

Vätgasexplosioner i realistiska utsläppsmiljöer

En validering av beräkningsmodeller för
gasmolnsexplosioner

Emil Nilsson Emil Wallgren

BRANDTEKNIK | LTH | LUNDS UNIVERSITET



EXAMENSARBETE
Brandteknik

**Vätgasexplosioner i realistiska utsläppsmiljöer- En
validering av beräkningsmodeller för gasmolnsexplosioner**

Emil Nilsson
Emil Wallgren

Lund 2026

Vätgasexplosioner i realistiska utsläppsmiljöer– En validering av beräkningsmodeller för
gasmolnsexplosioner
Hydrogen Explosions in Realistic Release Environments – A Validation of Computational
Models for Vapour Cloud Explosions

Författare/Author: Emil Nilsson & Emil Wallgren

Report 5759

ISRN: LUTVDG/TVBB--5759--SE

Antal sidor/Number of pages: 62

Illustrationer/Illustrations: 41

Sökord/Keywords

Gasmolnsexplosion, vätgas, realistisk utsläppsmiljö, TNT, TNO, OHVE, validering,
handberäkningsmodeller, övertryck.

Vapor cloud explosion, hydrogen, realistic release environment, TNT, TNO, OHVE,
validation, hand-calculation models, over pressure.

Abstract

This thesis evaluates the ability of three hand-calculation models for estimating overpressure from hydrogen vapour cloud explosions. The models were the TNT, TNO and OHVE models. The aim was to assess their performance in realistic release environments and identify their strengths and limitations. Model predictions were validated against experimental data from three experimental setups: a refuelling station, a storage facility, and pipes. Both premixed gas clouds and jet release explosions were analysed, except for pipelines where data for jet release explosions were unavailable. Model performance was quantified using RMSE and MAE. The results indicate that the TNT model performs poorly at low scaled distances, its pressure curve does not reflect vapour cloud explosion behaviour, and the established guidelines do not follow the experimental data. The OHVE model captures pressure decay with distance but underestimates overpressure in congested environments. The TNO model shows good agreement when the correct pressure curve is chosen, though current guidelines risk systematic underestimation. Overall, the models exhibit notable limitations, particularly in handling obstruction and confinement, indicating a need for improved guidelines and further research.

© Copyright: Division of Fire Safety Engineering, Faculty of Engineering, Lund University, Lund 2026

Avdelningen för Brandteknik, Lunds tekniska högskola, Lunds universitet, Lund 2026.

Brandteknik
Lunds tekniska högskola
Lunds universitet
Box 118
221 00 Lund

www.brand.lth.se
Telefon: 046 - 222 73 60

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

www.brand.lth.se
Telephone: +46 46 222 73 60

Förord

Detta arbete utgör ett examensarbete om 30 hp inom kursen VBRN10 vid brandingenjörsk- och civilingenjörsprogrammet i riskhantering vid Lunds Tekniska Högskola (LTH). Arbetet har genomförts vid brandavdelningen och utgör det avslutade momentet i utbildningarna.

Examensarbetet har utförts i samarbete med OKG, kärnkraftverket i Oskarshamn. Vi vill därmed tacka OKG till möjligheten att genomföra arbetet i samarbete med dem, samt till Jenny Wirandi och Morgan Lindqvist vilka har varit våra kontaktpersoner som gjort arbetet och samarbetet möjligt.

Vi vill även tacka vår handledare Marcus Runefors för all hjälp och vägledning som han givit oss under arbetet. Slutligen vill vi tacka våra goda vänner som förgyllt arbetsdagarna.

Sammanfattning

Detta examensarbete undersöker tre handberäkningsmodellens förmåga att beräkna övertryck av gasmolnsexplosioner med vätgas. De undersökta modellerna var TNT ekvivalensmetoden, TNO multi energi metoden och Open Hydrogen Vapour cloud Explosion metoden. Dessa kallas kortfattat för TNT-modellen, TNO-modellen och OHVE-modellen. Ändamålet med arbetet var att utvärdera modellernas förmåga att uppskatta övertryck i realistiska utsläppsmiljöer samt identifiera vilka styrkor och svagheter som modellerna har. Arbetet motiveras av det ökande behovet av tillförlitliga konsekvensmodeller i takt med att vätgas blir en mer central energibärare i samhället.

Valideringen utfördes genom att applicera de olika modellerna på experimentuppställningar. Sedan jämfördes det beräknade övertrycket med experimentdata hämtat från tre olika experimentuppställningar; *Tankstation*, *Lagringsanläggning* och *Rörledning*. Modellerna validerades utifrån förblandade gasmoln och jetutsläppsexplosioner, med undantag för experimentuppställningen *Rörledning* där data på jetutsläppsexplosioner saknades. För att möjliggöra modelljämförelser användes Root Mean Square Error (RMSE) och Mean Absolute Error (MAE).

Resultaten visar att TNT-modellen endast ger grova uppskattningar av övertrycket. De etablerade vägledningarna överensstämmer inte med experimentdatan. Även mer konservativa vägledningar som identifierats är inte tillräckligt konservativa för vätgas. Modellen har dålig prediktionsförmåga vid låga skalade avstånd och TNT-kurvans lutning överensstämmer inte med gasmolnsexplosioners tryckprofil. På grund av TNT-modellens brister anses det att modellen inte bör användas för att beräkna övertrycket vid vätgasexplosioner.

OHVE-modellen beskriver tryckminskning med ökat avstånd väl, men underskattar systematiskt trycket i miljöer med hinder och instängdhet. Detta gör att modellen är olämplig i sin nuvarande form för realistiska utsläppsmiljöer. Det finns dock potential hos modellen om justeringar görs för att ta hänsyn till den omgivande miljön.

TNO-modellen överensstämmer väl med experimentdatan och kan beskriva explosionsförlopp med god precision vid korrekt val av tryckkurva. Den rådande vägledningen för val av tryckkurva leder konsekvent till att *fel* kurva väljs och att övertrycket underskattas. Det föreslås därför att en ingenjörsmässig bedömning bör utföras för att välja tryckkurvor vid en riskanalys. Bedömningen kan göras genom att utgå från experimentuppställningarna som använts i arbetet och därifrån bestämma tryckkurvor för aktuell miljö.

Sammantaget visar studien att handberäkningsmodellerna har begränsningar, särskilt i hur hindergrad och instängdhet definieras och tillämpas utifrån rådande vägledningar. Arbetet konstaterar att vägledningarna inte tar hänsyn till alla relevanta parametrar som påverkar gasmolnsexplosioner i komplexa miljöer vilket öppnar för vidare forskning och modellutveckling.

Summary

This thesis investigates the ability of three hand-calculation models to calculate the overpressure from vapour cloud explosions with hydrogen. The models evaluated in the study were the TNT equivalence model, the TNO multi energy model, and the Open Hydrogen Vapour cloud Explosion model. In short they are called TNT model, TNO model och OHVE model. The purpose of the study was to assess the models' ability to estimate overpressure in realistic release environments and to identify their respective strengths and weaknesses. The study is motivated by the growing need for reliable consequence models as hydrogen becomes more common in society.

The validation was carried out by applying the different models to experimental setups. The calculated overpressure was then compared with experimental data obtained from three different setups: Refueling Station (*Tankstation*), Storage Facility (*Lagringsanläggning*), and Pipes (*Rörledning*). The models were validated for premixed gas clouds and jet release explosions, except for the Pipeline setup where data for jet release explosions were unavailable. To enable model comparisons, Root Mean Square Error (RMSE) and Mean Absolute Error (MAE) were used.

The results show that the TNT model provides only rough estimates of the overpressure. The established guidelines do not follow the experimental data. More conservative guidelines that have been identified are not sufficiently conservative for vapour cloud explosions with hydrogen. The model has poor predictive capability at low scaled distances, and the slope of the TNT curve does not match the pressure profile of vapour cloud explosions. Due to the shortcomings of the TNT model, it should not be used to calculate the overpressure of hydrogen explosions.

The OHVE model describes the pressure decay with increasing distance well but systematically underestimates the pressure in environments with congestion. This makes the model unsuitable in its current form for realistic release environments. However, the model has potential if adjustments are made to account for the surrounding environment.

The TNO model shows good agreement with the experimental data and can describe the explosion with good accuracy when the correct pressure curve is selected. However, the current guidelines for selecting pressure curves systematically leads to the wrong curve being chosen and to an underestimation of the overpressure. It is therefore proposed that a sound engineering judgment should be used when selecting pressure curves in a risk analysis. The selection of pressure curves can be based on the experimental setups used in this study.

Overall, the study shows that hand-calculation models have limitations, particularly in how obstruction and confinement are defined and how it is applied in current guidelines. The thesis concludes that the guidelines do not account for all relevant parameters influencing vapour cloud explosions in complex environments, which opens for further research and model development.

Innehållsförteckning

FÖRORD	4
SAMMANFATTNING	I
SUMMARY	II
NOMENKLATUR OCH FÖRKORTNINGAR	1
INLEDNING	2
1.1 SYFTE.....	3
1.2 MÅL	3
1.3 PROBLEMFÖRMULERING.....	3
1.4 AVGRÄNSNINGAR OCH BEGRÄNSNINGAR	3
2 TEORI	4
2.1 BRÄNSLE	4
2.2 SPRIDNING AV GAS	5
2.3 GASMOLNEXPLOSION	6
2.3.1 <i>Konsekvenser</i>	8
2.3.2 <i>Reflekterat tryck</i>	9
2.4 ANTÄNDNING AV GASMOLN.....	10
3 METOD	11
3.1 LITTERATURSTUDIE.....	11
3.2 VALIDERING AV MODELLER	12
4 BERÄKNINGSMODELLER	14
4.1 ALLMÄNT	14
4.2 TNT-MODELLEN	14
4.3 TNO-MODELLEN	16
4.4 OHVE-MODELLEN	20
5 EXPLOSIONSDATA	22
5.1 TANKSTATION	22
5.2 LAGRINGSANLÄGGNING	23
5.3 RÖRLEDNINGAR	24
5.4 SAMMANSTÄLLNING AV EXPERIMENTDATA	25
6 VALIDERING	26
6.1 FÖRBLANDAT GASMOLN.....	26
6.1.1 <i>Validering av TNT-modellen</i>	26
6.1.2 <i>Validering av TNO-modellen</i>	32
6.1.3 <i>Validering av OHVE-modellen</i>	36
6.2 JETUTSLÄPPSEXPLORATION	38
6.2.1 <i>Validering av TNT</i>	38
6.2.2 <i>Validering av TNO</i>	42
7 DISKUSSION	45
7.1 ALLMÄNT.....	45
7.2 DISKUSSION AV TNT – MODELLEN.....	45
7.3 DISKUSSION AV TNO – MODELLEN	48
7.4 DISKUSSION AV OHVE – MODELLEN	51
7.5 FELKÄLLOR OCH OSÄKERHETER.....	53
8 SLUTSATS	57
9 REFERENSER	58

BILAGA 1. REDOVISNING AV ANVÄNDNING AV GENERATIV AI.....	61
BILAGA 2. MOTSVARANDE MASSA VID FETA BLANDNINGAR.....	62

Nomenklatur och förkortningar

A_T	-	Area av turbulent flamma (m^2)
A	-	Area plan flamma (m^2)
C	-	Bränslekonzentration (%)
DDT	-	Deflagration to Detonation Transition
E	-	Energiinnehåll (J)
E_{TNT}	-	Energien TNT vid explosion (4182 kJ/kg)
ΔH_c	-	Heat of combustion för gasen (MJ/kg)
m	-	Massa bränsle (kg)
MAE	-	Mean Absolute Error
P_0	-	Omgivande tryck/Atmosfärstryck
P_r	-	Reflekterat övertryck (kPa)
\bar{P}_r	-	Skalat reflekterat övertryck (-)
\bar{P}_s	-	Dimensionslöst infallande övertryck (-)
P_s	-	Infallande övertryck (kPa)
R	-	Avstånd (m)
\bar{R}_{OHVE}	-	Skalat avstånd för OHVE modellen (-)
\bar{R}_{TNO}	-	Skalat avstånd för TNO modellen (-)
\bar{R}_{TNT}	-	Skalat avstånd för TNT-modellen ($m/kg^{1/3}$)
RMSE	-	Root Mean Square Error
S_L	-	Laminär förbränningshastighet (m/s)
S_T	-	Turbulent förbränningshastighet (m/s)
u'	-	Turbulensintensitet (m/s)
V	-	Volym gasmoln (m^3)
W	-	Massan gasmolnet bränsle (kg)
W_{TNT}	-	Ekvivalent massa TNT (kg)
α	-	Yield factor (0-1)

Inledning

Vätgas har länge haft en roll inom industrin, bland annat vid ammoniakproduktion och raffinering, men även för kylning i kärnkraftverk (Uniper, u.d.). Under de senaste åren har vätgas även fått en ny roll som energibärare i övergången mot ett fossilfritt samhälle. Vätgas ses även alltmer som en attraktiv lösning för att kompensera för sol och vindkrafts ojämna elproduktion (Wood, 2025). Utvecklingen kan även ses i konkreta tillämpningar bland annat för att driva fordon. Till exempel planeras vätgasdriven färjetrafik till och från Gotland, där målet är att på sikt skapa en helt fossilfri sjöfart. Projektet omfattar hela kedjan från produktion till lagring och användning av vätgas. Det finns samtidigt betydande tekniska och säkerhetsmässiga utmaningar, särskilt kopplade till hantering av stora volymer vätgas i publika miljöer (Malmberg & Olsson, 2024).

Detta examensarbete sker i samarbete med OKG, kärnkraftverket i Oskarshamn, som använder vätgas i olika syften bland annat för att kyla generatoren. För att säkerställa försörjningen av vätgas till kärnkraftverket har verksamheten egen produktion vilket stärker anläggningens resiliens. Samtidigt innebär produktionen och lagringen av vätgas att potentiella utsläppsscenarioer behöver beaktas ur ett säkerhetsperspektiv.

I takt med omställningen från fossila bränslen kommer sannolikt efterfrågan på vätgas att öka ytterligare och därmed kommer produktion öka för att möta efterfrågan. Det innebär även att riskerna ökar i takt med en ökad hantering av vätgas vilket i kombination med gasens höga reaktivitet innebär särskilda utmaningar vid riskhantering särskilt med avseendet på explosionsrisken.

En olycka som inträffade 2019 i Sandvika Norge är ett exempel på de konsekvenser som kan uppstå om en olycka inträffar på en vätgasanläggning. Olyckan orsakades av ett läckage av vätgas vid en tankstation. Den utsläppta vätgasen bildade ett gasmoln som antände vilket resulterade i en gasmolnexplosion (Kristensson, 2019). Till följd av explosionen blev två personer lindrat skadade (Holm, 2021). I takt med att fler vätgasanläggningar etableras ökar behovet av att korrekt kunna beskriva och bedöma de risker som dessa medför. Detta är särskilt viktigt för anläggningar med höga säkerhetskrav, såsom kärnkraftverk, där konsekvenserna av en olycka kan bli omfattande.

För att möjliggöra tillförlitliga riskbedömningar krävs beräkningsmodeller som med god precision kan beskriva verkliga explosionsscenarioer. Även om avancerade numeriska simuleringsverktyg finns tillgängliga, används dessa inte alltid i praktiken, bland annat på grund av deras komplexitet och resurskrav. Därför spelar enklare beräkningsmodeller fortfarande en central roll i riskanalyser.

Mot denna bakgrund finns därmed ett behov av att utvärdera hur väl dessa modeller representerar verkliga explosionsförlopp. Detta arbete syftar därför till att analysera och jämföra olika beräkningsmodeller för övertryck vid explosioner med experimentdata från försök som efterliknar realistiska utsläppsscenarioer.

1.1 Syfte

Syftet med examensarbetet är att öka precisionen på riskanalyser kring hantering av vätgas, med fokus på gasmolnsexplosioner. Arbetet syftar till att bidra till en säkrare utveckling av vätgasanläggningar.

Examensarbetet förväntas även bidra till kunskapsutveckling genom att ge en översikt över befintliga beräkningsmodeller, rådande vägledning och deras tillämpbarhet för riskanalyser samt identifiera kunskapsluckor som kan motivera vidare forskning.

1.2 Mål

Målet med examensarbetet är att identifiera och utvärdera befintliga beräkningsmodeller som används för att beräkna övertrycket från gasmolnsexplosioner i realistiska miljöer med vätgas. Arbetet ska undersöka modellernas styrkor och svagheter samt tillförlitligheten av deras tillhörande vägledningar.

Slutligen är målet att ta fram rekommendationer för hur de identifierade modellerna kan användas vid framtida riskanalyser.

1.3 Problemformulering

Examensarbetet utgår från följande frågeställningar:

- Vilka beräkningsmodeller finns för att beräkna övertryck av en gasmolnsexplosion med vätgas?
- Hur väl överensstämmer de identifierade modellernas beräknade värden med experimentdata från realistiska miljöer?
- Vilka styrkor och svagheter har de olika modellerna när de används i riskanalyser?

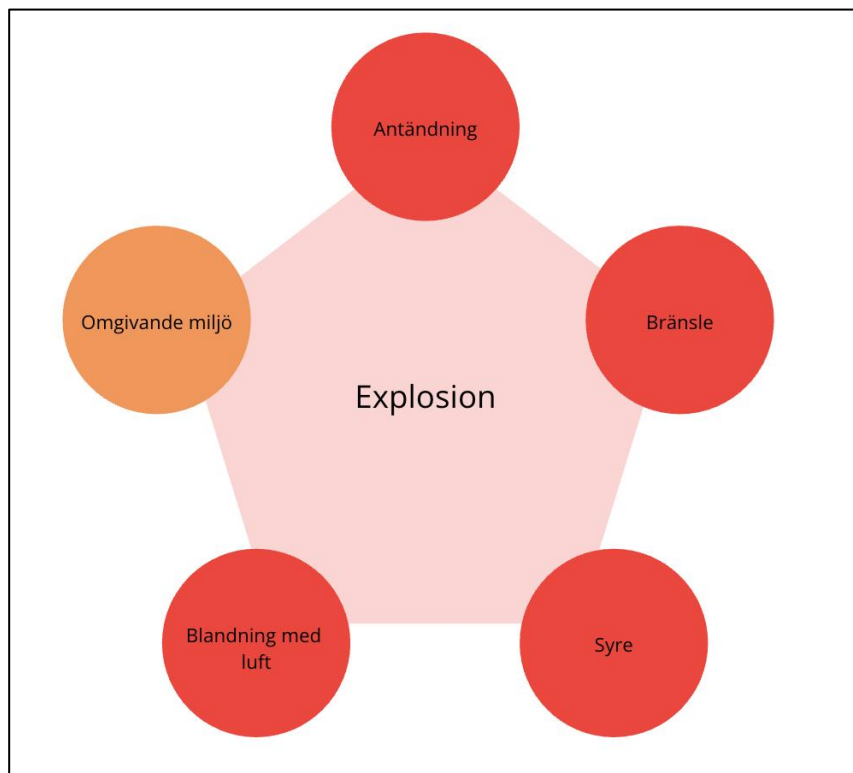
1.4 Avgränsningar och begränsningar

Arbetet är avgränsat till gasmolnsexplosioner med vätgas. Endast handberäkningsmodeller kommer att hanteras i arbetet. Arbetet kommer endast utgå från experimentdata som efterliknar realistiska miljöer.

På grund av begränsningar i tid och ekonomiska resurser har inga försök genomförts inom ramen för examensarbetet utan valideringen har baserats på experimentdata från litteraturen.

2 Teori

En gasmolnsexplosion kan endast uppstå om ett antal kriterier uppfylls på samma vis som att en brand inte kan uppstå utan närvaro av de tre kriterierna i brandtriangeln – syre, bränsle och värme. Faktorerna som krävs för att en gasmolnsexplosion ska inträffa kan också presenteras av en form nämligen *explosionspentagonen*. De fyra röda cirkelarna i Figur 1 nedan, antändning, bränsle, syre och blandning med luft, är alla nödvändiga för att explosionen ska kunna inträffa. Den femte orangea cirkeln, *Omgivande miljö*¹, beskriver omgivningen utifrån hinder i och runt gasmolnet samt om gasmolnet är instängt. Den är speciellt markerad med egen färg eftersom den till skillnad från de övriga faktorerna inte är en direkt förutsättning för att en gasmolnsexplosion ska kunna inträffa, men har en avgörande inverkan på det övertryck som bildas.



Figur 1: Explosionspentagonen.

Följande avsnitt kommer att behandla de olika aspekterna i explosionspentagonet som berör en gasmolnsexplosion. Från bränslet och dess spridning till antändningen och explosionsförloppet.

2.1 Bränsle

En av de viktigaste faktorerna för att en explosion ska uppstå är själva bränslet som driver explosionen. I arbetet kommer vätgas (H_2) utgöra bränslet. Vätgas består av två sammanbundna väteatomer. Vätgas är färglös och luktfritt, och är det vanligaste grundämnet i universum. Trots detta förekommer inte vätgas naturligt i några större mängder på jorden. Vätgas behöver därför produceras av människor för att få tillgång till den. Det finns tre huvudsakliga sätt att producera vätgas vilket ofta benämns, grön, grå och blå vätgas och syftar till hur stor klimatpåverkan som framställningen har. Grön vätgas produceras genom

¹ På engelska används ofta benämningen congestion.

elektrolys vilket innebär att vattenmolekyler delas upp till beståndsdelarna väte och syre. När förnybara energikällor används till själva tillverkningsprocessen ger detta inte upphov till något koldioxidutsläpp. Framställningen anses ha en mycket låg klimatpåverkan och kallas därför för grön vätgas. Den låga klimatpåverkan av grön vätgas är en av anledningarna till att intresset för vätgas har ökat i takt med utvecklingen av förnybara energikällor. Grå vätgas är idag den mest utbredda produktionsformen av gasen. Framställningen sker genom reformering av fossila bränslen, oftast naturgas vilket huvudsakligen består av metan, CH₄. Reformeringen producerar koldioxid vid frigöringen av vätgas från naturgasen vilket sedan släpps ut i atmosfären. Detta innebär att grå vätgas har en negativ klimatpåverkan. Om den frigjorda koldioxiden fångas upp i stället med hjälp av teknologi som Carbon Capture and Storage (CCS) blir klimatpåverkan lägre och vätgasen kallas då för blå vätgas (Världsnaturfonden, 2025).

Vätgas brännbarhetsområde är en aspekt att ta hänsyn till inom riskanalyser eftersom det är ett stort spann mellan den lägre och övre brännbarhetsgränsen, mellan cirka 4–75 volymprocent i luft (Drysdale, 2011). Vidare har vätgas även en mycket hög laminär förbränningshastighet jämfört med många andra brännbara gaser. Detta är en egenskap som gör vätgas särskilt farlig i explosionsommanhang, eftersom en hög förbränningshastighet kan leda till snabbare förbränningsförlopp och kraftigare tryckupbyggnad (Bjerketvedt et al., 1997). En mer ingående förklaring till hur detta påverkar explosionsförlopp kommer att behandlas i avsnitt 2.3.

Vätgas har dessutom en låg molekylmassa, vilket gör att vätgas är betydligt lättare än luft. Vid ett eventuellt utsläpp kommer gasen därför att stiga uppåt och inte ansamlas i större mängder vid marknivå. Detta är en viktig aspekt att beakta vid bedömning av risker och konsekvenser vid utsläpp av vätgas, eftersom det innebär att vätgasmoln generellt inte blir lika stora som för vissa andra gaser med högre densitet. De största kända vätgasexplosionerna motsvarar i storleksordningen några hundra kilo TNT, medan explosioner med tyngre gaser som inte stiger på samma sätt utan kan ansamlas i stora volymer och kan motsvara flera ton TNT (Bjerketvedt et al., 1997).

2.2 Spridning av gas

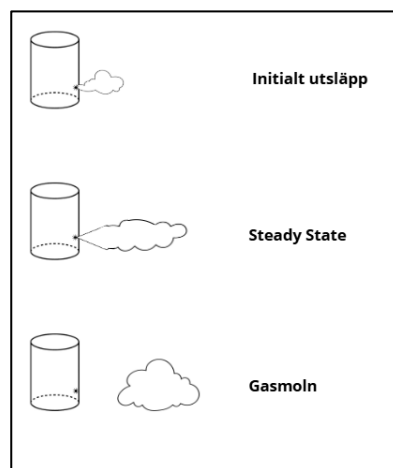
En gasmolnsexplosion omfattning beror bland annat på dess volym och koncentrationen av bränslet i gasmolnet. Om en gasmolnsexplosion ska inträffa måste gasens koncentration vara inom dess brännbarhetsområde, det vill säga mellan den nedre och övre brännbarhetsgränsen (Rangwala & Zalosh, 2023). Inom brännbarhetsområdet kan koncentrationen klassas som mager eller fet. Om koncentrationen bränsle i gasmolnet är under stökiometri betraktas blandningen som mager då tillgången till bränsle är begränsat. Blandningen kallas för fet när koncentrationen är över stökiometri (Karlsson & Quintiere, 2022).

Koncentrationen i molnet kan variera beroende på gasspridningen som bland annat beror på egenskaper som kan kopplas direkt till utsläppet. Några av dessa är gasens lagringstryck, temperatur och utsläppsöppningens storlek samt gasens övriga fysikaliska egenskaper (Fischer et al., 1998). Vätgas lagras normalt sett i form av trycksatt gas.

