

Validering av KFX för vätgasjetflamnor som träffar ytor

Jonathan Nilsson | Avdelningen för Brandteknik | LTH |
Lunds universitet



Validering av KFX för vätgasjetflammar som träffar ytor

Jonathan Nilsson

Lund 2023

Title: Validation of KFX for hydrogen jet flames that hits surfaces

Titel: Validering av KFX för vätagasjetflammar som träffar ytor

Författare/Author: Jonathan Nilsson

Report 5710

ISRN: LUTVDG/TVBB-5710-SE

Antal sidor/Number of pages: 43

Illustrationer/Illustrations: If not specified, all illustrations belong to the author.

Sökord/Keywords:

Kameleon FireEX, KFX, CFD, Hydrogen Jetfire.

Abstract

Regarding climate change and the future need for renewable energy, hydrogen is considered to be an important component in energy storage systems. However, the use of hydrogen is fraught with risk due to its chemical properties. This thesis deals with the problem of modelling heat transfer from hydrogen jet flames hitting surfaces. This paper aims to assess how well KFX reproduces results of hydrogen jet flames hitting surfaces. The simulations in KFX are based on data from experiments conducted by Merander et al. (n.d).

KFX is a CFD-code developed by DNV to analyse the safety of situations with fire risks, such as jet fires, mostly offshore. The consequences that were investigated are the temperature of surfaces and radiation levels at specific measurement points. A total of six simulations were performed, of which the results were compared with each respective experiment. For each case, the angle of the jet flame was varied, horizontally and at an angle of 45° (downwards). In addition, the experiments were based on three different geometries with a variation in the level of confinement: one plate, two plates and five plates. The results showed that KFX reproduces results well for the least confined cases (one plate) of the cases in terms of surface temperature. However, in terms of radiation, KFX reproduced good results for two other cases. Due to the irregular results, KFX cannot be considered validated for the heat transfer from hydrogen flames based on the results from this study.

Furthermore, a sensitive analysis was performed which showed that the results were not sensitive based on the selected parameters. The parameter that resulted in the greatest variation was the conductivity of the insulation.

© Copyright: Division of Fire Safety Engineering, Faculty of Engineering, Lund University, Lund 2023

Avdelningen för Brandteknik, Lunds tekniska högskola, Lunds universitet, Lund 2023.

Brandteknik
Lunds tekniska högskola
Lunds universitet
Box 118
221 00 Lund

<http://www.brand.lth.se>

Telefon: 046 - 222 73 60

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

<http://www.brand.lth.se>

Telephone: +46 46 222 73 60

Förord

Detta examensarbete började utföras under sommaren 2023 och slutfördes i december samma år på avdelningen för Brandteknik vid Lunds Tekniska Högskola, för examen av brandingenjörsprogrammet och civilingenjörsprogrammet inom riskhantering.

Examensarbetet motsvarar 30 högskolepoäng och utfördes av Jonathan Nilsson.

Ett stort tack riktas mot Marcus Runefors, Universitetslektor vid avdelningen för brandteknisk vid Lunds Tekniska Högskola, primärt för hans vägledning och kunskap under arbetets gång, men även för hans tydliga engagemang.

Dessutom tackar författaren Tian Li för och Lars Hov Odsæter för deras rådgivning inom de aktuella experimenten och simuleringsprogrammet Kameleon FireEx (KFX).

Lund, december 2023

Jonathan Nilsson

Sammanfattning

Med hänsyn till klimatförändringar och framtidens behov av förnybar energi kan vätgas anses vara en viktig komponent i energilagringssystem. Vätgas har i dagens samhälle en mängd olika användningsområden. Gasen fungerar primärt som en energibärare och kan användas till att lagra, tillhandahålla och distribuera energi. I kombination med förnybar energi som solenergi samt vind- och vattenkraft möjliggör vätgas ett miljövänligare sätt att använda elektricitet. Men eftersom användning av vätgas är riskfyllt på grund av dess kemiska egenskaper blir riskerna och konsekvenserna till följd av vätgasanvändning alltmer relevant. Detta examensarbete hanterar problematiken med vätgasjetflammar som träffar ytor och syftar på att besvara följande frågeställningar:

1. *Hur väl reproducerar KFX resultaten för jetflammar som träffar ytor?*
2. *Hur känsligt är resultatet för osäkerhet i ingående parametrar?*

Kameleon FireEx (KFX) är en CFD-kod producerad av DNV som används för att analysera säkerheten för situationer med brandrisker, så som jetflammar, oftast offshore. För att validera simuleringsprogrammet syftar denna rapport att jämföra konsekvenserna av vätgasjetflammar som träffar ytor i KFX med experiment som är utförda av Meraner et al. (n.d). Konsekvenserna som undersöktes är temperaturen på ytor samt strålningsnivåer vid specifika mätpunkter. Totalt utfördes sex simuleringar vars resultat jämfördes med respektive experiment. För varje fall varierades vinkeln på jetflamman, horisontellt och med en vinkel på 45° (neråt). Dessutom baserades experimenten på tre olika geometrier; en platta, två plattor och fem plattor. Vidare utfördes en känslighetsanalys med syfte att kvantifiera osäkerheten hos valda relevanta parametrar.

Tidigare validering av KFX har utförts för strålning från vätgasjetflammar som visade att KFX kunde reproducera experimenten. Vid dessa försök var dock var förutsättningarna annorlunda jämfört med dem i denna rapport eftersom avstånden mellan flammen och strålningsmätningen var längre och flammen träffade inga ytor. För att kunna utföra simuleringar i KFX baserade på experimenten gjordes en datainsamling av nödvändiga parametrar, både från rapporten (Meraner et al., n.d) och från externa källor. Vid modellering i KFX baserades samtliga fall på att efterlikna experimenten i syfte att ge så representativa resultat som möjligt. Temperatur på plattan/plattorna samt strålningsnivåer i anslutning till plattorna uppmättes för de simulerade fallen och jämfördes med experimenten. Dock gav ett av de sex fallen med fem plattor orealistiska svar och/eller kraschade vid simulering.

Resultaten visade att KFX reproducerar goda resultat för fallen med en platta när det gäller temperatur på yta. När det gäller strålningsnivåer var det dock två andra fall som KFX reproducerade goda resultat för. På grund av de oregelbundna resultaten, kan inte KFX anses vara validerat för värmetransport från vätgasjetflammar baserat på resultaten från denna studie. Vidare utfördes en känslighetsanalys som påvisade att resultaten inte är känsliga utifrån de valda parametrarna. Den parameter som påvisade störst variation var konduktivitet i isolering. Baserat på både simuleringar i KFX och experimenten har ett antal felkällor identifierats som kan ha påverkat resultaten. Exempelvis användes en lägre upplösning på simuleringarna än vad som är rekommenderat på grund av tidsbristen under examensarbetet.

Summary

Regarding climate change and the future need for renewable energy, hydrogen is considered to be an important component in energy storage systems. In today's society, hydrogen has a variety of uses. The gas functions primarily as an energy carrier and can be used to store, supply and distribute energy. In combination with renewable energy such as solar energy, wind and hydro power, hydrogen enables a more environmentally friendly way of using electricity. However, since the use of hydrogen is fraught with risk due to its chemical properties, the risks and consequences resulting from hydrogen use become increasingly relevant from a risk perspective. This thesis deals with the problem of hydrogen jet fires hitting surfaces and aims to answer the following questions:

1. How well does KFX reproduce the results of hydrogen jet fires hitting surfaces?
2. How sensitive are the results to uncertainties based on the included parameters?

KFX is a CFD-code developed by DNV to analyse the safety of situations with fire risks, such as jet fires, mostly offshore. To validate the simulation program, this report aims to compare the consequences of hydrogen jet fires hitting surfaces in KFX with experiments performed by Meraner et al. (n.d). The consequences that were investigated are the temperature of surfaces and radiation levels at specific measurement points. A total of six simulations were performed, of which the results were compared with each respective experiment. For each case, the angle of the jet flame was varied, horizontally and at an angle of 45° (downwards). In addition, the experiments were based on three different geometries: one plate, two plates and five plates. Furthermore, a sensitivity analysis was performed with the aim of quantifying the uncertainty of relevant parameters.

A previous analysis of KFX have been made for jet fires which resulted in that the simulation program could be validated. However, the conditions were different. The geometry and distances used were on a larger scale compared to the current analyses.

To be able to perform simulations in KFX based on the experiments, a data collection was conducted of necessary parameters from the report (Meraner et al., n.d) and external sources. When modelling in KFX, all cases were based on imitating the experiments in order to give as representative results as possible. Temperatures on the surfaces of the plates and radiation levels near the plates were measured for the simulated cases. However, one of the six cases with five plates resulted in incorrect results and/or crashed during simulation.

The results showed that KFX reproduces results well for the least confined cases (one plate) of the cases in terms of surface temperature. However, in terms of radiation, KFX reproduced good results for two other cases. Due to the irregular results, KFX cannot be considered validated for the heat transfer from hydrogen flames based on the results from this study. Furthermore, a sensitive analysis was performed which shows that the results were not sensitive based on the selected parameters. The parameter that resulted in the greatest variation was the conductivity of the insulation. Based on both simulations in KFX and the experiments, several error sources have been identified that may have affected the results. For example, a lower resolution was used for the simulations than in recommended, due to the lack of time during the master thesis.

Innehållsförteckning

1	Inledning.....	1
1.1	Vätgas	1
1.2	Syfte och mål.....	2
1.3	Begränsningar.....	2
1.4	Disposition.....	3
2	Bakgrund.....	4
2.1	Hållbarhet	4
2.1.1	Energianvändning och energiproduktion idag	4
2.1.2	Energianvändning i framtiden.....	5
2.2	Vätgas	5
2.3	Vätgas i samhället.....	6
2.4	Risker vid användning av vätgas	7
3	Teori	8
3.1	Jetflamnor	8
3.2	Plattermoelement	9
3.3	Kameleon FireEx.....	10
3.3.1	Beräkningar och ekvationer	10
3.3.2	Strålningsberäkningar i KFX	10
3.3.3	Celltyper i KFX.....	11
3.3.4	Simulering av jetflamnor med KFX.....	11
3.4	Tidigare validering av KFX för jetflamnor	12
4	Metodik	14
4.1	Metod.....	14
4.2	Scenariobeskrivning experiment	14
4.3	Scenariobeskrivning KFX	19
5	Resultat.....	23
5.1	Maximal Temperatur	23
5.2	Temperatur.....	25
5.3	Maximal strålning.....	29
5.4	Visuell jämförelse av KFX och Experiment.....	30
5.5	Känslighetsanalys	31
5.5.1	Temperatur	31
5.5.2	Maximal Temperatur.....	32
5.5.3	Maximal Strålning.....	33

6	Diskussion	35
6.1	Jämförelse av KFX och experiment	35
6.2	Diskussion och Felkällor - KFX	36
6.3	Diskussion och Felkällor - Experiment	38
7	Slutsats	40
8	Vidare studier	41
9	Referenser.....	42
	Bilaga A – Resultat	A

1 Inledning

1.1 Vätgas

Ur ett historiskt perspektiv har den främsta energikällan varit fossila bränslen, primärt kol och olja. På senare tid har kunskap om bland annat växthuseffekten gjort att samhället blivit mer miljöveten när det gäller utsläpp av växthusgaser. Förbränning av fossila bränslen producerar stora mängder koldioxid som bidrar till växthuseffekten (Wuebbles & Jain, 2001). Detta är negativt ur ett hållbarhetsperspektiv och i kombination med att fossila bränslen är ändliga resurser bidrar det till att det finns ett behov av att utveckla och använda miljövänliga alternativ av energikällor. Dessutom kan det förväntas finnas ett ännu större behov av energi i framtiden. Enligt Svenskt Näringsliv (2019) kommer Sveriges elbehov öka med minst 60 procent fram tills 2045. Därför har samhället stått inför ett omfattande vägval då energibehovet ökar samtidigt som av miljövänliga energikällor är nödvändigt ur ett hållbarhetsperspektiv.

Som ett substitut för fossila bränslen är vindkraft, solenergi genom solceller och vattenkraft exempel på miljövänliga energikällor som används för att utvinna elektricitet. Idag kommer dock cirka 98 % av energin från fossilfria bränslen (Wengeler, 2020). Problematiken ligger i att kunna lagra förnybar energi då energiproduktionen varierar över tid. Ett sätt att lagra energi på är energilagringssystem baserade på vätgas, som tar hänsyn till miljön (Arsad et. al, 2022). Användningen av vätgas som energibärare bidrar inte till utsläpp som bidrar till växthuseffekten. Produktionen av vätgas bidrar inte till koldioxid så användningen av vätgas som energibärare kan därför reducera koldioxidutsläppen.

