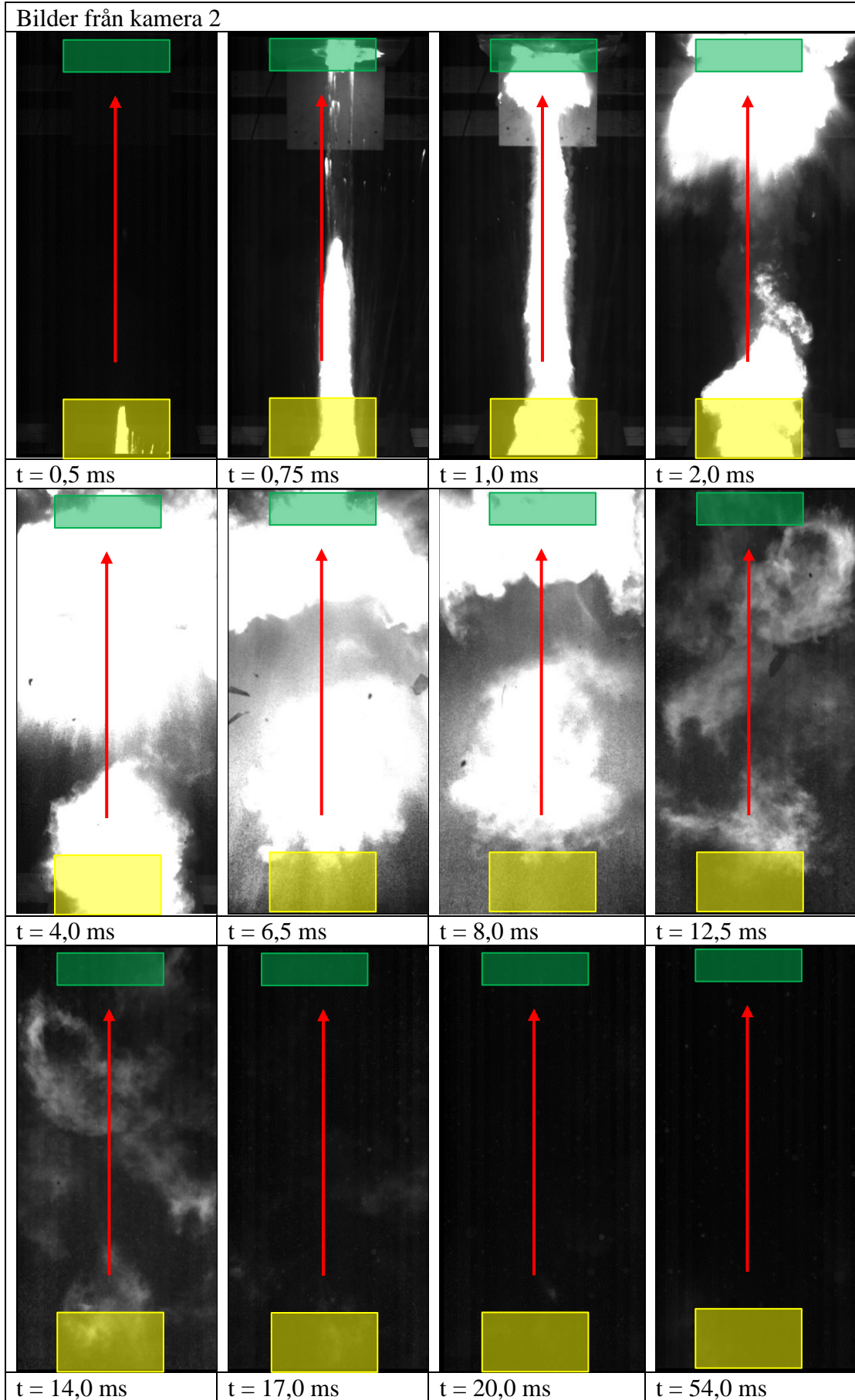
Figur 30 og figur 31 viser hur RSV-strålen antänder dieselaresolet från olika kameravinklar. De röda pilarna visar hur RSV-strålen och branden rör sig. Den gula rektangeln visar var dieseltanken är placerad i förhållande till reststacken som är markerad med den gröna rektangeln.

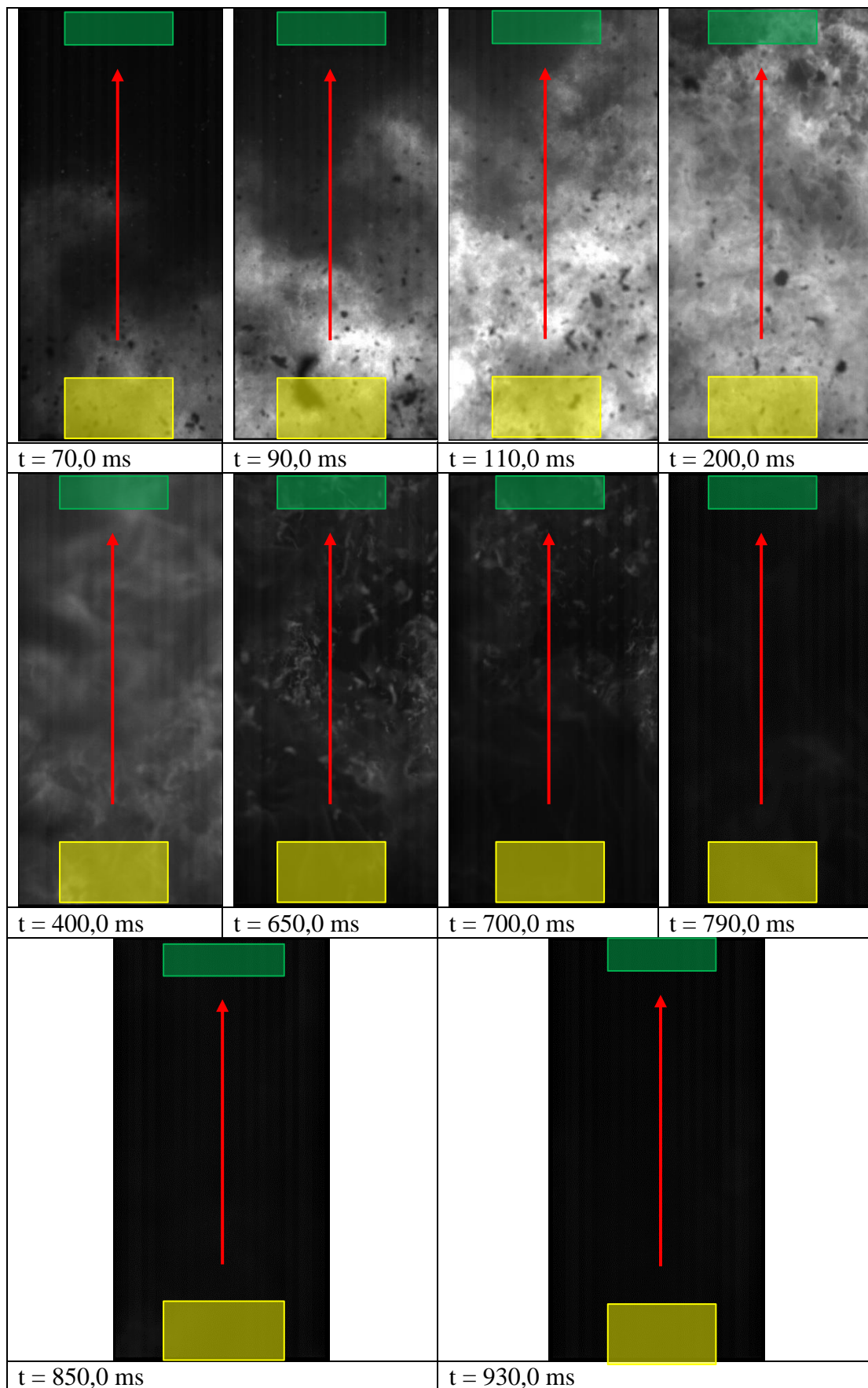




Figur 30: Tidsforløp over forbränningen mellan bränsletanken och reststacken från kamera 1, experimentet 2021

Efter 450 ms går det inte att observera några flammor från kamera 1. Om detta är p.g.a. för mycket rök som är i vägen eller om flammorna har passerat synfältet går inte att tyda.





Figur 31: Tidsforløp over forbränningen mellan bränsletanken och reststacken från kamera 2, experimentet 2021

Efter 930 ms går det inte att observera några flammor från kamera 2. Om detta är p.g.a. för mycket rök som är i vägen eller om flammorna har slocknat går inte att tyda.

5.2. Beräkningar

I det här delkapitlet presenteras resultat från alla genomförda beräkningar. Många av resultaten används som ingångsvärden i senare beräkningar och simuleringar.

5.2.1. Värmeproduktion, värmeflöde och värmeenergi

Utifrån temperaturresultaten från experimenten 2019 och 2021 gjordes beräkningar för att ta reda på hur stor värmeproduktionen och värmeflödet var och hur mycket värmeenergi som uppstod. Detta för att se om det kan påverka personalen i stridsfordonet.

Experimentet från 2019

Tabell 17 presenterar den beräknade på värmeproduktionen från experimentet. Det skiljer ca 9000 kW mellan den långsammaste och den snabbaste flamfronten.

Tabell 17: Värmeproduktionen från experimentet 2019 beroende på flamhastigheter under brandfenomenets tidsintervall

$V [m/s]$	50	100	150	200	250	300	340
$\dot{Q} [kW]$	4000	6140	7888	9423	10816	12106	13080

Tabell 18 presenterar beräknade värmeflödet i trycktanken i horisontal riktning mot reststacken från dieseltanken. Det skiljer ca 2900 kW/m² mellan den långsammaste och den snabbaste flamfronten.

Tabell 18: Värmeflödet från experimentet 2019 beroende på flamhastigheter under brandfenomenets tidsintervall

$V [m/s]$	50	100	150	200	250	300	340
$\dot{q}'' [kW/m^2]$	1274	1955	2512	3001	3445	3856	4166

Tabell 19 presenterar den beräknade värmeenergi som producerades under tidsintervallet för brandförloppet med varierande flamhastigheter. Det skiljer ca 1800 kJ mellan den långsammaste och den snabbaste flamfronten.

Tabell 19: Mängden värmeenergi under brandfenomenets tidsintervall från experimentet 2019

$V [m/s]$	50	100	150	200	250	300	340
$Q [kJ]$	800	1228	1578	1885	2163	2421	2616

Tabell 20 presenterar det beräknade värmeenergiflödet i trycktanken i vertikalriktning mot reststacken från dieseltanken. Det skiljer ca 600 kJ/m² mellan den långsammaste och den snabbaste flamfronten.

Tabell 20: Värmeenergiflödet under brandfenomenets tidsintervall från experimentet 2019

$V [m/s]$	50	100	150	200	250	300	340
$q'' [kJ/m^2]$	255	391	502	600	689	771	833

Alla resultat visas i bilaga F.

Experimentet från 2021

Tabell 21 presenterar den beräknade värmeproduktionen från experimentet med genomsnittstemperaturen. Det skiljer ca 4000 kW mellan den långsammaste och den snabbaste flamfronten.

Tabell 21: Värmeproduktionen från experimentet 2021 beroende på flamhastigheter under brandfenomenets tidsintervall

$V [m/s]$	50	100	150	200	250	300	340
$\dot{Q} [kW]$	1711	2626	3374	4030	4626	5178	5595

Tabell 22 presenterar det beräknade värmeflödet i trycktanken i vertikalriktning mot reststacken från dieseltanken. Det skiljer ca 2900 kW/m² mellan den långsammaste och den snabbaste flamfronten.

Tabell 22: Värmeflödet från experimentet 2021 beroende på flamhastigheter under brandfenomenets tidsintervall

$V [m/s]$	50	100	150	200	250	300	340
$\dot{q}'' [kW/m^2]$	545	836	1075	1284	1473	1649	1782

Tabell 23 presenterar den beräknade värmeenergi som producerades under tidsintervallet för brandförloppet med varierande flamhastigheter. Det skiljer ca 2700 kJ mellan den långsammaste och den snabbaste flamfronten.

Tabell 23: Mängden värmeenergi under brandfenomenets tidsintervall med genomsnittstemperaturen från experimentet 2021

$V [m/s]$	50	100	150	200	250	300	340
$Q [kJ]$	1198	1838	2362	2821	3238	3625	3916

Tabell 24 presenterar det beräknade värmeenergiflödet i trycktanken i vertikalriktning mot reststacken från dieseltanken. Det skiljer ca 800 kJ/m² mellan den långsammaste och den snabbaste flamfronten.

Tabell 24: Värmeenergiflödet under brandfenomenets tidsintervall från experimentet 2021

$V [m/s]$	50	100	150	200	250	300	340
$q'' [kJ/m^2]$	381	585	752	899	1031	1154	1247

Alla resultat visas i bilaga H.

5.2.2. Mängden diesel som förbränns under brandfenomenet

Här presenteras den beräknade mängden diesel som förbränts under brandfenomenets tidsintervall för att sedan användas i simuleringarna för massflöde. Tabell 25 presenterar den beräknade mängden enligt resultat från experimentet 2019 och tabell 26 presenterar från experimentet 2021.

Tabell 25: Mängden diesel som förbrändes vid de olika flamhastigheterna från experimentet 2019

$V [m/s]$	50	100	150	200	250	300	340
$m[g]$	26	40	52	62	71	80	86

Tabell 26: Mängden diesel som förbrändes vid de olika flamhastigheterna från experimentet 2021

$V [m/s]$	50	100	150	200	250	300	340
$m[g]$	71	109	140	168	192	215	233

5.2.3. Energi för uppvärmning av luften i trycktanken

Tabell 27 och tabell 28 presenterar den totala mängden värmeenergi som behövs för att värma upp 10 m³ luft till den genomsnittstemperatur som uppmätts vid tidpunkten sju sekunder i experimenten, samt vilket värmeflöde som behövs för att uppnå den temperaturen.

Tabell 27: Mängden värmeenergi för att värma upp luften vid 7 sekunder i experimentet 2019

Q	5592	[kJ]
\dot{Q}	799	[kW]

Tabell 28: Mängden värmeenergi för att värma upp luften vid 7 sekunder i experimentet 2021

Q	5614	[kJ]
\dot{Q}	802	[kW]

5.2.4. Värme- och kinetiskenergi från RSV-strålen

Tabell 29 och tabell 30 presenterar värmeenergin och värmeflödet per m² som strålar ut från RSV-strålen när den passerar genom trycktanken efter att ha penetrerat dieseltanken.

Tabell 29: Värmeenergi och värmeflöde per m² från RSV-strålen i form av strålning, experimentet 2019

$\dot{q}''_{\text{Strålning}}$	25,8	[kW/m ²]
$q''_{\text{Strålning}}$	0,04	[kJ/m ²]

Tabell 30: Värmeenergi och värmefflöde per m² från RSV-strålen i form av strålning, experimentet 2021

$\dot{q}_{\text{Strålning}}''$	25,8	[kW/m ²]
$q_{\text{Strålning}}''$	0,04	[kJ/m ²]

Den kinetiska energin i RSV-strålen med massan 20 g, uppskattas vara 250 kJ.