Ett utsläpp av trycksatt gas kan delas in i tre faser: det initiala utsläppet, ett stationärt utsläppstillstånd (steady state) och ett separat tillstånd i form av fritt gasmoln, se Figur 2. Den initiala utsläppsfasen inträffar omedelbart efter att läckaget uppstår. Under denna period har inte en tydlig stråle etablerats och den utströmmande gasen trycker undan och blandas med

den omgivande luften. Efter en viss tid övergår utsläppet till ett stationärt tillstånd där en väldefinierad stråle med mer förutsägbar luftinblandning har etablerats (Fischer et al., 1998).

Ett frikopplat gasmoln kan uppstå antingen när utsläppet upphör eller när gasen har transporterats tillräckligt långt från jetstrålen för att inte längre påverkas av jetdynamiken. Det frikopplade gasmolnets koncentration minskar ständigt allt eftersom luft blandas in och nytt bränsle inte längre tillförs från utsläppet. Ett frikopplat gasmoln kan också förflytta sig långt bort från utsläppsplatsen (Fischer et al., 1998). På grund av den låga densiteten hos vätgas är frikopplade gasmoln ovanligt då vätgasen snabbt blandas ut i luften. Ett gasmoln med vätgas kan dock uppstå när ersättningsluft och vätgas hindras från blandning på grund av den omgivande miljön.



Figur 2: Faser av ett utsläpp av trycksatt gas.

Utöver själva utsläppets egenskaper påverkas gasspridningen även av yttre förhållanden som väder, främst i form av solinstrålning, vindhastighet och vindriktning. Även omgivningens strukturer kommer att påverka hur gasen sprids. Förekomsten av bebyggelse, vegetation och andra fysiska hinder i terrängen kommer påverka spridningsförloppet (Fischer et al., 1998).

Detta arbete kommer inte att analysera eller validera olika spridningsmodeller, men det är viktigt att anmärka att spridningen av gasen är en avgörande faktor som påverkar explosionsförloppet. Vid en riskanalys är det därmed viktigt att ha välbeskrivande modeller för både utsläppet och påföljande explosion.

2.3 Gasmolnexplosion

En av konsekvenserna som kan uppstå om ett gasmoln med brännbar gas antänds är gasmolnsexplosioner. Gasmolnsexplosioner kan delas upp i två utfall, deflagrationer och detonationer. Deflagrationer innebär att det bildas en fränkopplad tryckvåg framför flamfronten som rör sig snabbare. En detonation sker när flamfronten och tryckvågen är sammankopplade och tillsammans rör sig över ljudets hastighet. Tryckvågen komprimerar och antänder den obrända gasblandningen framför sig och skapar en hög tryckökning. Utfallet om det blir en deflagration eller detonation beror på hur snabbt flamman fortplantar sig genom gasblandningen. När flammans fortplantning, i förhållande till de oförbrända gaserna,

sker under den lokala ljudhastigheten² sker en deflagration. Flamman sprids då genom att oförbrända gaser värms upp framför flamfronten och antänds. Det är ovanligt att detonationer sker direkt efter antändning för gasmolnexplosioner men det är möjligt för en deflagration att övergå till en detonation om flamfronten accelereras kraftigt. Övergången till detonation kallas för *deflagration to detonation transition* (DDT) (Rangwala & Zalosh, 2023).

Flamfronten kan accelereras av turbulens i gasblandningen och instabiliteter i flamfronten vilket ökar den turbulenta förbränningshastigheten. Den turbulenta förbränningshastigheten kan beskrivas utifrån den laminära förbränningshastigheten och turbulensintensiteten eller utifrån den laminära förbränningshastigheten och arean av flamfronten, se Ekvation 1 nedan. När instabiliteter och turbulens förekommer kommer flamman börja böjas vilket ökar reaktionsarean, se Figur 3. En ökad flamarea kommer i sin tur att öka den turbulenta förbränningshastigheten och accelerera flamfronten. Det skapas en positiv feedback-loop där ökad turbulent förbränningshastighet leder till ökad turbulens som leder till en större flamarea och därmed en ökad turbulent förbränningshastighet (Moen et al., 1980; Karanam et al., 2018). Även om flamfronten inte accelereras tillräckligt för att nå DDT kommer ett högre tryck genereras av en ökad turbulens.

$$\frac{S_T}{S_L} = 1 + \frac{u'}{S_L} = \frac{A_T}{A} \quad \text{Ekvation 1}$$

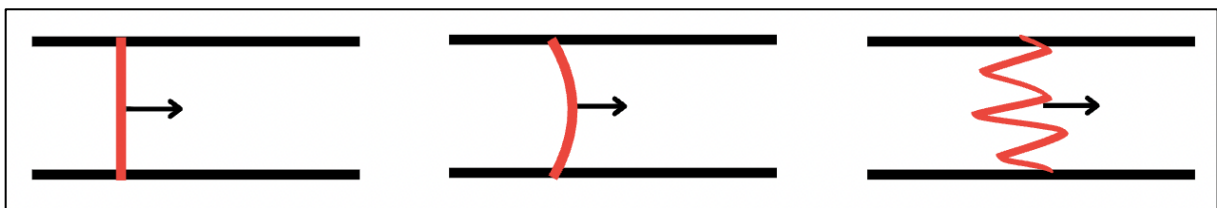
Där S_T = Turbulent förbränningshastighet (m/s)

S_L = Laminär förbränningshastighet (m/s)

u' = Turbulensintensitet (m/s)

A_T = Area av turbulent flamma (m²)

A = Area plan flamma (m²)



Figur 3: Plan, böjd och korrugerad flamma.

Ett sätt som turbulens i en gasblandning uppstår är när flamfronten interagerar med hinder. Ibland beskrivs hinder av *blockage ratio* eller blockeringsgrad, vilket anger hur stor volym i gasmolnet som utgörs av hinder. Johansson (2017) lyfter upp att storleken på hinder och

² Den lokala ljudhastigheten är beroende av temperatur och kan beräknas i en ideal gas enligt: $c_{ideal} = \sqrt{\frac{\gamma * R * T}{M}}$ (Foust, 2024).

antalet hinder är relevanta parametrar för att uppskatta tryckbildningen. Vid mycket hög blockeringsgrad kan det dock motverka flamaccelerationen genom att begränsa flödet och dämpa rörelsen (Zhang et al., 2025). Ytterligare en faktor som kan leda till ökad turbulens är om gasmolnet är instängt, det vill säga att gasen är begränsad av väggar, tak eller andra fasta gränser (Fischer et al., 1998). I arbetet kommer uttrycket *omgivande miljö* användas som samlingsord för att beskriva hinder och instängdhet.

Gasmolnsexplosioner kan även uppträda på olika sätt beroende på i vilket skede av gasutsläppet om antändningen sker. Om antändningen inträffar under det initiala utsläppet eller under steady-state fasen uppstår en *jetutsläppsexplosion*. I detta fall bildar det utströmmande bränslet en gasstråle som ger upphov till en hög grad av initial turbulens i gasblandningen. I fall antändningen i stället sker efter att ett gasmoln har etablerats behandlas gasmolnet som ett stationärt förblandat moln.

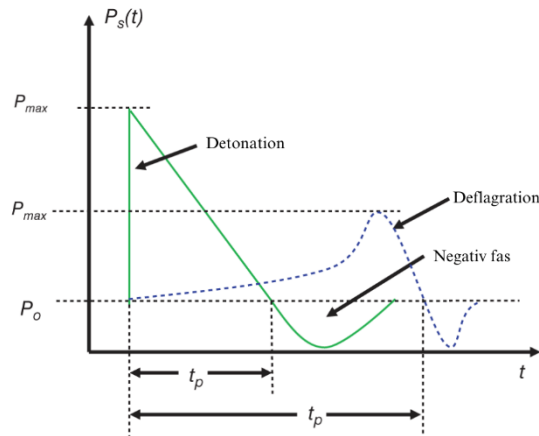
2.3.1 Konsekvenser

En gasmolnsexplosion kan ge upphov till en rad olika konsekvenser. Huvudsakligen bildas det en tryckvåg vilket i sin tur kan orsaka andra konsekvenser. Tryckvågens intensitet beror på vilken typ av explosion som inträffar. En detonation eller en deflagration kommer ge upphov till olika tryckvågor (Rangwala & Zalosh, 2023). Vid större gasmolnsexplosioner, såsom Buncefield-explosionen 2005, kan även markskakningar inträffa vilket kan orsaka skador på omgivningen (Ottemöller & Evers, 2008). Även om deras skadeverkan oftast är sekundär jämfört med tryckvågen, kan de fortfarande orsaka ytterligare skador på strukturer i omgivningen.

Gasmolnsexplosioner kan orsaka personskador, vilka kan delas upp i primära och sekundära skador. Primära skador orsakas direkt av tryckvågen och kan vara exempelvis trumhinneruptur eller lungskador (Fischer et al., 1998). Sekundära skador orsakas främst av projektiler. Enligt Fischer et al. (1998) kan dock personskador orsakade av projektiler bortses från vid utvändiga gasmolnsexplosioner.

För byggnader är det generellt tryckvågen och den tillhörande impulsbelastningen som orsakar merparten av skadorna. Övertrycket ger upphov till en momentan belastning, medan impulsen beskriver den totala belastningen över tid. Impuls definieras som integralen av tryck över tid. Vid deflagrationer är det maximala övertrycket lägre men varaktigheten är ofta längre jämfört med detonationer (Rangwala & Zalosh, 2023). Det innebär att även en explosion med lägre topptryck kan ge jämförbar eller större impulsbelastningar om varaktigheten är tillräckligt lång eftersom impulsen bestäms av den totala arean under tryck-tidskurvan. Figur 4 illustrerar de principiella tryckkurvorna som detonation och deflagration ger upphov till.

Vätgas skiljer sig mot andra gaser gällande övertryck och impuls. Park et al. (2022) menar att det maximala övertrycket som vätgas genererar är högt men att varaktigheten är kortare jämfört med andra brännbara gaser, vilket även innebär att impulsbelastningen är relativt lägre för vätgas än vad det är för andra gaser.

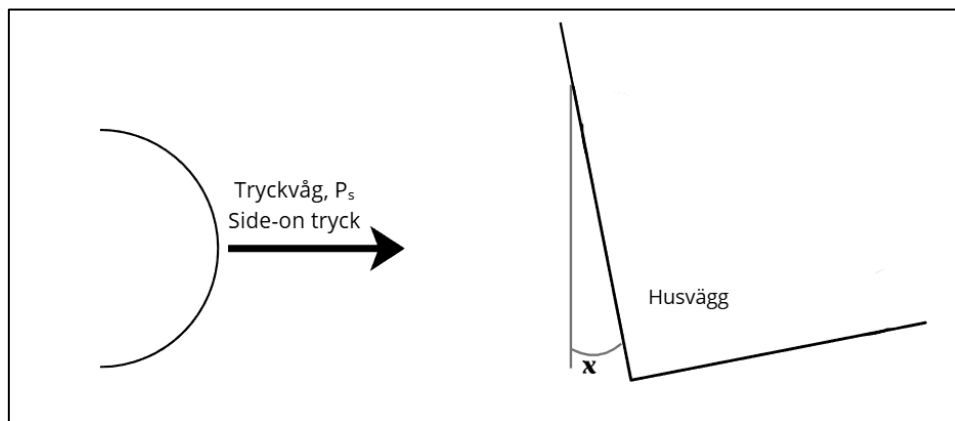


Figur 4: Schematisk beskrivning av tryckvågen för detonation och deflagration. P_{max} är maximala trycket, t_p är tiden för den positiva tryckfasen.

2.3.2 Reflekerat tryck

Två viktiga begrepp för tryckberäkningar är *side-on tryck* och *reflekerat tryck*. Side-on trycket är det infallande, ostörda övertrycket som en explosion genererar (Fischer et al., 1998).

Reflekerat tryck uppstår när en tryckvåg (side-on trycket) träffar en yta och reflekteras. Det reflekterade trycket är högre än side-on trycket och det är därför viktigt att beakta det reflekterade trycket vid riskanalyser och dimensionering av byggnader. Reflekerat tryck förekommer endast när infallsvinkeln X är mellan 0 och 90 grader. Vid noll grader kommer husväggen att vara helt vinkelrät mot tryckvågen och det reflekterade trycket kommer vara som störst. Det används oftast en gräns vid 45 grader för att avgöra om trycket ska anses som reflekterat eller inte. Figur 5, nedan demonstrerar hur vinkeln kan avgöras.



Figur 5: Visualisering av side-on tryck och infallsvinkel för reflekterat tryck.

Om det reflekterade trycket är av intresse kan Ekvation 2 användas för att omvandla side-on-trycket till reflekterat tryck (Fischer et al., 1998).

$$\bar{P}_r = 2\bar{P}_s + \frac{(\gamma + 1)\bar{P}_s^2}{(\gamma - 1)\bar{P}_s + 2\gamma} \quad \text{Ekvation 2}$$

Där \bar{P}_r = Skalat reflekterat övertryck = P_r/P_0

\bar{P}_s = Dimensionslöst infallande övertryck = P_s/P_0

P_r = Reflekterat övertryck (kPa)

P_s = Infallande övertryck (kPa)

$\gamma = 1,4$ (för luft)

2.4 Antändning av Gasmoln

För att en explosion av ett gasmoln ska uppstå krävs det att molnet antänds. Simpla kolväten har en minsta antändnings energi omkring 0,25 mJ medan vätgas har ett en minsta antändningsenergi på endast 0,018 mJ (Rangwala & Zalosh, 2023). Det krävs mindre än en tiondel av energin för att antända vätgas jämfört med simpla kolväten. Några olika potentiella tändkällor för vätgas är: mekanisk gnista, statisk elektricitet, friktion eller varma ytor.

Tabell 1: Energi hos potentiella tändkällor (Myndigheten för samhällsskydd och beredskap, 2024).

Potentiell tändkälla	Energi, (mJ)
Slipsprut (1 glödande järnpartikel)	1–10
Uppladdad människa	5–60
Ljusbåge i elkontakt	>1000

För jetutsläppsexplosioner påverkar även antändningens position och antändningstid explosionsförloppet. Ändringar i dessa parametrar kan generera helt olika explosionsförlopp. Försök utförda av Royle & Willoughby (2011) visade att för jetutsläppsexplosioner genereras det maximala övertrycket när antändningsfördröjning efter påbörjat utsläpp var 600 ms. Lagringstrycket vid försöket var 20,5 MPa och utsläppsdiametern var 6,4 mm. Andra försök för att bestämma hur antändningsplaceringens påverkan visade att ett avstånd på 3 meter bort i linje med utsläppet genererade det högsta övertrycket. Vid försöken användes en fördröjning på 800 ms.

3 Metod

I följande avsnitt kommer arbetets metoder och genomförande beskrivas.

3.1 Litteraturstudie

Det inledande steget i arbetet bestod av en litteraturöversikt, *literature review* (Säfsten & Gustavsson, 2023), det vill säga att undersöka vilken information som redan finns publicerad. Den inledande litteraturöversikten fokuserade därför främst på frågeställningen *vilka modeller finns och vilka är relevanta att använda i arbetet*. Litteraturöversikten utgick huvudsakligen i SFPE-handboken (Hurley, 2016). Det är en handbok riktad till brandingenjörer som sammanställt mycket av den befintliga kunskapen inom brandområdet samt andra närliggande discipliner, såsom explosioner. Litteraturöversikten bidrog även till en bättre förståelse för vilka ord, begrepp, termer och författare som är etablerade inom forskningsvärlden för explosioner.

Efter den initiala litteraturöversikten utfördes en litteratursökning för att identifiera olika beräkningsmodeller och tillhörande vägledning vilket utfördes med *strängsökning* (Säfsten & Gustavsson, 2023). Använda sökord redovisas i Tabell 2. Sökningen genomfördes i FINN³, Lund Universitets databas.

Därefter utfördes en ytterligare litteratursökning för att identifiera experimentdata på gasmolnexplosioner med vätgas. Litteratursökningen utfördes med *strängsökning* med samma sökord som tidigare användes i litteraturöversikten. Använda sökord redovisas i Tabell 2. Sökningen genomfördes i FINN och Google Scholar. En *Snowball*-strategin som Säfsten & Gustavsson (2023) presenterar tillämpades även för att hitta fler relevanta referenser när en relevant referens hittades.

I enstaka fall under de olika litteratursökningarna användes även GAI:n ChatGPT för att söka efter litteratur. Det gjordes genom att be GAI:n hitta artiklar, rapporter etcetera som innehöll specifik information med relevans för arbetet utifrån olika kombinationer av sökorden som redovisas i Tabell 2.

Tabell 2: Sökord som använts i litteratursökningen.

Sökord	Översättning
Hydrogen	Väte/Vätgas
Detonation	Detonation
Vapour cloud explosion	Gasmolnexplosion
Deflagration	Deflagration
Hydrogen-air	Väte-luft
Explosion	Explosion
Flame speed	Förbränningshastighet
Turbulence	Turbulens
Congestion	Hinder/begränsat/Instängt
Blockage-ratio	Blockeringsgrad
DDT	DDT (deflagrations-till-detonationsövergång)

³ Tidigare LUBsearch.

Följande krav ställdes på modellerna och experimenten som valdes ut från litteratursökningarna.

Modellerna skall:

- beskriva gasmolnsexplosioner
- vara applicerbara för vätgas
- vara licensfria

Experimenten skall:

- utföras med vätgas.
- inkludera antingen förblandade gasmoln eller jetutsläpp.
- inte ligga till grund för någon av modellerna.
- efterlikna verkliga utsläppsmiljöer.
- tydligt redovisa relevanta parametrar samt resultat av tryck och avstånd.

3.2 Validering av modeller

Efter identifieringen av relevanta beräkningsmodeller med tillhörande vägledning och fastställandet av experimentdatan genomfördes valideringen av modellerna. Valideringen utfördes genom att applicera modellerna på experimentuppställningarna och därefter jämfördes resultatet med experimentdatan. Vid behov utfördes anpassningar av modellerna utifrån två olika angreppssätt, best-fit och conservative-fit. Best-fit innebär att modellen anpassas så att den totala avvikelsen mellan modellerade och observerade värden minimeras. De observerade värdena kan därmed underskattas av modellen. Conservative-fit innebär att modellen anpassas så att de observerade värdena inte underskattas av modellen. Sedan, eftersom explosionsgrafer tenderar att presenteras i log-log skala är en visuell avläsning inte tillräckligt. Därför behövs det beräknas kvantitativa mått som möjliggör en objektiv bedömning. För respektive anpassning beräknades de statistiska måtten: Root Mean Square Error (RMSE) och Mean Absolute Error (MAE). Dessa mått valdes eftersom de är väletablerade för utvärderingen av modeller, ger kvantitativa mått på avvikelser mellan experimentdata och modell samt möjliggör en objektiv jämförelse.

Båda måtten baseras på skillnaden mellan observerade och modellerade värden. Lägre värde på RMSE eller MAE indikerar en bättre överensstämmelse mellan modell och experimentdata. Ett värde på noll innebär att modellen exakt återger de observerade värdena, vilket motsvarar perfekt överensstämmelse. Det finns dock inga generella gränsvärden för dessa mått, eftersom de är beroende av datans skala. De bör därför tolkas relativt och användas främst för jämförelse mellan modeller. En modell med lägre RMSE eller MAE än en annan anses därmed vara en bättre modell för att den ger en bättre prediktion av övertrycket. RMSE är utformad för en normalfördelning och är känslig för utstickare och MAE är utformad för en mer utbreddfördelning och hanterar utstickare bättre. För att experimentdatans fördelningar är okänd kommer båda måtten tillämpas. RMSE och MAE beräknas med hjälp av Ekvation 3 och Ekvation 4 (Hodson, 2022).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}$$

Ekvation 3

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|$$

Ekvation 4

Där n = Antal observationer

y_i = Observerat värde

\hat{y}_i = Modellvärde

4 Beräkningsmodeller

I följande avsnitt kommer beräkningsmodellerna som identifierades i litteraturstudien att presenteras.

4.1 Allmänt

Från litteratursökningen framkom det att två av de mest etablerade analytiska modellerna för att beräkna tryckvågen vid en gasmolnsexplosion är TNT-ekvivalensmetoden och TNO multi-energy-metoden (Ponchaut et al., 2016). En ytterligare modell som identifierades var OHVE-modellen (Mukhim et al., 2018). Det är en modell som inte är etablerad. Sammantaget analyserades således tre olika modeller, TNT, TNO och OHVE. I följande avsnitt kommer en detaljerad beskrivning av modellerna presenteras.

Det identifierades även etablerade numeriska datormodeller, exempelvis FLACS, som kan beräkna gasmolnsexplosioner. Datormodellerna är resurskrävande och kräver licenser vilket innebär att urvalskriterierna inte uppfylls.

Från den inledande litteraturöversikten identifierades även etablerade författare inom ämnet. En av författarna, Robert G. Zalosh, som hade skrivit ett kapitel i SFPE handbook of fire protection engineering (Hurley, 2016) har även författat boken *Explosion Dynamics* (2023) vilket har använts som övergripande referens i arbetet.

Samtliga modeller som behandlas i rapporten beräknar side-on trycket i form av ett dimensionslöst infallande övertryck, \bar{P}_s ⁴. Om det faktiska trycket är av intresse behöver modellernas resultat skalas om till det infallande övertrycket, P_s . I modellerna kommer atmosfärstrycket, P_0 , ansättas till 101 325 Pa.

4.2 TNT-modellen

TNT-modellen är en beräkningsmässigt relativt enkel metod för att beräkna övertryck från en gasmolnsexplosion. Grundprincipen är att den kemiska energin i gasmolnet omvandlas till en ekvivalent massa TNT, varefter tryckvågen bedöms med hjälp av en empiriskt framtagen kurva som bygger på experiment med detonationer av sprängämnet TNT⁵ på plana ytor. Modellen antar att explosionen utbreder sig i form av ett halvklot (Rangwala & Zalosh, 2023).

TNT-modellen är inte specifikt framtagen för vätgas utan kan appliceras på många olika explosiva gaser. Modellen tar inte hänsyn till hur gasmolnet uppstått och beaktar inte molnets storlek eller interna struktur. TNT-modellens styrkor är, den är tidseffektiv, enkel och ger ett direkt värde på maximalt tryck vid ett givet avstånd. Modellen har dock flera betydande begränsningar. För det första bygger den på detonationer av TNT, medan gasmolnsexplosioner sällan når detonationsnivå. TNT-explosioner har dessutom avsevärt högre maxtryck än deflagrationer i gasmoln (Rangwala & Zalosh, 2023).

Ekvation 5 nedan är det första steget i användningen av modellen för att omvandla bränslet i gasmolnet till en ekvivalent massa TNT. Högersidan i ekvationen multipliceras med två för att hantera det reflekterade trycket från marken av en halvsfärisk explosion.

⁴ Det dimensionslösa trycket beräknas enligt följande: $\bar{P}_s = P/P_0$

⁵ TNT är en förkortning av Trinitrotoluen.

$$W_{TNT} = \alpha \frac{W \Delta H_c \times 2}{E_{TNT}}$$

Ekvation 5

Där α = Yield factor

ΔH_c = Förbränningsentalpi (heat of combustion) (MJ/kg)

W = Massan på gasmolnet bränsle (kg)

E_{TNT} = Energin TNT vid explosion (4182 kJ/kg)

En central parameter i TNT-modellen är α -värdet eftersom det avgör hur stor del av gasmolnets energi som bidrar till den genererade tryckvågen. α -värdet är ett värde mellan 0–1 (0–100%) och det finns inget fast värde för α , utan värdet kan varieras beroende på flera faktorer såsom molnet utbredning, turbulens, hinder, instängning samt vilket ämne som exploderar. För gasmolnexplosioner rekommenderas α -värdes intervall mellan 0,01–0,1 (Rangwala & Zalosh, 2023). För att underlätta användningen har etablerade tumregler utvecklats, där explosionsförloppet delas in i två områden: nearfield och farfield. Nearfield avser området närmare explosionen, där vägledning rekommenderar ett värde på $\alpha=0,02$. Farfield representerar området bortom nearfield, det vill säga på längre avstånd från explosionscentrumet. Gränsen mellan områdena definieras utifrån det infallande maximala övertrycket. När övertrycket underskrider 6,9 kPa klassas explosionen som farfield. För detta område rekommenderas ett värde på $\alpha=0,05$. Indelningen i nearfield och farfield syftar till att möjliggöra en mer korrekt beskrivning av tryckprofilen då den ändrar intensitet och form med avståndet. De rekommenderade vägledningvärdena är avsedda att representera generella tryckförlopp för gasmolnexplosioner av alla sorters ämnen (Rangwala & Zalosh, 2023).

Enligt Sochet (2010) kan ett α -värde på 0,1 användas i riskanalyser för att uppnå en konservativ bedömning av gasmolnexplosionen. Enligt författaren motsvarar detta värde ett 97% konfidensintervall för de observerade explosioner, vilket innebär att en stor majoritet av möjliga explosioner täcks in utan att risken underskattas.