Vätgas i sig är dock problematiskt vid användning då dess molekylära egenskaper ger upphov till risker. Gasen är extremt lättantändlig vilket gör att det finns explosionsrisker. Detta beror på dess låga antändningsenergi och höga förbränningshastighet. Enligt MSB (2022) har vätgas länge använts i olika typer av industrier på grund av dess höga energiinnehåll. Därför finns det en rad olika föreskrifter som måste tas hänsyn till vid användning och hantering av den brandfarliga gasen.

Vätgas omfattas bland annat av lagen (2010:1011) om brandfarliga och explosiva varor. Denna lag gäller hantering av brandfarliga och explosiva varor och sådana förberedande och efterföljande åtgärder som behövs med hänsyn till brand- och explosionsrisken och till konsekvenserna av en brand eller en explosion (Sveriges Riksdag, 2010). Region Skåne har tagit fram riktlinjer för hur hantering vid transport av farligt gods ska ske, där bland annat skyddsavstånd till bebyggelse har tagits fram (Länsstyrelsen i Skåne Län, 2007). Dessa avstånd baseras på många olika olycksscenario, såsom jetflammar. Med en förväntad ökning vätgasanvändning blir konsekvenserna av jetflammar, till följd av antändning av vätgasläckage, mer relevant ur ett riskperspektiv. För att kunna analysera möjliga konsekvenser av ett antänt vätgasutsläpp är det av avgörande betydelse att kunna beräkna dessa på ett korrekt sätt, men många av de modeller som används idag kommer från olja-gas-industrin och är inte validerade för vätgas. Detta arbete kommer därför analysera hur väl CFD-programmet Kameleon FireEx (KFX) reproducerar konsekvenserna, såsom temperatur, vid vätgasjetflammar som träffar ytor.

För att kunna validera KFX jämfördes simuleringar i KFX mot utförda experiment. I denna rapport jämfördes resultat från experiment utförda av Meraner et al. (n.d). I den aktuella

rapporten utförs totalt sex experiment där bland annat vinkel på jetflamman, antal ytor som träffas av jetflamman samt avstånd till ytor ändras beroende på experiment. Experimenten modelleras i KFX för att kunna jämföra resultaten i syfte att validera simuleringsprogrammet. Mätvärden som jämförs är primärt temperatur som träffar ytorna samt strålningsnivåer som uppnås vid olika mätpunkter placerade på olika platser i anknytning till plattorna. Dessutom utförs en känslighetsanalys för att kvantifiera osäkerheter för de ingående parametrarna. Mer detaljerade beskrivningar av de olika scenarierna beskrivs senare i arbetet.

1.2 Syfte och mål

Syftet med detta arbete är att undersöka hur väl simuleringsprogrammet KFX kan prediktera storskaliga läckage av vätgas i form av jetflamnor.

Målet är att analysera om simuleringsprogrammet kan användas vid riskhanteringsprocessen genom att beräkna konsekvenserna. För att undersöka detta ämnesområde är målet att kunna besvara följande frågeställningar:

1. Hur väl reproducerar KFX resultaten för jetflamnor som träffar ytor?
2. Hur känsligt är resultatet för osäkerhet i ingående parametrar?

Detta arbete kan förväntas bidra till kunskapen av riskhantering vid användning av vätgas vid industriella sammanhang. Arbetet baseras på hur väl simuleringsprogrammet KFX (Kameleon FireEx) förhåller sig till verkligheten vilket bidrar till huruvida detta simuleringsprogram kan användas för att förutse konsekvenserna vid storskaliga läckage av vätgas i form av jetflamnor.

1.3 Begränsningar

Begränsningar i detta arbete består främst i att varken författaren eller handledaren har erfarenhet av att använda KFX vilket gör att felaktigheter i falldefinieringen inte kan uteslutas. Dock har en avstämning av de viktigaste parametrarna skett med Lars Hov Odsæter som jobbar med utvecklingen av KFX på DNV. Detta har möjliggjort rådgivning inom de övergripande delarna vid modellering i KFX.

En begränsning består även i att valideringen är baserad på försök som hämtats från litteraturen vilket gör att relevanta faktorer kan ha gått förlorade. Dock har ett möte hållits med Tian Lee på RISE i Norge som ansvarade för försöken, som har förtydligat viktiga osäkerheter för experimenten.

1.4 Disposition

Dispositionen för detta dokument är baserat på den ordning som författaren har utfört arbetet för att kunna besvara frågeställningarna.

Avsnitt 1: Inledning, syfte, mål, avgränsningar samt frågeställningar för examensarbetet beskrivs.

Avsnitt 2: Bakgrund som ska ge läsaren en inblick på varför ämnesområdet och frågeställningarna är relevanta ur ett riskperspektiv.

Avsnitt 3: Relevant information och viktig teori för arbetet beskrivs.

Avsnitt 4: Metod presenteras, experimenten och dess uppställning som ska jämföras med simuleringar beskrivs och indata för KFX tas upp.

Avsnitt 5: Sammanställning av resultat för simuleringarna.

Avsnitt 6: Diskussion.

Avsnitt 7: Slutsats & vidare studier

Avsnitt 8: Vidare studier

2 Bakgrund

I detta kapitel presenteras relevant bakomliggande information för arbetet. Utöver detta beskrivs riskerna med användning av vätgas samt hur ämnesområdet är relevant ur ett riskperspektiv.

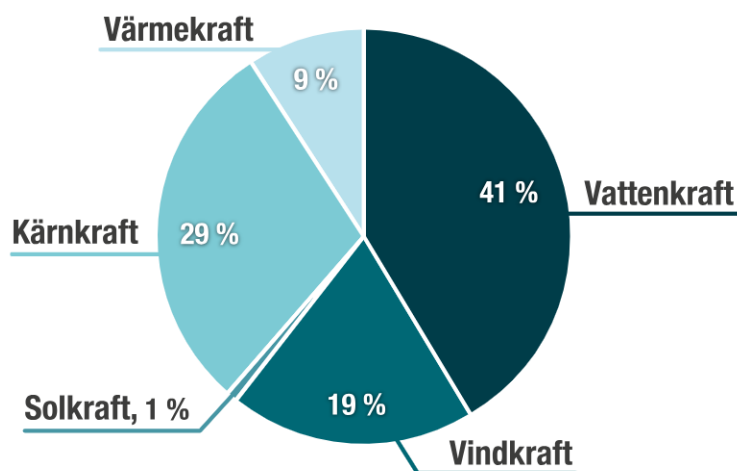
2.1 Hållbarhet

Den 1 januari 2016 togs Agenda 2023 fram tillsammans med de 17 globala målen för en hållbar utveckling (FN-förbundet, 2023a). Syftet med de globala målen är att skapa en hållbar utveckling som tillgodoser dagens behov utan att äventyra nästkommande generationers möjlighet att tillfredsställa sina behov. På så sätt kan kommande generationer leva med samma möjligheter som vi gör idag. Syftet med mål 7, hållbar energi för alla, är att alla människor ska ha tillgång till och råd med pålitlig, hållbar och modern energi. Dessutom är syftet med mål 13 att bekämpa klimatförändringarna genom att motverka temperaturökningarna runt om i världen. Detta kan göras genom att minska utsläppen av farliga växthusgaser (FN-förbundet, 2023b)

Energikällan som människan använt sig av har sedan länge varit fossila bränslen, primärt kol och olja, men eftersom växthuseffekten har blivit en viktig fråga i dagens samhälle har även mängden utsläpp av växthusgaser blivit en mycket diskuterad fråga. Växthusgaser som produceras vid förbränning av fossila bränslen bidrar till växthuseffekten (Wuebbles & Jain, 2001). Detta ger negativa konsekvenser i förhållande till de globala målen som FN har skapat i syfte att erhålla en hållbar utveckling. Detta har gett en anledning till att hitta alternativa miljövänliga energikällor som kan ersätta fossila bränslen utan att påverka miljön.

2.1.1 Energianvändning och energiproduktion idag

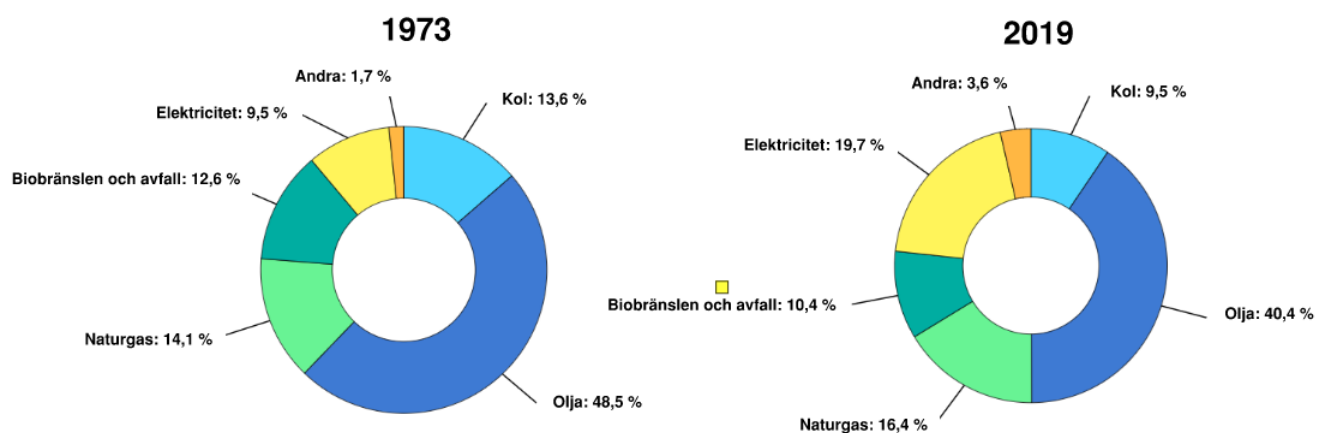
År 2022 skedde en minskning av elanvändning i Sverige samtidigt som elproduktionen ökade. Den totala exporten av elektricitet var upp mot 33 TWh (Bjerndal, 2023). Produktionen av elektricitet kom från olika typer av källor. Olika energikällors andel elproduktionen redovisas i figur 1 nedan.



Figur 1. Kraftslagets andel av elproduktion för Sverige under 2022 (Bjerndal, 2023).

Som figuren illustrerar produceras den största delen elektricitet i Sverige genom vattenkraft och kärnkraft. Detta gäller särskilt energikällor som är intermittenta, exempelvis solkraft och vindkraft. För energikällor som presenteras i figuren är det viktigt att det finns energibärare, så som system baserade på vätgas, för att kunna leda eller lagra energi

Ur ett globalt perspektiv varierar andelen för olika energikällor mellan länder. Som tidigare nämnt har det historiskt varit fossila bränslen som varit den primära energikällan, men på senare tid har alternativa och miljövänliga energikällor börjat användas. I figur 2 nedan redovisas andelen konsumerad energi, beroende på energibärare för 1973 och 2019. Som figuren illustrerar har konsumtionen av energi från fossila bränslen minskat samtidigt som andelen energi från naturgas och elektricitet av olika källor har ökat (IEA, 2021).



Figur 2. Global energiförbrukning beroende på källa för 1973 och 2019 (IEA, 2021).

2.1.2 Energianvändning i framtiden

Svenskt näringsliv (2019) bedömer att Sveriges elbehov förväntas öka med minst 60 % fram tills år 2045. Detta i kombination med växthuseffekten har gett ytterligare anledningar till att öka användningen av miljövänliga energikällor för att det ska kunna ske en hållbar utveckling. Exempel på sådana alternativa energikällor som substitut för fossila bränslen är vindkraft, solenergi och vattenkraft. De nämnda energikällorna tar hänsyn till de snabba miljöförändringarna eftersom mängden koldioxidutsläpp är betydligt lägre. Idag kommer nästan 98 % av energin i Sverige från fossilfria energikällor, så som kärnkraft, vindkraft, vattenkraft och solenergi (Wengeler, 2020). En problematik som dagens samhälle står inför är sättet att denna energi på. Ett sådant sätt att lagra energi på är genom energilagringssystem som är baserade på vätgas (Arsad et al., 2022). Användningen av vätgas bidrar inte till koldioxidutsläpp vilket är positivt ur ett hållbarhetsperspektiv. Vidare menar Back och Berg (2022) att vätgas som energibärare är både effektivt och billigt ur ett nytto-kostnadsperspektiv.