Tabell 31 presenterar vilken massa en RSV-stråle måste ha för att uppnå den minsta antändnings energin vid olika blandningsförhållande mellan luft och diesel, om det antas att all kinetisk energi omvandlas till värmeenergi.

Tabell 31: Massan som en RSV - stråle måste ha för att uppnå den minsta antändnings energin

Blandningsförhållande	Q_{MAE}	$m_{RSV-stråle}$
≈ 0,4	0,4 [J]	1,28E-18 [g]
≈ 0,5	0,06 [J]	1,92E-19 [g]
≈ 0,6	0,04 [J]	1,28E-19 [g]
≈ 0,7	0,025 [J]	8E-20 [g]
≈ 0,8	0,02 [J]	6,4E-20 [g]
≈ 0,9	0,015 [J]	4,8E-20 [g]

5.2.5. Antändningstemperatur i ett droppmoln

Tabell 32 visar vilken antändningstemperatur de olika bränslena har vid olika kokpunktstemperaturer. Den översta dieseln är dieseln som användes under experimenten. Den får en 3 °C lägre antändningstemperatur än när den är i vätskefas.

Tabell 32: Antändningstemperaturen för olika diesel och fotogen i droppmoln

Bränsle	Kokpunktstemperatur	Antändningstemperatur i droppmoln
Diesel	185 °C	66,9 °C
Diesel	180 °C	63,2 °C
Diesel	230 °C	100,2 °C
Diesel	280 °C	137,2 °C
Diesel	330 °C	174,2 °C
Diesel	360 °C	196,4 °C
Fotogen	150 °C	41 °C
Fotogen	200 °C	78 °C
Fotogen	250 °C	115 °C
Fotogen	300 °C	152 °C

5.3. Simulering

Detta delkapitel presenterar resultat gällande simuleringarna för arbetet.

5.3.1. D^* och cellstorlek

För att spara tid på att ta reda på vilken cellstorlek som passar simuleringarna har det gjorts uträkningar för den karaktäristiska branddiametern, D^* . Tabell 33 presenterar D^* med den lägsta värmeproduktionen från beräkningarna och tabell 34 presenterar D^* med den högsta värmeproduktionen. De rekommenderade cellstorlekarna som tabell 33 och tabell 34 presenterar, varierar mellan 6 – 55 cm.

Tabell 33: Rekommenderad cellstorlek beroende på D^* för den lägsta värmeproduktionen (2021)

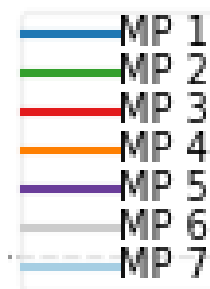
$D^* =$	1,23	m
Cellstorlek $D^*/5 =$	0,25	m
Cellstorlek $D^*/10 =$	0,12	m
Cellstorlek $D^*/20 =$	0,06	m

Tabell 34: Rekommenderad cellstorlek beroende på D^* för den högsta värmeproduktionen (2019)

$D^* =$	2,77	m
Cellstorlek $D^*/5 =$	0,55	m
Cellstorlek $D^*/10 =$	0,28	m
Cellstorlek $D^*/20 =$	0,14	m

5.3.2. FLACS

Figur 32 beskriver vilken graf som tillhör vilken mätpunkt. MP 7 finns bara i simuleringar som har en öppning i trycktanken vid dieseltanken. De andra mätpunkterna återfinns i samtliga simuleringar.



Figur 32: Färg beskrivning över mätpunkterna i graferna

Figur 33 presenterar temperatur och tryck från simuleringen med öppning med cellstorleken 10 cm. Det maximala övertrycket i simuleringen var ca 0,25 bar och den maximala temperaturen var strax över 2250 K i MP 5. Maxtrycket i öppningen var ca 0,075 bar.

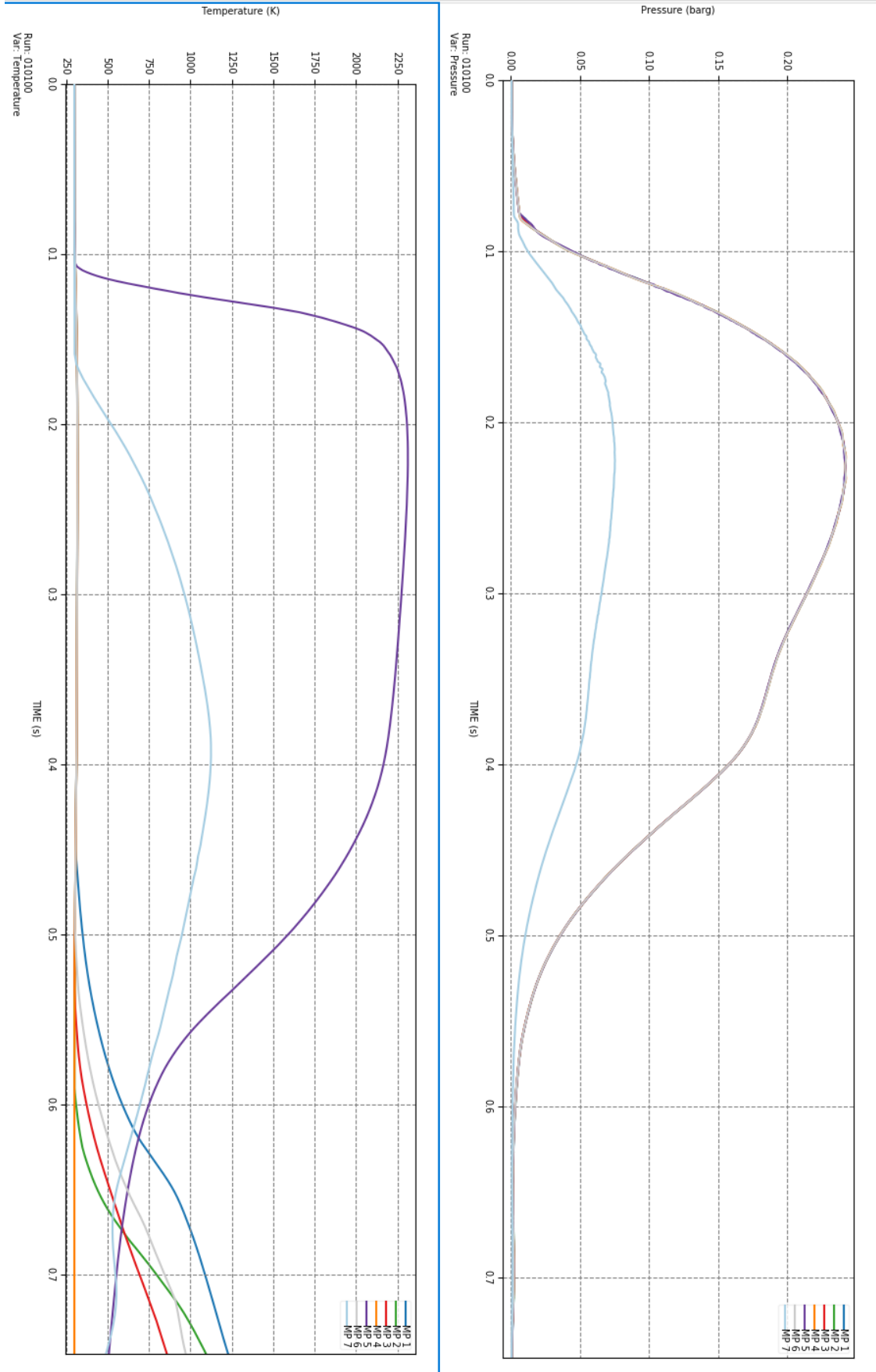
Figur 34 presenterar temperatur och tryck från simuleringarna med öppning med cellstorleken 5 cm. Det maximala övertrycket från simuleringarna var strax över 0,4 bar och den maximala temperaturen var ca 2300 K i MP 5. Maxtrycket i öppningen var ca 0,025 bar.

Figur 35 presenterar temperatur och tryck från simuleringarna med öppning med cellstorleken 2,5 cm. Det maximala övertrycket från simuleringarna var strax över 0,6 bar och den maximala temperaturen var över 2300 K i MP 5. Maxtrycket i öppningen var ca 0,05 bar.

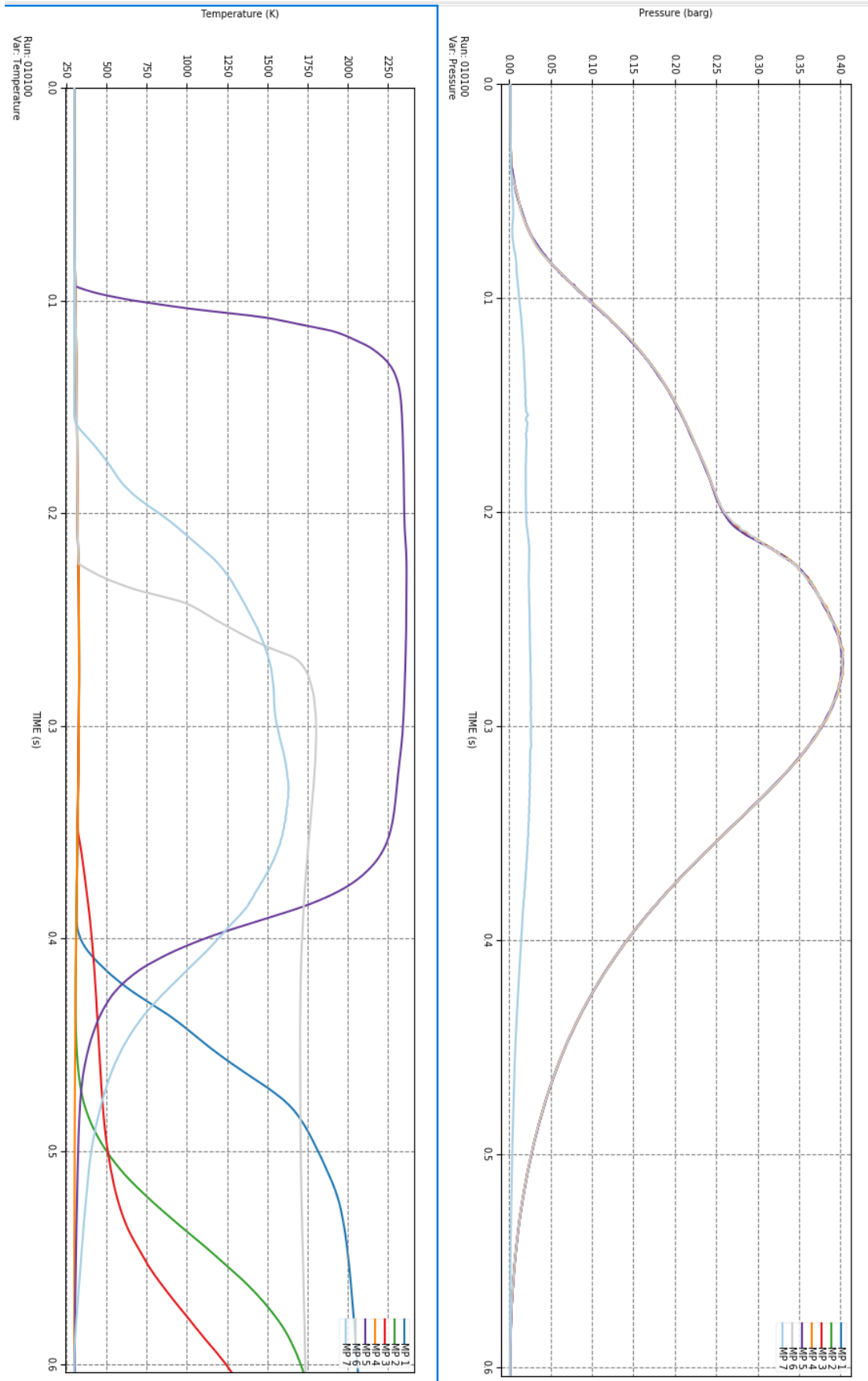
Figur 36 presenterar temperatur och tryck från simuleringarna utan öppning med cellstorleken 10 cm. Det maximala övertrycket från simuleringarna var strax under 1,1 bar och den maximala temperaturen var strax under 2250 K i MP 1.

Figur 37 presenterar temperatur och tryck från simuleringarna utan öppning med cellstorleken 5 cm. Det maximala övertrycket från simuleringarna var strax under 1,1 bar och den maximala temperaturen var strax under 2500 K i MP 5.

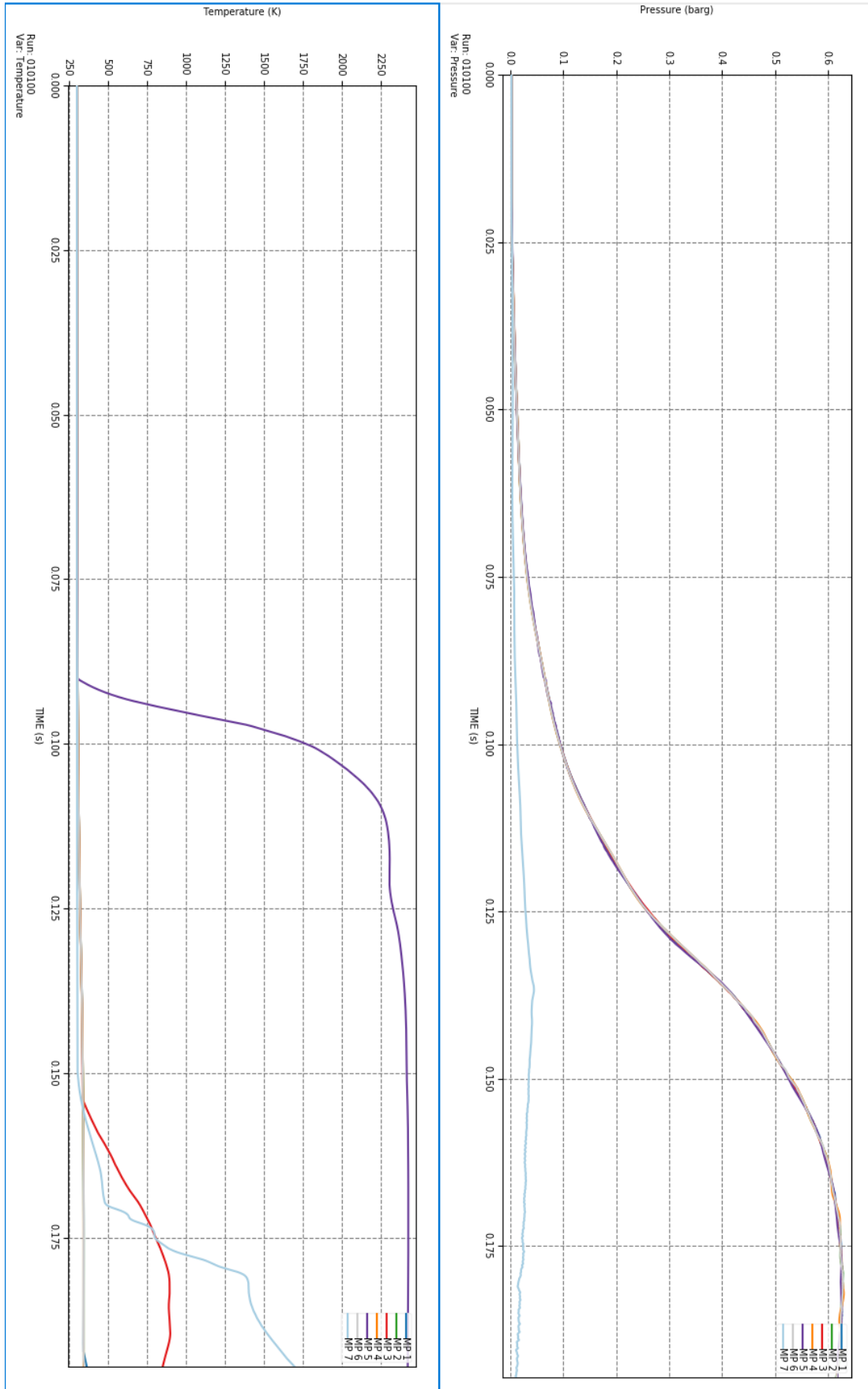
Figur 38 presenterar temperatur och tryck från simuleringarna utan öppning med cellstorleken 2,5 cm. Det maximala övertrycket från simuleringarna var strax över 1,0 bar och den maximala temperaturen var strax under 2500 K i MP 5.