Ekvation 6 och 7 nedan beskriver hur det dimensionslösa övertrycket beräknas utifrån den ekvivalenta massa av TNT som beräknades av Ekvation 5.

$$\bar{P}_s = \frac{1616 \times \left(1 + \left(\frac{\bar{R}_{TNT}}{4,5}\right)^2\right)}{\sqrt{1 + \left(\frac{\bar{R}_{TNT}}{0,048}\right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{\bar{R}_{TNT}}{0,32}\right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{\bar{R}_{TNT}}{1,35}\right)^2}}$$

Ekvation 6

$$\bar{R}_{TNT} = \frac{R}{W_{TNT}^{1/3}}$$

Ekvation 7

Där R är avståndet från molnets centrum till den punkt där trycket beräknas (m)

Tillvägagångsättet för TNT-modellen:

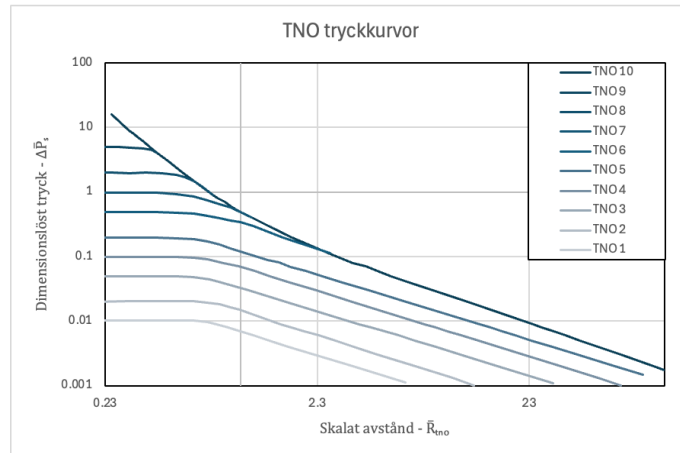
1. Beräkna massan av brännbar gas i gasmolnet och bestäm gasen förbränningsentalpi.
2. Omvandla energin i gasmolnet till en ekvivalent TNT-massa med Ekvation 5.
3. Använd Ekvation 6 för att beräkna det maximala dimensionslösa övertrycket \bar{P}_s vid ett avstånd R. Den skalade distansen \bar{R}_{TNT} erhålls via Ekvation 7.

4.3 TNO-modellen

TNO är en förkortning av *The Netherlands Organisation for Applied Scientific Research*, vilket är en oberoende forskningsorganisation. TNO-modellen är en multi-energi-metod för att uppskatta övertryck vid gasmolnsexplosioner men kan även användas för att uppskatta impuls. Modellen bygger på antagandet att kraftiga explosioner endast kan uppstå i gasmoln med turbulens, vilket kan uppstå i områden med hinder eller instängdhet (Rangwala & Zalosh, 2023). Modellen är empiriskt framtagen från experiment där olika kombinationer av hindergrad och instängdhet studerades. Utifrån dessa försök utvecklades ett system av tryckkurvor, där varje kurva motsvarar ett specifikt explosionsförlopp. Systemet sträcker sig från I , som representerar en svag deflagration utan hinder eller instängdhet (öppen yta), till 10 vilket motsvarar en detonation. Tryckkurvorna presenteras utifrån ett dimensionslöst övertryck, \bar{P}_s , längs y-axeln och skalat avstånd, \bar{R}_{TNO} , längs x-axeln i figur 5.8A i (TNO, 2005).

En fördel med modellen är att det går att hantera olika grader av hinder och instängdhet av ett gasmoln. Gasmolnet kan delas upp i olika explosionszoner som beräkningsmässigt beaktas som egna separata explosioner. Den explosionszon som ger det högsta trycket väljs sedan för vidare beräkningar (Rangwala & Zalosh, 2023).

Under litteratursökningen identifierades en artikel av Alonso et al. (2006) som sammanställde olika funktioner för att beskriva tryckkurvorna. Efter att ha analyserat funktionerna ansågs dessa olämpliga att använda i valideringen av TNO-modellen eftersom flera av funktionerna gav okontinuerliga kurvor. Därför utvecklades nya funktioner för att uppnå bättre överensstämmelse med kurvorna i Figur 6.8A i (TNO, 2005). Det gjordes genom att plotta ut punkter längs kurvorna med mjukvaranvaran PlotDigitizer. Datapunkterna importerades sedan till Excel där kurvorna delades upp i mindre intervall för att approximativt beskrivas med konstanta lutningar. Sedan användes den inbyggda trendlinjefunktionen i Excel för att härleda funktioner för de olika intervallen. Brytpunkterna beräknades genom att likställa funktionerna. De framtagna tryckkurvorna presenteras i Figur 6 nedan.



Figur 6: Framtagna tryckkurvor baserat på figur 5.8A från TNO (2005).

Det skalade avståndet, \bar{R}_{TNO} , beräknas med hjälp av Ekvation 8 nedan.

$$\bar{R}_{TNO} = \frac{R}{(E/P_0)^{1/3}}$$

Ekvation 8

Där $E = m \times \Delta H_c$ = Energiinnehåll (J)

m = Massa vätgas (kg)

ΔH_c = Förbränningsentalpi (J/kg)

De framtagna funktionerna för tryckkurvorna i Figur 6 bygger på Ekvation 9 nedan, där konstanterna a och b beror på val av tryckkurva samt värde av \bar{R}_{TNO} . Konstanterna a och b presenteras i Tabell 3 nedan.

$$\Delta \bar{P}_s = a \bar{R}_{TNO}^b$$

Ekvation 9

Tabell 3: Funktioner för att beskriva de olika tryckkurvorna utifrån olika intervalluppdelningar.

TNO10	$0,230 \leq \bar{R}_{TNO} < 0,300$ a=0,2405 b= -2,998	$0,300 \leq \bar{R}_{TNO} < 0,671$ a=0,3792 b= -2,618	$0,671 \leq \bar{R}_{TNO} < 1,583$ a=0,5001 b= -1,923	$1,583 \leq \bar{R}_{TNO}$ a= 0,3517 b= -1,156	
TNO9	$0,23 \leq \bar{R}_{TNO} < 0,375$ a= 4,1941 b= -0,122	$0,375 \leq \bar{R}_{TNO} < 0,414$ a=0,5677 b= -2,161	$0,414 \leq \bar{R}_{TNO} < 0,671$ a=0,3792 b= -2,618	$0,671 \leq \bar{R}_{TNO} < 1,583$ a=0,5001 b= -1,923	$1,583 \leq \bar{R}_{TNO}$ a= 0,3517 b= -1,156
TNO8	$0,23 \leq \bar{R}_{TNO} < 0,530$ a= 1,7748 b= -0,09	$0,530 \leq \bar{R}_{TNO} < 0,605$ a= 0,4844 b= -2,231	$0,605 \leq \bar{R}_{TNO} < 0,671$ a=0,3792 b=-2,618	$0,671 \leq \bar{R}_{TNO} < 1,583$ a=0,5001 b=-1,923	$1,58 \leq \bar{R}_{TNO}$ a= 0,3517 b= -1,156
TNO7	$0,23 \leq \bar{R}_{TNO} < 0,618$ a= 0,7669 b= -0,236	$0,618 \leq \bar{R}_{TNO} < 1,002$ a= 0,4994 b= -1,128	$1,002 \leq \bar{R}_{TNO} < 1,583$ a= 0,5001 b= -1,923	$1,583 \leq \bar{R}_{TNO}$ a= 0,3517 b= -1,156	
TNO6	$0,23 \leq \bar{R}_{TNO} < 0,666$ a= 0,4241 b= -0,144	$0,666 \leq \bar{R}_{TNO} < 1,053$ a= 0,3378 b= -0,703	$1,053 \leq \bar{R}_{TNO} < 2,670$ a= 0,346 b= -1,165	$2,670 \leq \bar{R}_{TNO}$ a= 0,3517 b= -1,156	
TNO5	$0,23 \leq \bar{R}_{TNO} < 0,646$ a= 0,1827 b= -0,072	$0,646 \leq \bar{R}_{TNO}$ a= 0,1215 b= -1,007			
TNO4	$0,23 \leq \bar{R}_{TNO} < 0,749$ a= 0,0893 b= -0,098	$0,749 \leq \bar{R}_{TNO}$ a= 0,0685 b= -1,015			
TNO3	$0,23 \leq \bar{R}_{TNO} < 0,675$ a= 0,0473 b= -0,049	$0,675 \leq \bar{R}_{TNO}$ a= 0,0326 b= -0,996			
TNO2	$0,23 \leq \bar{R}_{TNO} < 0,739$ a= 0,0196 b= -0,048	$0,739 \leq \bar{R}_{TNO}$ a=0,0145 b= -1,043			
TNO1	$0,23 \leq \bar{R}_{TNO} < 0,694$ a= 0,0098 b= -0,055	$0,694 \leq \bar{R}_{TNO}$ a= 0,0069 b= -1,016			

Eftersom valet av tryckkurva kan vara en utmaning vid riskanalyser behövs det vägledning som underlättar och minskar subjektiviteten. Följande vägledningar, Tabell 4 och Tabell 5, är framtagna för att underlätta valet av tryckkurva.

Tabell 4: Vägledning för val av tryckkurvor TNO (2005).

Antändningsenergi		Grad av hinder			Grad av instängdhet		Tryckkurva
Svag	Stark	Ingen	Låg	Hög	Etablerad	Ej etablerad	
	X			X	X		7–10
	X			X		X	7–10
	X		X		X		5–7
	X		X			X	4–6
	X	X			X		4–6
	X	X				X	4–5
X				X	X		5–7
X				X		X	4–5
X			X		X		3–5
X			X			X	2–3
X		X			X		1–2
X		X				X	1

Tabell 5: Definitioner av antändningsenergi, hinder och instängdhet.

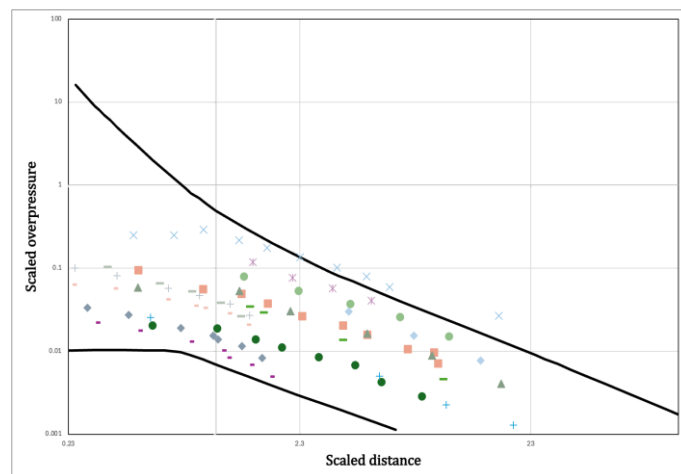
Definitioner enligt TNO (2005).		
Antändningsenergi	Stark	Antändningskällan är, exempelvis en ventilerad instängd explosion som kan bero på antändning av delar av molnet från en svag antändningskälla i en byggnad.
	Svag	Antändningskällan är en gnista, flamma, varm yta etc.
Hinder	Hög	Korta avstånd till hinder inom gasmolnet vilket ger en total blockeringsgrad över 30% och med avstånd mellan hinder under 3 m.
	Låg	Hinder i gasmolnet som har en hindergrad under 30% och/eller avstånd över 3 m.
Instängdhet	Etablerad	Gasmolnet, eller delar av gasmolnet, är instängt av väggar/barriärer på två eller tre sidor.
	Ej Etablerad	Gasmolnet är inte instängt, bortsett från marken.

Tillvägagångsättet för att använda TNO-modellen innefattar följande steg:

1. Identifiera zoner eller områden som gasmolnet är instängt eller har en hög hindergrad samt uppskatta volymen av gasmolnet i respektive område.
2. Välj tryckkurva (index 1–10) för varje identifierat område. Tabell 4 och Tabell 5 kan användas som vägledning vid valet.
3. Med hjälp av Figur 6 avläs det högsta dimensionslösa trycket \bar{P}_S som de olika zonerna genererar för ett givet avstånd R omräknat till \bar{R}_{TNO} med hjälp av Ekvation 8.
4. Den zon som ger det högsta dimensionslösa tryck vid avståndet anses dimensionerande.

4.4 OHVE-modellen

OHVE står för Open Hydrogen-Vapour cloud Explosion vilket är en benämning skapad för arbetet då författarna till modellen inte namngett den. Modellen är framtagen av Mukhim et al. (2018) och är en empirisk framtagen modell som bygger på experimentdata över gasmolnsexplosioner med vätgas på öppna ytor vilket anpassats med en Power-fit ekvation. Författarna var kritiska till TNT-modellens och TNO-modellens förmåga att beskriva gasmolnsexplosioner med vätgas på öppna ytor. De uttrycker att modellerna inte fångar experimentdatans spridning och att TNO-modellen underskattar trycket kraftigt. Figur 7 nedan är en återskapad figur från Mukhim et al. (2018) vilket jämför experimentdatan som OHVE-modellen bygger på med TNO-modellen. Enligt Mukhim et al. (2018) ska experimentdatan tangera tryckkurva 1 (den nedre linjen i figuren). Det kan dock observeras att experimentdatan inte följer tryckkurva (TNO-1).



Figur 7: Experimentdata från fria vätgasexplosioner återskapad från Mukhim et al. (2018). Övre linje (TNO-10), Nedre linje (TNO-1).

OHVE-modellen bygger vidare på samma bas som TNO-modellen genom att använda samma skalade avstånd. Modellen skiljer sig från TNO-modellen då det dimensionslösa trycket beräknas direkt utifrån en ekvation i stället för att välja en tryckkurva från Figur 6. Det dimensionslösa trycket beräknas med hjälp av Ekvation 10.

$$\bar{P}_s = A \times \bar{R}_{OHVE}^B \quad \text{Ekvation 10}$$

Där $B = -0,7072$

$$A = 0,0000006948 \times (V \times C)^3 - 0,0000807 \times (V \times C)^2 + 0,002943 \times (V \times C) + 0,02095 \quad \text{Ekvation 11}$$

$V =$ Volym på gasmoln (m^3)

$C =$ Koncentration på gas (%)

Tillvägagångsättet för användning av OHVE-modellen innefattar följande steg:

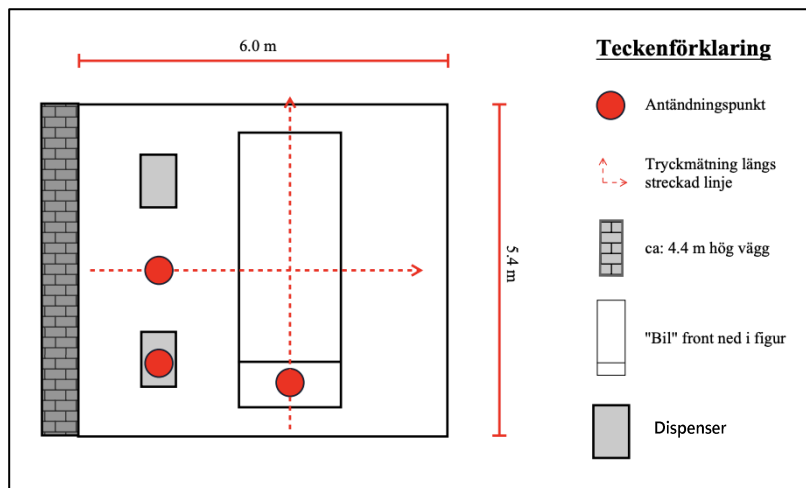
1. Bestäm utsläppscenario och beräkna koncentration (C) samt volym (V) för vätgasmolnet.
2. Beräkna \bar{R}_{OHVE} med Ekvation 8.
3. Beräkna konstant A med Ekvation 11.
4. Beräkna dimensionslösa övertryck \bar{P}_s genom Ekvation 10.

5 Explosionsdata

Från litteratursökningen identifierades tre relevanta experiment för valideringen av beräkningsmodellerna. Experimenten är utförda av Shirvill et al., (2012, 2018, 2019). Artiklarna beskriver olika uppställningar med variationer i den omgivande miljön i form av olika grader av hinder och instängdhet. Uppställningarna är utformade för att efterlikna verkliga miljöer där ett utsläpp av vätgas kan leda till en gasmolnexplosion. De olika experimenten kommer fortsättningsvis att benämnas *Tankstation*, *Lagringsanläggning* och *Rörledning* utifrån den miljö som de försöker efterlikna. Nedanför presenteras en kortfattad beskrivning över de olika experimentuppställningarna.

5.1 Tankstation

Uppställningen i det första experimentet av Shirvill et al., (2012) ska efterlikna en tankstation för vätgasdrivna bilar och bestod av en betongvägg, två dispensers samt en bil, se Figur 8 för schematisk uppställning. I denna uppställning testades gasmolnsexplosion med förblandade gasmoln av vätgas och jetutsläppsexplosioner.



Figur 8: Schematisk skiss av experimentuppställningen i Shirvill et al., (2012).

De förblandade fallen utfördes genom att testuppställningen inneslöts av ett tält av tunn plast (23 μm) och vätgas släpptes ut i tältet. Det utfördes fyra olika variationer av förblandade explosioner med tre olika antändningspunkter: mellan tankstationer, i motorutrymmet och i dispensern. Försöket med antändningen i dispensern utfördes två gånger först med en öppning vid marknivå och sedan med två öppningar, en upp till och en ned till av dispensern. Även gasmolnkoncentrationerna varierade mellan 30,88–34,64%. Blockeringsgraden för uppställningen varierade mellan 12–13,4 % beroende på om dispenserna var öppna eller inte.

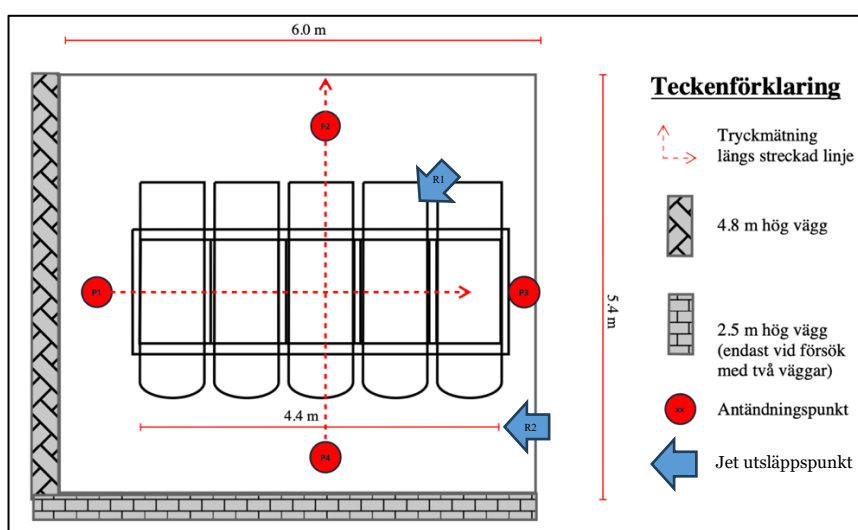
För de förblandade fallen var tryckgivarna placerade längs med de streckade linjerna i Figur 8, från den horisontala linjen var tre mätare placerade uppåt i figuren och tre nedåt i figuren där den bitersta av mätarna är placerade på 6,25 m från skärningspunkten. Längs den horisontella linjen var totalt fem tryckmätare placerade. En av givarna var placerad i skärningspunkten av linjerna och resterande var placerade åt höger, där den bitersta givaren var placerad 100 m från skärningspunkten.

Försöken med jetutsläppsexplosioner utfördes med utsläppet riktat ned mot marken från 1,2 meters höjd med placering mellan dispenser och motorutrymmet. Utsläppen utfördes med samma lagringstryck ca 40 MPa, utsläppsdiameterna var 8 mm, det initiala flödet var 1,02 kg/s, antändningstiderna var 0,7 s, 3,1 s och 6,1 s och antändningspunkt var i motorutrymmet.

För jetutsläppsexplosionerna var tryckmätarnas placering justerad men fortfarande längs med de streckade linjerna i Figur 8. Från den horisontala linjen var en mätare placerade 1,5 m uppåt i figur och fem nedåt i figur där den bortersta av mätarna var placerade 18,7 m från centrum. Längs med den horisontella linjen var totalt fem tryckmätare placerade. En av mätarna var placerad i skärningspunkten av linjerna och resterande var placerade åt höger i figuren där den bortersta mätaren var placerad 16,85 m från skärningspunkten.

5.2 Lagringsanläggning

Uppställningen i det andra experimentet vilket var utfört av Shirvill et al. (2018) ska efterlikna lagringstankar för vätgas. Uppställningen bestående av tio cylindriska tankar staplade två tankar i höjd. Lagringsankarna var 2,64 m långa och hade en diameter på 0,8 m. Experimenten utfördes med antingen en vägg eller två betongväggar, se Figur 9.



Figur 9: Schematisk skiss över experimentuppställning i Shirvill et al., (2018).

Experimenten utfördes med olika koncentrationer och antändningspunkter. Koncentrationerna varierades mellan 28,83–37,33%. De förblandade gasmolnen inneslöts av ett tält av tunn plast (23 μm). Det utfördes även försök med jetutsläpp vilka utfördes med två väggar. Blockeringsgraden för uppställningen var 16,56 %.

För de förblandade scenarierna med en vägg var tryckmätarna placerade längs med de streckade linjerna i Figur 9, från den horisontala linjen var två mätare placerade uppåt i figur med den bortersta placerad 6,94 m från centrum. Två mätare var placerade nedåt i figuren där den bortersta av mätarna var placerade på 7,06 m från centrum. För två väggar var fyra mätare placerade uppåt i figuren (inga nedåt) den bortersta var 30,94 m från centrum. Längs den horisontella linjen var totalt tio tryckmätare placerade. Två mätare var placerade till vänster om skärningspunkten mellan linjerna med den bortersta placerad 1,365 m från skärningspunkten. Den bortersta punkten till höger om skärningspunkten är placerad 100 m bort.

Försöken med jetutsläppsexplosioner utfördes med utsläpp från pilen markerad R1 och antändning i punkten P4, se Figur 9. Det utfördes fem olika försök med denna uppställning. Fyra av dessa hade utsläppsdiametern 8 mm men med variation i lagringstryck mellan 10,15–40 MPa, initialt flöde mellan 0,281–1 kg/s och olika antändningstider. Ett försök utfördes med utsläppsdiametern 5,5 mm, lagringstrycket 40 MPa och initialt flöde 0,482 kg/s. Det utfördes

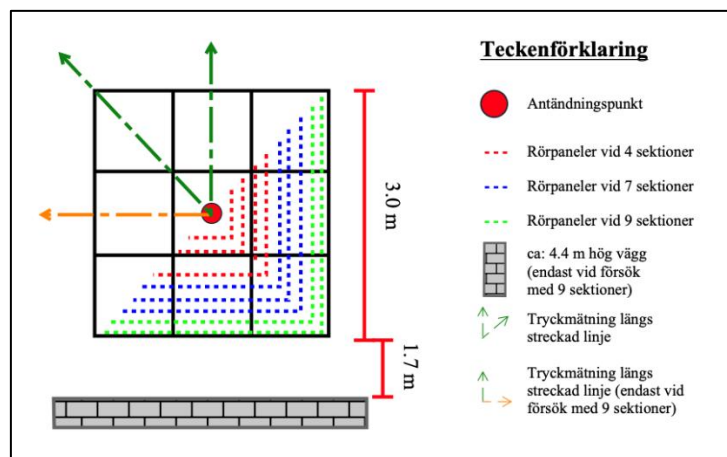
även ett försök med utsläppspunkt i R2 och antändning i P1, se Figur 9. Försöket utfördes med utsläppsdiametern 5,5 mm, lagringstrycket 39,86 MPa och initialt flöde 0,48 kg/s.

För jetutsläppsexplosionerna var tryckmätarnas placering justerad men fortfarande längs med de streckade linjerna i Figur 9. Fyra tryckmätare var placerade uppåt i figuren (inga nedåt) med den bortesta 18,97 m från centrum. Längs den horisontella linjen var totalt nio tryckmätare placerade. Placeringen följer här samma som för de förblandade fallen, dock var den tidigare bortesta mätaren nedmonterad och således blir den nya bortesta mätpunkten höger om skärningspunkten 16,275 m bort.

5.3 Rörledningar

Det tredje experimentet som utfördes av Shirvill et al., (2019) strävade efter att efterlikna rörledningar vilket är troligt att förekomma i anslutning till vätgasanläggningar.

Uppställningen bestod av en bur där sektioner av paneler med rör monterades. Det utfördes försök med fyra, sju och nio vertikala och horisontella sektioner. För experimentet med nio sektioner var en skyddsvägg placerad i närheten av buren, se Figur 10 för uppställning. Det utfördes endast försök med förblandade gasmoln som skapades genom att buren inneslöt med tunn plast (23 μm) och vätgas släpptes ut i tältet.



Figur 10: Schematisk skiss över experimentuppställning i Shirvill et al., (2019).

Det utfördes sex försök med fyra sektioner med koncentrationer som varierade mellan 24,7–41,11 %. Det utförde ett försök med sju sektioner med koncentrationen 32,32 % och ett försök med nio sektioner med koncentrationen 34,74 %. Blockeringsgraden för de olika uppställningarna var 2,82 %, 4,28 % och 4,4%.

Tryckmätarna var placerade längs med de streckade linjerna i Figur 10. Sju tryckmätare var placerade längs den vertikala gröna linjen och fyra längs den andra gröna linjen för försöken med fyra och sju sektioner. Den bortesta mätaren var placerad 32 m bort längs den vertikala linjen och 4 m för den gröna linjen. Vid försöket med nio sektioner var fem tryckmätare placerade längs den vertikala gröna linjen och sju längs den horisontella orangea linjen. Avstånden var då 32 m för vertikal linje och 7,87 m för horisontell linje.

5.4 Sammanställning av experimentdata

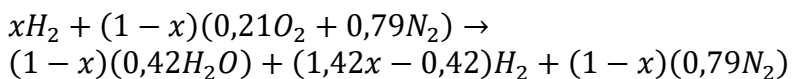
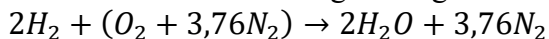
För att möjliggöra valideringen av modellerna sammanställdes den presenterade experimentdatan från studierna i Excel. I samtliga artiklar redovisades det uppmätta övertrycket blandat mellan tabeller och grafer. Avläsningen av övertryck utfördes visuellt från graferna avläsningsfelet uppskattas till omkring ± 1 kPa, detta diskuteras vidare i avsnitt 7.5 .