2.2 Vätgas

Vätgas har den kemiska beteckningen H_2 och består av två väteatomer. Väte (H) är det första grundämnet i det periodiska systemet och är det lättaste grundämnet i världen. Atomen består av en proton och en elektron samt har en relativ atommassa på 1. Dessutom är ämnet det

vanligast förekommande då nästan 93 % av alla atomer är väteatomer (Linde Gas, 2023). Dock är vätgas inte vanligt i jordens atmosfär, endast 0,0001 % av atmosfären består av vätgas.

Gasen, som ofta nyttjas som energibärare, har en låg densitet och är mycket lättantändligt vilket beror på dess goda reaktiva förmåga. Vätgas har en kokpunkt på cirka $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$, vilket betyder att ämnet oftast förekommer i gasform på jorden vid naturliga förhållanden. Vätgas är dessutom lukt- och färglös vilket gör att den är svår att detektera (Linde Gas, 2023). Eftersom gasen har ett stort brännbarhetsområde som ligger mellan 4 – 75 % samt dess låga antändningsenergi och höga förbränningshastighet är gasen lättantändlig och risken för explosion hög (Jeon & Sung Joong, 2020).

2.3 Vätgas i samhället

Vätgas har i dagens samhälle en mängd olika användningsområden. Gasen fungerar primärt som en energibärare och kan användas till att lagra, tillhandahålla och distribuera energi. Vätgas från fossila bränslen har länge använts inom kemiindustrin där syftet har varit att producera nya kemikalier så som ammoniak och metanol (Vätgas Sverige, 2023). Med de nya målen som ställer krav på minskning av användning av fossila bränslen har vätgas blivit en viktig komponent inom energisystemet i Sverige. Som tidigare nämnt finns det hög potential att använda vätgas som energibärare för att transportera eller lagra energi från förnybar energi från energikällor som sol, vind och vatten. Det är exempelvis möjligt att lagra energi som har producerats med hjälp av solceller. Denna användning av fossilfri vätgas kan minska koldioxidutsläppet och bidrar till en hållbar utveckling. Idag används vätgas ofta som råvara inom industrin, men i linje med att minska användning av fossila bränslen, har nya sätt att producera vätgas på tillkommit, så som genom elektrolys som används inom stålindustrin

Enligt Vätgas Sverige (2023) strävar Sverige efter att all transport ska vara fossilfri år 2030. För att uppnå detta mål är en av lösningarna att öka användningen av eldrivna fordon. Åter igen kan denna elektrifiering av transporter och fordon ske med hjälp av vätgas i kombination bränsleceller. En bränslecell används för att omvandla vätgas till el i fordon. Genom att öka användningen av eldrivna fordon minskas koldioxidutsläppet eftersom endast vatten bildas som en restprodukt.

När det gäller energibranschen är elproducenter intresserade av vätgas då det bidrar till flexibilitet och ett höjt värde på elproduktion. För att omvandla vätgas till elektricitet eller värme används bränsleceller och förbränningsmotorer eller gasturbiner. Vätgasens förmåga att lagra energi gör att det är möjligt att anpassa elförbrukningen till priser på elmarknaden (Vätgas Sverige, 2023). Dessutom kan den överblivna värmen som bildas vid produktionen användas för uppvärmning.

Som tidigare nämnt används vätgas från fossila källor för att producera ammoniak, som är en idag används för att tillverka konstgödsel. Jordbrukssektorn har som mål att bli 100 % fossilfria 2030 (Vätgas Sverige, 2023). För att uppnå målet har man i stället lagt fokus på att använda lokalt producerad vätgas från fossilfria energikällor, som till exempel solenergi, vattenkraft och vindkraft.

2.4 Risker vid användning av vätgas

Då vätgas förväntas användas och förekomma i större omfattning och mängder i samhället krävs det att riskerna för detta tas hänsyn till. Som tidigare nämnt kan gasen användas på en rad olika sätt, både idag och i framtiden. Vätgas är en brandfarlig gas som antänds lätt. Som tidigare nämnt är användning av vätgas riskfyllt eftersom gasens molekylära egenskaper ger upphov till risker. Då vätgas är extremt lättantändligt är risken för explosion hög (Jeon & Sung Joong, 2020).

Enligt Kotchourko och Jordan (2022) förekommer de största riskerna för vätgas vid läckage där det sker en spridning av gasen i luften. Beroende på en rad olika faktorer vid läckage, så som flöde, tryck och graden av inestängning, blir konsekvenserna olika omfattande. Läckage som sprids genom mindre rörbrott med en liten håldiameter i kombination med en antändningskälla kan leda till att en jetflamma bildas. Kotchourko och Jordan (2022) nämner att antändningskällor inte endast är flammor eller gnistor, utan kan även vara till exempel friktion och varma ytor. Antändningskällor som dessa kan förekomma i många sammanhang, så som industrier. Detta i kombination med att vätgas har ett så stort brännbarhetsområde medför förhöjda risker vid användning. Användning av vätgas ger dock även upphov till explosionsrisker. Vätgasläckage som sker inom stängda utrymmen är risken för explosion stor.

Enligt Molkov (2012a) ligger risken i att vätgas förvaras i högt tryck. Vid läckage av sådana behållare med en liten håldiameter kan en jetflamma uppstå med en längd på tiotals meter, exempelvis i vätgasdrivna fordon. I industriella sammanhang kan läckage från större vätgaskällor med högt tryck och större håldiameter leda till jetflammar med längder på hundratals meter. Detta betyder att det finns behov av att skydda närliggande skyddsobjekt med hjälp av exempelvis skyddsavstånd (Molkov, 2012a) Eftersom det kan förväntas ske en ökning av vätgasanvändning, blir riskerna och konsekvenserna till följd av vätgasjetflammar alltmer relevant ur ett riskperspektiv.

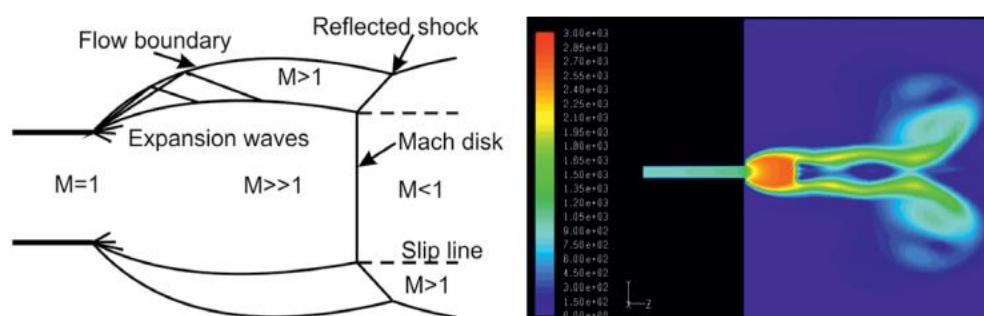
3 Teori

I följande avsnitt beskrivs teori som är relevant för examensarbetet och aktuell undersökning gällande vätgasjetflammar och simuleringsprogrammet Kameleon FireEx.

3.1 Jetflammar

En jetflamma uppstår vid ett kontinuerligt utsläpp av ett brännbart ämne i gas- eller vätskeform från ett trycksatt kärl eller en trycksatt ledning som resulterar i att luften sugas in i strålen och blandar sig turbulent med ämnet (Fischer et al., 1998). Vid antändning av en sådan utströmmande gasblandning uppstår en jetflamma. En stökiometrisk blandning uppstår i flammans gränsskikt, vilket innebär blandningen har en optimal förbränning.

Molkov (2012a) beskriver att det finns två olika typer av jetflammar, expanderade jetflammar och underexpanderade jetflammar. Expanderade jetflammar har ett tryck som vid munstycket för utsläppet är lika med atmosfärstrycket. Underexpanderade jetflammar har ett tryck som vid munstycket är högre än atmosfärstrycket. Som tidigare nämnt förekommer vätgas oftast i sammanhang där trycket är betydligt större än atmosfärstrycket. Därför är underexpanderade jetflammar den vanligast förekommande typen eftersom denna kan förväntas inträffa redan vid ett övertryck på 1,9 bar(g) (Molkov, 2012). I figur nedan illustreras en underexpanderad jetflamma.



Figur 3. Schematisk representation av en underexpanderad jetflamma (Molkov, 2012a).

Vidare nämner Molkov (2012a) att en jetflammas längd L_F är proportionell mot munstyckets/hållets diameter, D . Ekvation nedan, som är framtagen av Hawthorne, beskriver detta samband:

$$\frac{L_F - s}{D} = \frac{5.3}{C_{st}} \sqrt{\frac{T_{ad}}{\alpha_T T_N} \left[C_{st} + (1 - C_{st}) \frac{M_S}{M_N} \right]}, \quad (1)$$

där s är avståndet mellan brytpunkten och munstycket, α_T är förhållandet mellan antal mol reaktanter och antalet mol produkter för en stökiometrisk blandning, T_{ad} är den adiabatiska flamtemperaturen, T_N är vätskans temperatur i munstycket, C_{st} är molfraktionen av vätskan i munstycket för en stökiometrisk blandning med luft och M_S/M_N är sambandet mellan molekylära massan för omgivningen och vätskan. Molkov (2012a) nämner dock att denna ekvation inte är helt representativ för under-expanderade jetflammar på grund av bland annat turbulens. En mängd olika experiment har utförts för att beskriva förhållandet mellan

jetflammans längd, munstyckets diameter och vätgasflödet. Genom en sammanställning av experimenten kan den konservativa ekvation 2 användas för att beräkna jetflammans längd.

$$L_F = 116(\dot{m} * D)^{0,347} \quad (2)$$

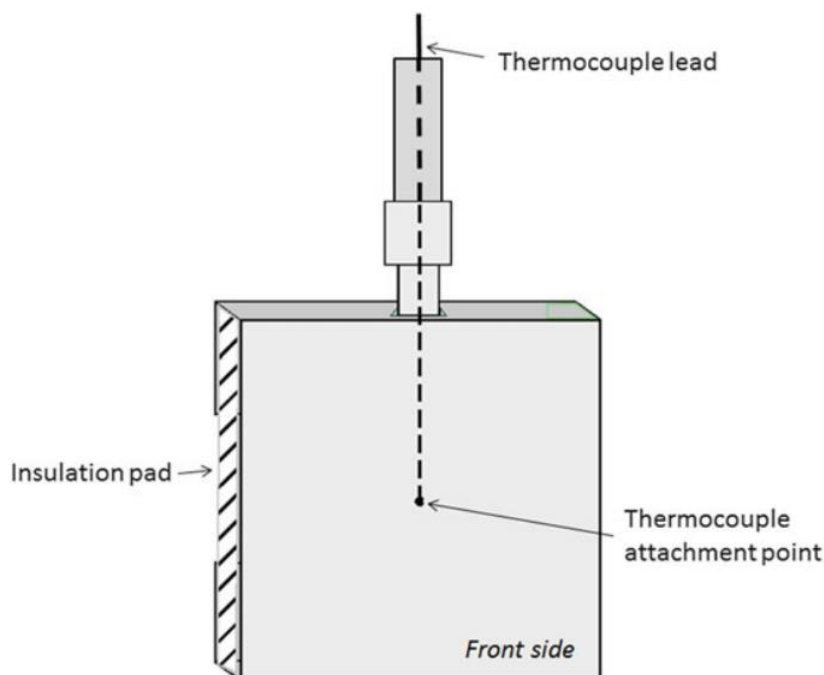
där \dot{m} är massflödet och D är munstyckets diameter.

3.2 Plattermoelement

Det finns ett flertal olika typer av termoelement som används vid forskning där typ K är den vanligaste (Wickström, 2016). Den standardiserade typen av termoelementplattor används för att mäta ISO834-påverkan och europeiska EN 1363-1 i syfte att harmonisera temperaturmätning vid experiment, se utformning i figur 4. Termoelementet mäter en kombination av strålning och gastemperatur. När plattermoelementen har en tillräckligt bra isolering försummas värmeledningen in i isoleringen, vilket gör att plåtens temperatur blir värmebalansen på ytan, utan värmeförlust in i materialet. Detta kallas "Adiabatic Surface Temperature". Dessutom kan även strålningen mätas med hjälp av termoelementplattor genom en värmebalansekvation enligt ekvation 3 (Wickström, 2016).

$$\varepsilon_{PT}\dot{q}_{inc}'' - \varepsilon_{PT}\sigma T_{PT}^4 + h_{PT}(T_g - T_{PT}) + K_{PT}(T_g - T_{PT}) = C_{PT} \frac{dT_{PT}}{dt} \quad (3)$$

där första termen på vänsterledet är strålningen som plattan absorberar; andra är emitterad värme; tredje är konvektiv värmeöverföring och fjärde är värmeförlust genom konduktion i isolering. Högerledet representerar värmen som lagras enligt Lumped-Heat-Capacity.