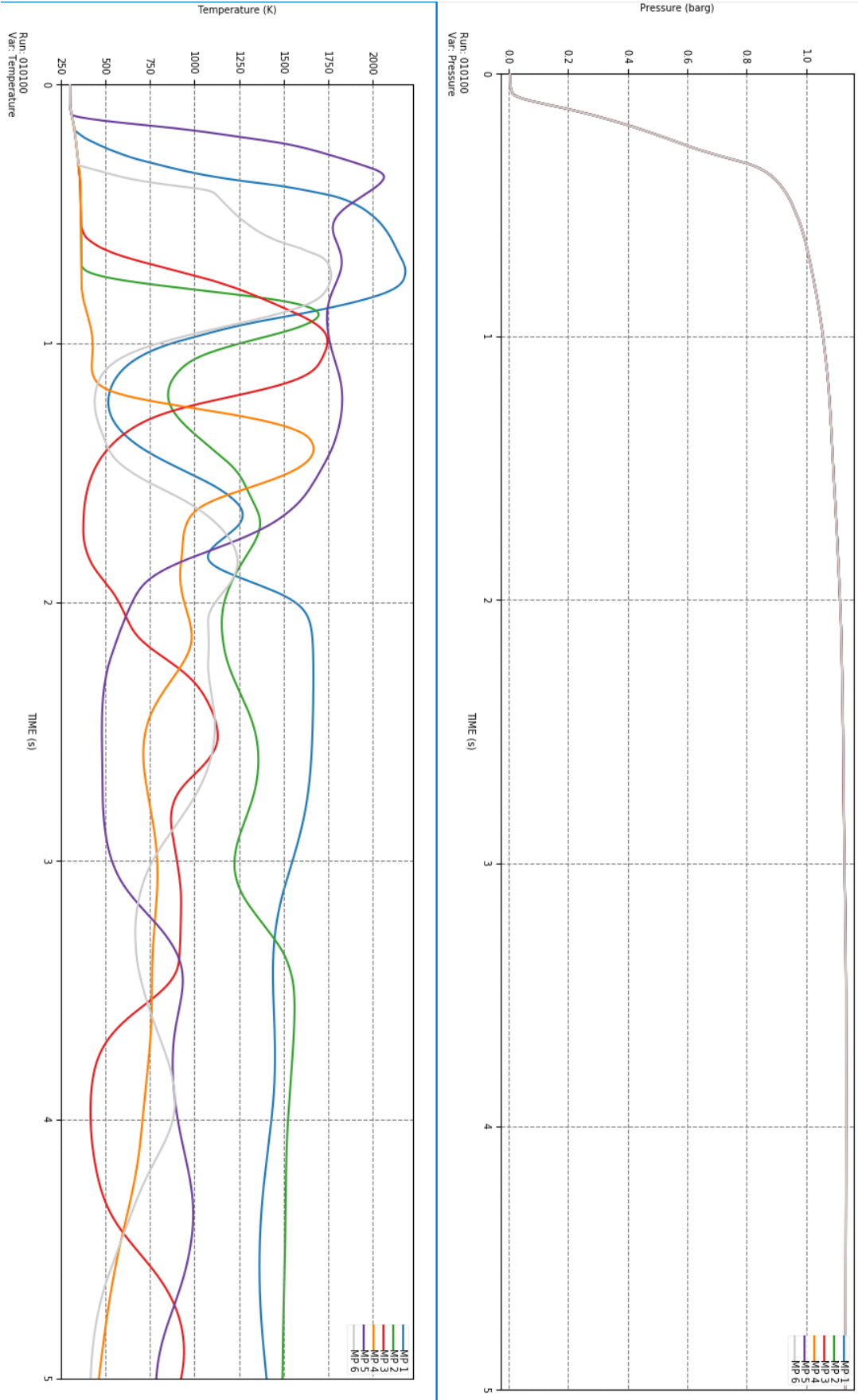
Figur 33: Temperatur och tryck från simuleringar med öppningen med cellstorleken 10 cm



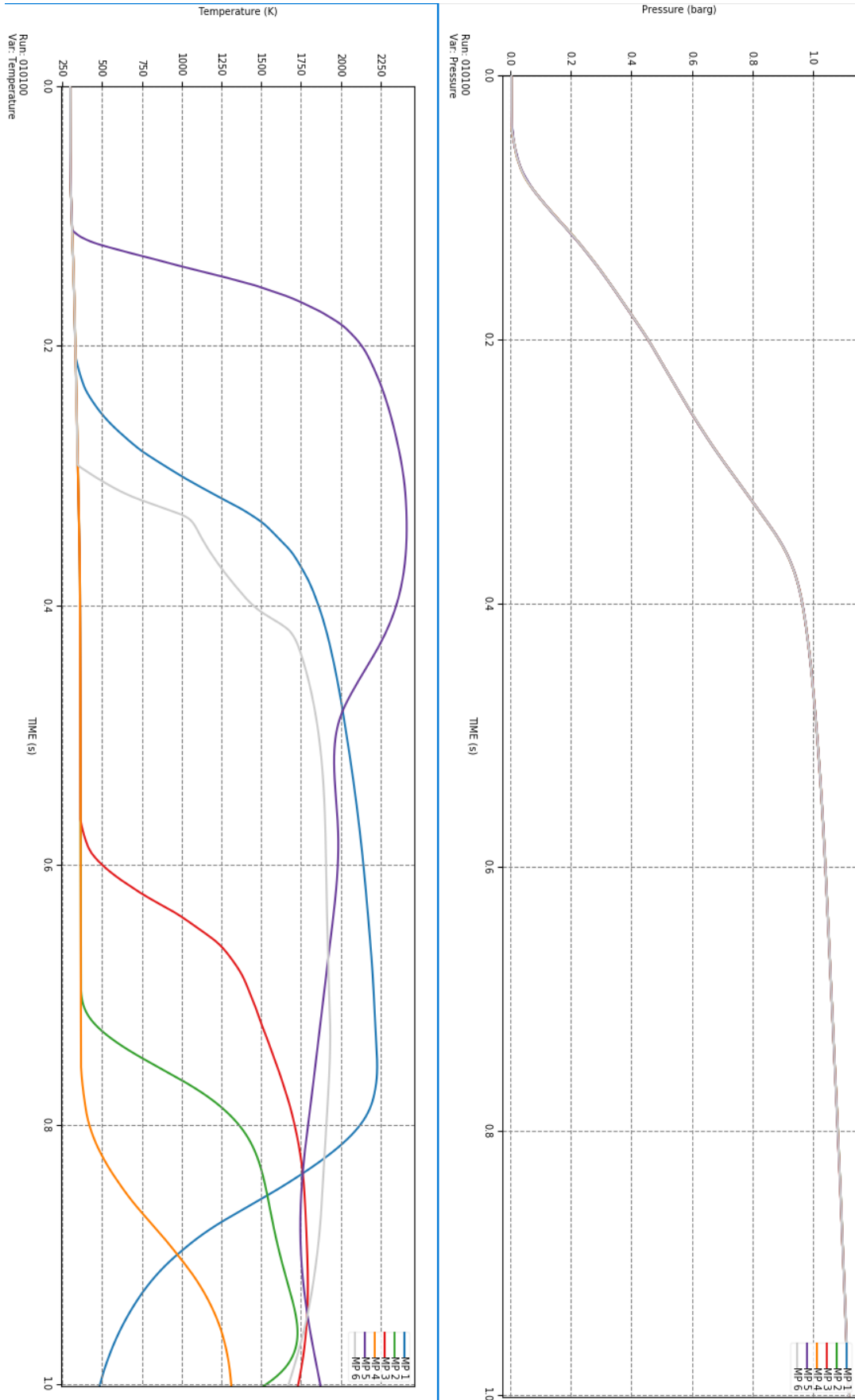
Figur 34: Temperatur och tryck från simuleringar med öppningen med cellstorleken 5 cm



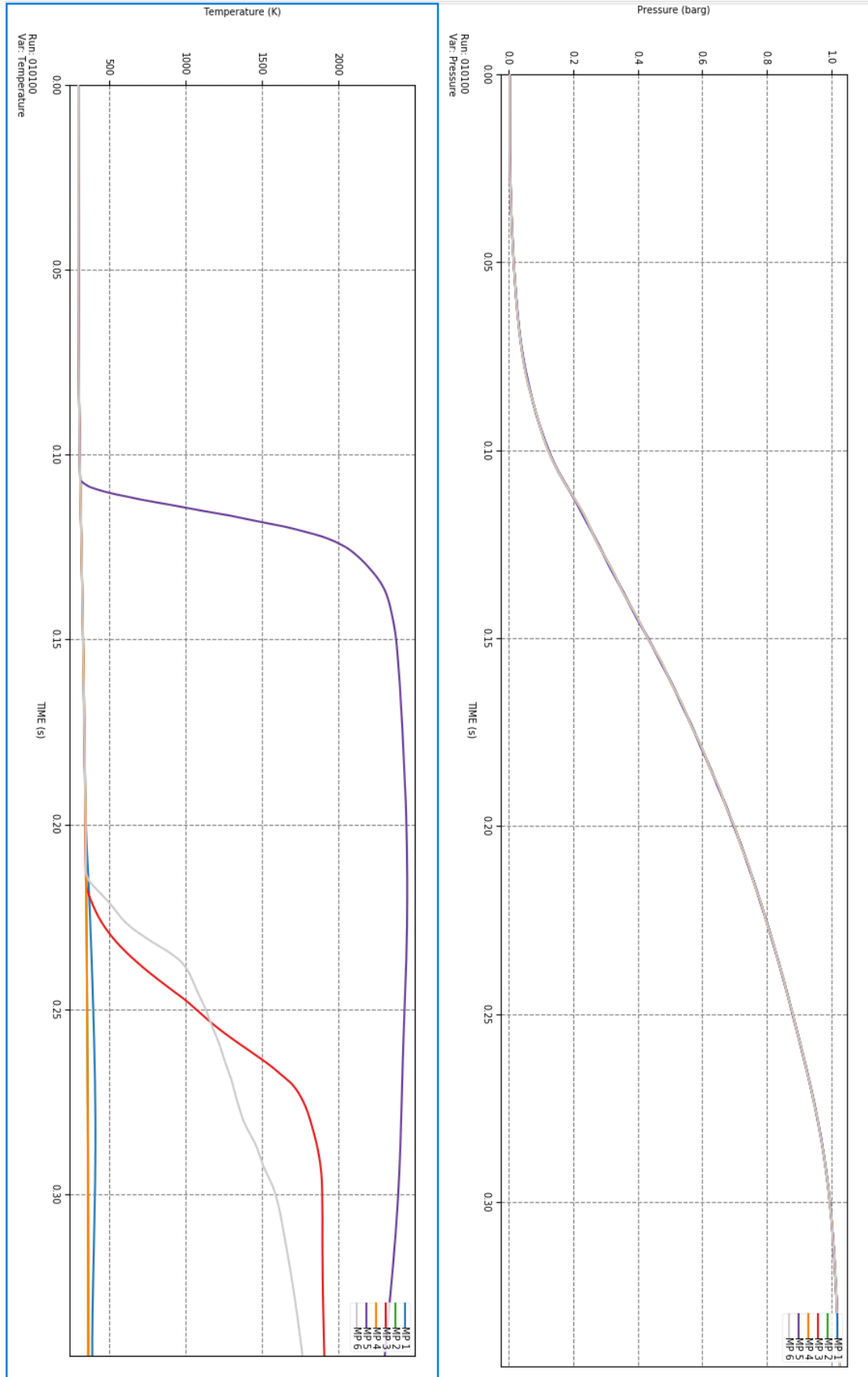
Figur 35: Temperatur och tryck från simuleringar med öppningen med cellstorleken 2,5 cm



Figur 36: Temperatur och tryck från simuleringar utan öppning med cellstorleken 10 cm



Figur 37: Temperatur och tryck från simuleringar utan öppning med cellstorleken 5 cm



Figur 38: Temperatur och tryck från simuleringar utan öppning med cellstorleken 2,5 cm

6. Diskussion

I det här kapitlet diskuteras de metoder som har valts och resultaten. Det diskuteras också om sannolikheten för antändning samt hur brandfenomenet kan påverka personalen i fordonen.

6.1. Metod

Det här delkapitlet diskuterar de metoder som har använts under detta arbete och hur utförandet av dem kan ha påverkat resultaten.

6.1.1. Litteraturstudien

Metoden som valdes för att genomföra litteraturstudien var en *översiktsstudie*. Som nämnts i kapitel 4.1 kan en översiktsstudie användas då det inte finns så mycket information inom det området man är intresserad av. Arbetet har gått igenom drygt 40 referenser och fokuserat på teman/problemställningar som liknar detta arbete. Det finns referenser som tar upp liknade teman men med fokus på flygplan och deras bränsletankar, men på flygplan är bränsletankarna placerade i vingarna, vilket inte ger någon påverkan inne i flygplanet. För att få en bättre förståelse av det brandfenomen som uppstod, valdes det att fokusera på rapporterna som hade liknande problemställningar som detta arbete, för att sedan göra experiment, beräkningar och simuleringar för att svara på problemställningen.