Avstånd till tryckmätarna var angivet i schematiska figurer som visade placering av de olika tryckgivarna utifrån uppställningen. För att säkerställa att experimentdatan kunde jämföras på ett likvärdigt sätt beräknades det absoluta avståndet från respektive trycksensor till antändningspunkten. Detta resulterade i en sammanställd datamängd bestående av uppmätt övertryck vid definierande avstånd från antändningspunkten. Avståndsberäkningarna genomfördes i två dimensioner och tog inte hänsyn till eventuella höjdskillnader.

När tryck och avstånd från experimentdatan fastställts sammanställdes övriga ingångsvärden som krävs för att validera modellerna. Massa som används för valideringen av de förblandade fallen benämndes i rapporterna ”*Mass of hydrogen ignited*”. Koncentrationerna i de förblandade fallen bestämdes utifrån partialtrycket för vätgas i blandningen vilket var angivet i rapporterna. Den massa som används i beräkningarna för jetutsläpp benämndes i rapporterna ”*Mass release on sparking (PT- change)*” Shirvill et al., (2012, 2018, 2019).

Vid genomgången av experimentdatan noterades att vissa blandningar i experimenten var feta blandningar. Därmed måste massan vätgas som faktiskt förbränns i den första explosionsfasen beräknas. För att beräkna den initialt reaktiva massan användes *Ekvation 12*. Skillnaden i hur modellerna behandlar totala vätgasmassan och den korrigerade massan presenteras i Bilaga 2. Motsvarande massa vid feta blandningarEftersom det krävs komplexa modeller för att uppskatta koncentrationerna i jetutsläppen görs inte denna beräkningarna för jetutsläppen.

Stökiometrisk förbränning av vätgas i luft:



Ekvation 12

Förbränning av vätgas i luft, där x är koncentration för vätgas i blandningen i decimalform.

6 Validering

I följande avsnitt presenteras valideringsprocessen för de olika beräkningsmodellerna som presenterats i avsnitt 4 ovan utifrån förblandade gasmoln i avsnitt 6.1 och jetutsläppsexplosioner i avsnitt 6.2.

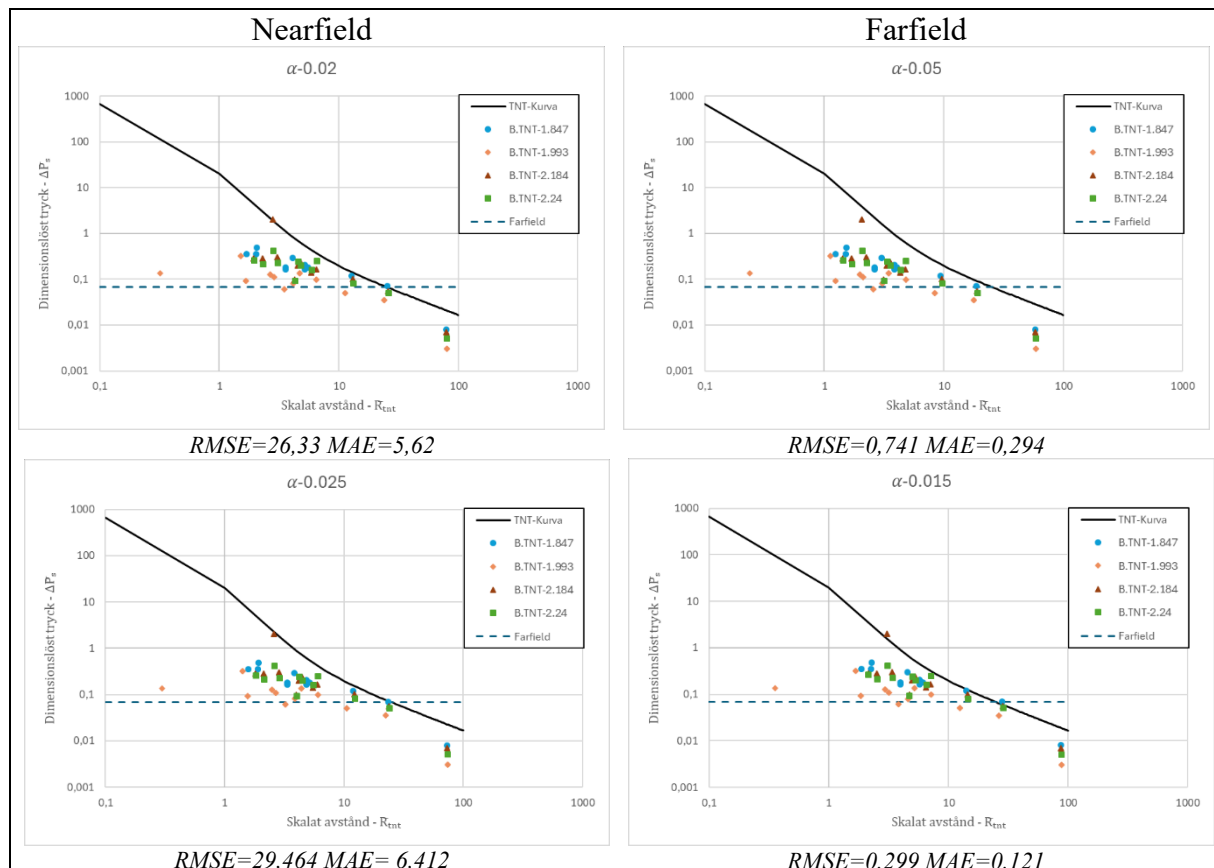
6.1 Förblandat gasmoln

Nedanför kommer samtliga modeller presenteras utifrån experimentdata för förblandade explosioner.

6.1.1 Validering av TNT-modellen

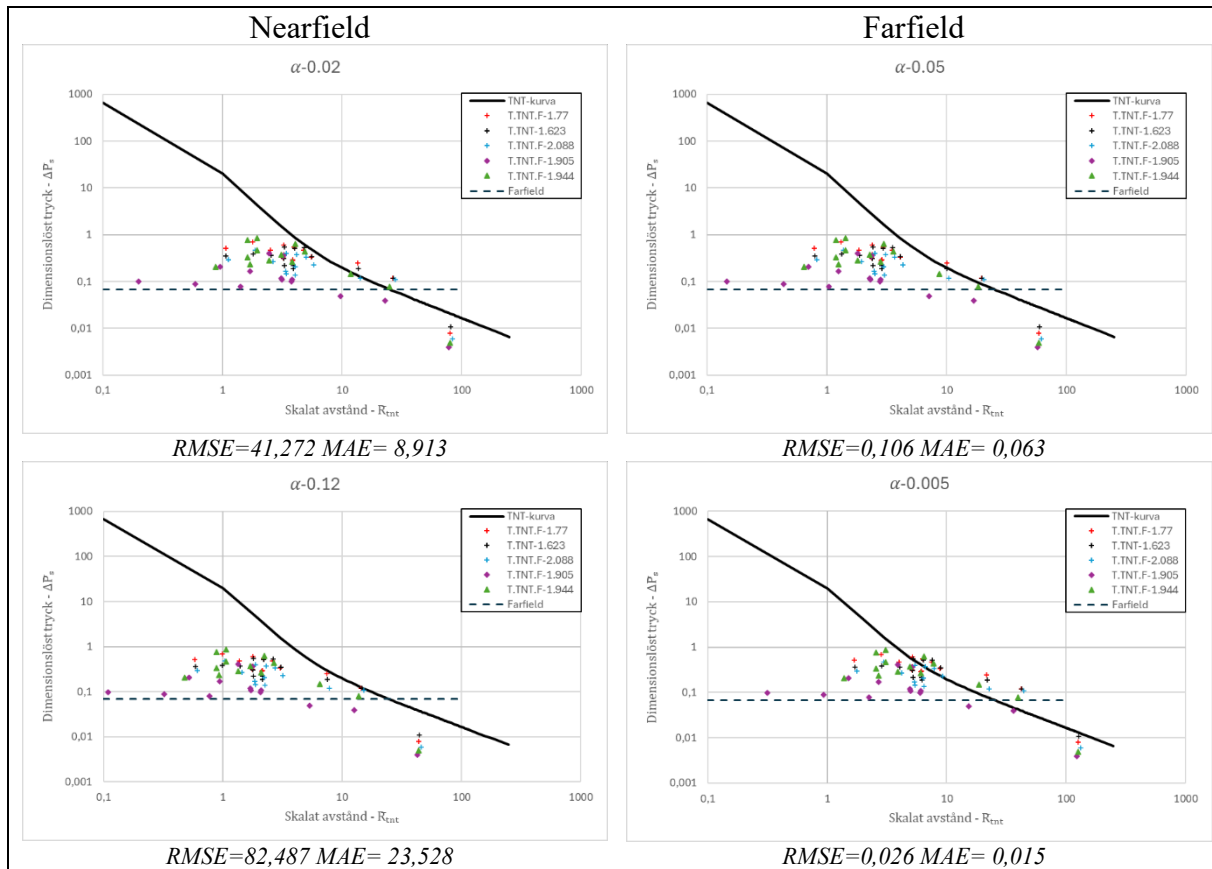
Det första steget i valideringen av TNT-modellen bestod av att plotta det dimensionslösa övertrycket, \bar{P}_s utifrån Ekvation 6 mot det skalade avståndet, \bar{R}_{TNT} . Därefter omvandlades experimentdatan till dimensionslöst övertryck \bar{P}_s och det skalade avståndet \bar{R}_{TNT} , vilket beräknades med Ekvation 7. I ekvationen användes $\frac{\Delta H_c}{E_{TNT}} = 28,66$ för vätgas vilket hämtades från Rangwala & Zalosh (2023). Sedan plottades experimentdatan utifrån de rådande vägledningarna för att välja α -värdet för nearfield ($\alpha = 0,02$) och farfield ($\alpha = 0,05$). Därefter utfördes iterativa justeringar av α -värdet för att ta fram de α -värden som anpassar experimentdatan utifrån conservative-fit för att bedöma trycket vid near- och farfield. Justeringarna gjordes med målet att samtliga punkter ska hamna under kurvan. Avslutningsvis beräknades RMSE och MAE för de olika fallen.

Nedan presenteras valideringsresultaten från uppställningen *Tankstation* från avsnitt 5.1 ovan.



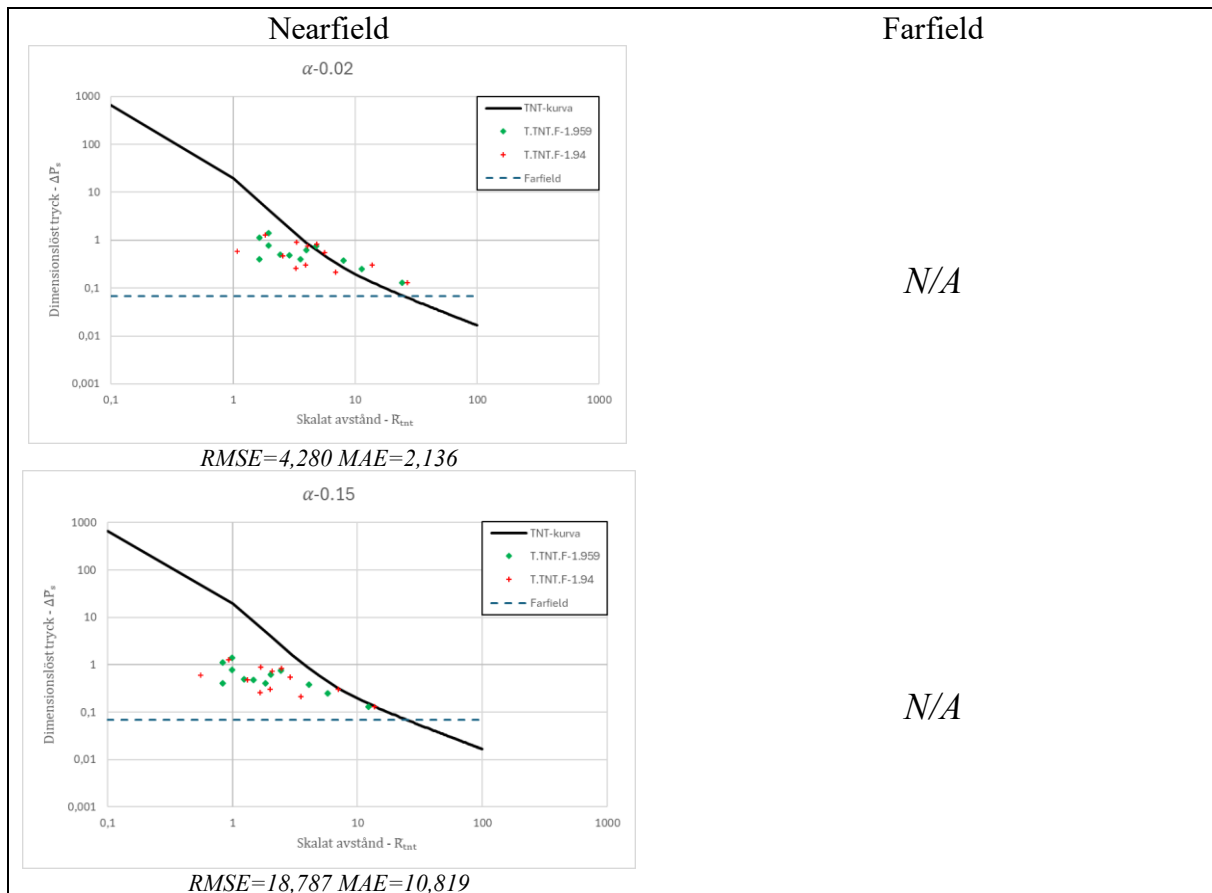
Figur 11: Experimentdata utifrån förblandade explosioner och scenariot *Tankstation* där alla försök är utförda med fet blandning. Antändningsplacering: Romb (Motorhuv), Triangel (en öppning), Kvadrat (två öppningar), Cirkel (Mellan dispensers). Den övre raden är α enligt de standardiserade tumreglerna. Nedre raden är justerade α -värden.

Nedan presenteras valideringsresultaten från uppställningen *Lagringsanläggning* med en vägg från avsnitt 5.2.



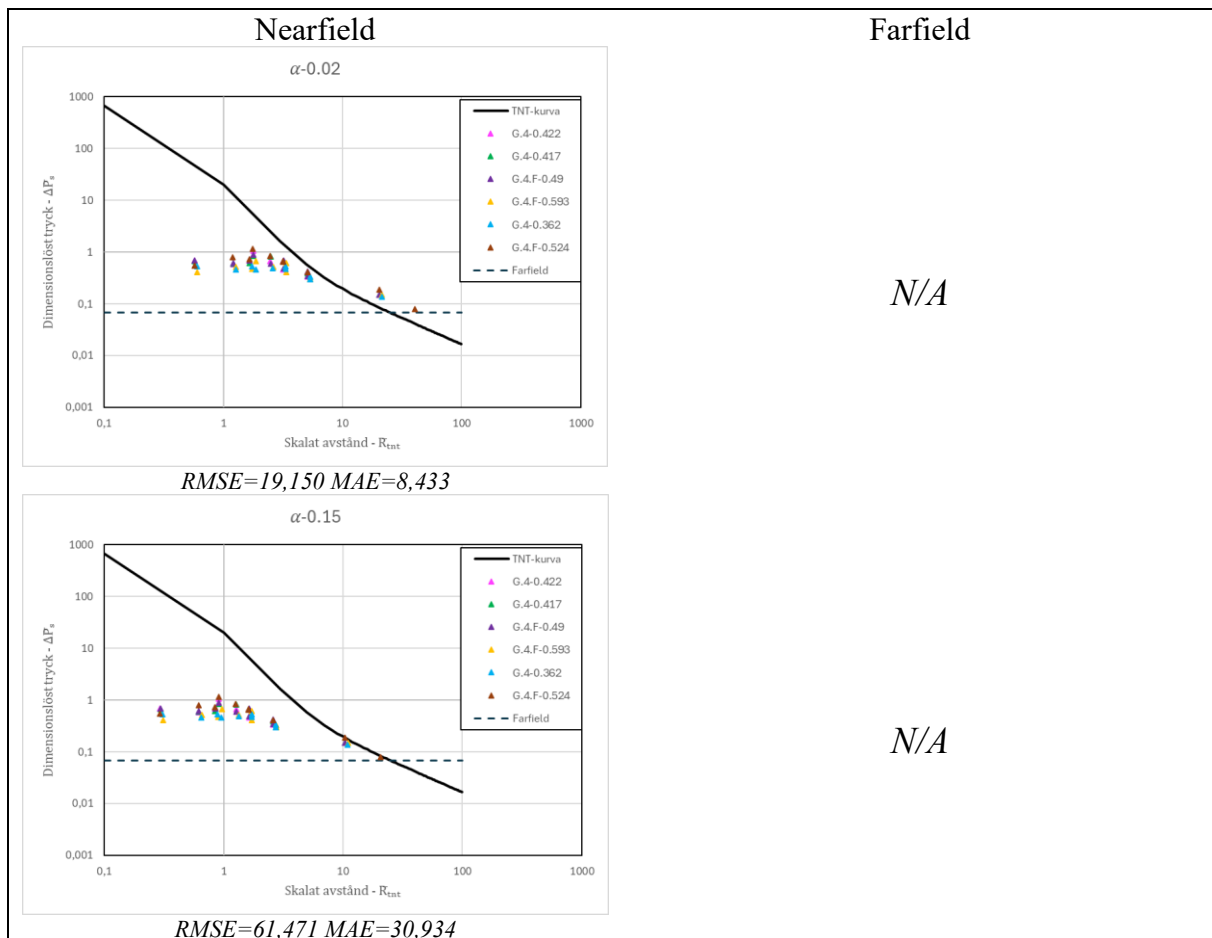
Figur 12: Experimentdata utifrån förblandade explosioner och scenariot *Lagringsanläggning* en vägg. Antändnings placering: Kryss (P1), Triangel (P2), Romb (P3), (F) står för fet blandning. Den övre raden är α enligt de standardiserade tumreglerna. Nedre raden är justerade α -värden.

Nedan presenteras valideringsresultaten från scenariot *Lagringsanläggning* med två väggar från avsnitt 5.2. Uppställningen generade höga tryck på längre avstånd vilket leder till att ett α -värde för farfield inte kan fastställas då experimentdatan inte underskrider 6,9 kPa.



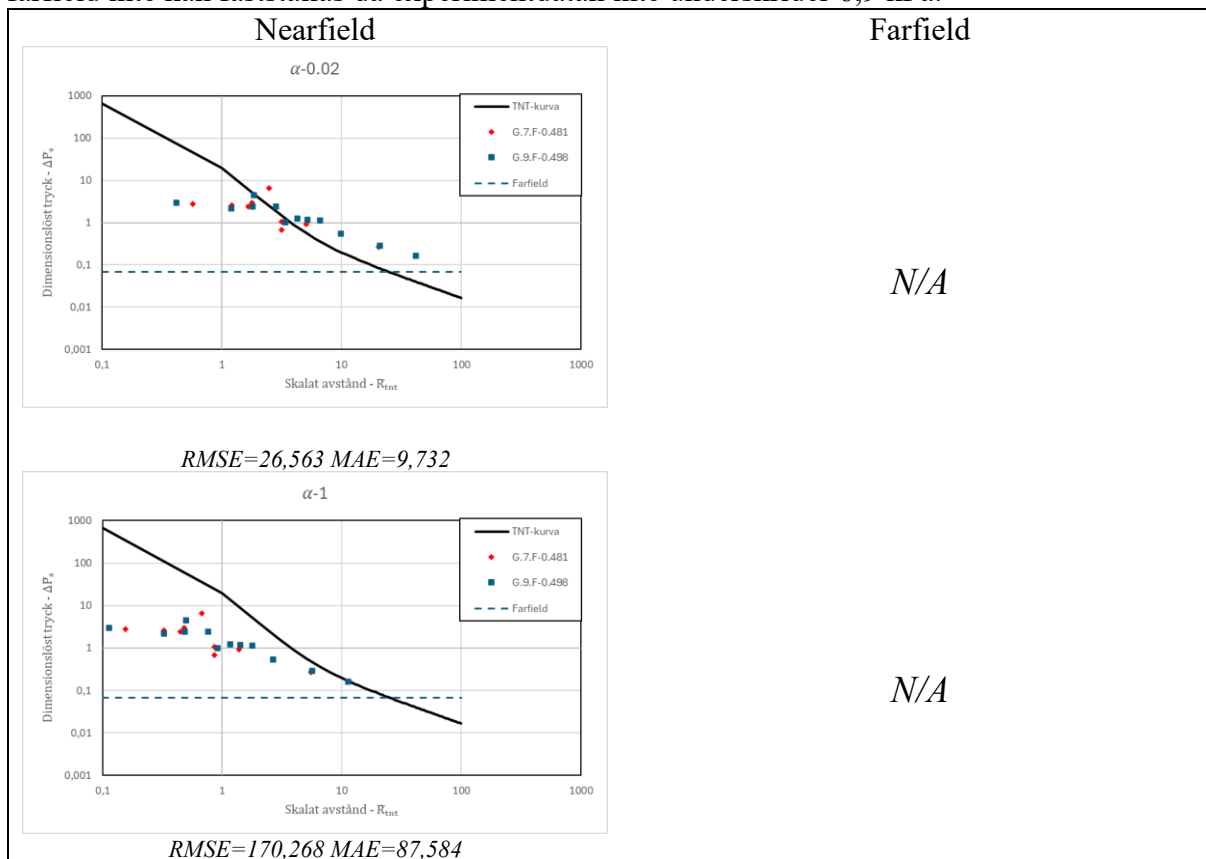
Figur 13: Experimentdata utifrån förblandade explosioner och scenariot *Lagringsanläggning* två väggar. Antändnings placering: Kryss (P1), Romb (P3), (F) står för fet blandning. Den övre raden är α enligt de standardiserade tumreglerna. Nedre raden är justerade α -värden.

Nedan presenteras valideringsresultaten från scenariot *Rörledning* från avsnitt 5.2. Alla försöken presenterade är utförda med fyra sektioner. Uppställningen genererade höga tryck på längre avstånd vilket gör att ett α -värde för farfield inte kan fastställas då experimentdatan inte underskrider 6,9 kPa.



Figur 14: Experimentdata utifrån förblandade explosioner och scenariot *Rörledning* med fyra sektioner, (F) står för fet blandning. Den övre raden är α -värden enligt de standardiserade tumreglerna. Nedre raden är justerade α -värden.

Nedan presenteras valideringsresultaten från uppställningen *Rörledning* med sju och nio sektioner. Även här genererades höga tryck på längre avstånd vilket gör att ett α -värde för farfield inte kan fastställas då experimentdata inte underskrider 6,9 kPa.



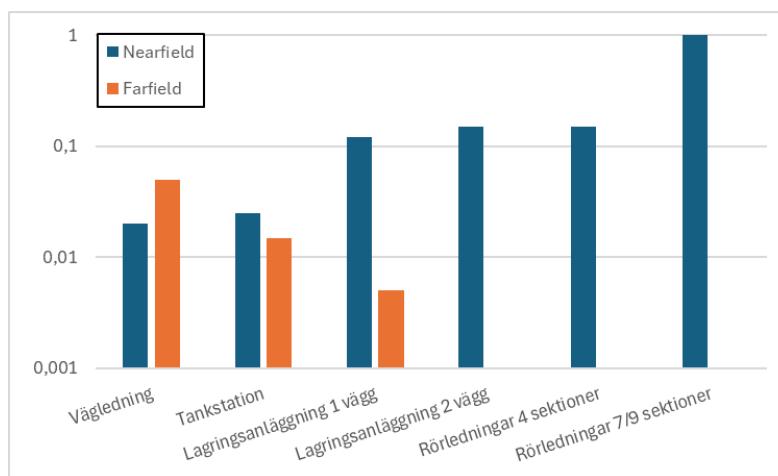
Figur 15: Experimentdata utifrån förblandade explosioner och uppställningen *Rörledning* med sju och nio sektioner. Rektangel (9 sektioner), Romb (7 sektioner) (F) står för fet blandning. Den övre raden är α enligt de standardiserade tumreglerna, nedre raden är justerade α -värden.

I Tabell 6 nedan presenteras en sammanställning av RMSE-värden och MAE-värden för tumregels α -värdet samt det justerade värdet för samtliga uppställningar.

Tabell 6: Sammanställning av RMSE- och MAE-värden utifrån tumregler och justerade värden.

Uppställning	Nearfield	Farfield
Tankstation	Tumregel $\alpha=0,02$, RMSE=26,33 MAE=5,62	Tumregel $\alpha=0,05$ RMSE=0,741 MAE=0,294
	Justerat $\alpha=0,025$, RMSE=29,464 MAE= 6,412	Justerat $\alpha=0,015$, RMSE=0,299 MAE=0,121
Lagrinsanläggning en vägg	Tumregel $\alpha=0,02$, RMSE=41,272 MAE= 8,913	Tumregel $\alpha=0,05$ RMSE=0,106 MAE= 0,063
	Justerat $\alpha=0,12$, RMSE=82,487 MAE= 23,528	Justerat $\alpha=0,005$, RMSE=0,026 MAE= 0,015
Lagrinsanläggning två Vägg	Tumregel $\alpha=0,02$, RMSE=4,280 MAE=2,136	N/A
	Justerat $\alpha=0,15$, RMSE=18,787 MAE=10,819	N/A
Rörledningar fyra sektioner	Tumregel $\alpha=0,02$, RMSE=19,150 MAE=8,433	N/A
	Justerat $\alpha=0,15$, RMSE=61,471 MAE=30,934	N/A
Rörledningar sju & nio sektioner	Tumregel $\alpha=0,02$, RMSE=26,563 MAE=9,732	N/A
	Justerat $\alpha=1$, RMSE=170,268 MAE=87,584	N/A

I Figur 30 nedan presenteras α -värdet från vägledningen samt en summering av de justerade värdena för respektive uppställning.