Figur 4. Termoelementplatta enligt ISO 834 och EN 1364-1 (Wickström, 2016).

3.3 Kameleon FireEx

3.3.1 Beräkningar och ekvationer

Kameleon FireEx (KFX) är en CFD-kod producerad av DNV och används för att analysera säkerheten för situationer med brandrisker, oftast offshore. Detta beror på att mjukvaran möjliggör ett snabbt och effektivt sätt att bedöma konsekvenser av olika typer av situationer där brandrisken är hög. Simuleringsprogrammet används primärt inom olje- och gasindustrin som ett CFD-verktyg i syfte att simulera flammor, gasspridning och brandspridning (DNV, 2022a). KFX har använts sedan 1989 i industriella sammanhang för att analysera konsekvenserna av bland annat explosioner, jetflammar och gasläckor. KFX beräknar CFD-koden baserat på fundamentala och konserveringsekvationer för turbulenta flöden och förbränning. Den grid som programmet definierar för att lösa dessa ekvationer kallas Cartesian Grid (koordinatsystem) (DNV, 2022a).

KFX använder sig av Navier-Stokes ekvationer och Reynolds Avarage Navier-Stokes för att modellera kritiska flöden och turbulens. Dessutom använder KFX Eddy Dissipation Concept (EDC) som baseras på $k-\epsilon$ modellen, som tar hänsyn till det komplexa samspelet mellan kemiska reaktioner och turbulenta flöden (DNV, 2022b). Detta är en viktig del vid modellering av brandutveckling och gasspridning då en rad olika variabler måste tas hänsyn till, så som flamstabilitet och förbränning.

Vidare använder KFX sig av en kalkylator för jetgränsvillkor för att beräkna utsläppsvillkor av underexpanderade jetutsläpp Meraner et al. (n.d). När gas vid högt tryck släpps ut från en öppning till atmosfärstryck som är betydligt lägre än utsläppstrycket, skapas kritiska förhållanden som begränsas av den lokala ljudhastigheten. Gasen som släppts ut expanderar snabbt för att nå omgivningens tryck. Detta leder till att tvärsnittsarean ökar. Denna modell möjliggör en uppskattning av avståndet från utsläppskällan till positionen där jetflamman har blivit subsonisk. På så sätt kan utdata för den nya positionen av jetflammas utsläppskälla beräknas.

3.3.2 Strålningsberäkningar i KFX

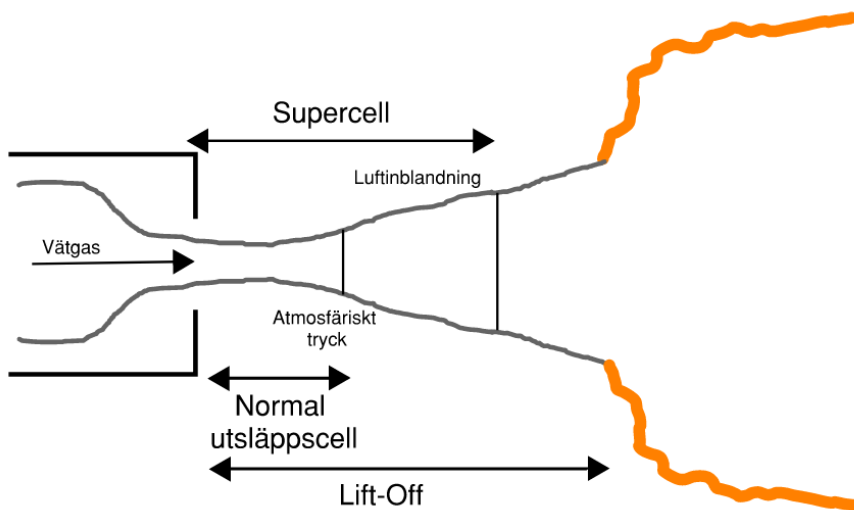
När det gäller strålningsberäkningar i KFX, finns det två olika modeller som kan användas beroende på geometri och behov. Modellerna kallas i KFX för Far Field Calculations och Near Field Calculations (DNV, 2022b).

Strålningsberäkningarna baseras på att en linje av punkter skapas på jetflammas axel som utgör strålningskällor för simuleringen. Strålningen beräknas för varje individuell kontrollvolym vilket betyder att den totala strålningen från flammen kan beräknas genom en integral av strålningsbalansen för alla kontrollvolymerna som utgör luft i domänen. Om syftet är att mäta strålningen för ett relativt långt avstånd från flammen kan den totala strålningen användas som en punktkälla. I KFX går det även att definiera antalet strålar som punkten/punkterna strålar med, ju fler desto noggrannare resultat kan förväntas, särskilt vid längre avstånd. Vid denna validering används 96 strålar per punkt, vilket är ett default-värde (Merander et al., n.d). Den stora skillnaden mellan Near Field och Far Field Calculations är att Near Field calculations tar hänsyn till temperaturen på solida material som bidrar till värmeöverföring genom utfallande strålning. På grund av detta är det lämpligare att använda Near Field Calculations vid mindre domäner med kortare avstånd (DNV, 2022b).

3.3.3 Celltyper i KFX

I domänen som definieras i KFX ansätts varje cell till en enskild celltyp. I simuleringsprogrammet används i denna analys primärt tre typer av celltyper som antingen kan innehålla fasta material eller gas. Den första celltypen är celler för det fria flödet i luften i omgivningen. I denna typ av cell sker primärt beräkningar för värmeöverföring och jetflamman. När det gäller stålet och isoleringen ansätts de celler där materialen ska finnas som fasta material, där materialegenskaperna som presenteras under arbetet måste anges.

Slutligen ansätts den cellen för utsläppspunkten som en individuell utsläppscell (supercell). Denna typ av cell är lämplig vid simulering av underexpanderade jetflammar och möjliggör god kvalitet av simuleringar, även vid en grövre grid, i jämförelse med andra typer av utsläppscelltyper (DNV, 2022b). För denna typ av utsläppscell beräknas det avstånd från den fysiska utsläppskällan till den virtuella utsläppskällan, vilket betyder att flammen i KFX måste flyttas i flammans riktning. Vanliga utsläppsceller i KFX mäter avståndet tills då gasen har gått ner till atmosfäriskt tryck, se figur 5.



Figur 5. Skillnad på supercell och normal utsläppscell vid beräkning av flammans förflyttning.

3.3.4 Simulering av jetflammar med KFX

Som tidigare nämnt använder KFX sig av Eddy Dissipation Concept för samspelet mellan kemiska reaktioner och turbulenta flöden. Med EDC kan programvaran beräkna följande variabler enligt ekvationer nedan (Rian, 2019).

$$u^* = 1,75(\varepsilon * \nu)^{1/4} \quad (4)$$

$$L^* = 1,43\nu^{3/4}/\varepsilon^{1/4}, \quad (5)$$

där u^* är den karakteristiska flamhastigheten, L^* är den karakteristiska flamlängden, ε är spridningshastigheten för den kinetiska energin och ν är den kinematiska viskositeten. Strålning modelleras i simuleringsprogrammet enligt metoden för diskret överföring framtagen av Lockwood och Shah (DNV, 2022b).

3.4 Tidigare validering av KFX för jetflammar

En validering som utförts tidigare är *Modelling and Numerical Simulation of Hydrogen Jet Fires for Industrial Safety Analays* (Rian, 2019). Experimenten utfördes i Storbritannien på Spadeadam testsite på uppdrag av Products and Chemicals Inc. Tidigare har endast valideringar av småskaliga experiment av vätgasjetflammar gjorts för KFX, därför valideras i stället ett storskaligt experiment i aktuell analys.

Valideringen utgår ifrån två olika experiment med ett munstycke på 20,9 mm respektive 52,2 mm diameter. Massflödet vätgas var 1 respektive 7,5 kg/s, vilket mättes med hjälp av mätinstrument. Vätgasjetflammorna har en horisontell riktning och är placerade 3,25 meter över marken, se figur 6. Vidare uppmättes omgivningens förhållanden enligt tabell. För att kunna mäta den infallande strålningen användes mätpunkter för strålningsnivåer med 13 olika placeringar, se figur 6. Både vinkelräta och parallella mätpunkter mot flamman användes.

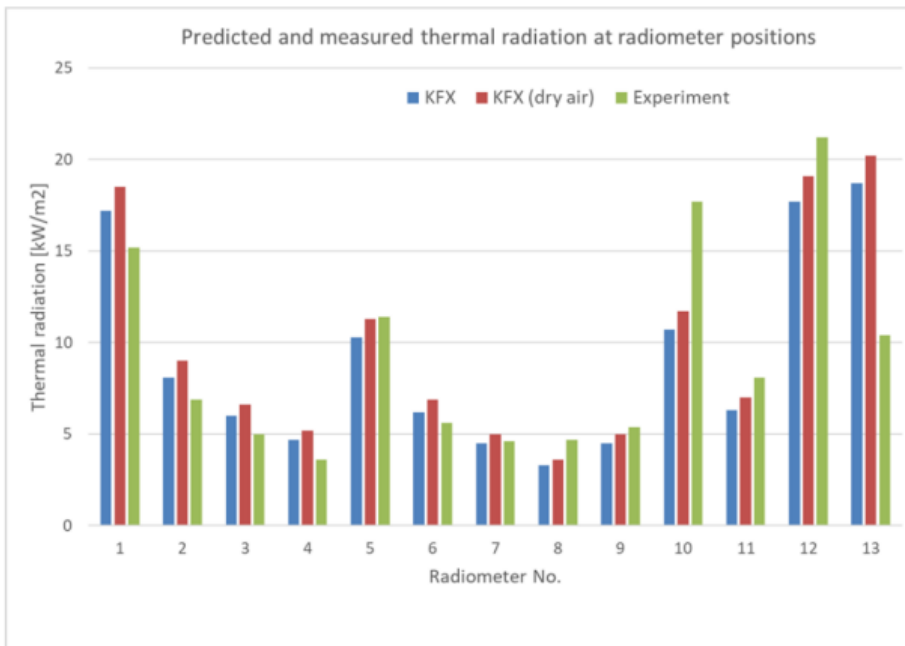


Figur 6. Placering utsläppspunkten för vätgasjetflamman samt placering av vätinstrument (Rian, 2019).

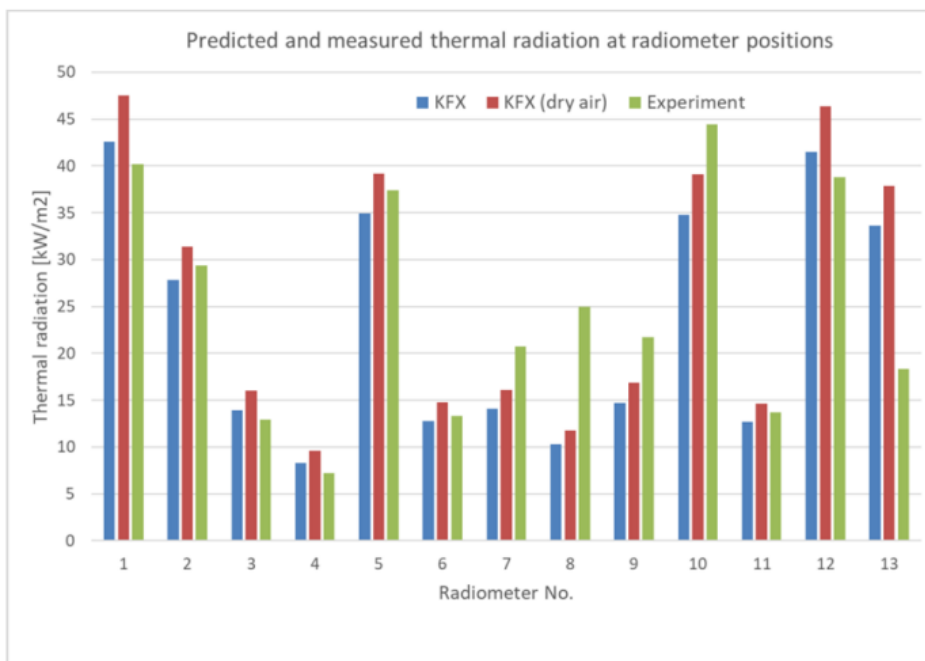
Tabell 1. Omgivningens förhållanden (Rian, 2019).