6.1.2. Experiment

De två experimenten som gjordes hos FOI 2019 respektive 2021 var nästan identiska med varandra. Vid experimentet 2021 tillfördes det ytterligare en höghastighetskamera och två temperaturmätpunkter samt att en annan typ RSV-laddning användes. För att mäta temperaturen användes termoelement, dessa har en uppdateringsfrekvens på två Hz, vilket anses vara långsamt för det här arbetet med tanke på hur kort tid som brandfenomenet varade. Det planerades att använda en infraröd termometer, som har en betydligt högre uppdateringsfrekvens än termoelementen, för experimentet 2021. Den infraröda termometern kunde dock inte användas då det inte fanns ett bra sätt att montera den utan att ändra förutsättningarna för experimentet. Det riskerade att det inte skulle gå att jämföra insamlade data med experimentet från 2019. Det diskuterades också att ha flera tryckmätare av olika slag inne i trycktanken, framför allt den som används vid Axelssons metod, se kapitel 2.5.2, men även detta riskerade att påverka experimentet för mycket för att man skulle kunna jämföra experimenten sinsemellan.

6.1.3. Beräkningar

Alla beräkningar som är gjorda i detta arbete baseras på mätdata från experimenten. Beräkningarna bygger sedan på varandra för att ta fram värmeproduktion, värmefflöde, mängd diesel etc. Det betyder att om det är ett fel i mätvärden från experimenten eller i beräkningarna i ett tidigt steg kan det leda till att alla följande beräkningar blir fel.

Brandfenomenet varar i ca 0,2 sekunder enligt experimentet från 2019, vilket kan ses i de stillbilder som är med från [18]. Tar man i beaktande att termoelementen i bästa fall mäter en gång under denna tidsperiod, blir det svårt att få noggranna värden på temperaturen som man kan basera beräkningarna på. Samma sak gäller för experimentet 2021, där går det att se att brandfenomenet vara i ca 0,7 sekunder och det är två temperaturmätningar som används vidare i beräkningarna.

För att bestämma den konvektiva värmeöverföringskoefficienten, h , används ekvation (13) och i den bestäms C och n beroende på värdet på Re_f . Vid beräkningarna för Re_f från experimenten hamnar Re_f mellan $9,06 \cdot 10^9$ och $7,96 \cdot 10^{10}$, se bilagor F och H. Enligt tabell 7 är det bara dokumenterat med värden för C och n för ett maxvärde på Re_f vid $4 \cdot 10^3$. Re_f i detta arbete använder samma värden för C och n när Re_f är minst 10^6 gånger större.

Det är ett grovt, överskattande, antagande att all kinetisk energi omvandlas till värmeenergin en del åtgår med säkerhet för att penetrera plåtar i reststacken. Antagandet gjordes som en referenspunkt för att se om RSV – strålen har en tillräckligt stor massa för att uppnå den minsta antändnings energin för diesel vid olika blandningsförhållanden.

Beräkningarna för antändningstemperaturen i droppmoln verkar vara logisk då en vätska/gas kommer få en lägre antändningstemperatur ju mer utspridd den är.

6.1.4. Simuleringar

Vid beräkningen av D^* och cellstorlekarna är dessa mer inriktade åt bränder. Det valdes därför att cellstorlekarna för simuleringarna blev 10 cm, 5 cm och 2,5 cm för att kompensera att det är en explosion som simuleras istället för en brand.

Uppbyggnaden av modellerna gjordes för att efterlikna experimenten så bra som möjligt. Skillnaderna antogs vara så små att det inte gav någon nämnvärd skillnad i resultaten. Det är därför det gjordes två modeller, en med öppning för att simulera hålet som är för RSV-laddningen vid experimenten och en utan öppning för att efterlikna ett stridsfordon som blir träffat av en RSV-stråle.

Dessa simuleringar skulle ha inkluderat ett läckage för att simulera rörelsen av dieselmolnet efter att RSV-strålen penetrerat dieseltanken. Men detta kunde inte genomföras p.g.a. bristande kunskap om FLACS samt att tiden blev för knapp. Detsamma gäller inverkan av olika parametrar, t.ex. ändrade blandningsförhållanden mellan bränslet och luften, storleken på bränsleområdet i modellerna, antändningspunkten, starttemperaturer för luften och bränslet för att nämna några.

Dessa kan ha en stor påverkan på resultaten och det rekommenderas att det görs flera simuleringar i framtiden för att få en bättre förståelse av brandfenomenet.

6.2. Resultat

Det här delkapitlet diskuterar de framkomna resultaten.

6.2.1. Litteraturstudien

Många av de tidigare experimenten, som liknar de experiment utförda hos FOI, har inte tagit med data om temperatur och tryck, vilket hade varit till stor nytta för att kunna jämföra olika experiment mot varandra. Vid de experiment där det har varit temperatur- och tryckmätningar går det inte att jämföra data p.g.a. för stora skillnader i utformning och utförande hos dessa. De antaganden och slutsatser som de tidigare experimenten har gett, ser ut att stämma överens med det man har sett från experimentet utfört i detta arbete.

De antaganden som man kan jämföra och acceptera, men inte fullständigt bekräfta är:

- i tryckkammaren pulserar branden fram, eventuellt p.g.a. tryckreflektioner som bildas i det slutna utrymmet,
- RSV-strålen drar alltid med sig bränsle och att bränslet alltid antänds.

För att kunna bekräfta antagandet gällande tryckreflektioner behövs nya experiment med flera tryckmätpunkter. Höghastighetsfilmerna bekräftar att brandfenomenet pulserar.

6.2.2. Experimenten

Experimentet 2021 gav mycket data med några avvikelser. T2 slutar att registrera mätningar efter någon tiondelsekund men börja registrera igen efter någon sekunds uppehåll och T1 slutar att mäta temperaturen från att RSV-laddningen sköts, tidpunkt 0, till tre sekunder efter skottet. Där har man tappat data som kunde ha varit användbar. Temperaturmätningarna i T2 från experiment 2021 används ändå, då en liknande temperaturökning sker i T4 från experimentet 2019. Detta anses inte som en tillfällighet men det behövs flera experiment för att se om dessa temperaturökningar sker vid samma tidpunkt och var det sker, (då de sker vid olika platser i trycktanken för de båda experimenten).

Vid jämförelse har experimentet från 2019 en jämnare temperaturökning i starten vid alla mätpunkter än experimentet 2021. 2021 ökar temperaturen vid T2 väldigt snabbt jämfört med de andra fyra mätpunkterna, där det ena termoelementet, T1, inte mäter någonting det första tre sekunderna och T2 slutar att mäta lite efter en sekund. Temperaturmätningarna i T3 och T4 från 2019 börjar att sjunka när T1 och T2 fortsätter att öka. I mätningarna från 2021 stiger temperaturerna med varandra och når sin maxtemperatur ungefär samtidigt. Utifrån filmerna går det inte att bekräfta om det är en fortsatt brand i trycktanken under hela brandförloppet p.g.a. rökutveckling och

att kamerorna inte kunde filma hela brandförloppet. Kamera 1 kunde bara filma i 1,5 sekunder och kamera 2 i tre sekunder.

I kapitel 6.1.2 rekommenderas det att i framtiden används flera tryckmätare och av olika varianter samt att temperaturen mäts med en eller flera infraröda termoelement för att få flera och noggrannare tryck- och temperaturmätningar över brandfenomenet som kan leda till mer noggranna beräkningar. Utöver tryck- och temperaturmätningar kan det också vara av intresse att mäta koncentrationerna av CO, CO₂, NO_x etc. samt göra mätningar av metalldamm i röklagret från brandfenomenet. Det är också av intresse att titta på olika brandskyddssystem för att se hur de påverkar brandfenomenet. Placeringen av de olika mätinstrumenten är svår att bestämma i förväg. Det kommer att variera beroende vad man är intresserad av att mäta. Det går inte att stoppa in allt i trycktanken och hoppas på att man får med sig all data. Vissa mätinstrument tar större plats än andra och kan påverka brandfenomenet mer eller mindre. Det är viktigt att man bestämmer sig för vad man ska fokusera på, repetera experimenten med oförändrade förutsättningar (så långt det går) mer än en gång för att se om resultaten varierar stokastiskt. Sedan kan man göra om experimenten och fokusera på att mäta annan data. Rekommendationen är att det även görs experiment där man flyttar på reststacken för att se om den har någon påverkan gällande antändningen av dieselmolnet, samt att man, vid experiment på FOI, försöker bygga in RSV-laddningen för att veta hur mycket luft som kan användas under brandfenomenet. Det kan också vara intressant att se vad som händer om öppningen som existerar i trycktanken vid experimenten är stängd och RSV-strålen penetrerar den innan RSV-strålen penetrerar dieseltanken.

Övertrycket vid de två experimenten skiljer sig med 0,1 bar där övertrycket uppmättes till 1,2 bar 2019 och 1,1 bar 2021. De skiljer sig också åt när trycket sjunker, vid experimentet 2021 sjunker trycket långsammare.

Utgångshålen från RSV-strålen i dieseltanken skiljer sig åt, från 2019 är hålet mindre och rundare medan experimentet 2021 gav ett större och mer ovalformat. Detta kan bero på att RSV-strålen från experimentet 2021 kan ha fått en rotation och därmed börjat wobbla i dieseltanken. Det bildades dessutom mer rök i experimentet 2021 jämfört med 2019.

Det var en förbättring att ha med ytterligare en höghastighetskamera för att kunna filma utgångshålet av RSV:n genom dieseltanken. Detta gjorde det möjligt att bättre lokalisera var brandfenomenet startade. Det går dock inte att se exakt var branden startar då det fortfarande sker utanför bildområdet.

6.2.3. Beräkningar

I kapitel 6.1.3 diskuteras de värden som används för att beräkna h . Ser man på resultaten för h ligger de runt 440 – 1790 W/(m²·K) med olika flamfrontshastigheter. Detta är inget utöver det vanliga för h och det kan därför anses att de värden som används för konstanterna C och n , när Re_f är så pass mycket högre än vad som är refererat, i beräkningarna är inom rimliga gränser.

Vid beräkningarna av värmeproduktionen, värmeflödet och värmeenergin kan det konstateras att värmeflödet och värmeenergi som kommer från RSV-strålen är så pass liten och kortvarig, att den inte har någon påverkan på själva brandfenomenet.

Utifrån resultatet i kapitel 5.2.3 behövs det ca 5600 kJ för att värma upp luften till temperaturerna vid sju sekunder in i experimentet. Det behövs då en genomsnittlig värmeproduktion på ca 800 kW för att uppnå det. Om man antar att brandfenomenet är den enda branden som uppstår i experimentet kan man se att värmeproduktionen från experimentet 2019 har en värmeproduktion som är över 800 kW, (det är på gränsen när flamfronthastigheten är 50 m/s). Motsvarande beräkningar vid experimentet 2021 visar att värmeproduktionen vid alla flamfrontshastigheter är över 800 kW. Detta kan indikera att de ekvationer och värden som har använts till att beräkna värmeproduktionen, värmeflödet och värmeenergin kan stämma med verkligheten. Men detta gäller för ett kontinuerligt brandförlopp. Det går inte att följa hela brandförloppet i filmerna, då de bara är ca 1,5 sekund för den ena kameran och ca tre sekunder för den andra. Temperaturerna stiger fram till ca sju sekunder så det kan vara någon form av förbränning som fortsätter under denna tid. Det kan därför inte uteslutas att det är ett brandförlopp som pågår i sju sekunder.

För att få en högre precision i resultaten, rekommenderas det att ta reda på flamfronthastigheten från experimenten och göra beräkningar med den.

För mängden diesel som förbrändes är resultaten logiska och förefaller rimliga, de är tillräckligt noggranna för att kunna användas vidare i simuleringarna för att uppskatta massflödet för läckagen. Det är svårt att ta reda på den totala mängden som följer med RSV-strålen ut ur bränsletanken, då en del av dieseln inte antänds och förbränns, och efter att brandfenomenet är över, läcker det ut diesel från utgångshållet i bränsletanken ut i trycktanken.

Temperaturskillnaden vid vanlig antändningstemperatur till antändningstemperatur i droppmoln är ett par grader och för dieseln som användes vid experimenten sänks antändningstemperaturen med ca 3°C. För att veta om detta är exakt värde behövs det göras fler experiment som testar olika blandningsförhållanden mellan luften och dieseln för att se vilka faktorer som påverkar förloppet. [8] nämner att droppdiametern är en viktig faktor, men väldigt lite om hur den påverkar beräkningen av antändningstemperaturen.

6.2.4. Simuleringar

Tidsaxlarna vid simuleringarna varierar p.g.a. att det inte är ett bestämt minsta tidsförlopp för simuleringarna och FLACS följer då standardinställningarna för simuleringarna,

- minst 90 % av bränslet har förbränts eller lämnat området,
- minst 50% av bränslet har förbränts eller lämnat området och genomsnittstrycket blir negativt.

Jämför man påverkan av cellstorleken, märks det att den har en större påverkan på tryckresultaten för simuleringarna med öppningen i trycktanken. När cellstorleken är 10 cm är det ett maxtryck strax under 0,3 bar, vid 5 cm är det strax över 0,4 bar och med 2,5 cm ligger den strax över 0,6 bar. Det kan vara av intresse att se om det blir en skillnad av att minska cellstorleken till 1 cm. Detta arbete har inte gjort det p.g.a. tidsbrist. Gällande tryckresultaten utan en öppning i trycktanken kan man inte se en större skillnad, i alla tre fall kommer trycket över 1,0 bar. Skillnaden där är att tiden det tar för de olika simuleringarna att nå 1,0 bar skiljer sig med några tiondels sekunder.

Likheten vid simulering med öppning i trycktanken med de olika cellstorlekarna är att temperaturen i MP 5 stiger vid ca 0,1 sekunder till ca 2250 K. Utöver det är det svårt att se några fler likheter mellan simuleringarna. Vid simulering med trycktanken utan öppningen är det större variationer av maxtemperaturen. För simuleringarna med en cellstorlek på 10 cm är maxtemperaturen i MP 1 efter ca 0,8 sekunder strax under 2500 K och för simuleringarna med 5 cm och 2,5 cm är maxtemperaturen efter 0,3 sekunder respektive 0,2 sekunder i MP 5 där den hamnar strax under 2500 K.

Simuleringarna har gett varierande resultat och det är tveksamt om data från dessa är tillförlitliga. De varierande resultaten som beror på cellstorleken varierar på ett ologiskt sätt från andra CFD-program. En minskad cellstorlek ger inte ett noggrannare resultat utan helt annorlunda resultat jämfört med en grövre cellstorlek.

6.3. Tryckökning utan brandförlopp

Ser man på de tryckökningar som uppstod när man sköt en RSV-laddning genom PBV 302, framkommer det att tryckökningen ifrån RSV-skottet var ca 0,6 bar. Det är nästan hälften av vad tryckökningen var när det blev ett brandförlopp ifrån experimenten 2019 och 2021. Det kan då antas att brandförloppet ger en tryckökning på ca 0,5 – 0,6 bar utöver det som RRSV-skottet producerar.