Figur 16: Sammanfattning av α -värden från vägledning och justerade värden.

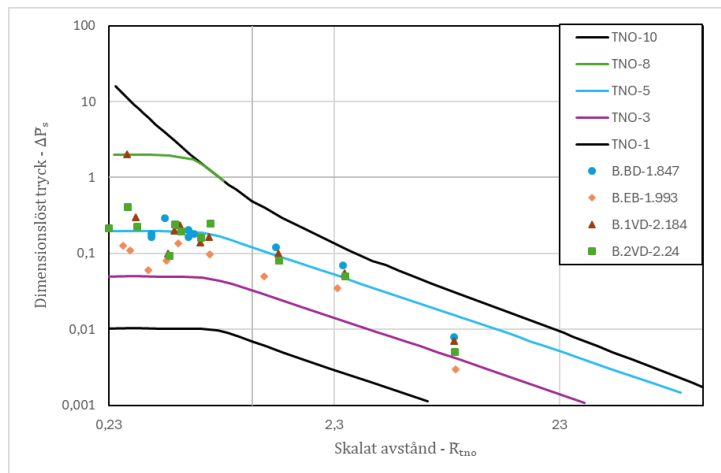
6.1.2 Validering av TNO-modellen

Det först steget av valideringen av TNO-modellen var att omvandla den insamlade experimentdatan till det dimensionslösa trycket, \bar{P}_s , och det skalade avståndet, \bar{R}_{TNO} . Först beräknades energiinnehållet i gasmolnet, E , med utgångspunkt att $\Delta H_c = 120$ MJ/kg (Rangwala & Zalosh, 2023). Det beräknade energiinnehållet användes sedan för att omvandla experimentdatan till det skalade avståndet, \bar{R}_{TNO} , med hjälp av Ekvation 8.

Därefter bedömdes vilken tryckkurva som beskriver de olika uppställningarna utifrån vägledningen i Tabell 4 och Tabell 5. Eftersom vätgas är mycket reaktivt kommer det högre värdet i intervallet som anges i Tabell 4 användas. Experimentdatan jämfördes sedan med samtliga tryckkurvor med hjälp av de statistiska måtten RMSE och MAE. Utifrån resultaten bestämdes vilka kurvor som utgör best-fit och conservative-fit för de olika uppställningarna.

Avslutningsvis plottades den omskalade experimentdatan mot tryckkurvorna utifrån vägledning, conservative-fit och best-fit samt tryckkurvorna 1 och 10 för att visa de övre och nedre gränserna som modellen hanterar.

Nedan i Figur 17 och Tabell 7 presenteras valideringsresultaten från uppställningen *Tankstation*. Antändningsenergin antogs som låg. I bedömningen antogs det att instängdhet inte är etablerad då det endast är en vägg och hindergraden sattes till låg eftersom blockeringsgraden är under 30 %. Utifrån vägledningen i Tabell 4 och Tabell 5 bedöms uppställningen motsvara tryckkurva TNO-3.

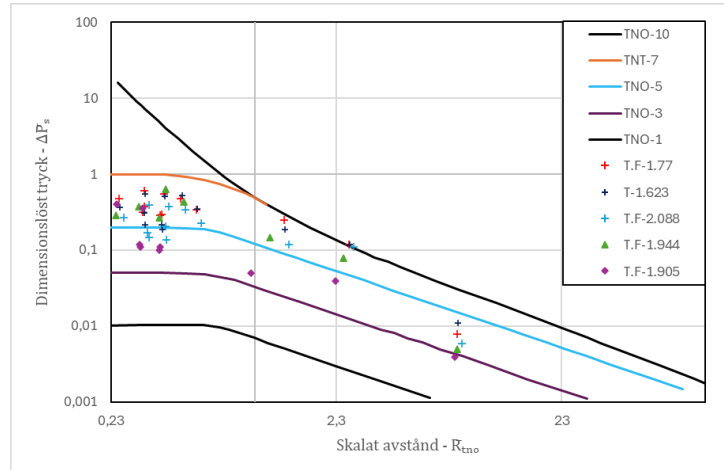


Figur 17: Experimentdata för uppställningen *Tankstation*. Alla försök är fet blandning. Antändningsplacering: Romb (Motorhuv), Triangel (en öppning), Kvadrat (två öppningar), Cirkel (Mellan tankstation)

Tabell 7: RMSE- och MAE-värden för conservative-fit, best-fit och tryckkurva enligt vägledning, Tabell 4.

<i>Conservative-fit</i>	<i>TNO-8</i>	<i>RMSE=1,356</i>	<i>MAE=1,126</i>
<i>Best-fit</i>	<i>TNO-5</i>	<i>RMSE=0,295</i>	<i>MAE=0,091</i>
<i>Vägledning</i>	<i>TNO-3</i>	<i>RMSE=0,336</i>	<i>MAE=0,147</i>

Nedan i Figur 18 och Tabell 8 presenteras valideringsresultaten från uppställningen *Lagringsanläggning* med en vägg. Antändningsenergin antogs vara låg. I bedömningen antogs det även att instängdhet inte är etablerad då det endast är en vägg och hindergraden sattes till låg eftersom blockeringsgraden är under 30 %. Utifrån Tabell 4 och Tabell 5 bedöms uppställningen motsvara tryckkurva TNO-3.

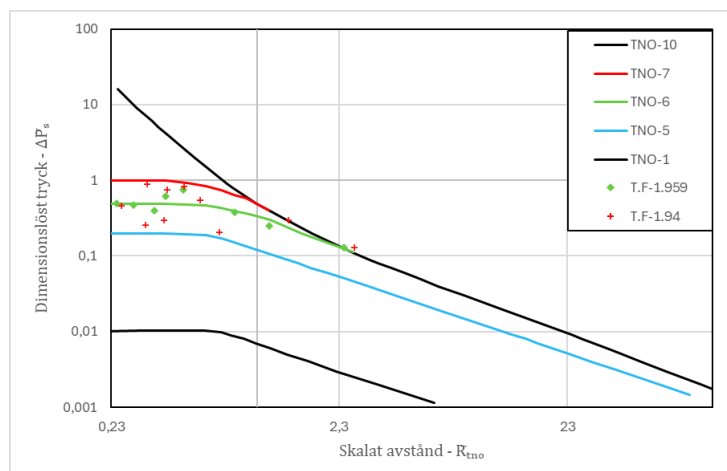


Figur 18: Experimentdata för uppställningen *lagringsanläggning* en vägg jämfört med TNO-modellen. Antändningsplacering: kryss (P1), triangel (P2), romb (P3). F i beskrivning står för fetblandning.

Tabell 8: RMSE- och MAE-värden för conservative-fit, best-fit och tryckkurva enligt vägledning, Tabell 4.

Conservative-fit	TNO-7	RMSE=0,571	MAE=0,489
Best-fit	TNO-5	RMSE=0,166	MAE=0,125
Vägledning	TNO-3	RMSE=0,268	MAE=0,217

Nedan i Figur 19 och Tabell 9 presenteras valideringsresultaten från uppställningen *Lagringsanläggning* med två väggar avsnitt 5.2.. Antändningsenergin antogs vara låg, instängdhet som etablerad då det är två väggar och hindergraden antogs vara låg eftersom blockeringsgraden är under 30 %. Utifrån Tabell 4 och Tabell 5 bedöms uppställningen motsvara tryckkurva TNO-5

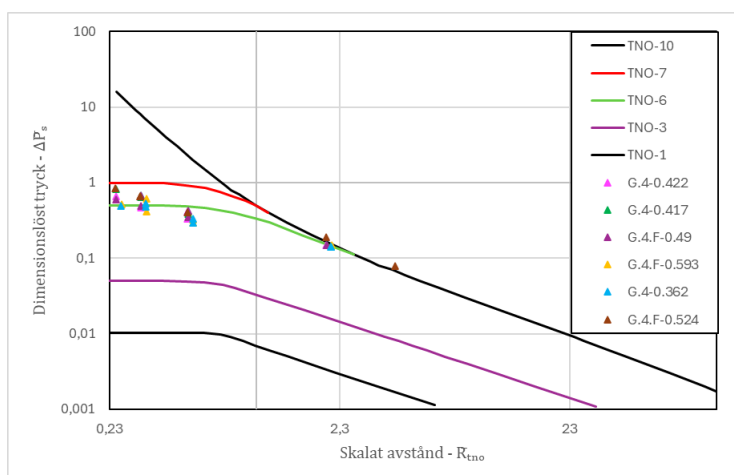


Figur 19: Experimentdata för uppställningen *lagringsanläggning* två väggar jämfört med TNO-modellen. Antändningsplacering: kryss (P1), romb (P3). F i beskrivning står för fetblandning.

Tabell 9: RMSE- och MAE-värden för conservative-fit, best-fit och tryckkurva enligt vägledning, Tabell 4.

Conservative-fit	TNO-7	RMSE=0,412	MAE=0,333
Best-fit	TNO-6	RMSE=0,183	MAE=0,139
Vägledning	TNO-5	RMSE=0,346	MAE=0,285

Nedan i Figur 20 och Tabell 10 presenteras valideringsresultaten från uppställningen Rörledningar med 4 sektioner. Antändningsenergin antogs vara låg, instängdhet är sattes till ej etablerad då det saknas väggar eller barriärer. Hindergraden antogs vara låg då volymblockeringen är under 30 %. Utifrån Tabell 4 och Tabell 5 bedöms uppställningen motsvara tryckkurva TNO-3.

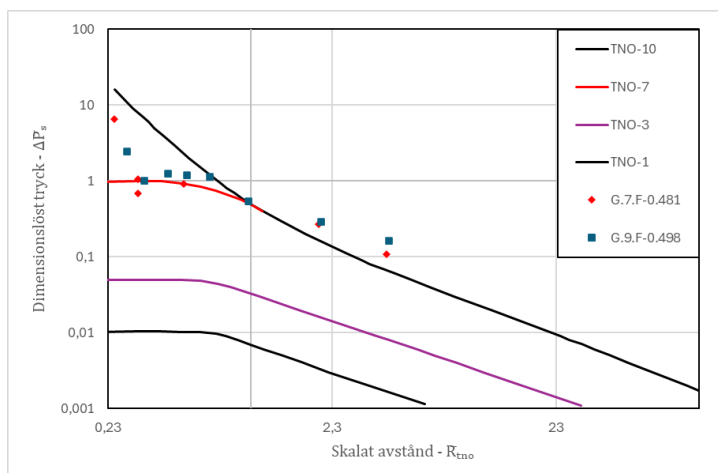


Figur 20: Experimentdata för uppställningen Rörledningar med fyra sektioner jämfört med TNO-modellen. F i beskrivningen står för fet blandning.

Tabell 10: RMSE- och MAE-värden för conservative-fit, best-fit och tryckkurva enligt vägledning, Tabell 4.

Conservative-fit	TNO-7	RMSE=0,426	MAE=0,375
Best-fit	TNO-6	RMSE=0,124	MAE=0,093
Vägledning	TNO-3	RMSE=0,441	MAE=0,398

Nedan i Figur 21 och Tabell 11 presenteras valideringsresultaten från scenariot *Rörledningar* med 7 och 9 sektioner. Antändningsenergin antogs vara låg, instängdhet är ej etablerad då det saknas väggar inom gasmolnet. Den skyddsvägg som finns för uppställningen med nio sektioner är placerad bortom gasmolnet vilket enligt definition i Tabell 5 innebär att uppställningen ska anses vara ej etablerat, enligt Tabell 5. Hindergraden antogs vara låg då volymblockeringen är under 30%. Utifrån Tabell 4 och Tabell 5 bedöms uppställningen motsvara tryckkurva TNO-3.



Figur 21: Experimentdata för uppställningen *Rörledningar* med sju sektioner och nio sektioner jämfört med TNO-modellen. F i beskrivningen står för fet blandning.

Tabell 11: RMSE- och MAE-värden för conservative-fit, best-fit och tryckkurva enligt vägledning, Tabell 4.

<i>Conservative-fit</i>	TNO-10	RMSE=4,825	MAE=3,286
<i>Best-fit</i>	TNO-7	RMSE=1,584	MAE=0,659
<i>Vägledning</i>	TNO-3	RMSE=2,067	MAE=1,303

I Tabell 12 nedan presenteras en sammanställning av RMSE- och MAE-värden för vägledning, best-fit och conservative-fit för de olika experimentuppställningarna.

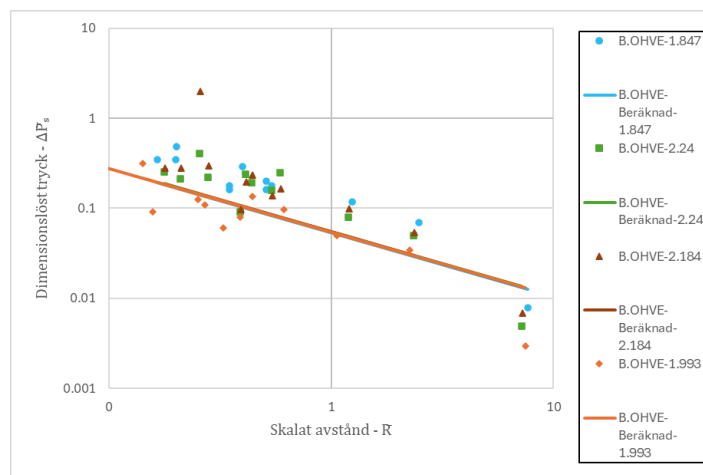
Tabell 12: Sammanställning av RMSE och MAE värden för vägledning, best-fit och conservative-fit för TNO-modellen.

Uppställning	Vägledning	Best-fit	Conservative-fit
<i>Tankstation</i>	TNO-3 RMSE=0,336 MAE=0,147	TNO-5 RMSE=0,295 MAE=0,091	TNO-8 RMSE=1,356 MAE=1,126
<i>Lagringsanläggning en vägg</i>	TNO-3 RMSE=0,268 MAE=0,217	TNO-5 RMSE=0,166 MAE=0,125	TNO-7 RMSE=0,571 MAE=0,489
<i>Lagringsanläggning två Vägg</i>	TNO-5 RMSE=0,347 MAE=0,285	TNO-6 RMSE=0,183 MAE=0,139	TNO-7 RMSE=0,412 MAE=0,333
<i>Rörledningar fyra sektioner</i>	TNO-3 RMSE=0,441 MAE=0,398	TNO-6 RMSE=0,124 MAE=0,093	TNO-7 RMSE=0,426 MAE=0,375
<i>Rörledningar sju & nio sektioner</i>	TNO-3 RMSE=2,067 MAE=1,303	TNO-7 RMSE=1,584 MAE=0,659	TNO-10 RMSE=4,825 MAE=3,286

6.1.3 Validering av OHVE-modellen

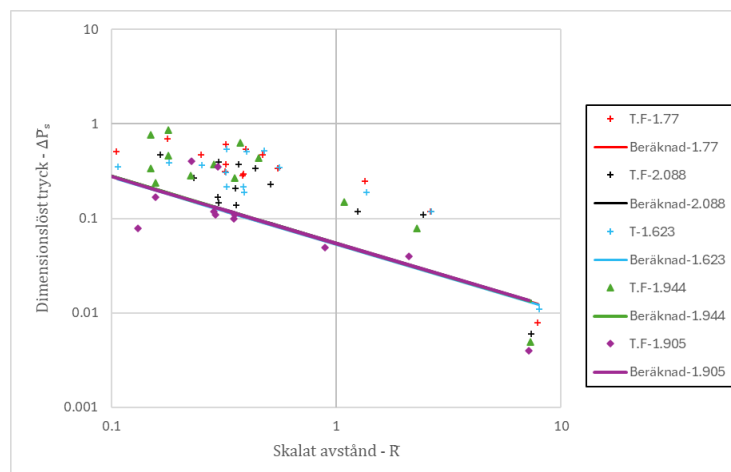
Det första steget i valideringen av OHVE-modellen var att omvandla experimentdata till det skalade avståndet, \bar{R}_{OHVE} , och dimensionslösa övertrycket, \bar{P}_s . Det skalade avståndet \bar{R}_{OHVE} beräknas på samma sätt som \bar{R}_{TNO} . Eftersom modellen tar hänsyn till koncentrationer används den totala massan för gasmolnen som har en fet blandning vid beräkningen av \bar{R}_{OHVE} . Därefter beräknades faktorn A med hjälp av Ekvation 11 för respektive dataset. Det beräknade värdet för faktorn A applicerades sedan i Ekvation 10 för att beräkna det dimensionslösa övertrycket vid de skalade avstånden från experimentdata. Därefter plottades det omskalade experimentdata mot det beräknade dimensionslösa övertrycket. Avslutningsvis jämfördes experimentdata med modellvärdena med hjälp av de statistiska verktygen RMSE och MAE.

I Figur 22 nedan presenteras uppställningen *Tankstation* jämfört med OHVE-modellen. Endast en kurva för OHVE-modellen är synlig i figuren eftersom variationen i koncentration och volym mellan försöken är liten. Då de är ingångsvariablerna för att beräkna faktorn A i Ekvation 11.



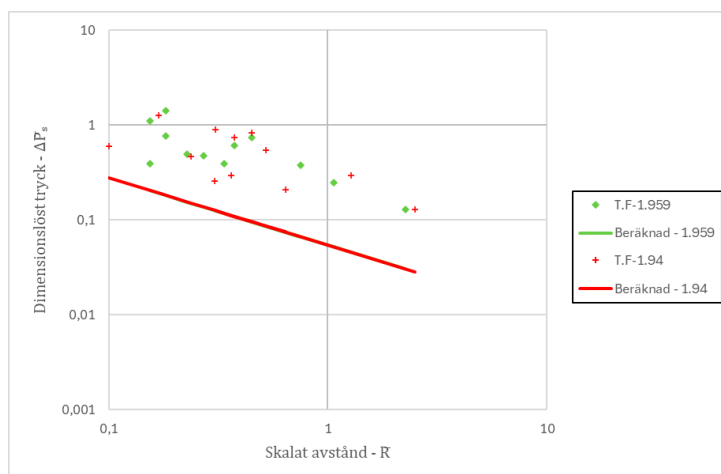
Figur 22: Experimentdata för uppställningen *Tankstation* jämfört med OHVE-modellen. Alla försök är fet blandning. Antändningsplacering: Romb (Motorhuv), Triangel (en öppning), Kvadrat (två öppningar), Cirkel (Mellan tankstation).

I Figur 23 nedan presenteras uppställningen *Lagringsanläggning* med en vägg jämfört med OHVE-modellen. Även för denna uppställning är endast en av modellkurvorna synlig.



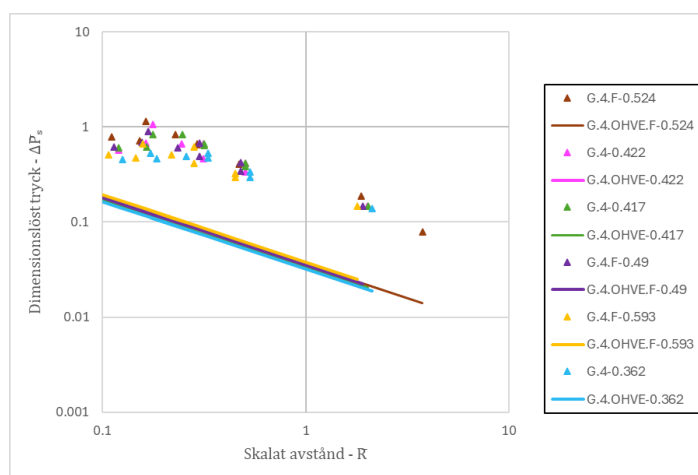
Figur 23: Experimentdata för uppställningen *Lagringsanläggning* en vägg jämfört med OHVE-modellen. Antändningsplacering: kryss (P1), triangel (P2), romb (P3). F i beskrivning står för fetblandning.

I Figur 24 nedan presenteras uppställningen *Lagringsanläggning* med två väggar jämfört med OHVE-modellen. Även för denna uppställning är endast en av modellkurvorna synlig.



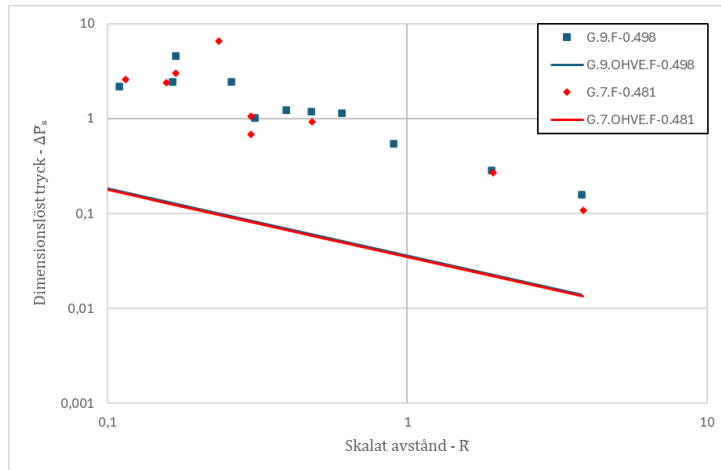
Figur 24: Experimentdata för uppställningen *Lagringsanläggning* två vägg jämfört med OHVE-modellen. Antätningsplacering: kryss (P1), romb (P3). F i beskrivning står för fetblandning.

I Figur 25 nedan presenteras uppställningen *Rörledning* med fyra sektioner jämfört med OHVE-modellen. För denna uppställning är flera av modellkurvorna synliga.



Figur 25: Experimentdata för uppställningen *Rörledning* med fyra sektioner jämfört med OHVE-modellen. F i beskrivningen står för fet blandning.

I Figur 26 nedan presenteras uppställningen *Rörledningar* med sju och nio sektioner jämfört med OHVE-modellen.



Figur 26: Experimentdata för uppställningen *Rörledningar* med sju och nio sektioner jämfört med OHVE-modellen. *F* i beskrivningen står för fet blandning.

I Tabell 13 nedan presenteras RMSE- och MAE-värden för de olika experimentuppställningarna.

Tabell 13: RMSE- och MAE-värden för de olika uppställningarna.

Uppställning	RMSE	MAE
Tankstation	0,296	0,124
Lagringsanläggning en vägg	0,261	0,193
Lagringsanläggning två väggar	0,539	0,445
Rörledningar fyra sektioner	0,467	0,423
Rörledningar sju och nio sektioner	2,374	1,814

6.2 Jetutsläppsexplosion

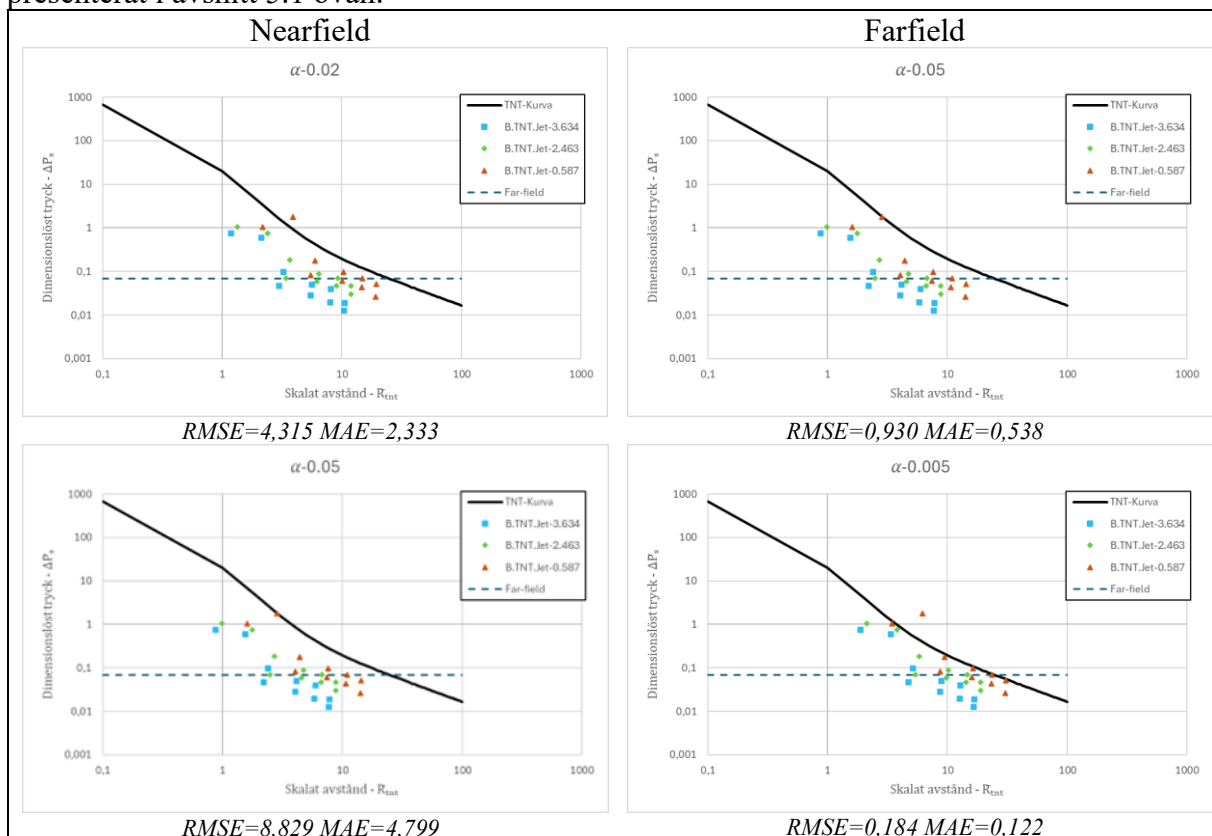
Nedanför kommer samtliga modeller presenteras utifrån experimentdatan för jetutsläppsexplosioner.