Jet nr	Di (mm)	\dot{m} (kg/s)	P_0 (bar)	T_0 (K)	RH (%)	T_{amb} (K)	P_{amb} (mbar)	U_{wind} (m/s)	Φ_{wind} (°)
1	20,9	1,0	62,1	308,7	94,3	280	1022	3,4	68,5
2	52,2	7,5	61,4	287,1	94,2	287	1011	2,6	38,7

Simuleringar som utfördes i KFX efterliknade de två olika scenarierna i experimenten. På så sätt kunde resultaten för simuleringarna och experimenten jämföras och på så sätt validera KFX. Resultaten för jet nummer 1 och 2 redovisas i figur 7 respektive 8.



Figur 7. Strålning uppmätt i KFX respektive experiment, jet 1 (Rian, 2019).



Figur 8. Strålning uppmätt i KFX respektive experiment, jet 2 (Rian, 2019).

Slutsatsen för valideringen var att värmestrålningen uppmätt i KFX överensstämde med värmestrålningen uppmätt i experimenten. Felmarginalen låg endast på $\pm 5\%$. Resultaten visade därför att KFX kan användas för att uppskatta konsekvenser av vätagjetflammar. Det rekommenderas dock att vidare valideringar utförs av storskaliga experiment i realistiska miljöer med komplexa geometrier (Rian, 2019).

4 Metodik

4.1 Metod

Detta avsnitt beskriver vilka metoder som har använts för att kunna utföra analysen och svara på de aktuella frågeställningarna. Den första delen som utfördes var datainsamling i syfte att inskaffa information och material som kunde användas som ingångsvärden vid simulering i KFX. Dessutom gjordes en undersökning om hur KFX fungerar för att få en grundlig förståelse för simuleringsprogrammet.

För att undersöka möjligheterna för KFX att prediktera förhållandena när en vätgasjetflamma träffar en yta så jämfördes simuleringar med tidigare experiment som utfördes år 2023 av Meraner et al. (n.d). Försöksupställningarna i de olika försöken beskrivs i nästföljande avsnitt och därefter beskrivs implementeringen i KFX.

4.2 Scenariobeskrivning experiment

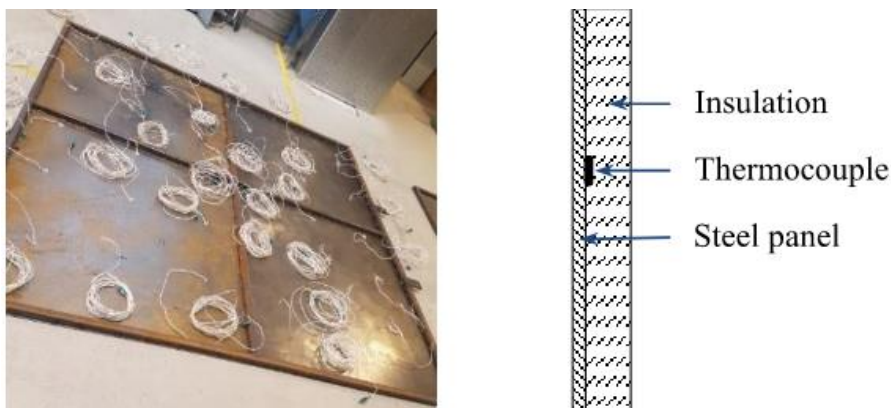
Som tidigare nämnt utgörs en variation av de olika fallen primärt på geometrierna av stålpanelerna som träffas av jetflammorna. Utöver detta varierar andra parametrar för respektive experiment, så som vinkel på munstycket för flödet av vätgas, jetflammans position samt geometrin. Valet av antal paneler baseras på möjliga sätt som fordon kan parkeras på. En panel (på marken), två paneler (en på marken och en bakre vägg) samt fem paneler som skapar ett instängt utrymme med en öppen front, se figur 10. Samtliga paneler är 3 meter långa och 3 meter breda. Fordon ska kunna parkera på en öppen yta, mot en vägg och i ett garage. Bortsett från experimenten med vätgasjetflammar har även ett experiment utförts med propanjetflamma, i syfte att jämföra de två olika gaserna. I tabell 2 redovisas en kortfattad beskrivning för respektive experiment. Notera att samtliga fall inte simuleras i KFX på grund av tidsbrist. Vilka scenarier som simuleras beskrivs nedan och i avsnitt 4.2.

Tabell 2. Beskrivning av indata för samtliga experiment (Meraner et al., n.d).

Scenario	Panel antal	Jet vinkel	Temp omg (°C)	Vind hastighet (m/s)	Vind rikt	Jet rikt	Hålets diameter (mm)	Initial Flöde (kg/s)	Initial Tryck (bar)
J45-1p *	1	45°	8	0,6	W	E	6	0,22	285
J45-2p-a *	2	45°	5	0,6	NE	E	6	0,21	286
J45-2p-b	2	45°	5	0,6	E	N	6	0,23	Ej obs
J45-5p-a *	5	45°	10	0,6	SE	N	6	0,20	305
J45-5p-b	5	45°	24	1,1	SE	N	6	0,23	281
J90-1p-a *	1	90°	0	0,6	NW	N	6	0,22	275
J90-1p-b	1	90°	0	0,3	N	N	6	0,23	272
J90-2p-a *	2	90°	10	0,8	NE	N	6	0,23	293
J90-2p-b	2	90°	9	1,4	SW	N	6	0,22	290
J90-2p-c	2	90°	6	1,4	E/NE	N	6	0,25	294
J90-5p-a	5	90°	13	0,6	SW	N	6	0,17	282
J90-5p-b *	5	90°	22	0,8	E/NE	N	6	0,21	Ej obs
J90-5p-prop	5	90°	27	0,6	E/NE	N	17,8	0,3	4

(*) Scenarier som simuleras i KFX.

Som figur 9 visar är panelerna konstruerade med ett 25 mm tjockt lager AES-mineralull (Alkaline Earth Silicate) och ett 1,5 mm tjockt lager stål. Mellan de två materialen är termoelementen (typ K) placerade fästa mot stålet. I experimenten utförda av Meraner et al. (n.d) som simuleringarna i KFX jämförs mot användes termoelementplattor i syfte att kontinuerligt mäta värmeutvecklingen i panelerna för respektive experiment.



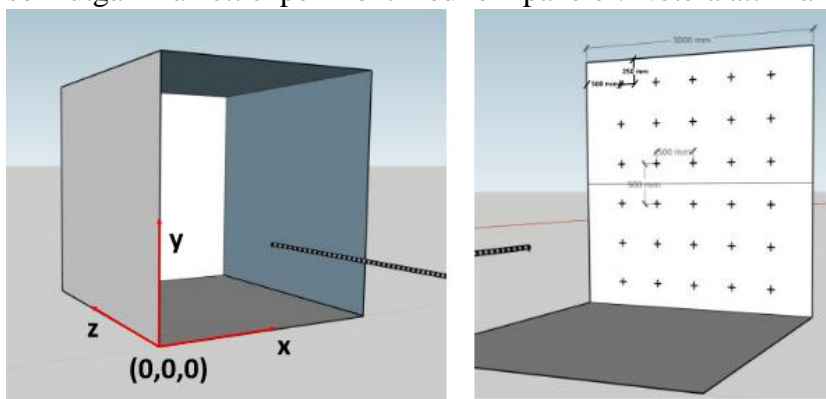
Figur 9. Termolement mellan stål och isolering för experimenten.

Enligt Meraner et al. (n.d) är densiteten för aktuell mineralull 128 kg/m^3 . Konduktiviteten och specifika värmekapaciteten för AES-mineralull kunde inte hittas under arbetets gång, därför användes värden för mineralull i genomsnitt. Den specifika värmekapaciteten för mineralull är 120 J/kgK (Svenskt Trä, 2021), men konduktiviteten varierar mellan $0,03$ och $0,045 \text{ W/mK}$ (Isover, 2023). Därför ansattes en konduktivitet på $0,037 \text{ W/mK}$. Dock gäller denna konduktivitet vid normal rumstemperatur, men när temperaturen stiger kommer även konduktiviteten öka på grund av konvektion i luften som finns i isoleringen. I tabell 3 redovisas k , ρ och C_p som används vid simuleringarna för respektive material. En fast konduktivitet på $0,037 \text{ W/mK}$ ansattes för isoleringen i plattan vilket är en felkälla som kan ha påverkat värmeöverföringen i materialet och därmed resultaten. Detta beror på att konduktiviteten ökar med ökad temperatur. Detta diskuteras vidare under diskussionen.

Tabell 3. Materialegenskaper för plattor.

	$K \text{ (W/mK)}$	$\rho \text{ (kg/m}^3\text{)}$	$C_p \text{ (J/kgK)}$	Tjocklek (mm)
Stål	45	7850	520	1,5
Mineralull	0,037	128	120	25

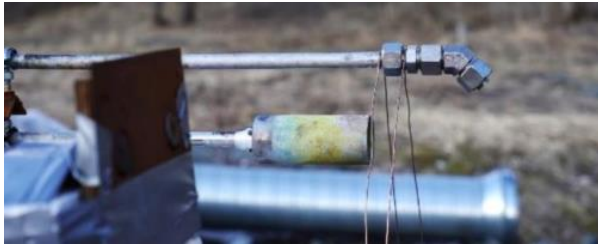
Namnet på experimenten baseras på vinkel, antal paneler och repetition enligt $J_x\text{-}y\text{-}z$, där x är vinkel på munstycket, y är antal paneler och z är repetition. Vinkeln på jetflamman ansätts till antingen 90° (horisontellt) eller 45° neråt, se figur 11. Avståndet kan variera beroende på repetition, se tabell 2. Positioner som följer koordinatsystem utgår ifrån origo enligt figur 10 som utgår ifrån ett experiment med fem paneler. Notera att Y är Z i KFX och vice versa.



(a)

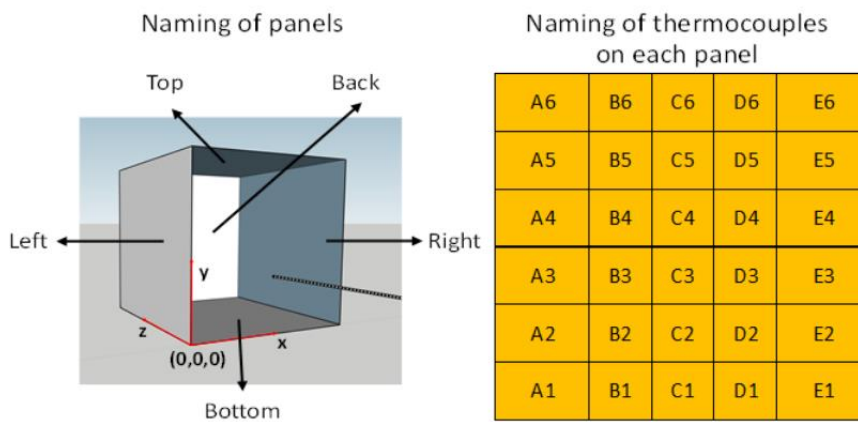
(b)

Figur 10. (a) Experiment med fem paneler och öppen front. X, Y och Z visas med röda pilar. (b) Experiment med en vertikal väggpanel och en panel på marken (Meraner et al., n.d).



Figur 11. Vätgasröret med ett 45 graders vinklat munstycke och propanbrännaren (Meraner et al., n.d)

Som figur 12 visar placeras 30 mätpunkter för temperatur med 500 mm avstånd. Vidare namnges varje mätpunkt för termoelementen efter bokstav, nummer och placering enligt figur 12 nedan.