6.4. Sannolikheten för antändning

Baserat på litteraturstudien, experimentet och beräkningarna antas det att sannolikheten för att dieseln ska antändas är hög. Detta är eftersom det behövs väldigt lite energi för att få dieseln att antändas. Dieseln som följer med RSV-strålen ut ur dieseltanken har en förhöjd temperatur, vilket underlättar antändning som sedan skapar en kemisk kedjereaktion. I alla experiment som har utförts har det alltid varit en reststack inne i trycktanken. Det rekommenderas att vid fortsatta experiment undersöka vilken påverkan reststacken placering, utformning och material har på antändningen av dieseln. Ser man försöksupställningen ur ett stridsfordons perspektiv finns det ofta men inte alltid något som kan absorbera upp RSV-strålen och hettas upp, vilket i sin tur kan leda till att dieseln antänds. Detta kan vara allt från ett motorblock till en tunn vägg som RSV-strålen passerar igenom. Det är också viktigt att göra experiment där någon form av brandskydd är installerat för att se om det kan ha någon påverkan på antändningsförloppet. Utifrån ett värsta scenario där ett fordon

inte har något brandskydd alls, kommer det alltid ske en antändning om en RSV-stråle penetrerar dieseltanken.

6.5. Påverkan på personalen

Jämför man resultaten från experimenten, beräkningarna och simuleringarna mot de skadekriterier som har nämnts i kapitel 2.5, kan man få en uppfattning över hur brandfenomenet kan påverka personalen.

Tar man de lägsta temperaturerna från beräkningarna för båda experimenten får man för 2019 ett värmefflöde på 1274 kW/m^2 och ett värmeenergiflöde på 255 kJ/m^2 och för 2021 ett värmefflöde på 545 kW/m^2 och ett värmeenergiflöde på 381 kJ/m^2 . Jämför man värmefflödet för båda experimenten mot vad som står i tabell 3 ser man att $37,5 \text{ kW/m}^2$ överskrider väldigt mycket. Gör man detsamma med värmeenergiflödet för båda experimenten mot tabell 4 överskrider båda det värde som är satt för tredje gradens brännskador på 250 kJ/m^2 . Men trots detta antas det att personalen inte kommer få brännskador som är värre än första gradens brännskador, då brandfenomenet inte vara längre än en sekund (enligt det man kan se från filmerna tagna under experimenten). Personalen i ett stridsfordon bär uniform, kroppsskydd, handskar, hjälm etc. som även skyddar personalen från branden. Det har inte gjorts några beräkningar på hur mycket ett uniformssystem skyddar personalen och det rekommenderas att det görs mer forskning och försök om det i framtiden.

Tar man den lägsta tryckökningen från simuleringarna, 0,3 bar, och tryckökningarna från experimenten, 1,2 bar (2019) och 1,1 bar (2021) och använder de i figur 12, kan man ta fram sannolikheten för att en soldat blir utslagen under brandfenomenet. Resultaten från simuleringarna och experimenten visar att personalen utsätts för en tryckökningsexponering under ca 500 millisekunder. Vid simuleringsresultatet är sannolikheten för att personalen blir utslagen ca 2 % om dem inte använder hjälm eller hörselskydd. Sannolikheten för personalen blir utslagen av tryckökningarna i båda experimenten blir:

- Utan hjälm och utan hörselskydd – ca 95 %
- Utan hjälm men med hörselskydd – ca 75 %
- Med hjälm och med hörselskydd – ca 30 %

Den enda faktorn som har visat sig ha en påverkan på hur en individ hanterar tryckökningarna är kroppsmassan. Eftersom den kan variera mellan individer kan sannolikheten variera från det som är sagt ovanför.

För att kunna få en uppfattning av hur trycket kan påverka personalen är Axelssons metod eller en utav de metoder som FFI jämförde mot Axelssons bra alternativ. Det som man kan få ut av metoderna är bröstkorgshastigheten, som visar med vilken hastighet bröstkorgen komprimeras. Det kan ge en indikation på hur allvarliga skador en person kan få vid snabba tryckökningar.

Ytterligere en viktig faktor som kan påvirka stridsdugligheten hos personalen är chock. Chock är svår att definiera och påverkar personalen olika, detta gäller också med varaktigheten av chocken. Det är svårt att avgöra hur långtid det kan ta innan personalen är stridsdugliga igen efter temperatur- och tryckökningarna. Vissa individer kan återhämta sig snabbare än andra.

7. Slutsats

Detta arbete har genom litteraturstudie, experiment, beräkningar och simuleringar, analyserat och evaluerat information om brandfenomenet som uppstår efter att en RSV-stråle har penetrerat en dieseltank inuti ett stridsfordon och hur det kan påverka personalen.

Brandfenomenet som uppstår i de båda utförda experimenten 2019 och 2021, varar i ca 0,2 sekunder (2019) och ca 0,7 sekunder (2021), tiden antogs utifrån filmerna från höghastighetskamerorna som användes i experimenten. Det är två väldigt snabba brandfenomen och klassas som en deflagration explosion. Utifrån resultaten som framkommit från de metoder som har använts under arbetet, kan man anse att de antaganden som har gjorts kan stämma överens med verkligheten. Det behövs ändå göras mer forskning inom området, för att få en bättre förståelse över exakt vad det är som gör att dieseln antänds och vad som kan göras för att förhindra det.

Det gjordes simuleringar för att kunna få en bättre förståelse över explosionerna som uppstår i experimenten. Utifrån resultaten från simuleringarna kan man se att hålet i trycktanken har en stor påverkan av tryckökningarna. Det var planlagt att arbetet skulle utföra flera simuleringar med läckage för att simulera spridningen av dieseln i trycktanken. Men p.g.a. bristande kunskap om FLACS och tidsbrist valdes det att bara göra simuleringar med ett stillastående dieselmoln.

Sannolikheten för att det ska ske en antändning av dieseln som följer med RSV-strålen ut från dieseltanken anses vara hög. Det är p.g.a. att det krävs en så pass liten mängd energi för att dieseln i droppform ska antändas, och om RSV-strålen träffar något som kan absorbera den kinetiska energin från RSV-strålen, behöver den ha en minsta massa som nästan är noll gram, för att dieseln ska antändas.

Det antas att personalen bär ett uniform, hjälm och hörselskydd när de befinner sig i ett stridsfordon. Utifrån resultaten om tryckökningarna anser arbetet att sannolikheten för att personalen ska förlora eller minska sin stridsduglighet, efter att en RSV-stråle har penetrerat dieseltanken är ca 30 %. Vid bestämmande av hur lång tid det tar innan personalen återigen är stridsduglig, går det inte att komma med något exakt svar. Detta är p.g.a. att tiden för återhämtningen kan variera så pass mycket mellan individer. Det som kan varieras mellan individerna är kroppsmassan vilken har en dokumenterad påverkan på hur en individ hanterar tryckökningar. Det är också svårt att fastställa hur individerna kommer hantera situationen efter explosionen som har uppstått. De kan t.ex. hamna i chock, som är svårt att i förväg definiera hur individerna kommer hantera. De kan tränas upp att hantera chocken, men man vet aldrig hur det kommer vara i ett skarpt scenario.

Utifrån resultaten om temperaturökningarna anser arbetet att de kommer ha en minimal påverkan på personalen, om det är det samma scenario som från filmerna tagna från experimenten. Det antas då att hela brandförloppet är kortvarigt, och kan jämföras med att dra ett finger över ett ljus som brinner. Desto snabbare man rör fingret över lågan, desto mindre skadas fingret. Om personal dessutom har på sig en

uniform som ger lite brandskydd, är det bara ansiktet som är exponerat för branden. Men om man utgår från temperaturmätningarna och antar att det är ett brandförlopp som varar i sju sekunder kommer det ha en större påverkan på personalen. Det kan resultera i fler som blir utslagna och leda till att det tar längre tid tills de blir stridsdugliga igen p.g.a. att man kanske måste evakuera fordonet.

8. Vidare arbete

Som det har nämnts i kapitel 6 och kapitel 7 rekommenderas det att fler experiment görs med flera typer av mätinstrument för de temperatur- och tryckökningarna som uppstår. Det behöver också göras mätningar om röken och metalldammet som uppstår vid explosionen och brandfenomenet för att se hur dessa kan påverka personalen. Det rekommenderas även att det görs experiment där man använder sig av olika typer av brandskydd för att se vad som kan förhindra eller minska sannolikheten för antändning. Eller om brandskydden minskar konsekvenserna av den explosion och eventuella brand som uppstår och hur brandskydden kan påverka personalen i stridsfordonet. Det är även viktigt att tänka på hur inredningen av ett stridsfordon kan påverka turbulensen från explosionen. Turbulensen kan göra att blandningen mellan bränslet och luften ändrar sig, som i sin tur kan leda till en potentiellt våldsammare explosion.

Det kan också vara av intresse att se på vad som händer när en RSV-stråle penetrerar andra typer av bränsle än dieseln, som t.ex. hydraulolja. Oljan har andra brandegenskaper än diesel och kan leda till andra typer av brandfenomen.

9. Referenser

- [1] B. C. Hagen, Grunnleggende brannteknikk, Haugesund, 2014.
- [2] B. Karlsson och J. G. Quintiere, Enclosure Fire Dynamics, Florida: CRC, 2000.
- [3] D. Drysdale, An Introduction to Fire Dynamics, Edinburgh: WILEY, 2011.
- [4] M. J. Hurey med flera, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering Fifth Edition, Springer, 2016.
- [5] N. Fernandez, *Industrial Fire Satey Lecture 11th of February, Ppt presentetion*, Haugesund, 2020.
- [6] Försvarshögskolan, Lärobok i Militärteknik, vol. 4 Verkan och skydd, Vällingby: Försvarshögskolan, 2009.
- [7] T. Hartmann med flera, "Fuel tank vulnerability to shaped charge jet," 29TH Internatinal Symposium on ballistics, Edingburgh, 2016.
- [8] R. K. Eckhoff, Explosjion Hazards in the process industries, Huston, Texas, USA: Gulf Publishing Company, 2005.
- [9] N. Moussa, M. Whale, D. Groszmann och X. Zhang, "The Potential for Fuel Tank Fire and Hydrodynamic Ram From Uncontained Aircraft Engine Debris: DOT/FAA/AR-96/95," U.S. Department of Transportation, Virginia, 1997.
- [10] C. E. Polymeropoulos, "Ignition and propagation rates for flames in a fuel mist," U.S. Department of transportation, Washington D.C., 1975.
- [11] P. Thomas och F. Barry, "Fire Expousure Profile Modeling Some Threshold Damage Limit (TDL) Data," TFBarry Publications, 2003.
- [12] G. W. Weibull, "Underlag för värdering av verkan av RSV-stridsdelar med restverk-kanstillsats (ej stråle och splitter) - FT 126-09:98," FFV Försvarsmateriel, 1983.

- [13] L. G. Bowen, E. R. Fletcher och D. R. Richmond, "Estimate of man's tolerance to direct effects of air blast," Defence Atomic Support Agency, Washington D.C., 1968.
- [14] N. Johansson, "Skadeutvärdering av komplexa stötvågor med Axelssons metod: FOI-R--4300--SE," FOI, Totalförsvarets forskningsinstitut, Grindsjön, 2016.
- [15] A. v. d. M. v. d. H. E. S. Jan Arild Teland, "Single point methods for determining blast wave injury," FFI, 2011.
- [16] G. W. Weibull, "A proposal for blast incapacitation criteria concerning soldiers inside armoured vehicles - FT 126-09:99," FFV Försvarsmateriel, 1983.
- [17] H. Axelsson med flera, "Verkan av en RSV-laddning mot pbv 302, En Experimentell jämförelse med beskjutningarna i Bosninen 1994: - FOA-R--98-00742-310--SE," Försvarets Forskningsanstalt, FOA, Tumba, 1998.
- [18] A. Helte, E. Lindén och J. Lundgren, "Ammunitionsprovning med handburen RSV-ammunition mot typmål: FOI-RH--2081-SE.2019," FOI, Grindsjön, 2019.
- [19] C. Forsberg och Y. Wngström, Att göra systematiska litteraturstudier, Lettland: Natur & Kultur, 2016.
- [20] A. Medin med flera, "RSVE-granaters verkan i pansrade fordon: FOA Rapport C 20801-2.3 Juni 1990 ISSN 0347-3694," FOA, Grindsjön, 1992.
- [21] OKQ8, *OKQ8 Diesel Miljöklass 1*, OKQ8, 2017.
- [22] Gexcon AS, "FLACS-CFD v20.2 User's Manual," Gexcon, 2020.
- [23] NIST, "Fire Dynamics Simulator User's Guide," U.S. Department of Commerce, 2013.
- [24] L. Svensson, "Människans tålighet mot luftstötvågor: FOI-R--3905--SE," FOI, Totalförsvarets forskningsinstitut, Grindsjön, 2015.

Bilagor

A. Flamhastighet mot hastigheten av bränsledropparna

Tabell 35 visar hur mycket flamhastigheten ökar med hastigheten hos dropparna i en luftkanal med fotogen med olika droppdiametrar. Blandningsförhållandet, λ , mellan fotogen och luft är 1,1 [8].

Tabell 35: Flamhastighet mot hastighet av bränsledropparna [8]

Droppdiameter	Luftkanalhastighet	Flamhastighet
30 μm	≈ 12 m/s	$\approx 3,3$ m/s
	≈ 22 m/s	$\approx 3,5$ m/s
	≈ 25 m/s	$\approx 4,0$ m/s
	≈ 34 m/s	$\approx 3,8$ m/s
50 μm	≈ 12 m/s	$\approx 2,2$ m/s
	≈ 21 m/s	$\approx 2,7$ m/s
	≈ 25 m/s	$\approx 3,2$ m/s
	≈ 34 m/s	$\approx 3,3$ m/s
90 μm	≈ 12 m/s	$\approx 1,1$ m/s
	≈ 21 m/s	$\approx 2,1$ m/s
	≈ 25 m/s	$\approx 2,3$ m/s
	≈ 34 m/s	$\approx 2,9$ m/s

Tabell 36 visar flamhastigheten för fotogen som har flödes hastighet på 25 m/s med olika droppdiameter och vid olika bränsle/luft blandningar. Tabell 37 visar flamhastigheten för fotogen med en flödes hastighet på 20 m/s med en droppdiameter på 30 μm vid varierande bränsle/luft blandning [8].

Tabell 36: Flamhastighet mot bränsle/luft blandning med flödes hastighet på 25 m/s [8]

Droppdiameter	Blandningsförhållande	Flamhastighet
30 μm	$\approx 0,4$	$\approx 2,8$ m/s
	$\approx 0,7$	$\approx 3,7$ m/s
	$\approx 1,1$	$\approx 4,1$ m/s
	$\approx 1,5$	$\approx 2,9$ m/s
	$\approx 1,8$	$\approx 1,8$ m/s
50 μm	$\approx 0,4$	$\approx 2,2$ m/s
	$\approx 0,7$	$\approx 2,8$ m/s
	$\approx 1,1$	$\approx 3,3$ m/s
	$\approx 1,5$	$\approx 3,1$ m/s
	$\approx 1,8$	$\approx 2,9$ m/s
70 μm	$\approx 0,4$	$\approx 1,9$ m/s
	$\approx 0,7$	$\approx 2,1$ m/s
	$\approx 1,1$	$\approx 2,5$ m/s
	$\approx 1,5$	$\approx 2,8$ m/s
	$\approx 1,8$	$\approx 2,2$ m/s

Tabell 37: Flamhastighet mot bränsle/luft blandning med flödes hastighet på 20 m/s [8]

Droppdiameter	Blandningsförhållande	Flamhastighet
30 μm	$\approx 0,38$	$\approx 2,3$ m/s
	$\approx 0,55$	$\approx 2,8$ m/s
	$\approx 0,75$	$\approx 3,2$ m/s
	$\approx 0,91$	$\approx 3,5$ m/s
	$\approx 1,1$	$\approx 3,6$ m/s

Tabell 38 visar vid vilka temperaturer en vägg behöver för att Jet A – fuel ska antändas, beroende på vilken bränsle/luft-blandning det är när droppdiametern är mindre än 50 μm och har en flödes hastighet på 1 m/s [8].