6.2.1 Validering av TNT

Det första steget i valideringen av TNT-modellen bestod av att plotta det dimensionslösa övertrycket, \bar{P}_s utifrån Ekvation 6 mot det skalade avståndet, \bar{R}_{TNT} . Därefter omvandlades experimentdata till dimensionslöst övertryck \bar{P}_s och det skalade avståndet \bar{R}_{TNT} , som beräknades med Ekvation 7. I ekvationen användes $\frac{\Delta H_c}{E_{TNT}} = 28,66$ för vätgas hämtat från Rangwala & Zalosh (2023). Sedan plottades experimentdatan mot den framtagna TNT-kurvan med tumregels α -värdet 0,02 och 0,05.

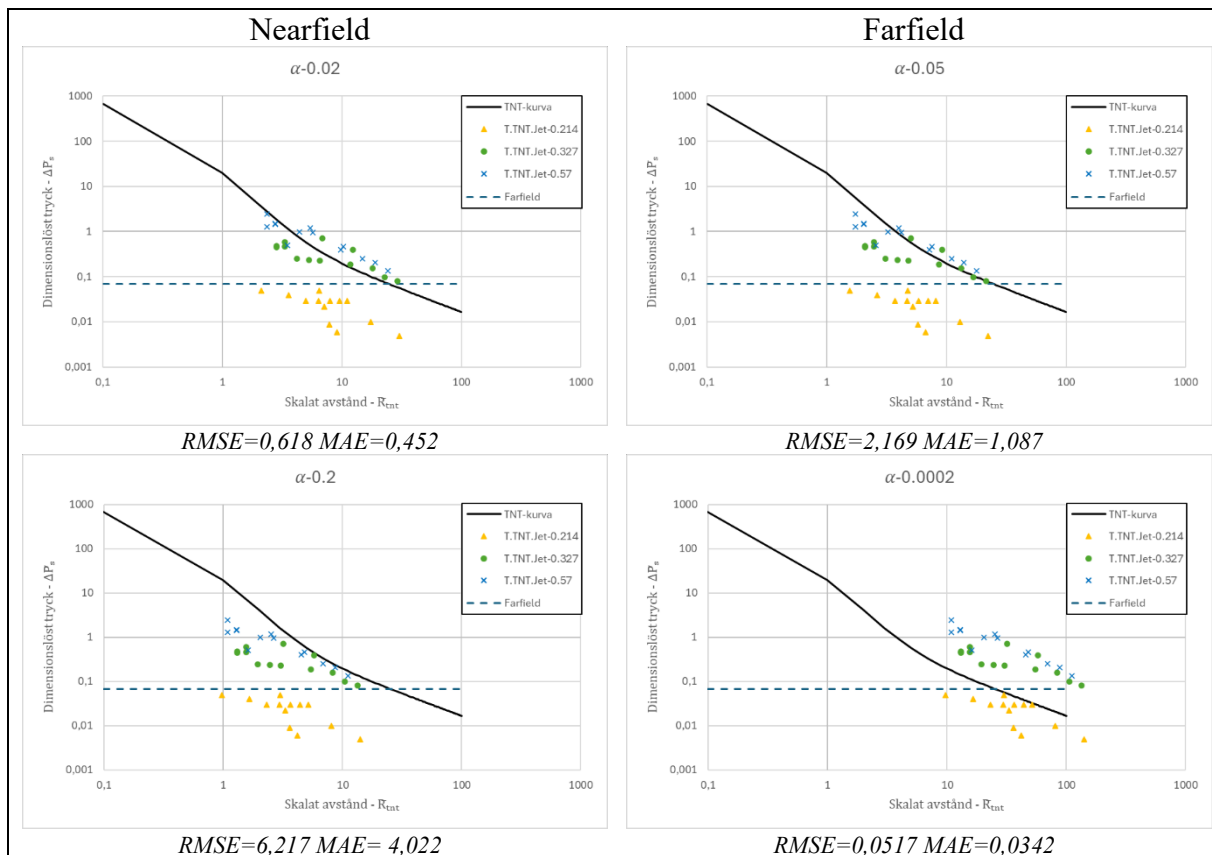
Därpå utfördes iterativa justeringar av α -värdet för att ta fram de α -värden som anpassar experimentdatan utifrån conservative-fit för att bedöma trycket vid near- och farfield. Justeringarna gjordes med målet att samtliga punkter ska hamna under kurvan. Avslutningsvis beräknades RMSE och MAE för de olika fallen.

Nedan i Figur 27 presenteras valideringsresultaten från jetutsläpp uppställningen *Tankstation* presenterat i avsnitt 5.1 ovan.



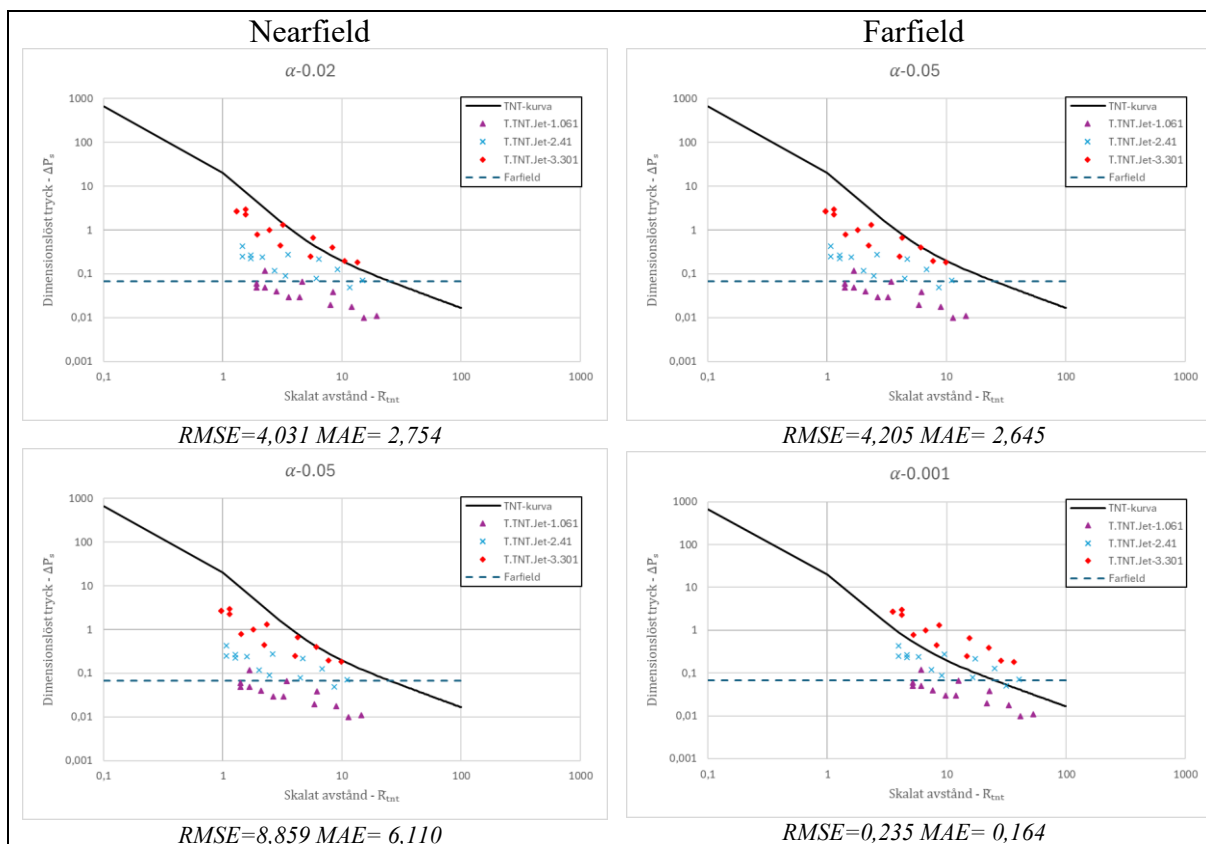
Figur 27: Experimentdata utifrån jetutsläppsexplosioner och uppställningen *Tankstation*. Antändningstider: Triangel 0,7 s, romb 3,1 s, kvadrat 6,1 s. Den övre raden är α enligt de standardiserade tumreglerna. Nedre raden är justerade α -värden.

Nedan i Figur 28 presenteras valideringsresultaten från uppställningen *Lagringsanläggning* med olika utsläppsdiametrar.



Figur 28: Experimentdata utifrån jetutsläppsexplosioner och uppställningen *Lagringsanläggning* med två väggar. Lagringsstryck: ca 40 MPa. Utsläppsdiameter: Cirkel 5,5 mm, Kryss 8 mm, Triangel 8 mm. Utsläppposition: Kryss och Cirkel R1, Triangel R2. Antändningspunkt: Kryss och Cirkel P4, Triangel P1. Antändningstid: ca 0,5 s. Den övre raden är α enligt de standardiserade tumreglerna. Nedre raden är justerade α -värden.

Nedan i Figur 29 presenteras valideringsresultaten från uppställningen *Lagringsanläggning* med olika lagringstryck.



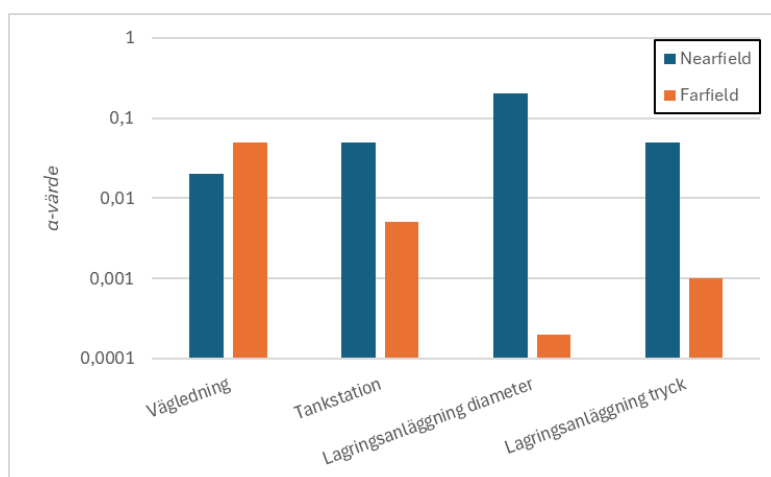
Figur 29: Experimentdata utifrån jetutsläppsexplosioner och uppställningen *Lagringsanläggning* med två väggar. Lagringstryck: Romb 40 MPa, Kryss 25,55 MPa, Triangel 10,15 MPa. Antändningspunkt P4. Antändningstid: ca 5 s. Den övre raden är α enligt de standardiserade tumreglerna. Nedre raden är justerade α -värden.

En sammanställning av RMSE- och MAE-värdet för tumregels α -värdet samt det justerade värdet för samtliga uppställningar presenteras i Tabell 14 nedan.

Tabell 14: Sammanfattning av RMSE- och MAE-värden utifrån tumregler och justerade värden.

Uppställning	Nearfield	Farfield
Tankstation	Tumregel $\alpha=0,02$, RMSE=4,315 MAE=2,333	Tumregel $\alpha=0,05$ RMSE=0,930 MAE=0,538
	Justerat $\alpha=0,05$, RMSE=8,829 MAE=4,799	Justerat $\alpha=0,005$, RMSE=0,184 MAE=0,122
Lagringsanläggning 2 Vägg Diameter	Tumregel $\alpha=0,02$, RMSE=0,618 MAE=0,452	Tumregel $\alpha=0,05$ RMSE=2,169 MAE=1,087
	Justerat $\alpha=0,2$, RMSE=6,217 MAE= 4,022	Justerat $\alpha=0,0002$, RMSE=0,0517 MAE=0,0342
Lagringsanläggning 2 Vägg L.Tryck	Tumregel $\alpha=0,02$, RMSE=4,031 MAE= 2,754	Tumregel $\alpha=0,05$ RMSE=4,205 MAE= 2,645
	Justerat $\alpha=0,05$, RMSE=8,859 MAE= 6,110	Justerat $\alpha=0,001$, RMSE=0,235 MAE= 0,164

I Figur 30 nedan presenteras α -värdet från vägledningen samt de justerade värdena för de olika uppställningarna.

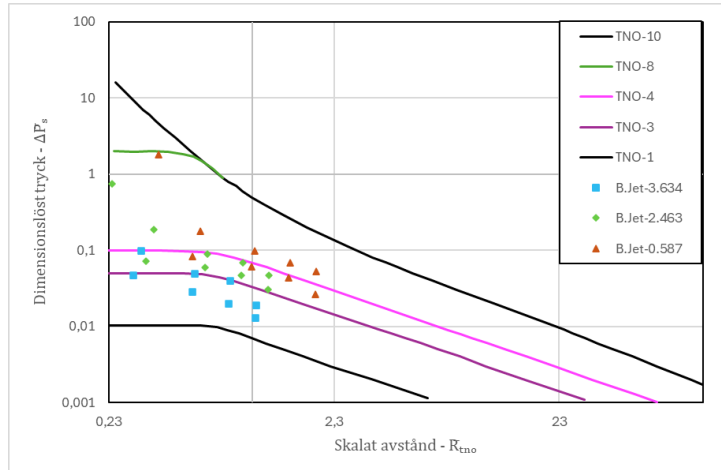


Figur 30: Sammanfattning av α -värdet från vägledning och justerade värden.

6.2.2 Validering av TNO

Det först steget av valideringen av TNO-modellen var att omvandla den insamlade experimentdatan till det dimensionslösa trycket, \bar{P}_s , och det skalade avståndet, \bar{R}_{TNO} . Först beräknades energiinnehållet i gasmolnet, E , med utgångspunkt att $\Delta H_c=120$ MJ/kg (Rangwala & Zalosh, 2023). Det beräknade energiinnehållet användes sedan för att omvandla experimentdatan till det skalade avståndet, \bar{R}_{TNO} , med hjälp av Ekvation 8. Därefter bedömdes vilken tryckkurva som beskriver de olika uppställningarna utifrån vägledningen i Tabell 4 och Tabell 5. Eftersom vätgas är mycket reaktivt kommer det högre värdet i intervallet som anges i Tabell 4 användas. Experimentdatan jämfördes sedan med samtliga tryckkurvor med hjälp av RMSE och MAE. Utifrån resultaten bestämdes vilka kurvor som utgör best-fit och conservative-fit för de olika uppställningarna. Avslutningsvis plottades den omskalade experimentdatan mot tryckkurvorna utifrån vägledning, conservative-fit och best-fit samt tryckkurvorna 1 och 10 för att visa de övre och nedre gränserna som modellen hanterar.

Nedan i Figur 31 och Tabell 15 presenteras valideringsresultaten från uppställningen *Tankstation*. Antändningsenergin antogs vara låg. I bedömningen antogs det även att instängdhet är ej etablerad då det endast är en vägg och hindergraden sattes till låg eftersom blockeringsgraden är under 30 %. Utifrån Tabell 4 och Tabell 5 bedöms uppställningen motsvara tryckkurva TNO-3.

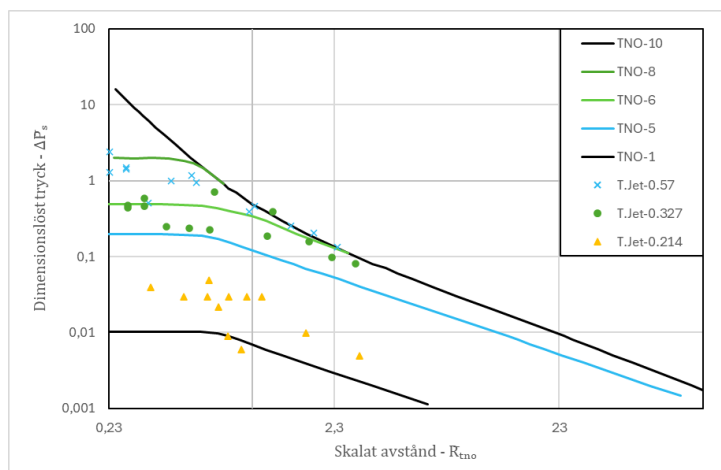


Figur 31: Experimentdata utifrån jetutsläppsexplosioner och uppställningen *Tankstation*. Antändningstider: Triangel 0,7 s, romb 3,1 s, kvadrat 6,1 s.

Tabell 15: RMSE- och MAE-värden för conservative-fit, best-fit och tryckkurva enligt vägledning, Tabell 4.

Conservative-fit	TNO-8	RMSE= 1,130	MAE=0,915
Best-fit	TNO-4	RMSE= 0,357	MAE=0,120
Vägledning	TNO-3	RMSE= 0,370	MAE=0,123

Nedan i Figur 32 och Tabell 16 presenteras valideringsresultaten från uppställningen *Lagringsanläggning*. Antändningsenergin antogs vara låg, instängdhet bedömdes vara etablerad då uppställningen har två väggar och hindergraden antogs vara låg eftersom blockeringsgrad är under 30 %. Utifrån Tabell 4 och Tabell 5 bedöms uppställningen motsvara tryckkurva TNO-5.

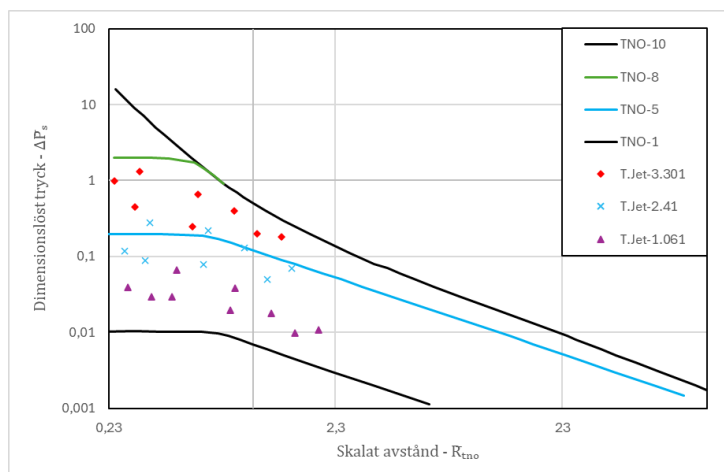


Figur 32: Experimentdata utifrån jetutsläppsexplosioner och uppställningen *Lagringsanläggning* med två väggar. Lagringstryck: ca 40 MPa. Utsläppsdiameter: Cirkel 5,5 mm, Kryss 8 mm, Triangel 8 mm. Utsläppsposition: Kryss och Cirkel R1, Triangel R2. Antändningspunkt: Kryss och Cirkel P4, Triangel P1. Antändningstid: ca 0,5 s.

Tabell 16: RMSE- och MAE-värden för conservative-fit, best-fit och tryckkurva enligt vägledning, Tabell 4.

<i>Conservative-fit</i>	<i>TNO-8</i>	<i>RMSE= 0,984</i>	<i>MAE=0,761</i>
<i>Best-fit</i>	<i>TNO-6</i>	<i>RMSE= 0,482</i>	<i>MAE=0,324</i>
<i>Vägledning</i>	<i>TNO-5</i>	<i>RMSE=0,572</i>	<i>MAE=0,351</i>

Nedan i Figur 33 och Tabell 17 presenteras valideringsresultaten från uppställningen *Lagringsanläggning*. Antändningsenergin antogs vara låg, instängdhet bedömdes vara etablerad då uppställningen har två väggar och hindergraden antogs vara låg eftersom blockeringsgrad är under 30 %. Utifrån Tabell 4 och Tabell 5 bedöms uppställningen motsvara tryckkurva TNO-5.



Figur 33: Experimentdata utifrån jetutsläppsexplosioner och uppställningen *Lagringsanläggning* med två väggar. Lagringstryck: Romb 40 MPa, Kryss 25,55 MPa, Triangel 10,15 MPa. Antändningspunkt P4. Antändningstid: ca 5 s.

Tabell 17: RMSE- och MAE-värden för conservative-fit, best-fit och tryckkurva enligt vägledning, Tabell 4.

<i>Conservative-fit</i>	<i>TNO-8</i>	<i>RMSE= 1,215</i>	<i>MAE=1,010</i>
<i>Best-fit</i>	<i>TNO-5</i>	<i>RMSE= 0,309</i>	<i>MAE=0,185</i>
<i>Vägledning</i>	<i>TNO-5</i>	<i>RMSE= 0,309</i>	<i>MAE=0,185</i>

I Tabell 18 nedan presenteras en sammanställning av RMSE- och MAE-värden för vägledning, best-fit och conservative-fit för de olika experimentuppställningarna.

Tabell 18: Sammanställning av RMSE och MAE värden för vägledning, best-fit och conservative-fit för TNO-modellen.

<i>Uppställning</i>	<i>Vägledning</i>	<i>Best-fit</i>	<i>Conservative-fit</i>
<i>Tankstation</i>	<i>TNO-3</i> <i>RMSE= 0,370 MAE=0,123</i>	<i>TNO-4</i> <i>RMSE= 0,357 MAE=0,120</i>	<i>TNO-8</i> <i>RMSE= 1,130 MAE=0,915</i>
<i>Lagringsanläggning en vägg</i>	<i>TNO-5</i> <i>RMSE=0,572MAE=0,351</i>	<i>TNO-6</i> <i>RMSE= 0,482 MAE=0,324</i>	<i>TNO-8</i> <i>RMSE= 0,984 MAE=0,761</i>
<i>Lagringsanläggning 2 Vägg Diameter</i>	<i>TNO-5</i> <i>RMSE= 0,309 MAE=0,185</i>	<i>TNO-5</i> <i>RMSE= 0,309 MAE=0,185</i>	<i>TNO-8</i> <i>RMSE= 1,215 MAE=1,010</i>

7 Diskussion

I följande avsnitt diskuteras övergripande observationer från experimentdatan, modellspecifika observationer och slutligen felkällor eller osäkerheter i arbetet.

7.1 Allmänt

Ett övergripande mönster som kunde identifieras i experimentdatan är att storleken och formen på hinder har betydande inverkan på övertrycket. Valideringen visar att uppställningen *Rörledning* som har många upprepade mindre hinder genererar högre övertryck än de andra uppställningarna trots en lägre blockeringsgrad. Detta indikerar att hinderstrukturen, antal hinder och hinderstorlek, har stor betydelse och enbart blockeringsgrad är inte tillräckligt för att beräkna explosionsstyrkan. Detta ligger i linje med vad Johansson (2017) presenterar. Trots att detta är känt inom forskningsfältet beaktar ingen av modellerna hinderstrukturen. TNO-modellen är den enda av de studerade modellerna som försöker beskriva hinder utifrån blockeringsgrad men som experimentdatan och litteraturen visar är blockeringsgraden inte den enda faktorn som avgör hur hinder påverkar explosionsstyrkan.

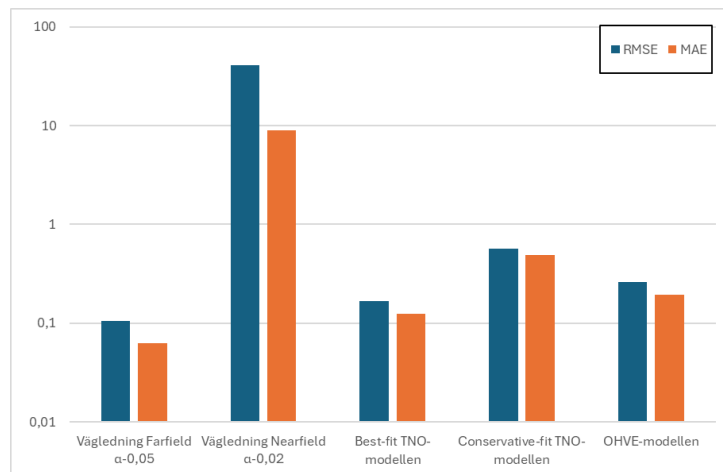
Vidare kunde det observeras att conservative-fit för jetutsläpp resulterade i ett högre övertryck än motsvarande uppställning för de förblandade fallen, trots att den totala vätgasmassan generellt var mindre i jetutsläppfallen. För jetutsläppsexplosionerna identifierades vissa ingångsparametrar som har en tydlig påverkan på övertrycket, främst lagringstrycket och antändningstiden. Experimentdatan visar även att variation av utsläppsdiametern tycks påverka, dock i en mindre utsträckning. Det framgår i Figur 33 att ett högre lagringstryck leder till ett högre övertryck vid jetutsläppsexplosioner. Det kan även noteras i Figur 31 att den antändningstid som genererade störst tryck är de som är närmst 0,6 s vilket överensstämmer väl med den data som Royle & Willoughby (2011) presenterar. Det är sannolikt att dessa parametrar bidrar till att högre conservative-fit kurvor behövs för jetutsläppsexplosionerna. Lagringstrycket och antändningstiden påverkan på explosionsförloppet kan troligen kopplas till den initiala turbulensen. Ett högre lagringstryck ger upphov till en mer intensiv turbulent jetstråle än lägre lagringstryck. Tidig antändning innebär även en hög flödes hastigheten då trycket inte hunnit avta i lagringstanken. En hög flödes hastighet innebär en högre grad av turbulens. Detta indikerar att en parameter som beskriver utsläppturbulensen bör inkluderas i modellering av jetutsläpp.