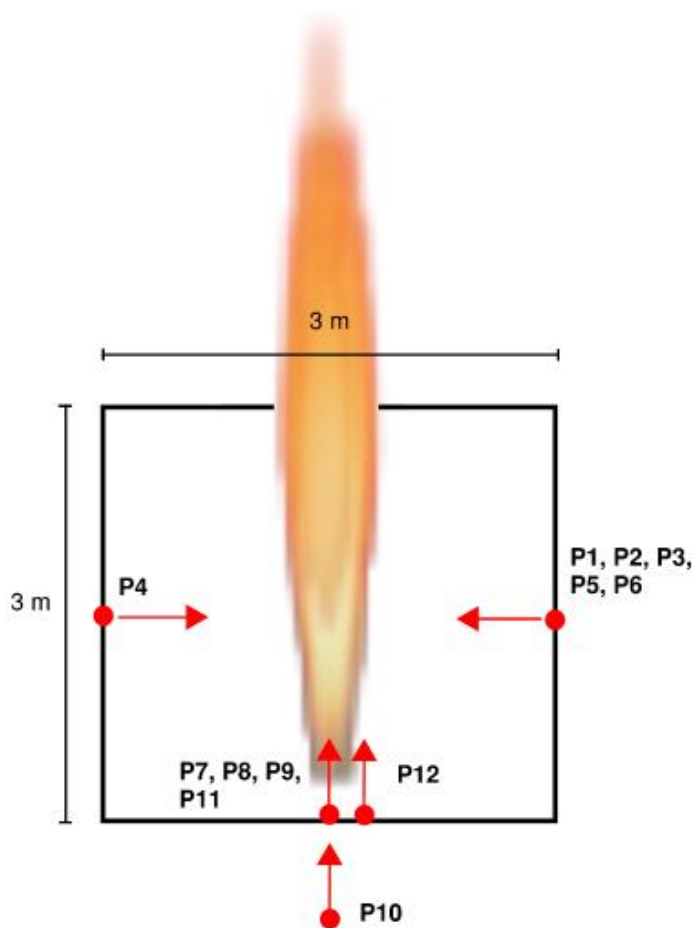
Figur 12. Beskrivning av mätpunkter (Meraner et al., n.d)

När det gäller strålningsnivåer har två strålningsmätare placerats i anknötning till plattorna, en som är riktad vinkelrätt mot jetriktningen och en som är riktad parallellt mot jetriktningen. Placering av mätpunkterna redovisas i tabell 4 och figur 13.

Tabell 4. Placering av mätpunkter för strålning.

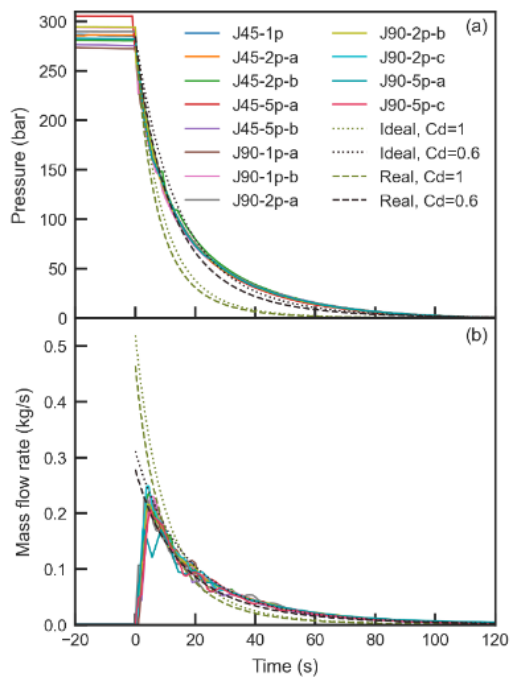
Scenario	Vinkelrätt	Parallellt
	Koordinat (x;y)(m)	Koordinat (x;y)(m)
J45-1p *	3; 1,5 (P1)	1,5; 0 (P7)
J45-2p-a *	3; 1,5 (P2)	1,5; 0 (P8)
J45-5p-a *	3; 1,5 (P3)	1,5; 0 (P9)
J90-1p-a *	0; 1,5 (P4)	1,5; -1 (P10)
J90-2p-a *	3; 1,5 (P5)	1,5; 0 (P11)
J90-5p-b *	3; 1,5 (P6)	1,6; 0 (P12)

(*) Scenarier som simuleras i KFX.



Figur 13. Placering och riktning på mätpunkter.

I experimenten används vätgas som förvarats i totalt 5 ståltuber som rymmer 50 liter vätgas var med ett initialt tryck på cirka 300 bar. Varje tub innehåller $12,3 \text{ m}^3$ vätgas i normala förhållanden, $20 \text{ }^\circ \text{C}$ och 1,013 bar. I varje experiment mättes det initiala trycket, vilket låg mellan 272 och 294 bar, bortsett från experimentet med propan där trycket hölls konstant på 4 bar med en regulator. För trycket och massflödet sker så kallat "blowdown" vilket innebär att värdet minskar tills att det når 0 enligt figur 14. Notera att massflöde och tryck för experimentet med propan är konstant under hela brandförloppet.



Figur 14. Massflöde och tryck för respektive scenario (Meraner et al., n.d)

Massflöde -och tryckkurvorna jämfördes med teoretiska kurvor för med två olika utsläppskoefficienter (C_d), $C_d=1,0$ och $C_d=0,6$. Detta gjordes för både ideal och real gas. Som figur 14 visar representerar $C_d=0,6$ experimenten väl i jämförelse med $C_d=1,0$. Därför antas utsläppskoefficienten vara 0,6 för samtliga experiment. C_d är en kontraktionsfaktor som beskriver hur hålet för utsläppet påverkar gasens utströmning, där 1,0 är för flöden utan kontraktion. Kontraktionsfaktorn för hål med rundade inloppskanter är normalt 0,95 samt 0,75 för skarpkantade hål (Fischer et al., 1998).

I experimenten användes två olika uppställningar för grenrör enligt figur 15. Fem slangar är fästa i vätgastuberna som leder till munstycket för jetflamman. För det ena grenröret (a), från vänster till höger, är tryckgivaren placerad, därefter slangarna från tuberna, sedan är kulventilen placerad som styrs av de gula slangarna, en Coriolis-massflödesmätare och sist är röret som leder till munstycket. Det andra sättet (b) skiljer sig genom att kulventilen är placerad efter massflödesmätaren, se figur 15.



Figur 15. Två typer av uppställningar av grenrör för vätgasflödet. (b) gäller för experiment J45-2p-b, J45-5p-b, J90-2p-c och J90-5p-b.

4.3 Scenariobeskrivning KFX

Totalt sex simuleringar gjordes i KFX, vilka redovisas i tabell 2. Anledningen till att endast sex simuleringar utfördes berodde på den rådande tidsbristen under examensarbetet samt att många av fallen är snarlika med endast små skillnader i ingångsvärden. Tidsbristen berodde på att författaren inte hade erfarenhet av KFX vilket gjorde att tiden för att utföra simuleringar tog längre tid än förväntat.

Ingångsvärden framgår av tabell 2 för respektive scenario. De ingångsvärden som är aktuella för respektive scenario ansattes i KFX enligt figur 16. I figuren beskrivs scenario J90-1p-a som exempel.

The screenshot shows the KFX software interface with the following data:

- Case name:** J90-1p-a, dir: C:\Users\Brandteknik
- Simulation type:** Fire, Gas cloud
- Geometry:** Geometry file: 1p0NY.kfx, Solid response: DEFAULT
- Wind conditions:** Wind direction (deg. from north): 315, Wind speed (m/s): 0.6, Ambient temperature (C): 0, Atmospheric stability: neutral, Wind profile ground level (m): 0, Ground roughness- z0 (m): 0.0002
- Jet release data:** Reservoir Temperature (C): 0, Jet release flow rate (kg/s): 0.22, Reservoir Pressure (barg): 199.099, Hole diameter (m): 0.00465, Equivalent diameter (m): 0.062249
- Vapour/Liquid table:**

Get species	H2	100					
<		0		0		0	0
>		0		0		0	0
<input checked="" type="checkbox"/> DIPPR		0		0		0	0
		0		0		0	0
- Attach files:** Attach transient release file: N/A, Attach spray input file: N/A
- Grid data:** Number of control volumes: 100, Grid smoothing: Grom2, Force domain boundaries: Lower (X: -10, Y: -10, Z: 0), Upper (X: 10, Y: 15, Z: 10)

Figur 16. Exempel på användning av ingångsvärden i KFX.

Som tidigare nämnt antas C_d värdet vara 0,6 för samtliga scenarier efter jämförelse med teoretiska kurvor med blowdown (Meraner et al., n.d). I KFX är $C_d = 1,0$ som default, vilket betyder att håldiametern som används vid experimenten behövde göras om till effektiv diameter för att få ett representativt massflöde ur hålet med hänsyn till den nya kontraktionsfaktorn 0,6. Detta gjordes enligt följande formler:

$$A_e = \frac{C_d \pi D^2}{4}$$

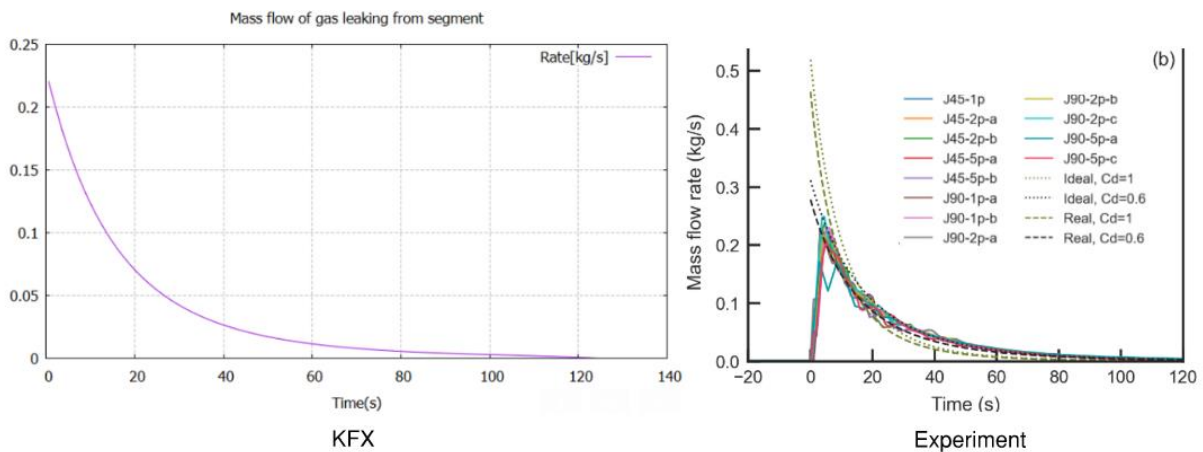
$$D_e = \sqrt{\frac{4A_e}{\pi}},$$

där A_e är den effektiva arean, C_d är kontraktionsfaktorn 0,6, D är ursprungsdiametern 6 mm på hålet och D_e är den effektiva diametern. Detta ger en effektiv diameter på ca 4,65 mm (rödmarkerat), som används vid simuleringarna.

För att KFX ska kunna hantera värmeledningen i de fasta materialen behöver densiteten (ρ), specifika värmekapaciteten (C_p) och konduktiviteten (k) specificeras för respektive material. I KFX är de tre variablerna redan definierade för stål, men inte för mineralull. Se tabell 3 för värden som används för respektive variabel. Vid simuleringar gjordes antagandet att initialtemperaturen hos materialen i plattorna är ekvivalent med omgivningens temperatur.

För att ta hänsyn till att den virtuella källtermen ligger på ett visst avstånd från den fysiska dysan så flyttas källtermen till den fysiska dysan, vilket är när gasen har expanderat till omgivningstrycket och hastigheten är under ljudets hastighet och viss inblandning av luft har skett, se figur 5 i avsnitt 3.3.3.

Som figur 14 i föregående avsnitt visar sker så kallat blowdown för massflödet i jetflammorna, vilket betyder att massflödet minskar över tid. I KFX anpassas flödet för respektive scenario med blowdown automatiskt med ansatta initiala flöden. Detta används i beräkningarna för simuleringarna. Se figur 17 nedan för exempel på hur flöde förändras under brandförloppet.



Figur 17. Blowdown för massflöde med initialt flöde på 0,22 kg/s för KFX (vänster) samt experiment (höger).

För att kunna utföra simuleringar i KFX måste en grid för domänen definieras. Griden är något av de viktigaste delarna vid CFD-simuleringar då den är avgörande för simuleringstiden och kvaliteten av resultaten (Bertram, 2012). Ju fler celler som ingår i griden desto bättre resultat ger vanligen simuleringar. Som tidigare nämnt baseras KFX på så kallad kartesisk grid, som utgår från ett ortogonalt koordinatsystem. Griden består av celler i olika storlekar beroende på meshens utformning. Beräkningarna som utförs vid simulering görs för varje cell, vilket betyder att kvaliteten vanligen ökar ju fler celler som finns i griden.