Tabell 38: Jet A- fuel minsta temperatur på en vägg för att antändning ska ske beroende på bränsle/luft-blandning [8]

Droppdiameter	Blandningsförhållande	Minsta antändningstemperatur
<50 μm	$\approx 0,2$	≈ 818 °C
	$\approx 0,3$	≈ 810 °C
	$\approx 0,7$	≈ 795 °C
	$\approx 1,2$	≈ 778 °C
	$\approx 1,4$	≈ 775 °C
	$\approx 1,8$	≈ 770 °C
	$\approx 1,8$	≈ 778 °C
	$\approx 1,8$	≈ 795 °C
	$\approx 3,4$	≈ 790 °C
	$\approx 5,4$	≈ 835 °C
	$\approx 5,4$	≈ 842 °C

Tabell 39 visar vid vilka temperaturer Jet A – fuel kan antändas vid, beroende på flödes hastighet det är när droppdiametern är mindre än 50 μm och har en stökiometrisk blandning av bränsle/luft [8].

Tabell 39: Jet A- fuel minsta temperatur på en vägg för att antändning ska ske beroende på flödes hastigheten [8]

Droppdiameter	Flödes hastighet	Minsta antändningstemperatur
<50 μm	≈ 1 m/s	≈ 815 – 818 °C
	$\approx 2,3$ m/s	≈ 850 – 861 °C
	$\approx 3,1$ m/s	≈ 878 °C

B. Tålighetsgräns mot termisk strålning

Detaljerad information om skador och påverkningar av termisk strålning, nivåerna varierar beroende på vilken region man hämtar data från, de som presenteras här är från U.S.A., U.K och New South Wales [11].

Tabell 40: Förväntade skador vid varierande termiska strålningsnivåer [11]

Exponering	Termisk strålningsnivå [kW/m ²]		
	US DOT	UK	New South Wales
1. Orsakar smärta efter 1 min av exponering	-	-	2,1
2. Kommer att orsaka smärt inom 15 – 20 sekunder och andragsbrännskador efter 30 sekunder	5	6,3	4,7
3. Betydande risk för dödsfall vid längre exponering; hög risk för skada efter exponering i mindre än 30 sekunder. Byggnader av cellulosamaterial kan få mindre skador vid långvarig exponering	12,5	10	12,6
4. Förlängd exponering resulterar i dödsfall; det finns en chans att omedelbar exponering leder till dödsfall. Byggnader som är gjorda av cellulosamaterial eller inte brandsäkra material kommer att få skador efter kort exponering. Byggnader med brandmotstånd och metall kan drabbas av skador efter långvarig exponering.	21,0	-	23,0
5. Markant ökad risk för dödsfall för människor vid omedelbar exponering. Byggnader med brandmotstånd får skador efter kort exponering. Byggnader av cellulosamaterial kommer spontantändas. Det kommer att uppstå metallutmattnings efter en kort till medellång exponering.	31,5	-	35,0

C. Temperaturdata från experimentet 2019

Tabell 41: Temperaturdata från experimentet 2019 [18]

Tid	T1 tak Last (C)	T2 tak Last (C)	T3 (P1) Last (C)	T4 (P2) Last (C)
0	0	0	0	0
0,1	0	0	0	0
0,2	0	0	0	0
0,3	0	0	0	0
0,4	0	0	0	0
0,5	0	0	0	0
0,6	0	0	0	0
0,7	0	0	0	0
0,8	0	0	0	0
0,9	0	0	0	0
1	0	0	0	0
1,1	262	98	411	695
1,2	262	98	411	695
1,3	262	98	411	695
1,4	262	98	411	695
1,5	262	98	411	695
1,6	391	425	398	458
1,7	391	425	398	458
1,8	391	425	398	458
1,9	391	425	398	458
2	391	425	398	458
2,1	488	449	287	355
2,2	488	449	287	355
2,3	488	449	287	355
2,4	488	449	287	355
2,5	488	449	287	355
2,6	540	468	244	289
2,7	540	468	244	289
2,8	540	468	244	289
2,9	540	468	244	289
3	540	468	244	289
3,1	607	526	227	252
3,2	607	526	227	252
3,3	607	526	227	252
3,4	607	526	227	252
3,5	607	526	227	252
3,6	630	591	207	238
3,7	630	591	207	238
3,8	630	591	207	238
3,9	630	591	207	238
4	630	591	207	238
4,1	648	588	195	225

4,2	648	588	195	225
4,3	648	588	195	225
4,4	648	588	195	225
4,5	648	588	195	225
4,6	651	612	173	229
4,7	651	612	173	229
4,8	651	612	173	229
4,9	651	612	173	229
5	651	612	173	229
5,1	667	599	167	239
5,2	667	599	167	239
5,3	667	599	167	239
5,4	667	599	167	239
5,5	667	599	167	239
5,6	666	620	159	252
5,7	666	620	159	252
5,8	666	620	159	252
5,9	666	620	159	252
6	666	620	159	252
6,1	709	656	147	264
6,2	709	656	147	264
6,3	709	656	147	264
6,4	709	656	147	264
6,5	709	656	147	264
6,6	700	646	136	260
6,7	700	646	136	260
6,8	700	646	136	260
6,9	700	646	136	260
7	700	646	136	260
7,1	673	627	131	250
7,2	673	627	131	250
7,3	673	627	131	250
7,4	673	627	131	250
7,5	673	627	131	250
7,6	657	605	131	240
7,7	657	605	131	240
7,8	657	605	131	240
7,9	657	605	131	240
8	657	605	131	240
8,1	628	581	156	255
8,2	628	581	156	255
8,3	628	581	156	255
8,4	628	581	156	255
8,5	628	581	156	255
8,6	602	535	159	234

8,7	602	535	159	234
8,8	602	535	159	234
8,9	602	535	159	234
9	602	535	159	234
9,1	526	445	149	200
9,2	526	445	149	200
9,3	526	445	149	200
9,4	526	445	149	200
9,5	526	445	149	200
9,6	450	370	153	169
9,7	450	370	153	169
9,8	450	370	153	169
9,9	450	370	153	169
10	450	370	153	169
10,1	402	342	148	148
10,2	402	342	148	148
10,3	402	342	148	148
10,4	402	342	148	148
10,5	402	342	148	148
10,6	363	318	142	130
10,7	363	318	142	130
10,8	363	318	142	130
10,9	363	318	142	130
11	363	318	142	130
11,1	331	291	134	122
11,2	331	291	134	122
11,3	331	291	134	122
11,4	331	291	134	122
11,5	331	291	134	122
11,6	307	271	127	128
11,7	307	271	127	128
11,8	307	271	127	128
11,9	307	271	127	128
12	307	271	127	128
12,1	299	257	121	125
12,2	299	257	121	125
12,3	299	257	121	125
12,4	299	257	121	125
12,5	299	257	121	125
12,6	297	240	116	128
12,7	297	240	116	128
12,8	297	240	116	128
12,9	297	240	116	128
13	297	240	116	128
13,1	295	229	110	124

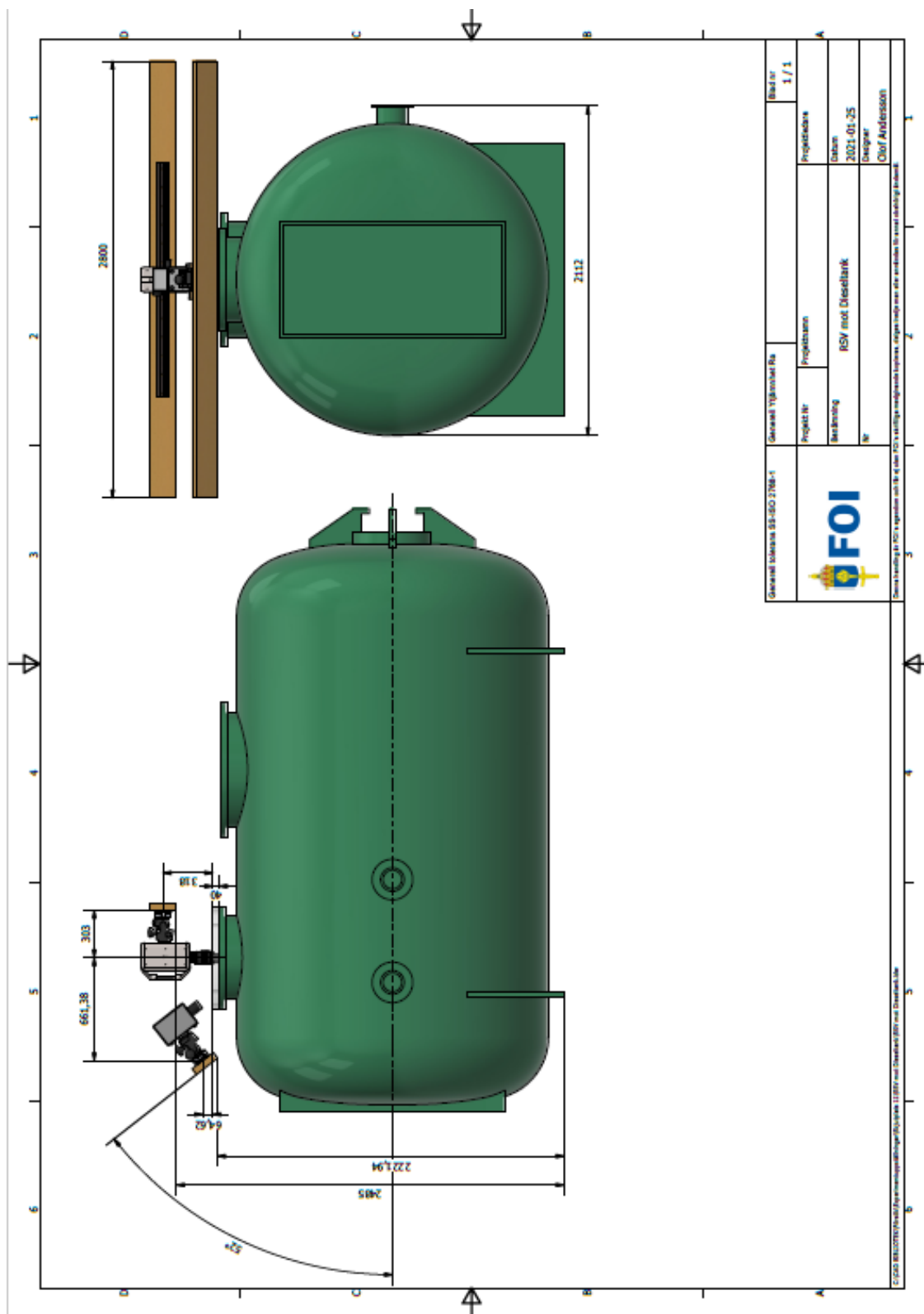
13,2	295	229	110	124
13,3	295	229	110	124
13,4	295	229	110	124
13,5	295	229	110	124
13,6	289	223	111	121
13,7	289	223	111	121
13,8	289	223	111	121
13,9	289	223	111	121
14	289	223	111	121
14,1	280	217	112	120
14,2	280	217	112	120
14,3	280	217	112	120
14,4	280	217	112	120
14,5	280	217	112	120
14,6	267	220	111	118
14,7	267	220	111	118
14,8	267	220	111	118
14,9	267	220	111	118
15	267	220	111	118
15,1	256	222	106	113
15,2	256	222	106	113
15,3	256	222	106	113
15,4	256	222	106	113
15,5	256	222	106	113
15,6	252	220	96	110
15,7	252	220	96	110
15,8	252	220	96	110
15,9	252	220	96	110
16	252	220	96	110
16,1	248	219	90	106
16,2	248	219	90	106
16,3	248	219	90	106
16,4	248	219	90	106
16,5	248	219	90	106
16,6	241	218	86	101
16,7	241	218	86	101
16,8	241	218	86	101
16,9	241	218	86	101
17	241	218	86	101
17,1	234	207	78	94
17,2	234	207	78	94
17,3	234	207	78	94
17,4	234	207	78	94
17,5	234	207	78	94
17,6	227	201	78	92

17,7	227	201	78	92
17,8	227	201	78	92
17,9	227	201	78	92
18	227	201	78	92
18,1	220	195	73	90
18,2	220	195	73	90
18,3	220	195	73	90
18,4	220	195	73	90
18,5	220	195	73	90
18,6	213	193	68	91
18,7	213	193	68	91
18,8	213	193	68	91
18,9	213	193	68	91
19	213	193	68	91
19,1	203	185	69	91
19,2	203	185	69	91
19,3	203	185	69	91
19,4	203	185	69	91
19,5	203	185	69	91
19,6	203	185	69	91
19,7	203	185	69	91
19,8	203	185	69	91
19,9	203	185	69	91
20	203	185	69	91
20,1	187	171	62	90
20,2	187	171	62	90
20,3	187	171	62	90
20,4	187	171	62	90
20,5	187	171	62	90
20,6	187	171	62	90
20,7	187	171	62	90
20,8	187	171	62	90
20,9	187	171	62	90
21	187	171	62	90
21,1	181	165	54	88
21,2	181	165	54	88
21,3	181	165	54	88
21,4	181	165	54	88
21,5	181	165	54	88
21,6	181	165	54	88
21,7	181	165	54	88
21,8	181	165	54	88
21,9	181	165	54	88
22	181	165	54	88
22,1	170	162	51	86