7.2 Diskussion av TNT – modellen

TNT-modellen är beräkningsmässigt en enkel modell för att uppskatta övertrycket vid en gasmolnexplosion. Det krävs inte detaljerad indata som hindergeometri, instängdhet, information om utsläppsscenario etcetera. Det gör modellen enkel att applicera då endast en uppskattning av explosiv massa och α -värde krävs. Enkelheten innebär dock vissa begränsningar när det kommer till precision och användningsområde.

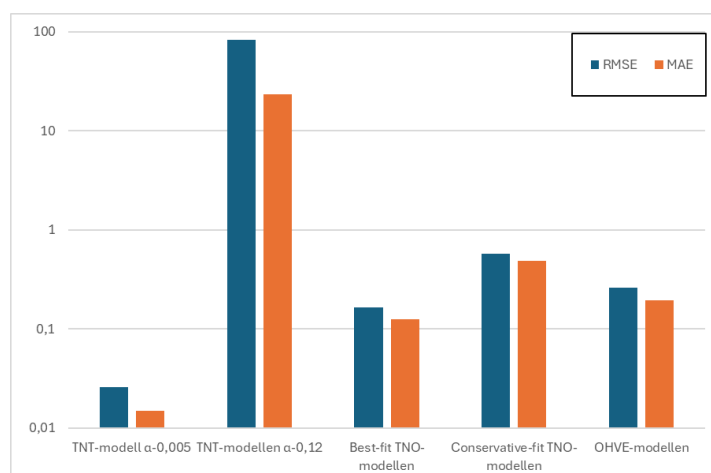
Ett problem med TNT-modellen är att kurvan har en lutning som inte överensstämmer med tryckprofilen som gasmolnexplosioner genererar. Modellen är även inkonsekvent i sin prediktionsförmåga då den ibland överskattar och ibland underskattar övertrycket. Tumregelsvärdena av α för farfield och nearfield är framtagna för att bättre anpassa modellen till gasmolnexplosioner. Valideringen visar dock att användningen av dessa α -värden inte beskriver tryckprofilen korrekt. Enligt tumreglerna ska α -värdet vara lägre för nearfield än vad det är för farfield men baserat på de justerade värdena visas det omvända mönstret, se Figur 16 och Figur 30.

Vid jämförelse av TNT-modellen med TNO-modellen och OHVE-modellen framträder ytterligare svagheter med nearfield och farfield. I Figur 34 nedan presenteras *Lagringsanläggning en vägg* vilket var uppställningen som hade det lägsta värdet på RMSE och MAE för farfield. I figuren presenteras även motsvarande värden för TNO-modellen och OHVE-modellen för samma uppställning. Trots att TNT-modellen har det lägsta RMSE och MAE värdet för farfield har modellen ett betydligt högre RMSE och MAE värden på nearfield än de övriga modellernas RMSE och MAE värden. Detta innebär att TNT-modellen endast beskriver farfield väl eftersom experimentdatan passar dåligt för nearfield. Detta mönster, att farfield överensstämmer väl med experimentdata medan nearfield inte gör det, gäller även för de övriga uppställningarna för både förblandade gasmoln och jetutsläpp.



Figur 34: Jämförelse mellan RMSE och MAE för respektive modell på uppställningen, *Lagringsanläggning en vägg*. TNT-modellen presenteras utifrån vägledning ($\alpha = 0,02$ och $\alpha = 0,05$). För TNO: Best-fit TNO-5, Conservative-fit TNO-8. OHVE efter vägledning.

Om samma uppställning i stället jämförs med ett justerat α -värde (conservative-fit) för TNT-modellen följs samma mönster som ovan, se Figur 35. Det är tydligt att TNT-modellen kraftigt underpresterar på nearfield jämfört med de övriga modellerna. För att en modell ska vara användbar i explosionsanalyser måste modellen kunna beskriva hela förloppet, inklusive nearfield vilket TNT-modellen inte klarar av.

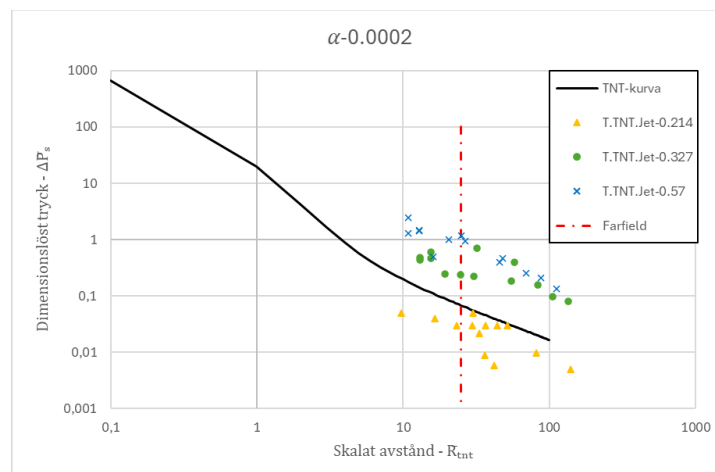


Figur 35: Jämförelse mellan RMSE och MAE för respektive modell på uppställningen, *Lagringsanläggning en vägg*. TNT-modellen presenteras utifrån justerade värden. För TNO: Best-fit TNO-5, Conservative-fit TNO-8. OHVE efter vägledning.

En anledning till att TNT-modellen får de höga RMSE och MAE värdena för nearfield är att modellen systematiskt överskattar trycket, speciellt vid låga \bar{R}_{TNT} . I många fall blir överskattningarna väldigt stora, ett exempel är Figur 11 ($\alpha=0,02$, nearfield) där uppskattar modellen ett värde som är 1336 gånger större än experimentdatan. Detta beror troligen på hur modellen är uppbyggd. Modellen utgår ifrån att sprängämnet TNT exploderar vilket ger en mycket högre trycktopp än vad gasmolnexplosioner genererar. Tryckvågens skarpa form från en detonation är svårare att upprätthålla än den mer bulliga strukturen hos tryckvågen från en deflagration. Omvandlingen av gasmoln till ett fast sprängämne verkar inte vara en lämplig modellstruktur för att beskriva gasmolnexplosioner.

Sammantaget uppvisar både den etablerade tumregeln och det justerade α -värdet för nearfield höga RMSE och MAE värden. Modellen kan därmed inte beskriva experimentdatan tillförlitligt i detta område, utan avviker kraftigt från experimentdatan. Däremot uppvisas en betydligt bättre överensstämmelse mellan experimentdatan och modellen för farfield. En möjlig förklaring till detta kan vara hur farfield definieras och därmed även hur experimentdatan valdes ut för valideringen. Eftersom farfield är definierat utifrån trycket var det endast datapunkterna som underskrider 6,9 kPa som används i beräkningarna för RMSE och MAE. De datapunkter vars tryck överskrider 6,9 kPa, men som har ett skalat avstånd vilket motsvarar farfield, inkluderas inte i bedömningen av farfield. Det innebär att utvärderingen begränsas till ett mindre antal datapunkter, vilket kan ge en lägre spridning och därmed även ett skenbart bättre felmått.

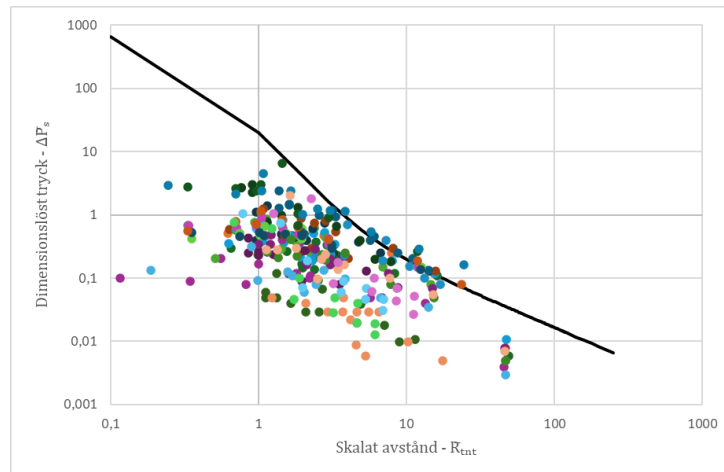
I Figur 36 nedan förtydligas detta genom att definiera farfield utifrån det skalade avståndet i stället för tryck. Definitionen medför således att datapunkter som enligt det skalade avståndet kan betraktas som farfield exkluderas enbart på grund av tryckkriteriet. Att modellen uppvisar låga RMSE och MAE är därför inte nödvändigtvis ett tecken på att modellen passar bra på farfield, utan kan snarare vara en konsekvens av att analysen endast omfattar datapunkter som per definition ligger under gränsvärdet.



Figur 36: Jetutsläppsexplosion vid uppställningen Lagringsanläggning med farfield definierat utifrån \bar{R}_{TNT} i stället för tryck.

Trots att tidigare studier anger ett generellt konservativt α -värde, visar resultaten i arbetet på betydande avvikelser vid tillämpning på vätgasexplosioner. Enligt Sochet (2010) kan ett värde på 0,1 användas för att beskriva 97 % konfidensintervall av alla explosioner utan underskattning. Detta värde bör därmed kunna användas för att ge en konservativ uppskattning av övertrycket för en majoritet av möjliga explosioner. Valideringen visar dock att uppställningarna *Lagringsanläggning* och *Rörledning* med fyra sektioner kräver α -värden över 0,1 för att inte underskatta någon datapunkt. För uppställningen *Rörledning*

med sju och nio sektioner behövs $\alpha = 1,0$ för att inte underskatta någon datapunkt. Ett α -värde på 1,0 är mycket högt och kan eventuellt bero på av mätosäkerheter vid experimenttillfället. Även om detta värde bortses från kan det konservativa värdet angivet i litteraturen inte anses vara tillräckligt konservativt. Det går därmed inte att tillämpa $\alpha = 0,1$ för gasmolnexplosioner med vätgas om ingen experimentdata får underskattas. **I Fel! Hittar inte referenskälla.** nedan visas samtliga data punkter med $\alpha = 0,1$.



Figur 37: TNT-modellen med samtliga experimentdata och α -värdet = 0,1.

Sammanfattningsvis ger TNT-modellen endast en grov uppskattning av övertrycket vid explosioner. De etablerade tumreglerna är inte konsekventa då den både överskattar och underskattar experimentdatan. Även det konservativa α -värdet 0,1 som presenteras i litteraturen underskattar delar av experimentdatan. Det innebär att värdet inte är tillräckligt konservativt då flera datapunkter underskattas. Modellen kan anpassas för olika miljöer genom att justera α -värdet. Det finns dock ingen vägledning kopplat till val av miljöspecifika α -värden. Även om justering görs har modellen fortfarande flera brister vilket gör miljöspecifika α -värden irrelevanta. Modellen har dålig prediktionsförmåga vid låga \bar{R}_{TNT} och kurvans lutning överensstämmer inte med gasmolnexplosioners tryckprofil.

På grund av TNT-modellens brister anses det därmed att modellen inte är lämplig för att uppskatta gasmolnexplosioner med vätgas.

7.3 Diskussion av TNO – modellen

TNO-modellen är mer avancerad än TNT-modellen vilket även speglas i hur väl modellen kan uppskatta övertrycket vid gasmolnexplosioner med vätgas. Med rätt val av tryckkurva kan förloppet beskrivas väl, med endast mindre avvikelser från experimentdatan. Däremot är valet av en tryckkurva en av svagheterna med modellen. Valet kan vara subjektivt och den rådande vägledningen fångar inte upp alla parametrar som påverkar explosioner.

Valideringen visar att TNO-modellens tryckkurvor i många fall beskriver förloppet relativt väl. Värdena för RMSE och MAE är låga för best-fit kurvorna och beskriver därmed förloppet väl. Valideringen visar även att kurvorna som bedöms som conservative-fit generellt har låga värden på RMSE och MAE trots en inbyggd grad av fel, eftersom ingen datapunkt underskattas leder det till att flera punkter överskattas. Med rätt val av kurva kan modellen representera experimentdatan väl antingen genom best-fit eller conservative-fit med en acceptabel precisionsnivå.

Det identifierades dock i valideringen att rådande vägledning ofta leder till att *fel* kurva väljs. I många miljöer leder vägledningen till att TNO-3 ska appliceras, vilket utifrån experimentdatan alltid är en underskattning av trycket. Därmed anses det att vägledningen är bristfällig eftersom den systematiskt underskattar explosionsstyrkan. Det beror troligen på att definitionerna av parametrarna som presenteras i vägledningen, se Tabell 5, är missvisande.

En parameter som är missvisande och inte stämmer överens med experimentdatan är hindergraden. Enligt definitionen klassas hindergraden som hög om blockeringsgraden är 30 % eller mer. Blockeringsgraden för uppställningarna *Tankstation* och *Lagringsanläggning* är mellan cirka 12–16,56 % men uppvisar tryck som följer tryckkurvor som närmare motsvarar hög hindergrad enligt Tabell 4. Felbedömningen av dessa uppställningar skulle det kunna förklaras av antagandet som gjordes tidigare att hela uppställningsmiljön kan klassas som en explosionszon. Om en snävare klassificering av explosionszoner görs där till exempel tankarna i uppställningen *Lagringsanläggning* ansätts som en explosionszon blir hindergraden betydligt högre. Klassning skulle bli hög hindergrad för explosionszonen kring tankarna och låg hindergrad för explosionszonen runt om tankarna.

Felaktig indelning av explosionszonerna kan däremot inte förklara att experimentdatan för uppställningen *Rörledning* får tryck som motsvarar hög hindergrad. Uppställningen kan inte delas in i olika explosionszoner då hinder förekommer i hela molnet. Experimentdatan visar att uppställningen genererar tryck som följer tryckkurvor som motsvarar en hög hindergrad, trots att uppställningen har den lägsta blockeringsgraden av de olika uppställningarna på endast 2,82–4%. Det tyder på att definitionen av hindergrad från Tabell 5 inte är applicerbar på vätgas. Vi anser att det inte är lämpligt att enbart använda hindergrad i form av blockerad volymandel för att definiera hindergraden. Enligt Johansson (2017) är storleken på hinder och mängden hinder relevanta parametrar för att uppskatta tryckbildningen vilket bekräftas av experimentdatan. Vägledningen för hindergrad bör därmed justeras utifrån fler parametrar för att bättre kunna beskriva hindergraden. Vägledningen skulle exempelvis kunna inkludera hinderdiameter och antalet hinder.

En ytterligare kritik mot definitionerna som ges i vägledningen är definitionen av instängdhet. Vägledningen beskriver gasmoln som begränsas av två och tre väggar som *etablerad* instängdhet och inga väggar som *ej etablerad* instängdhet. Däremot utelämnas fallet då en vägg förekommer. Det skapar användningsosäkerheter och inslag av subjektivitet för valet av instängdhetsgrad vilket motarbetar syftet med en vägledning. Om antagande görs att en vägg kan anses vara etablerad ska experimentdatan med en vägg enligt vägledningen då följa TNO-5, givet att övriga parametrar lämnas orörda. Det överensstämmer bättre med experimentdatan även om tryckkurvan fortfarande underskattar experimentdatan något. Om en justering av definitionen av hindergrad och instängdhet däremot görs samtidigt kommer experimentdatan att överskattas. Det är möjligt att en ytterligare nivå av instängdhet behövs för att beskriva experimentdatan bättre.

En annan svaghet med vägledningen är att den inte är anpassad för jetutsläpp, vilket medförde att antaganden gjordes vid valet av tryckkurvor. Vägledningen beaktar enbart hindergrad, instängdhet och antändningsenergi. Vid jetutsläpp kan dock både hindergraden och instängdheten variera beroende på jetstrålens riktning och hur gasen sprids bort från strålen. Variationen gör att hindergrad och instängdhet är svåra att uppskatta. I valideringen antogs det därför att hindergraden, instängdheten och placeringen är samma som för uppställningarnas förblandade fall.

Som tidigare konstaterat visar valideringen att conservative-fit för jetutsläppexplosionerna generellt är något högre, även om mindre massa deltog i explosionen. För TNO-modellen innebär det att jetutsläppen generellt beskrivs av en tryckkurva över de förblandade fallen. Den troliga förklaringen är den högre initiala turbulensen som genereras av gasstrålen. Utifrån de observerade mönstren kan det därför diskuteras om den initiala turbulensen kan approximeras genom att utgå från motsvarande förblandat fall och därefter höja styrkan med ett steg. Exempelvis om ett förblandat fall för en miljö ger TNO-5, skulle motsvarande TNO-6 bestämmas för jetutsläppexplosioner. Det är dock viktigt att betona att detta är en grov förenkling med osäkerheter. En sådan justering bör i så fall endast användas i conservative-fit syfte. För att uppnå en träffsäker best-fit kurva måste den initiala turbulensen kvantifieras mer detaljerat. I nuläget finns det ingen tydlig vägledning för att hantera jetstrålens turbulens.

En ytterligare oklarhet med modellens tillämpning är gränsdragningen mellan hinder och instängdhet. Det saknas tydliga kriterier för när ett objekt ska betraktas som ett hinder eller som instängdhet. Ett exempel är i miljön *Lagringsanläggning*, där gasen befinner sig mellan lagringstankarna. Ur ett helhetsperspektiv kan tankarna tolkas som hinder, medan gasvolymen mellan tankarna samtidigt kan lokalt betraktas som instängd. Liknande tolkningsproblem uppstår vid närvaro av väggar. Om en vägg reduceras i storlek kan den, beroende på utformning, övergå från att klassificeras som instängdhet till att uppfattas som ett hinder. Övergången mellan hinder och instängdhet är väldigt diffus. Avsaknaden av tydliga definitioner och kriterier medför ett betydande utrymme för subjektiva tolkningar, vilket kan resultera i att olämpliga kurvor väljs ut. Tydligare kriterier för när ett objekt ska betraktas som hinder respektive instängdhet hade möjligtvis kunnat underlätta valet av kurvor.

Samtidigt innebär fasta gränsvärden och kriterier för att minska tolkningsmöjligheten andra begränsningar. Fasta värdenas svaghet kan observeras hos definitionen av *hög hindergraden* vid 30 % blockeringsgrad då det fasta värdet inte alls överensstämmer med experimentdatan. Verkliga scenarier är sällan binära, vilket innebär att alltför strikta kriterier riskerar att förenkla komplexa miljöer på ett missvisande sätt. Detta kan i sin tur leda till liknande problem som vägledningen redan står inför. Det finns därmed inte ett entydigt sätt att hantera denna problematik. Strikta kriterier kan minska tolkningsosäkerheter, men samtidigt kräver realistiska scenarier en viss flexibilitet i modellens tillämpning.

En potentiell anledning varför vägledningen av tryckkurvor misslyckas och att *fel* kurva väljs kan vara för att experimentutsläppmiljöer är extrema. TNO-modellen är utformad för att fånga in ett brett spektrum av gasmolnexplosioner, så som utsläpp av tyngre gaser som kan bilda mycket stora gasmoln där flera olika explosionszoner kan uppstå. Dessa typer av scenarier skiljer sig markant från experimentuppställningarna, som i stället representerar mindre gasmoln med endast en explosionszon och med en reaktiv gas. Experimenten kan därmed potentiellt beaktas som en extrempunkt inom modellens användningsintervall, vilket kan bidra till att vägledningens träffsäkerhet blir försämrad.

Till sist gällande brister och osäkerheter kan det även noteras att vissa mätpunkter underskattas av samtliga tryckkurvor. För uppställningen *Lagringsanläggning* med två väggar, Figur 18, och uppställningen *Rörledningar*, Figur 19 och Figur 20, förekommer flera mätpunkter som ligger ovanför alla tryckkurvor. Oavsett vilken kurva som väljs underskattar modellen dessa datapunkter. En möjlig förklaring är att kurvorna är framtagna som best-fit för flera olika gaser vilket innebär att extrempunkter underskattas. Eftersom *Rörledningar* med sju och nio sektioner även kräver ett mycket högt α -värde för TNT-modellen är det möjligt att TNO-modellens underskattning beror på mätosäkerheter vid experimentet. Dock eftersom det

är de kraftigaste explosionerna i experimentdatan som systematisk underskattas väcks frågan om en ytterligare kurva hade behövts för att kunna beskriva starkare explosioner.

En aspekt som inte behandlades i valideringen är modellens förmåga att uppskatta impulsen. Eftersom vägledningen uppvisar avvikelser i beräkningen av övertrycket kan det konstateras att även impulsen riskerar att missbedömas, då den är direkt beroende av det beräknade trycket. Vidare skiljer sig vätgas från kolvätebaserade gaser genom att impulsbelastningen generellt är lägre i förhållande till övertrycket, till följd av den kortare varaktigheten hos tryckvågen. Det hade därför varit intressant att undersöka huruvida modellen kan beskriva impulsen för vätgas. Om modellen kan beskriva både det maximala övertrycket och impulsen med god precision skulle det stärka dess relevans för riskanalyser då den också kommer fånga in den tidsberoendebelastning, vilket är särskilt betydelsefullt vid dimensionering av byggnader.

Avslutningsvis anser vi att modellens olika explosionskurvor kan beskriva explosionsförloppen tillfredställande, både utifrån best-fit och conservative-fit, men den vägledningen som finns för valet av tryckkurva är opålitlig och missvisande. Vägledningens parametrar är otydliga och öppna för subjektiv tolkning, samt att explosionskurvorna alltid underskattas om vägledningen följs. Vidare studier bör därmed utföras för att ta fram en uppdaterad vägledning som kan ge rättvisande kurvor. Tills dess att en uppdaterad vägledning är framtagen föreslås det att en ingenjörsmässig bedömning baserat på experimentdata utförs för att välja lämpliga tryckkurvor. Om en riskanalys ska utföras på en tankstation (eller liknade miljöuppbyggnad) bör en tryckkurva väljas utifrån conservative-fit eller best-fit för uppställningen *Tankstation* i stället för att utgå från vägledningen. Det medför en viss subjektivitet i valet av tryckkurva men det anses ändå mer lämpligt eftersom den rådande vägledningen är undermålig. För jetexplosioner anser vi att utgångspunkten ska vara att utgå från förblandade explosioner i samma miljö men att en starkare kurva ska väljas för att ta hänsyn till den initiala turbulensen som jetstrålen skapar.

7.4 Diskussion av OHVE – modellen

OHVE-modellen är beräkningsmässigt en enkel och kräver endast en uppskattning av gasmolnets volym och koncentration. En nackdel med OHVE-modellen är att det inte finns fria parametrar och det går därmed inte att anpassa modellen för conservative-fit. Det går endast att beräkna ett tryck för en given uppställning. Eftersom volym och koncentration i gasmolnet behövs för att beräkna trycket enligt OHVE-modellen är den även illa lämpad för att hantera jetutsläpp. Att bedöma koncentration och volym av ett jetutsläpp som sker i en miljö med hinder kräver avancerade beräkningar. En ytterligare svaghet är att modellen är framtagen för att beskriva gasmolnsexplosioner med vätgas på öppna ytor och den tar därför inte hänsyn till parametrar som hinder och instängdhet. Det innebär att modellen genomgående underskattar experimentdatan.

Trots modellens svagheter och de systematiska underskattningarna av experimentdatan ger modellen ändå en god beskrivning av tryckminskningen med hänsyn till ökat avstånd från explosionscentrum. I Figur 35 som presenterades i avsnitt **Fel! Hittar inte referenskälla.** ovan kan låga värden för RMSE och MAE avläsas för OHVE-modellen för uppställningen *Lagringsanläggning en vägg* för förblandat gasmoln. Värdena är låga trots att modellen underskattar övertrycket. Samma mönster kan även observeras i Tabell 13 där de övriga uppställningarna presenteras. De låga RMSE- och MAE-värdena samt förmågan att beskriva tryckminskningen gör att vi ser en stor potential hos OHVE-modellen om justeringar görs för att ta hänsyn till hindergrad och instängdhet.

En ytlig analys utfördes därför för att undersöka om en justering som tar hänsyn till blockeringsgrad kan anpassa modellen till experimentdatan bättre. Analysen baserades på uppställningen *Rörledning* och experimentdatan för nio sektioner (G.9.F-0,498) och fyra sektioner (G.4.F-0,544) vilket är försöket som genererade det högsta trycket bland uppställningen med fyra sektioner.

Ekvation 13 och Ekvation 14 är förslag på hur faktorerna A och B i Ekvation 10 kan justeras utifrån den ytliga analysen.

$$\dot{B} = -0,7072 \times g(h) \quad \text{Ekvation 13}$$

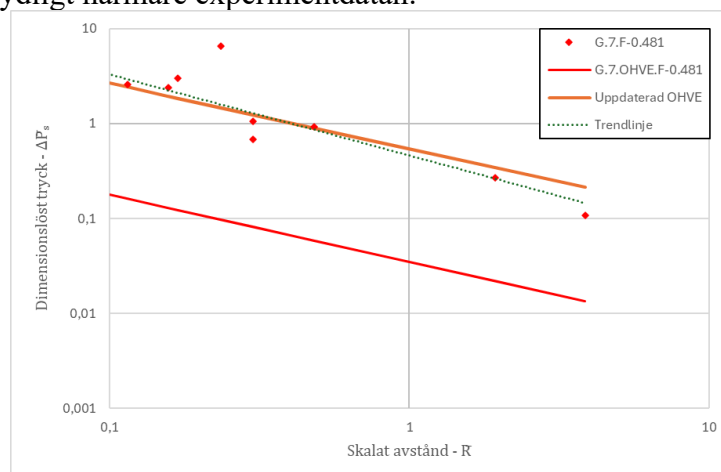
$$\dot{A} = (0,0000006948 \times (V \times C)^3 - 0,0000807 \times (V \times C)^2 + 0,002943 \times (V \times C) + 0,02095) \times f(h) \quad \text{Ekvation 14}$$

Där $g(h) = 0,247e^{32,155h}$

$$f(h) = 3,221e^{36,620h}$$

h = blockeringsgrad (%)

Figur 38 nedan visar OHVE-modellen med justeringarna av A och B ovan jämfört med experimentdatan för *Rörledning* med sju sektioner. Modellen underskattar fortfarande trycket men är betydligt närmare experimentdatan.