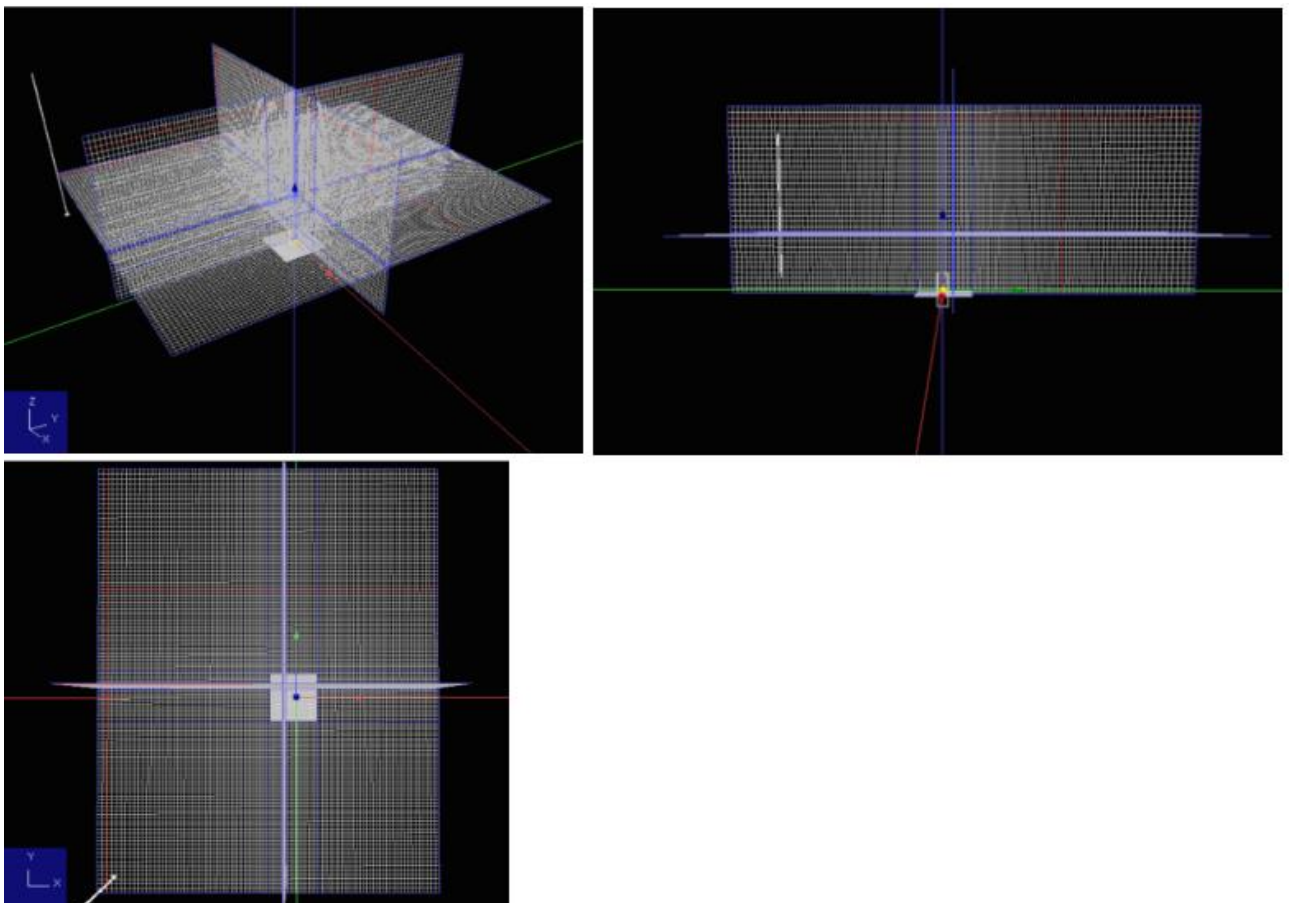
Vid simuleringar av aktuella scenarion används en domän enligt tabell 5. Gränsvärdena har valts med avsikt att gränserna inte ska påverka resultatet för jetflamman.

Tabell 5. Gränsvärden för domänen.

	X (m)	Y (m)	Z (m)
Min	-10	-10	0
Max	10	15	10

För aktuella simuleringar används 100 000 celler, vilket är lägre än rekommenderat för liknande situationer enligt DNV (2022b), som är 500 000 celler. Anledningen till detta är den tidsbrist som fanns under arbetets gång. Även denna aspekt diskuteras under diskussionen. Se figur 18 för exempel på gridens utformning vid simuleringar.

Vid simuleringarna användes strålningsmodellen "Near Field Calculations" i KFX som baseras på punktkällor för strålningsberäkningar. Enligt DNV (2022b) fungerar detta beräkningssätt väl vid små geometrier och domäner, i jämförelse med Far Field Calculations. Se avsnitt 3.4 för vidare beskrivning av strålningsberäkningar. Dessutom användes en emissivitet på 0,9 vilket används som default i KFX.

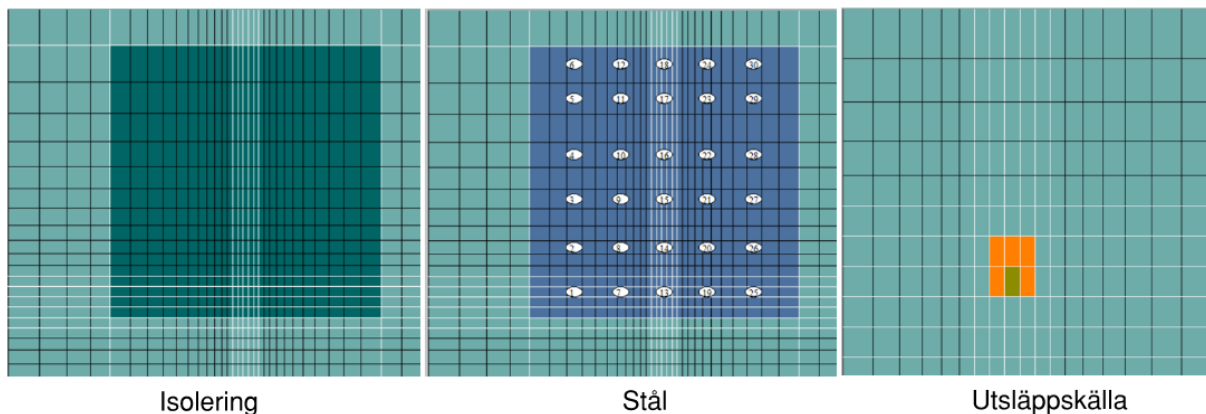


Figur 18. Mesh för samtliga scenarion.

I CFD-modeller, så som KFX, sker beräkningar för varje cell som finns i meshen. I KFX ansätts en "cell type" för varje cell beroende på innehållet. Cellerna kan antingen innehålla fasta material eller gaser. För aktuella scenarion används primärt tre olika celltyper. Först och

främst definieras luften i domänen som fria flödesceller i luft. När det gäller plattorna definieras stålet och isoleringen som fasta material. För dessa celler ansätts de materialegenskaper som redovisas i tabell 3, som påverkar värmeöverföringen i materialen. Dessutom anges den tjocklek, som redovisas i tabell 3, som materialet har. Slutligen anges cellen för utsläppspunkten till en egen enskild utsläppscell. Beskrivning samt anledning till valet av de olika celltyperna och redovisas i avsnitt 3.4.

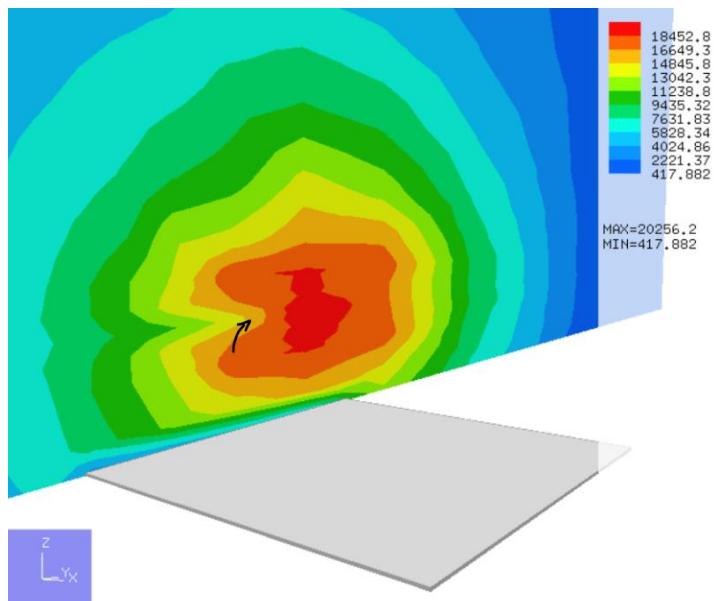
De olika celltyperna placeras därefter i domänen. Meshen skapas därefter av KFX med hänsyn till att tillräckligt bra upplösning finns runt jetflamman. Notera att cellerna är olika stora beroende på placering. Ju närmre cellerna är utsläppskällan och jetflamman desto mindre celler, vilket ger bättre upplösning och noggrannare beräkningar. I figur 19 nedan visas en representation av geometrin som används i KFX för scenario J90-1p-a. De 30 mätpunkter (termoelement) i plattan som används vid jämförelse med experiment är placerade i mitten av cellen, som kan ses i figur 19. Detta beror på att man endast kan placera så kallade history points (mätpunkter) i mitten av celler i KFX. Ett beslut gjordes därför att placera mätpunkterna i mitten av stålet vars tjocklek endast är 1,5 mm. Temperaturen förväntas därför inte avvika i stor omfattning i relation till temperaturen mellan isolering och stålet.



Figur 19. Representation av geometri som KFX använder i beräkningar som utförs vid simulering.

*Orange färg på celler anger riktningen på flammen, i detta fall (J90-1p-a) i positiv y-riktning.

Vid jämförelse av strålningsnivåer i KFX användes visuella utdata för strålningsnivåer på valda axlar i 2D. Koordinaterna för mätpunkterna i tabell 4 användes för att ta fram rätt bild. Se figur 20 för hur strålningen för den vinkelräta mätpunkten uppmättes för J90-1p-a.



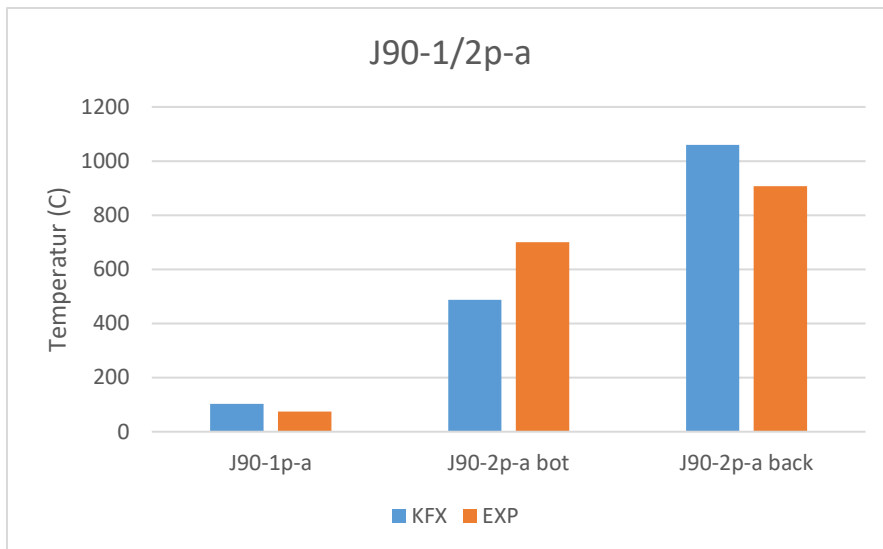
Figur 20. Strålning för J90-1p-a vinkelrät mät punkt.

5 Resultat

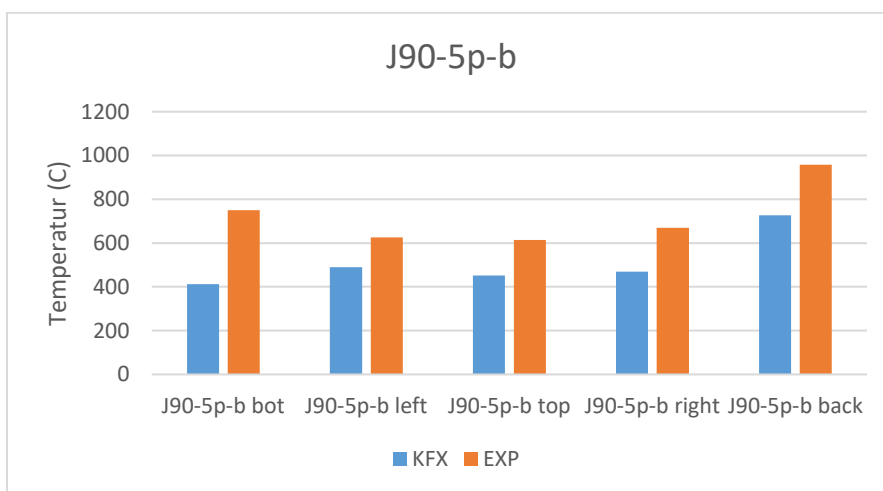
I följande avsnitt redovisas resultat från simuleringarna i KFX samt en jämförelse mot de aktuella experimenten. Notera att experiment benämns "EXP" i grafer som presenteras. Notera även att scenario J45-5p-a kraschade på grund av numerisk instabilitet och därför kan inga resultat redovisas i följande avsnitt (se bilaga A).