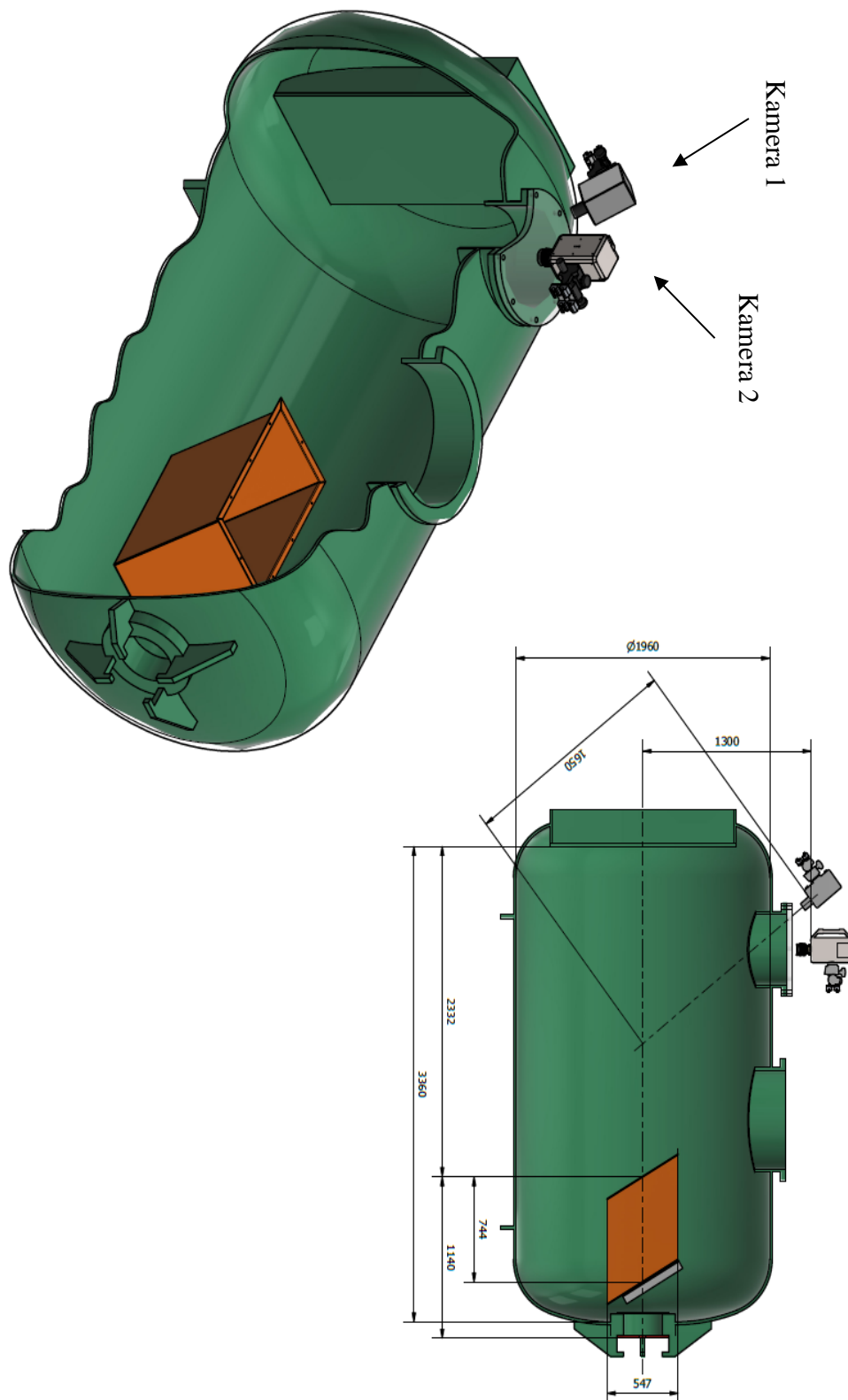
22,2	170	162	51	86
22,3	170	162	51	86
22,4	170	162	51	86
22,5	170	162	51	86
22,6	170	162	51	86
22,7	170	162	51	86
22,8	170	162	51	86
22,9	170	162	51	86
23	170	162	51	86
23,1	163	154	48	82
23,2	163	154	48	82
23,3	163	154	48	82
23,4	163	154	48	82
23,5	163	154	48	82
23,6	163	154	48	82
23,7	163	154	48	82
23,8	163	154	48	82
23,9	163	154	48	82
24	163	154	48	82
24,1	157	151	44	81
24,2	157	151	44	81
24,3	157	151	44	81
24,4	157	151	44	81
24,5	157	151	44	81
24,6	157	151	44	81
24,7	157	151	44	81
24,8	157	151	44	81
24,9	157	151	44	81
25	157	151	44	81
25,1	149	140	47	76
25,2	149	140	47	76
25,3	149	140	47	76
25,4	149	140	47	76
25,5	149	140	47	76
25,6	149	140	47	76
25,7	149	140	47	76
25,8	149	140	47	76
25,9	149	140	47	76
26	149	140	47	76
26,1	139	137	44	75
26,2	139	137	44	75
26,3	139	137	44	75
26,4	139	137	44	75
26,5	139	137	44	75
26,6	139	137	44	75

26,7	139	137	44	75
26,8	139	137	44	75
26,9	139	137	44	75
27	139	137	44	75
27,1	137	133	40	73
27,2	137	133	40	73
27,3	137	133	40	73
27,4	137	133	40	73
27,5	137	133	40	73
27,6	137	133	40	73
27,7	137	133	40	73
27,8	137	133	40	73
27,9	137	133	40	73
28	137	133	40	73
28,1	133	131	34	70
28,2	133	131	34	70
28,3	133	131	34	70
28,4	133	131	34	70
28,5	133	131	34	70
28,6	133	131	34	70
28,7	133	131	34	70
28,8	133	131	34	70
28,9	133	131	34	70
29	133	131	34	70
29,1	128	128	32	67
29,2	128	128	32	67
29,3	128	128	32	67
29,4	128	128	32	67
29,5	128	128	32	67
29,6	128	128	32	67
29,7	128	128	32	67
29,8	128	128	32	67
29,9	128	128	32	67
30	128	128	32	67
30,1	125	124	29	65
30,2	125	124	29	65
30,3	125	124	29	65
30,4	125	124	29	65
30,5	125	124	29	65
30,6	125	124	29	65
30,7	125	124	29	65
30,8	125	124	29	65

D. Trycktank



Figur 39: Trycktanken sett utifrån




Figur 40 Trycktanken sedd i 3D, till vänster och i snitt till höger

E. OKQ8 Diesel Miljøklass 1

Informationsblad om dieseln som användes vid experimenten.


December 2017

 **FOI DIESEL**

OKQ8 Diesel Miljøklass 1

Motorbränsle för dieselmotorer, såväl lätta som tunga dieseldrivna fordon och arbetsmaskiner.

OKQ8 Diesel – Miljøklass 1 finns i följande utföranden;

 **OKQ8 Diesel B0 – Miljøklass 1** utan inblandning av RME (raps-metyl-ester). Rekommenderas framförallt för anläggningar där en mycket lång hållbarhet krävs. Säljs endast som bulkvara med leverans av tankbil till tank med tankbilskoppling. Kan även säljas som grönfärgat skattebefriat dieselbränsle till motorer vilka är tillåtna att köras på lågbeskattat bränsle.

OKQ8 Diesel B5 – Miljøklass 1 med upp till 5 % inblandning av det förnybara dieselbränslet RME.

OKQ8 Diesel Bio+ – Miljøklass 1 med 40 % andel förnybar diesel (35 % syntetisk dieselolja av förnybara råvaror och 5 % RME). I vissa områden och perioder kan Diesel Bio+ innehålla upp till 40 % förnybar syntetisk diesel och 5 % RME. Den syntetiska dieseln är ett modernt och miljöanpassat alternativ med mycket hög teknisk prestanda, t.ex. ett mycket högt cetantal. Endast tillgänglig i vissa geografiska områden, för mer information se <http://www.okq8.se/privat/pastationen/drivmedel>.

KVALITETSNIVÅ

Uppfyller Svensk Standard SS 15 54 35 Miljøklass 1 och SS EN-590. Inblandad RME uppfyller SS-EN 14 214.

FÖRDELAR

- Goda förbränningsegenskaper för en lägre nivå av miljö- och hälsokadliga avgasemissioner men även minimala sot- och koksavlagringar i motorns förbränningsrum
- Arktisk dieselkvalitet med mycket goda vinteregenskaper
- Goda smörjande egenskaper

HÄLSA, MILJÖ OCH SÄKERHET

För information om miljö-, hälso- och säkerhetsaspekter se säkerhetsdatablad på www.okq8.se. Här finns t.ex. brand- och transportkodsklassificering.

LAGRING

Lagring skall ske i för lagring av dieselbränsle godkända cisterner. Kontinuerlig dränering av kondensvatten och cisternrengöring rekommenderas vid egen lagring. OKQ8 Diesel B5 och OKQ8 Diesel Bio+ rekommenderas inte för lagring längre än 1 år. För mer information om lagring och lagringsstabilitet se Svenska Petroleum & Biodrivmedels Institutets faktabas för dieselbränsle, www.spbi.se.

TYPDATA	Svensk Standard SS 15 54 35	OKQ8 Diesel B0 - MK1	OKQ8 Diesel B5 - MK1	OKQ8 Diesel Bio+ - MK1
Densitet, 15°C, kg/m ³	800 - 830	815	818-819	810
Tändvillighet, cetanindex	min 50	53,5	53,4	57
Viskositet, 40°C, cSt	1,5 - 4,0	2,0	2,1	2,3
Destillation				
Begynnelsekokpunkt vid °C	Min 180	185	185	185
95% destillerat vid °C	max 320	290	305	305
Grumlingstemperatur, °C	max -16	-33	-24	-24
Filterbarhet i kyla, °C				
Söder om dalälven	max -26	-32	-26	-26
Norr om dalälven	max -26	-35	-32	-32
Svavelhalt, ppm	max 10	2	2	<2
Aromhalt, vol. %	max 5	<5	<5	<4,5
PAH, vol. %	max 0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Flampunkt, °C	min 56	70	70	70
Inblandning RME, vol. %	max 7	0	5	5
Total förnybar andel		0	5	25-45
Färg		Färglös	Gulaktig	Gulaktig

För hela livet med bilen



Figur 41: Informationsblad om dieseln som används vid FOI

F. Värden och resultat från beräkningarna av experimentet 2019

Alla beräkningar har gjorts med Excel. Alla ekvationer som använts har presenterats i kapitel 4.3.

Värden som användes i beräkningarna med genomsnittstemperaturen visas i tabell 42 och resultaten från beräkningarna visas i tabell 43:

Tabell 42: Värden som användes i beräkningarna med genomsnittstemperaturen

$L \text{ \& } D =$	2	m
$B =$	3,180	m
$T_{Fl} =$	639,65	K
$T_Y =$	273,15	K
$A_{Kv} =$	19,970	m ²
$A_C =$	3,140	m ²
c_p	2,6543	J/gK
$v_f =$	1,103E-08	m ² /s
$k_f =$	0,05181	W/m*K
$\rho_{Jet \text{ A-Fuel}} =$	800,0	kg/m ³
$\rho_{luft} =$	0,55186	kg/m ³
$\Delta t =$	0,2	s
$\chi =$	0,7	
$\Delta H_c =$	43,5	kJ/g

Tabell 43: Resultaten från beräkningarna med genomsnittstemperaturen

$V \text{ [m/s]}$	50	100	150	200	250	300	340
Ref	9,06E+09	1,81E+10	2,72E+10	3,62E+10	4,53E+10	5,44E+10	6,16E+10
$h \text{ [W/m}^2 \cdot \text{K]}$	546,58	838,86	1077,74	1287,44	1477,81	1654,06	1787,08
$\dot{Q} \text{ [kW]}$	4000,51	6139,76	7888,16	9422,97	10816,29	12106,32	13079,93
$\dot{q} \text{ [kW/m}^2 \text{]}$	1274,05	1955,34	2512,15	3000,95	3444,68	3855,52	4165,58
$Q \text{ [kJ]}$	800,10	1227,95	1577,63	1884,59	2163,26	2421,26	2615,99
$\dot{q} \text{ [kJ/m}^2 \text{]}$	254,81	391,07	502,43	600,19	688,94	771,10	833,12
$\dot{m} \text{ [g/s]}$	131,379	201,634	259,053	309,457	355,215	397,580	429,554
$m \text{ [g]}$	26,276	40,327	51,811	61,891	71,043	79,516	85,911

G. Temperaturdata från experimentet 2021

Tabell 44: Temperaturdata från experimentet 2021

Tid (s)	T1 Tak Last (C)	T2 Manhål Last (C)	T3 vid P1 Last (C)	T4 vid P2 Last (C)	T5 Dieseltank Last (C)	T6 Utetemp Last (C)
0	6	6	3	2	11	-4
0,1	6	6	3	2	11	-4
0,2	6	6	3	2	11	-4
0,3	6	6	3	2	11	-4
0,4		245	5	15	18	-4
0,5		245	5	15	18	-4
0,6		245	5	15	18	-4
0,7		967	10	49	68	-4
0,8		967	10	49	68	-4
0,9		967	10	49	68	-4
1		967	10	49	68	-4
1,1		967	10	49	68	-4
1,2		967	10	49	68	-4
1,3		967	10	49	68	-4
1,4		11	19	91	80	-4
1,5		11	19	91	80	-4
1,6		11	19	91	80	-4
1,7		11	19	91	80	-4
1,8		11	19	91	80	-4
1,9		11	19	91	80	-4
2		11	19	91	80	-4
2,1		11	19	91	80	-4
2,2		11	19	91	80	-4
2,3		11	19	91	80	-4
2,4			20	120	84	-4
2,5			20	120	84	-4
2,6			20	120	84	-4
2,7			27	154	92	-4
2,8			27	154	92	-4
2,9	269	298	27	154	92	-4
3	269	298	27	154	92	-4
3,1	269	298	27	154	92	-4
3,2	269	298	27	154	92	-4
3,3	269	298	27	154	92	-4
3,4	269	298	88	209	100	-4
3,5	269	298	88	209	100	-4
3,6	269	298	88	209	100	-4
3,7	269	298	88	209	100	-4
3,8	269	298	88	209	100	-4
3,9	269	298	88	209	100	-4
4	269	298	88	209	100	-4

4,1	269	298	88	209	100	-4
4,2	269	298	88	209	100	-4
4,3	269	298	88	209	100	-4
4,4	548	472	526	283	106	-4
4,5	548	472	526	283	106	-4
4,6	548	472	526	283	106	-4
4,7	548	472	526	283	106	-4
4,8	548	472	526	283	106	-4
4,9	548	472	526	283	106	-4
5	548	472	526	283	106	-4
5,1	548	472	526	283	106	-4
5,2	548	472	526	283	106	-4
5,3	548	472	526	283	106	-4
5,4	595	592	316	321	111	-4
5,5	595	592	316	321	111	-4
5,6	595	592	316	321	111	-4
5,7	617	613	457	337	116	-3
5,8	617	613	457	337	116	-3
5,9	617	613	457	337	116	-3
6	617	613	457	337	116	-3
6,1	617	613	457	337	116	-3
6,2	617	613	457	337	116	-3
6,3	617	613	457	337	116	-3
6,4	634	617	466	349	120	-3
6,5	634	617	466	349	120	-3
6,6	634	617	466	349	120	-3
6,7	634	617	466	349	120	-3
6,8	634	617	466	349	120	-3
6,9	634	617	466	349	120	-3
7	634	617	466	349	120	-3
7,1	634	617	466	349	120	-3
7,2	634	617	466	349	120	-3
7,3	634	617	466	349	120	-3
7,4	635	590	474	356	123	-3
7,5	635	590	474	356	123	-3
7,6	635	590	474	356	123	-3
7,7	602	546	433	363	125	-2
7,8	602	546	433	363	125	-2
7,9	602	546	433	363	125	-2
8	602	546	433	363	125	-2
8,1	602	546	433	363	125	-2
8,2	602	546	433	363	125	-2
8,3	602	546	433	363	125	-2
8,4	557	510	385	358	124	-2
8,5	557	510	385	358	124	-2