Figur 38: Uppdaterad OHVE-modell jämfört med experimentdata för uppställningen *Rörledning* med sju sektioner

Den uppdaterade ekvationen är endast giltig för uppställningen *Rörledning*. Om modellen appliceras på experimentdatan för *Tankstation* eller *Lagringsanläggning* överskattas trycket mycket kraftigt eftersom blockeringsgraden för *Rörledning* är lägre men genererar högre tryck. En mer djupgående uppdatering av modellen som inkluderar hinderstorlek och instängdetsgrad bör genomföras för att modellen ska kunna appliceras på andra miljöer. Om modellen uppdateras utifrån hindergrad och instängdhet kommer det krävas en väldigt tydlig vägledning för att beskriva dessa parametrar för att modellen ska kunna appliceras vid riskanalyser. Det kan det även vara av lämpligt att undersöka hur modellen hanterar större gasmoln där olika kombinationer av hinder och instängdhet förekommer i olika zoner.

Sammanfattningsvis är modellen i sin nuvarande form inte lämplig för miljöer med hinder och instängdhet. Om modellen justeras för att ta hänsyn till detta har den dock potential att bli mer användbar.

7.5 Felkällor och osäkerheter

Det finns en viss grad av osäkerhet i valideringen som beror på antaganden och förenklingar som utförts för att möjliggöra valideringen. I detta avsnitt kommer de osäkerheter som identifierats att diskuteras.

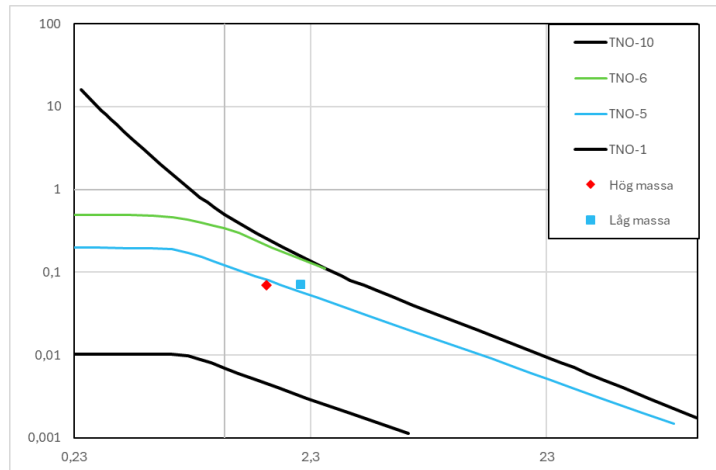
Arbetet var i hög grad beroende av vägledningarna som är knutna till de olika modellerna. Det innebär att valet av vägledning hade en stor påverkan på utfallet av valideringen. Som övergripande referens i arbetet användes Rangwala & Zalosh (2023) som presenterar olika vägledningar. Källan användes eftersom den är relativt ny-publicerad och författarna är etablerade inom området och informationen som presenteras anses därmed var aktuell. Författarna beskriver dock inte modellerna med fokus på vätgas utan ger endast en generell beskrivning av TNT-modellen och TNO-modellen. Eftersom modellerna presenteras utifrån ett generellt perspektiv är även vägledningen endast övergripande. Under litteratursökningen hittades inga andra tumregler för TNT-modellen än de som presenteras av Rangwala & Zalosh (2023) och därmed användes dessa vid valideringen.

För TNO-modellen kompletterades vägledningen från Rangwala & Zalosh (2023) med vägledning av TNO (2005). TNO (2005) användes främst för definitionerna och anledningen varför den källan användes är eftersom de skapade modellen. Under litteratursökningen hittades även en annan vägledning för val av tryckkurva som var specifikt anpassad för vätgas, alltså ett alternativ till Tabell 4. Vägledningen var framtagen av Johansson (2017). Initialt användes denna tabell i valideringen innan det insågs att den uppdaterade tabellen utgick från delar av experimentdatan som användes i valideringen. Det konstaterades dock att även om den uppdaterade tabellen används kommer samma kurva väljas om vägledningen i Tabell 5 följs och därmed anses detta inte påverka resultaten från valideringen.

Johansson (2017) presenterade även vägledning för att välja hindergrad och instängdhet för TNO-modellen. Riktlinjerna använder sig av vägledningen för en annan beräkningsmodell, BST-modellen, och tar fram en motsvarande tryckkurva för TNO-modellen. Beslutet av tryckkurva görs genom att undersöka miljön utifrån parametrarna inneslutning, reaktivitet och blockeringsgrad utifrån BST-modellens vägledning. Det innebär att hög blockeringsgrad inträffar redan vid 5,7 % och en ytterligare nivå Medium tillkommer. Inneslutning i BST-modellen motsvarar instängdhet i TNO-modellen och där finns tre kategorier 2D, 2,5D och 3D, definitionerna av dessa är något otydlig. Eftersom denna vägledning hittades i ett senare skede av valideringen och definitionerna av inneslutning är otydlig valdes det att inte arbeta vidare med den. Vi ser dock att om vägledningen tillämpas, oavsett val av inneslutningsgrad, kommer en tryckkurva mellan 6–10 att tillämpas vilket stämmer väl med conservative-fit som fastställts för experimentdatan.

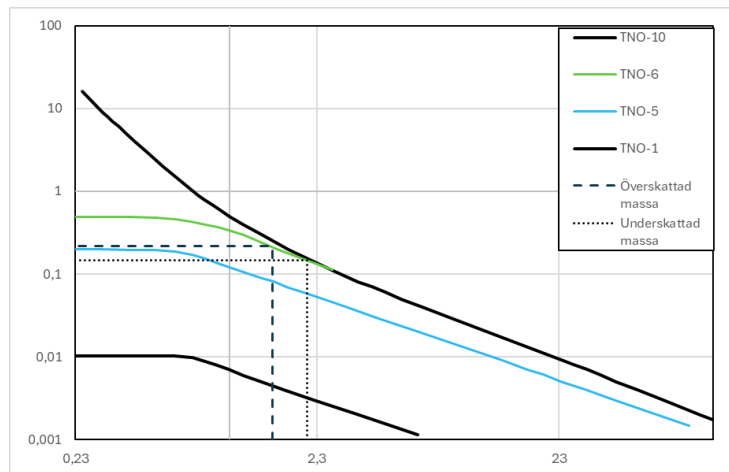
I valideringen har feta blandningar omräknats till initialt reaktiv massa. Den initiala massan är mindre än den totala massan, vilket ger ett större \bar{R} . Det kan ha påverkat valet av conservative-fit för TNO-kurva eftersom en ökning av \bar{R} kan leda till att datapunkten flyttas utanför en given kurva, se Figur 39. Det kan leda till ett mer konservativt val av TNO-kurva eller α -värde än vad som möjligtvis är nödvändigt. Det kan även till viss del förklara att vissa datapunkter faller utanför samtliga TNO-kurvor i valideringen. Vi anser att omräkning till motsvarande initial massa för förblandade moln inte är nödvändigt då detta leder till att ett mer konservativt tryck uppskattas. Att inte räkna om till initial massa gör även användningen av modellerna enklare.

Ett likande problem uppstår även för jetutsläppsexplosionerna. För jetutsläppen har massan vätgas troligtvis överskattats eftersom antagandet gjordes att all utsläppt massa deltar i explosionen. Det innebär att problemet omvänds och en lägre kurva kan väljas än vad som faktiskt representerar explosionen. Vi kan dock konstatera från jämförelsen mellan total och motsvarande massa, Bilaga 2. Motsvarande massa vid feta blandningar, att skillnaden för datapunkterna är relativt liten och att valet av conservative-fit inte har påverkats för de feta blandningarna. För jetutsläppsexplosionerna kan detta inte verifieras.



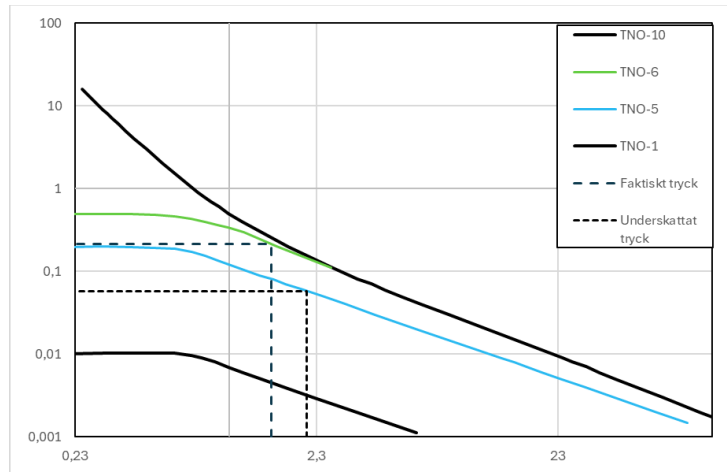
Figur 39: Visualisering av påverkan som en hög eller låg uppskattad massa har på valet av TNO-kurva.

Ett snarlikt problem kan även inträffa vid beräkningen av trycket utifrån modellerna. Om massan som deltar i explosionen överskattas kommer ett högre tryck antas då det skalade avståndet blir lägre. Om massan underskattas kommer ett lägre tryck räknas fram, se Figur 40.



Figur 40: Visualisering av påverkan som över- eller underskattning av massa har vid beräkning av tryck givet en vald tryckkurva.

En fallgrupp som kan uppstå från problematiken ovan är att om en lägre kurva uppskattas från experimentdata och massan som deltar i explosionen samtidigt underskattas kommer trycket att underskattas från två håll, se Figur 41 nedan. Det är därför viktigt att vara medveten om hur kurvorna väljs så att detta problem inte uppstår då det kan leda till en kraftig underskattning av risken.



Figur 41: Visualisering av hur en feluppskattning av trycket kan uppstå om en underskattad massa appliceras på underskattad tryckkurva.

Problemen ovan är särskilt relevanta för beräkningarna av jetutsläppförsöken där vätgasmassan, koncentrationen och volymen är svårbedömd. För vätgasmassan gjordes antagandet att all vätgas som släppts ut innan antändning deltog i explosionen. Detta innebär sannolikt en överskattning av den faktiska massan som deltar i explosionen eftersom en del av gasen har blandats ut med luft och underskrider brännbarhetsgränsen. Uppskattningen av volymen och koncentrationen är betydligt svårare för jetutsläpp än förblandade gasmoln vilket påverkar samtliga modeller, då ingen bra beskrivning av jetstrålen kunde göras. För att beskriva dessa parametrar krävs mer avancerade beräkningar, där både gasmolnet storlek och dess placering måste beaktas.

Ett tillvägagångsätt som övervägdes var att använda handberäkningsmodeller som beräknar den brännbara massan i fria jetutsläpp eftersom det finns etablerade modeller för detta. Utsläppscenarierna var dock inte fria jetstrålar, då gasstrålen interagerade med olika hinder vilket gör dessa beräkningsmodeller olämpliga att använda. En annan faktor kopplat till spridningen som bortsågs från var vädret. Det kan påverka spridningen bland annat genom att öka inblandningen av luft från vind. Vindriktningen kan även påverka genom att driva gasen åt olika håll antingen mot eller bort från hinder. Jetutsläpp är mycket komplexa och väldigt svåra att hantera med handberäkningar jämfört med förblandade gasmoln. Spridningsmodeller har en avgörande betydelse för analysen av denna typ av explosioner då en rättvisande modell kommer kunna öka precisionen av konsekvensberäkningarna.

Det finns mer avancerade datorbaserade verktyg, såsom CFD-program som kan modellera en mer komplex spridning. Ett problem med att tillämpa datormodeller för spridningen och handberäkningsmodeller för konsekvenserna är den inkonsekventa användningen av avancerade simuleringsprogram. Att använda en avancerad modell för att beskriva spridningsförloppet för att sedan använda en relativt grov handberäkningsmodell för att beräkna konsekvenserna av explosionen blir kontraproduktivt. En av poängerna med handberäkningsmodeller är att de ska vara relativt enkla och tidseffektiva. Om en hög precisionsnivå som endast datormodeller kan ge måste användas för att beskriva

spridningsförloppet är det inte rimligt att sedan koppla det med en handberäkningsmodell. Hela analysen bör då i stället ske med datorbaserade modeller.

En annan osäkerhet i valideringen är insamlingen av datan. Experimentdatan presenterades i vissa fall endast i grafer vilket avlästes visuellt vid insamlingen. Det innebar att insamlingen av övertrycket för dessa dataset kan variera något från det faktiskt uppmätta värdet. I de fall där tabellerade värden för övertrycket fanns tillgängliga jämfördes dessa med visuellt avlästa värden, vilket gav en felmarginal på omkring ± 1 kPa. Det motsvarar en förändring av det dimensionslösa trycket på ca 0,01. Det är möjligt att vissa datapunkter därmed har över eller underskattats något. Det gäller dock inte för uppställningen *Rörledning* med sju och nio sektioner som ligger utanför samtliga TNO-kurvor då dessa värden hämtades ur tabeller. Programmet PlotDigitizer användes inte eftersom kännedom om programmet erhöles först efter att all data hade samlats in och valideringen av modellerna hade påbörjats. Det hade dock varit ett mer lämpligt verktyg för att erhålla mer rättvisande tryckvärden från graferna.

En ytterligare osäkerhet som kan påverka valideringen är mätosäkerheter från experimenten. De uppmätta trycken filterades med ett lågpasfilter för att reducera mängden brus vid mätningen. Men det är möjligt att en mängd brus ändå kan ha påverkat resultaten, vilket kan ha lett till att ett högre tryck än vad som faktiskt genererades av explosionerna som presenteras i graferna. Det är även möjligt att ett reflekterat tryck registrerats på sensorerna och därmed kan det uppmätta trycket blivit betydligt högre än vad det borde vara. Shirvill et al., (2012, 2018, 2019) nämner dock inget om reflektion, detta försvårar diskussionen ifall det kan ha påverkat men eftersom de inte diskuterar det antas att reflektion inte har inträffat.

8 Slutsats

Målet med examensarbetet var att identifiera och utvärdera befintliga beräkningsmodeller som kan användas för att beräkna övertrycket från gasmolnsexplosioner i realistiska miljöer med vätagas. Arbetet skulle även undersöka modellernas styrkor, svagheter och tillförlitligheten av deras tillhörande vägledning samt ta fram rekommendationer för hur de identifierade modellerna kan användas vid framtida riskanalyser.

I arbetet identifierades tre handberäkningsmodeller; TNT-modellen, TNO-modellen och OHVE-modellen. Utifrån validering har följande slutsatser fastställts.

TNT-modellen är en enkel modell som endast ger grova uppskattningar av övertrycket. De etablerade tumreglerna för α -värde kopplat till nearfield och farfield överensstämmer inte med experimentdatan och det konservativa α -värdet, 0,1, som presenteras i litteraturen är inte tillräckligt konservativt. Modellen har dålig prediktionsförmåga vid låga \bar{R}_{TNT} och kurvans lutning överensstämmer inte med gasmolnsexplosioners tryckprofil. På grund av TNT-modellens brister anses det därmed att modellen inte bör användas i riskanalyser för att beräkna övertrycket vid explosioner i realistiska miljöer.

OHVE-modellen är inte anpassad för realistiska miljöer med hinder och instängdhet vilket leder till att modellen underskattar experimentdatan. Modellen är därmed i sin nuvarande form inte lämplig att använda i riskanalyser för att beräkna explosionstrycket för realistiska miljöer. En styrka med modellen är att den beskriver tryckminskningen med ökat avstånd väl och det finns därmed potential hos modellen om justeringar för att ta hänsyn till den omgivande miljön utförs.

TNO-modellen är en mer avancerad modell än de övriga modellerna. De olika tryckkurvorna beskriver experimentdatan väl men en tydlig svaghet hos modellen är att de rådande vägledningarna för val av tryckkurva leder till att *fel* kurva väljs. Eftersom vägledningen i sin nuvarande form är missledande bör en ingenjörsmässig bedömning baserat på experimentdata utföras. Om en riskanalys ska genomföras på en miljö som efterliknar experimentuppställningarna kan en konservativ tryckkurva väljas utifrån Tabell 19 nedan.

Tabell 19: Rekommenderat val av tryckkurva utifrån miljöuppställning för förblandade gasmoln och jetutsläppsexplosioner.

Miljö	Förblandat gasmoln	Jetutsläppsexplosion
Tankstation	TNO-8	TNO-9
Lagringsanläggning en vägg	TNO-7	TNO-8
Lagringsanläggning två väggar	TNO-7	TNO-8
Rörledningar fyra sektioner	TNO-7	TNO-8
Rörledningar sju och nio sektioner	TNO-10*	TNO-10*

*Vissa datapunkter överskrider denna kurva.

Avslutningsvis leder den rådande vägledningen för modellerna ofta till att *fel* tryck bedöms. Vi anser att det finns en kunskapslucka kring hindergrad och instängdhet som framtida forskning bör fokusera på, att kvantifiera parametrarna kan starkt förbättra vägledningen och i sin tur även modellernas precision.

9 Referenser

Bjerketvedt, D., Bakke, J. R., & van Wingerden, K. (1997). *Gas explosion handbook*. *Journal of Hazardous Materials*, 52(1), 1–150. [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(97\)81620-2](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(97)81620-2)

Alonso, F., D., Ferradás, E., G., Sánchez Pérez, J. F., Aznar, A., M., Gimeno, J., R., & Alonso, J., M. (2006). Characteristic overpressure–impulse–distance curves for vapour cloud explosions using the TNO Multi-Energy model. *Journal of Hazardous Materials*, 137(2), 734–741. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.04.005>

Drysdale, D. (2011). *An Introduction to Fire Dynamics, Third Edition*. John Wiley & Sons, Ltd.

Fischer, S., Forsén, R., Hertzberg, O., Jacobsson, A., Koch, B., Runn, P., Thaning, L., & Winter, S. (1998, november). Vådautsläpp av brandfarliga och giftiga gaser och vätskor: Metoder för bedömning av risker (Tredje reviderade upplagan). Forsvarets forskningsanstalt (FOA). ISSN 1104–9154

Foust, H. (2024). Speed of sound and critical flow (Shock Wave and High Pressure Phenomena). Springer Nature Singapore. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-97-5918-7_4

Hodson, T. O. (2022). *Root-mean-square error (RMSE) or mean absolute error (MAE): when to use them or not*, *Geosci. Model Dev.*, 15, 5481–5487. <https://doi.org/10.5194/gmd-15-5481-2022>

Holm, G. (19 juni 2021). Explosion på bensinstation nära köpcentrum: ”Kaotiskt”. *Expressen*. <https://www.expressen.se/nyheter/larm-om-explosion-pa-bensinstation/> [25 februari 2026]

Hurley, M. J. (2016). *SFPE handbook of fire protection engineering*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2565-0>

Johansson, M. (2017). *Gasexplosion i det fria* (B06-105). Myndigheten för civilt försvar. https://www.mcf.se/contentassets/872971cf790a4cdcdb53b85a32011703/b06.-berakningsstod/b06-105_gasexplosion-i-det-fria.pdf

Karanam, A., Sharma, P. K., & Ganju, S. (2018) Numerical simulation and validation of flame acceleration and DDT in hydrogen air mixtures. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(36) 17492–17504. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.07.108>

Karlsson, B., & Quintiere, J.G. (2022). *Enclosure Fire Dynamics, Second Edition*. Taylor & Francis Group, LLC.

Kristensson, J. (17 juni 2019). Detta låg bakom explosion på vätgasmack. *Ny Teknik*. <https://www.nyteknik.se/fordon/detta-lag-bakom-explosion-pa-vatgasmack/137954> [13 februari 2026]

Malmberg, Å & Olsson, D. (23 augusti 2024). Vätgas ska göra Gotlands färjetrafik fossilfri. *Uppsala universitet*. <https://www.uu.se/nyheter/2024/2024-08-23-vatgas-ska-gora-gotlands-farjetrafik-fossilfri>

[24 mars 2026]

Moen, I. O., Donato, M., Knystautas, R., & Lee, J. H. (1980). *Flame acceleration due to turbulence produced by obstacles*. *Combustion and Flame*, 39(1), 21–32.

[https://doi.org/10.1016/0010-2180\(80\)90003-6](https://doi.org/10.1016/0010-2180(80)90003-6)

Mukhim, E. D., Abbasi, T., Tauseef, S. M., & Abbasi, S. A. (2018). A method for the estimation of overpressure generated by open air hydrogen explosions. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 52, 99–107. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2018.01.009>

Myndigheten för samhällsskydd och beredskap. (2024). *Hantering av brandfarliga vätskor: handbok (152 s.)*. MSB.

Ottmöller, L., & Evers, L. G. (2008). *Seismo-acoustic analysis of the Buncefield oil depot explosion in the UK, 2005 December 11*. *Geophysical Journal International*, 172(3), 1123–1134. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2007.03701.x>

Park, S. W., Kim, J. H., & Seo, J. K. (2022). Explosion Characteristics of Hydrogen Gas in Varying Ship Ventilation Tunnel Geometries: An Experimental Study. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(4), 532. <https://doi.org/10.3390/jmse10040532>

Ponchaut, N. F., Colella, F., & Marr, K. C. (2016). Vapor cloud. In M. J. Hurley (Ed.), *SFPE handbook of fire protection engineering* (5th ed., Chap. 67). Springer.

<https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2565-0>

Rangwala, A. S., & Zalosh, R. G. (2023). *Explosion Dynamics: Fundamentals and Practical Applications*. Wiley-VCH.

Royle, M., & Willoughby, D. B. (2011). Consequences of catastrophic releases of ignited and unignited hydrogen jet releases. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(3), 2688–2692. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.03.141>

Säfsten, K., & Gustavsson, M. (2023) *Forskningsmetodik 2.0: För ingenjörer och andra problemlösare*. Studentlitteratur AB.

Shirvill, L. C., Roberts, T. A., Royle, M., Willoughby, D. B., & Gautier, T. (2012). Safety studies on high-pressure hydrogen vehicle refuelling stations: Releases into a simulated high-pressure dispensing area. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(8), 6949–6964.

<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.01.030>

Shirvill, L. C., Roberts, T. A., Royle, M., Willoughby, D. B., & Sathiah, P. (2018). Effects of congestion and confining walls on turbulent deflagrations in a hydrogen storage facility – Part 1: Experimental study. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(15), 7618-7642.

<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.02.135>

Shirvill, L. C., Roberts, T. A., Royle, M., Willoughby, D. B., & Sathiah, P. (2019). Experimental study of hydrogen explosion in repeated pipe congestion – Part 1: Effects of increase in congestion. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(18), 9466-9483.

<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.04.193>

Sochet, I. (2010). Blast effects of external explosions. *Eighth International Symposium on Hazards, Prevention, and Mitigation of Industrial Explosions*. Tillgänglig: hal-00629253
TNO. (2005). *Methods for the calculation of physical effects due to releases of hazardous materials (liquids and gases) ("Yellow Book")*. The Hague: TNO.
<https://publications.tno.nl/publication/34634119/QIKv78/TNO-2005-yellow.pdf>

Uniper. (u.d.). Vätgas i Sverige. <https://www.uniper.energy/sv/sverige/om-uniper-i-sverige/vatgas-i-sverige> [13 oktober 2025]

Världsnaturfonden. (14 juli 2025). *Vätgas*. <https://www.wwf.se/energi/vatgas/#vad-ar-vatgas> [1 december 2025]

Wood, D. A. (2025). Critical review of development challenges for expanding hydrogen-fuelled energy systems. *Fuel*, 387, 134394. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2025.134394>

Zhang, Y., Gao, H., Mao, S., Zhao, X., Zhou, Y., Yang, C., & Tong, Y. (2025). Influence of obstacle blockage on flame propagation, overpressure and local temperature of vapor deflagration in narrow ship channel-like space. *Thermal Science and Engineering Progress*, 62, Article 103655. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2025.103655>

Bilaga 1. Redovisning av användning av generativ AI

Nedanstående text redovisar hur författaren använt så kallad generativ AI.

Användning av GAI	<i>Ja eller nej</i>
1) I rapporten har jag använt verktyg för Generativ AI (t.ex. ChatGPT eller liknande)	<i>Ja</i>
2) Jag har använt ett GAI-verktyg för språkbehandling (t.ex för att åtgärda grammatiska fel etc.	<i>Ja</i>
3) Jag har använt ett GAI-verktyg för att söka efter information.	<i>Ja</i>
4) Jag har använt ett GAI-verktyg för att skapa programkod.	<i>Nej</i>
5) Jag har använt ett GAI-verktyg för att översätta text	<i>Ja</i>
6) Jag har använt ett GAI-verktyg för att skapa figurer eller andra illustrationer.	<i>Nej</i>
7) Jag har använt ett GAI-verktyg för att strukturera texten i rapporten.	<i>Ja</i>
GAI har främst använts för att omformulera meningar och stycken i arbetet. Det användes även för att översätta sammanfattning till engelska. I viss utsträckning användes GAI för att söka efter källor som innehåller viss information.	

Bilaga 2. Motsvarande massa vid feta blandningar

I följande figurer visas påverkan av omräkning från total massa till motsvarande massa för feta blandningar för uppställningen *Rörledning*ar med fyra, sju och nio sektioner. Plus (+) i figuren utgör den totala massa och minus (-) utgör den omräknade massan.