8,6	557	510	385	358	124	-2
8,7	557	510	385	358	124	-2
8,8	557	510	385	358	124	-2
8,9	557	510	385	358	124	-2
9	557	510	385	358	124	-2
9,1	557	510	385	358	124	-2
9,2	557	510	385	358	124	-2
9,3	557	510	385	358	124	-2
9,4	442	449	357	343	121	-2
9,5	442	449	357	343	121	-2
9,6	442	449	357	343	121	-2
9,7	367	338	320	328	117	-2
9,8	367	338	320	328	117	-2
9,9	367	338	320	328	117	-2
10	367	338	320	328	117	-2
10,1	367	338	320	328	117	-2
10,2	367	338	320	328	117	-2
10,3	367	338	320	328	117	-2
10,4	339	227	306	315	113	-2
10,5	339	227	306	315	113	-2
10,6	339	227	306	315	113	-2
10,7	339	227	306	315	113	-2
10,8	339	227	306	315	113	-2
10,9	339	227	306	315	113	-2
11	339	227	306	315	113	-2
11,1	339	227	306	315	113	-2
11,2	339	227	306	315	113	-2
11,3	339	227	306	315	113	-2
11,4	297	158	291	300	109	-2
11,5	297	158	291	300	109	-2
11,6	297	158	291	300	109	-2
11,7	297	158	291	300	109	-2
11,8	297	158	291	300	109	-2
11,9	297	158	291	300	109	-2
12	297	158	291	300	109	-2
12,1	297	158	291	300	109	-2
12,2	297	158	291	300	109	-2
12,3	297	158	291	300	109	-2
12,4	274	123	269	288	105	-3
12,5	274	123	269	288	105	-3
12,6	274	123	269	288	105	-3
12,7	246	107	244	276	101	-3
12,8	246	107	244	276	101	-3
12,9	246	107	244	276	101	-3
13	246	107	244	276	101	-3

13,1	246	107	244	276	101	-3
13,2	246	107	244	276	101	-3
13,3	246	107	244	276	101	-3
13,4	205	87	231	266	96	-3
13,5	205	87	231	266	96	-3
13,6	205	87	231	266	96	-3
13,7	205	87	231	266	96	-3
13,8	205	87	231	266	96	-3
13,9	205	87	231	266	96	-3
14	205	87	231	266	96	-3
14,1	205	87	231	266	96	-3
14,2	205	87	231	266	96	-3
14,3	205	87	231	266	96	-3
14,4	158	69	212	255	92	-3
14,5	158	69	212	255	92	-3
14,6	158	69	212	255	92	-3
14,7	123	54	195	243	88	-3
14,8	123	54	195	243	88	-3
14,9	123	54	195	243	88	-3
15	123	54	195	243	88	-3
15,1	123	54	195	243	88	-3
15,2	123	54	195	243	88	-3
15,3	123	54	195	243	88	-3
15,4	88	41	177	233	85	-3
15,5	88	41	177	233	85	-3
15,6	88	41	177	233	85	-3
15,7	88	41	177	233	85	-3
15,8	88	41	177	233	85	-3
15,9	88	41	177	233	85	-3
16	88	41	177	233	85	-3
16,1	88	41	177	233	85	-3
16,2	88	41	177	233	85	-3
16,3	88	41	177	233	85	-3
16,4	63	32	161	222	81	-3
16,5	63	32	161	222	81	-3
16,6	63	32	161	222	81	-3
16,7	46	23	149	212	78	-3
16,8	46	23	149	212	78	-3
16,9	46	23	149	212	78	-3
17	46	23	149	212	78	-3
17,1	46	23	149	212	78	-3
17,2	46	23	149	212	78	-3
17,3	46	23	149	212	78	-3
17,4	33	17	142	204	75	-3
17,5	33	17	142	204	75	-3

17,6	33	17	142	204	75	-3
17,7	33	17	142	204	75	-3
17,8	33	17	142	204	75	-3
17,9	33	17	142	204	75	-3
18	33	17	142	204	75	-3
18,1	33	17	142	204	75	-3
18,2	33	17	142	204	75	-3
18,3	33	17	142	204	75	-3
18,4	25	14	139	197	73	-3
18,5	25	14	139	197	73	-3
18,6	25	14	139	197	73	-3
18,7	25	14	139	197	73	-3
18,8	25	14	139	197	73	-3
18,9	25	14	139	197	73	-3
19	25	14	139	197	73	-3
19,1	25	14	139	197	73	-3
19,2	25	14	139	197	73	-3
19,3	25	14	139	197	73	-3
19,4	16	9	120	181	68	-3
19,5	16	9	120	181	68	-3
19,6	16	9	120	181	68	-3
19,7	16	9	120	181	68	-3
19,8	16	9	120	181	68	-3
19,9	16	9	120	181	68	-3
20	16	9	120	181	68	-3
20,1	16	9	120	181	68	-3
20,2	16	9	120	181	68	-3
20,3	16	9	120	181	68	-3
20,4	13	7	133	175	65	-4
20,5	13	7	133	175	65	-4
20,6	13	7	133	175	65	-4
20,7	13	7	133	175	65	-4
20,8	13	7	133	175	65	-4
20,9	13	7	133	175	65	-4
21	13	7	133	175	65	-4
21,1	13	7	133	175	65	-4
21,2	13	7	133	175	65	-4
21,3	13	7	133	175	65	-4
21,4	9	6	122	163	61	-4
21,5	9	6	122	163	61	-4
21,6	9	6	122	163	61	-4
21,7	9	6	122	163	61	-4
21,8	9	6	122	163	61	-4
21,9	9	6	122	163	61	-4
22	9	6	122	163	61	-4

22,1	9	6	122	163	61	-4
22,2	9	6	122	163	61	-4
22,3	9	6	122	163	61	-4
22,4	8	5	119	158	59	-4
22,5	8	5	119	158	59	-4
22,6	8	5	119	158	59	-4
22,7	8	5	119	158	59	-4
22,8	8	5	119	158	59	-4
22,9	8	5	119	158	59	-4
23	8	5	119	158	59	-4
23,1	8	5	119	158	59	-4
23,2	8	5	119	158	59	-4
23,3	8	5	119	158	59	-4
23,4	6	4	115	152	57	-4
23,5	6	4	115	152	57	-4
23,6	6	4	115	152	57	-4
23,7	6	4	112	147	55	-4
23,8	6	4	112	147	55	-4
23,9	6	4	112	147	55	-4
24	6	4	112	147	55	-4
24,1	6	4	112	147	55	-4
24,2	6	4	112	147	55	-4
24,3	6	4	112	147	55	-4
24,4	5	3	109	143	53	-4
24,5	5	3	109	143	53	-4
24,6	5	3	109	143	53	-4
24,7	5	3	109	143	53	-4
24,8	5	3	109	143	53	-4
24,9	5	3	109	143	53	-4
25	5	3	109	143	53	-4
25,1	5	3	109	143	53	-4
25,2	5	3	109	143	53	-4
25,3	5	3	109	143	53	-4
25,4	5	3	110	138	52	-4
25,5	5	3	110	138	52	-4
25,6	5	3	110	138	52	-4
25,7	5	3	110	138	52	-4
25,8	5	3	110	138	52	-4
25,9	5	3	110	138	52	-4
26	5	3	110	138	52	-4
26,1	5	3	110	138	52	-4
26,2	5	3	110	138	52	-4
26,3	5	3	110	138	52	-4
26,4	4	3	108	134	50	-4
26,5	4	3	108	134	50	-4

26,6	4	3	108	134	50	-4
26,7	4	2	106	129	49	-4
26,8	4	2	106	129	49	-4
26,9	4	2	106	129	49	-4
27	4	2	106	129	49	-4
27,1	4	2	106	129	49	-4
27,2	4	2	106	129	49	-4
27,3	4	2	106	129	49	-4
27,4	4	2	102	126	48	-4
27,5	4	2	102	126	48	-4
27,6	4	2	102	126	48	-4
27,7	4	2	102	126	48	-4
27,8	4	2	102	126	48	-4
27,9	4	2	102	126	48	-4
28	4	2	102	126	48	-4
28,1	4	2	102	126	48	-4
28,2	4	2	102	126	48	-4
28,3	4	2	102	126	48	-4
28,4	3	2	100	122	47	-4
28,5	3	2	100	122	47	-4
28,6	3	2	100	122	47	-4
28,7	3	2	99	119	46	-4
28,8	3	2	99	119	46	-4
28,9	3	2	99	119	46	-4
29	3	2	99	119	46	-4
29,1	3	2	99	119	46	-4
29,2	3	2	99	119	46	-4
29,3	3	2	99	119	46	-4
29,4	3	1	95	115	45	-4
29,5	3	1	95	115	45	-4
29,6	3	1	95	115	45	-4
29,7	3	1	95	115	45	-4
29,8	3	1	95	115	45	-4
29,9	3	1	95	115	45	-4
30	3	1	95	115	45	-4
30,1	3	1	95	115	45	-4
30,2	3	1	95	115	45	-4
30,3	3	1	95	115	45	-4
30,4	3	1	91	112	44	-4
30,5	3	1	91	112	44	-4
30,6	3	1	91	112	44	-4
30,7	2	1	89	110	43	-4
30,8	2	1	89	110	43	-4
30,9	2	1	89	110	43	-4
31	2	1	89	110	43	-4

31,1	2	1	89	110	43	-4
31,2	2	1	89	110	43	-4
31,3	2	1	89	110	43	-4
31,4	2	1	89	107	42	-4
31,5	2	1	89	107	42	-4
31,6	2	1	89	107	42	-4
31,7	2	1	89	107	42	-4
31,8	2	1	89	107	42	-4
31,9	2	1	89	107	42	-4
32	2	1	89	107	42	-4
32,1	2	1	89	107	42	-4
32,2	2	1	89	107	42	-4
32,3	2	1	89	107	42	-4
32,4	2	1	86	105	42	-4
32,5	2	1	86	105	42	-4
32,6	2	1	86	105	42	-4
32,7	2	1	86	105	42	-4
32,8	2	1	86	105	42	-4
32,9	2	1	86	105	42	-4
33	2	1	86	105	42	-4

H. Värden och resultat från beräkningarna av experimentet 2021

Alla beräkningar har gjorts med Excel. Alla ekvationer som använts har presenterats i kapitel 4.3.

Värden som användes i beräkningarna med genomsnittstemperaturen visas i tabell 45 och resultaten från beräkningarna visas i tabell 46:

Tabell 45: Värden som användes i beräkningarna med genomsnittstemperaturen

$L \text{ \& } D =$	2	m
$B =$	3,180	m
$T_{Fl} =$	470,62	K
$T_Y =$	278,65	K
$A_{Kv} =$	19,970	m ²
$A_C =$	3,140	m ²
c_p	2,1456	J/gK
$v_f =$	8,542E-09	m ² /s
$k_f =$	0,03812	W/m*K
$\rho_{Jet \text{ A-Fuel}} =$	800,0	kg/m ³
$\rho_{luft} =$	0,75008	kg/m ³
$\Delta t =$	0,7	s
$\chi =$	0,7	
$\Delta H_c =$	43,5	kJ/g

Tabell 46: Resultaten från beräkningarna med genomsnittstemperaturen

$V \text{ [m/s]}$	50	100	150	200	250	300	340
Ref	1,17E+10	2,34E+10	3,51E+10	4,68E+10	5,85E+10	7,02E+10	7,96E+10
$h \text{ [W/m}^2 \cdot \text{K]}$	446,34	685,01	880,08	1051,32	1206,77	1350,70	1459,33
$\dot{Q} \text{ [kW]}$	1711,12	2626,13	3373,96	4030,44	4626,40	5178,18	5594,61
$\dot{q}'' \text{ [kW/m}^2 \text{]}$	544,94	836,35	1074,51	1283,58	1473,37	1649,10	1781,72
$Q \text{ [kJ]}$	1197,78	1838,29	2361,77	2821,31	3238,48	3624,72	3916,23
$q'' \text{ [kJ/m}^2 \text{]}$	381,46	585,44	752,16	898,51	1031,36	1154,37	1247,21
$\dot{m} \text{ [g/s]}$	56,194	86,244	110,803	132,363	151,934	170,055	183,731
$m \text{ [g]}$	39,336	60,371	77,562	92,654	106,354	119,039	128,612

I. Energi för uppvärmning att luften i trycktanken

Tabell 47: Värderna för beräkningarna av energin som behövs för att värma upp luften i trycktanken för båda experimenten

	2019	2021	
V	10	10	m^3
c_p	1,0065	1,0065	$\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
ρ	1,2923	1,2923	kg/m^3

J. Värme- och kinetiska energi från RSV-strålen

Tabell 48: Värderna för beräkningarna värme- och kinetiska energin från RSV-strålen

ϕ	1	
ε	0,79	
σ	5,67E-08	$\text{W}/m^2\cdot\text{K}^4$
T_f	873,15	K
T_0	273,15	K
t	0,0015	s
m	20	g
v	5000	m/s
Blandningsförhållande	Qmae	
0,4	0,4	J
0,5	0,06	J
0,6	0,04	J
0,7	0,025	J
0,8	0,02	J
0,9	0,015	J

K. Simuleringar

Tabell 49: Värden för att bestämma D^* och cellstorlekarna, lägsta värmeproduktionen 2021

$\dot{Q} =$	1711	kW
$\rho =$	1,204	kg/m ³
$c_p =$	1,005	kJ/kg-K
$T =$	270	K
$g =$	9,81	m/s ²

Tabell 50: Värden för att bestämma D^* och cellstorlekarna, högsta värmeproduktionen 2019

$\dot{Q} =$	13080	kW
$\rho =$	1,204	kg/m ³
$c_p =$	1,005	kJ/kg-K
$T =$	270	K
$g =$	9,81	m/s ²

Tabell 51: Placering och dimensioner för trycktanken i modellerna

Trycktank			
Axel	X	Y	Z
Placering [m]	0,0	0,0	0,0
Dimension [m]	3,6	2,4	2,4

Tabell 52: Placering och dimensioner för dieseltanken i modellerna

Dieseltank			
Axel	X	Y	Z
Placering [m]	2,5	0,9	0,9
Dimension [m]	0,9	0,6	0,6

Tabell 53: Placering och dimensioner för reststacken i modellerna

Reststack			
Axel	X	Y	Z
Placering [m]	0,4	1,0	1,0
Dimension [m]	0,1	0,4	0,4

Tabell 54: Placering och dimensioner för bränsleområdet i modellerna

Bränsleområde			
Axel	X	Y	Z
Placering [m]	1,0	0,8	0,8
Dimension [m]	1,5	0,8	0,8

Name ^	Position
MP 1	<1.8, 1.2, 2> m
MP 2	<0.9, 1.2, 2> m
MP 3	<1.4, 0.4, 1.2> m
MP 4	<0.5, 0.4, 1.2> m
MP 5	<2.8, 0.8, 1.2> m
MP 6	<0.6, 1.2, 1.2> m
MP 7	<3.5, 1.2, 1.2> m

Figur 42: Placering av mätpunkter