5.1 Maximal Temperatur

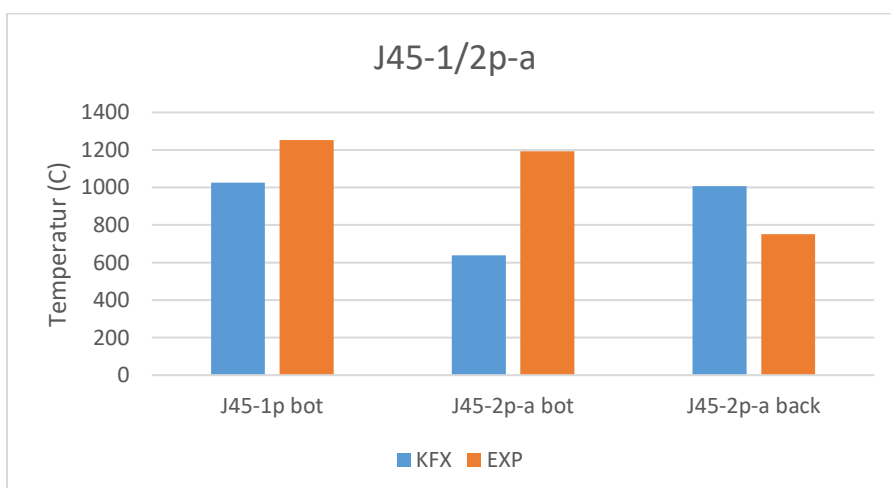
I följande avsnitt redovisas en jämförelse mellan maximal temperatur i plattorna för KFX respektive experimenten. Tabell 10 och 11 i bilaga A redovisar maximal temperatur för plattorna i respektive scenario. Plattan på marken kallas bot, den bakre vertikala plattan kallas back, den övre horisontella plattan kallas top samt högra och vänstra plattan kallas right respektive left.



Figur 21. Maximal temperatur för KFX respektive experiment.



Figur 22. Maximal temperatur för KFX respektive experiment.

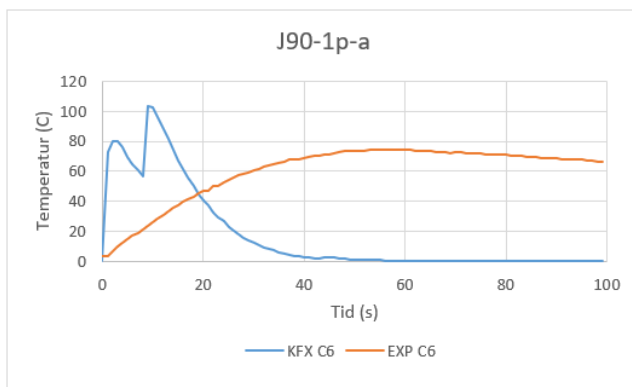


Figur 23. Maximal temperatur för KFX respektive experiment.

5.2 Temperatur

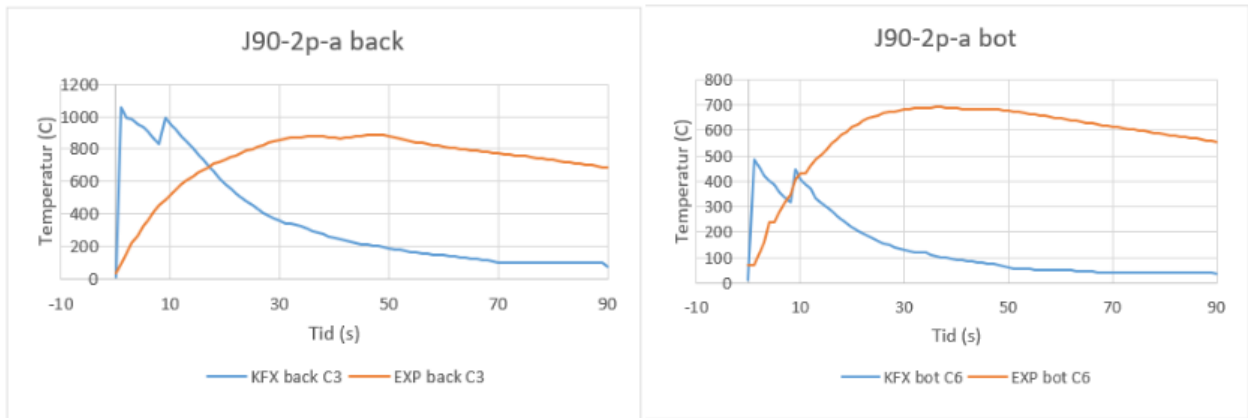
I följande avsnitt redovisas en jämförelse mellan temperaturen i stålplattorna för KFX respektive experimenten. Notera att för varje jämförelse väljs den punkt vars temperatur blir högst i KFX. Maximal temperatur för experimenten kan baseras på en annan punkt än den som jämförs i avsnitt aktuellt avsnitt. För vissa fall har dock vissa mätpunkter vid experimenten inte visat några resultat på grund av komplikationer vid experimentet. Vid sådana fall har den mätpunkt med näst högst temperatur valts att analyseras. Plattan på marken kallas bot, den bakre vertikala plattan kallas back, den övre horisontella plattan kallas top samt högra och vänstra plattan kallas right respektive left.

J90-1p-a



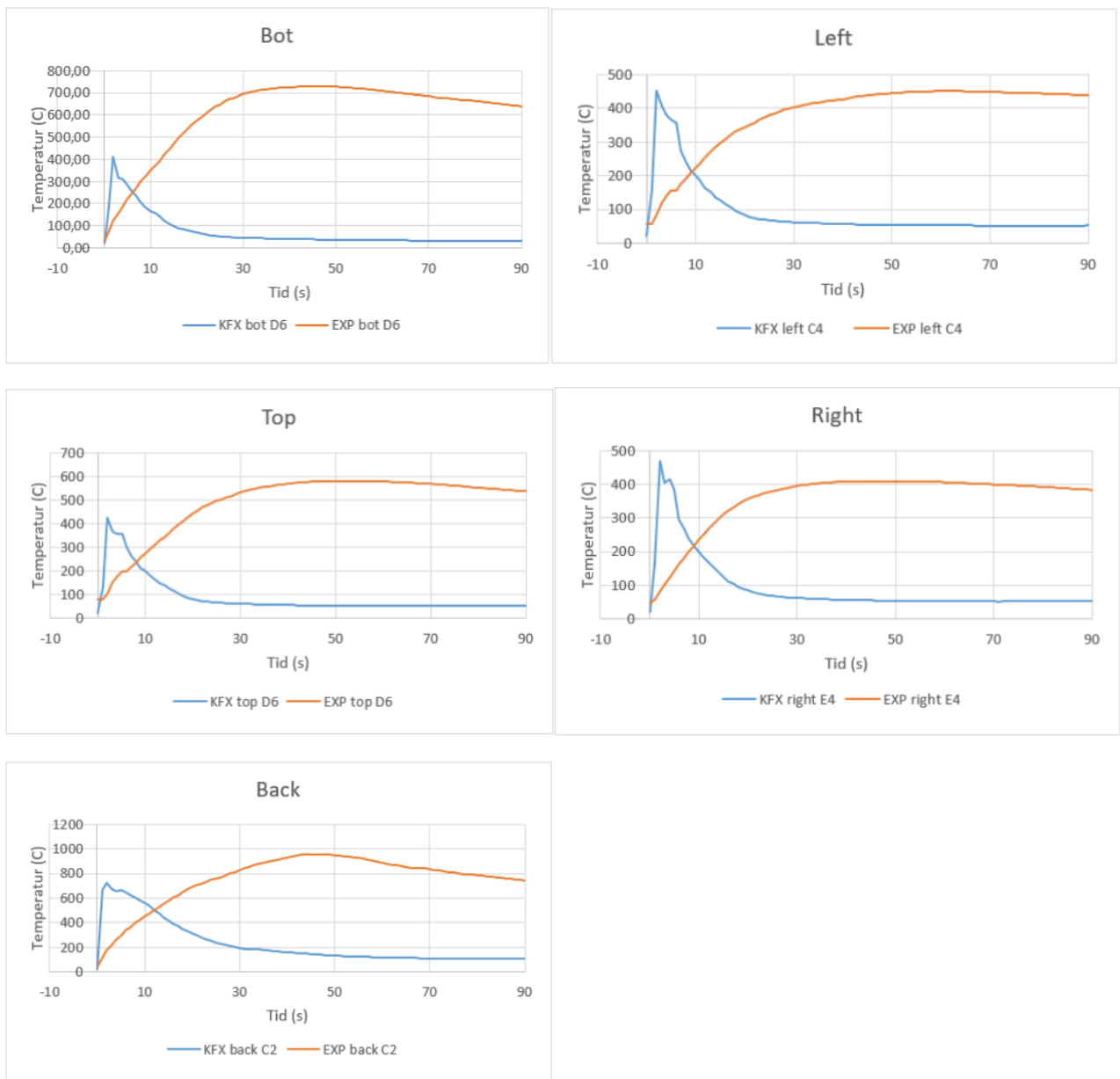
Figur 24. Temperatur för KFX respektive experiment.

J90-2p-a



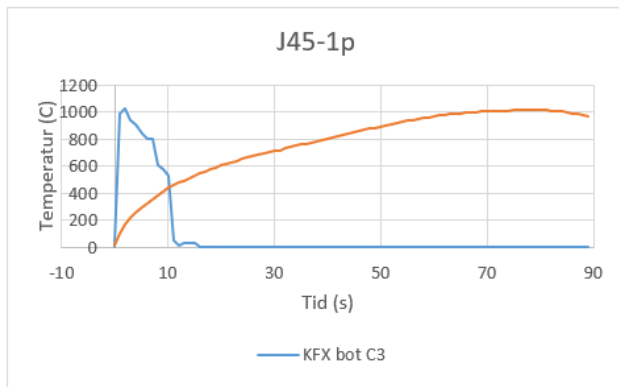
Figur 25. Temperatur för KFX respektive experiment.

J90-5p-b



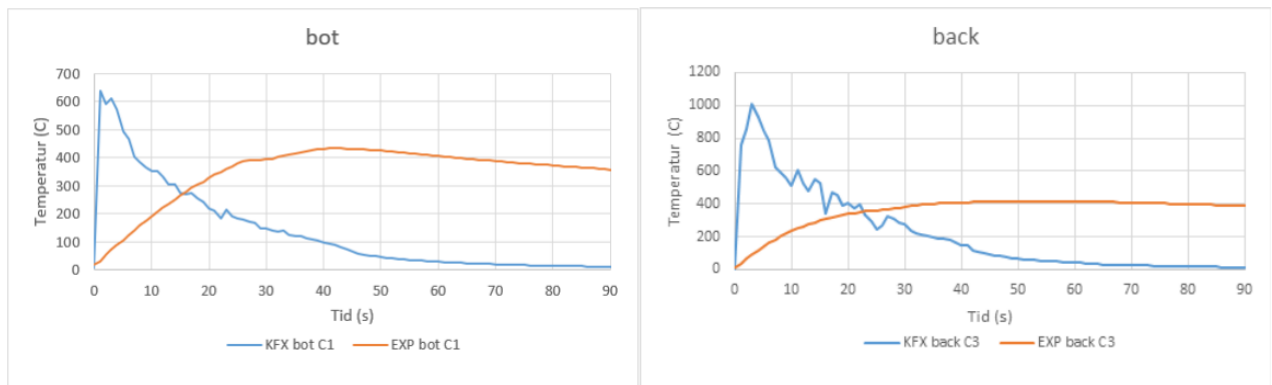
Figur 26. Temperatur för KFX respektive experiment.

J45-1p



Figur 27. Temperatur för KFX respektive experiment.

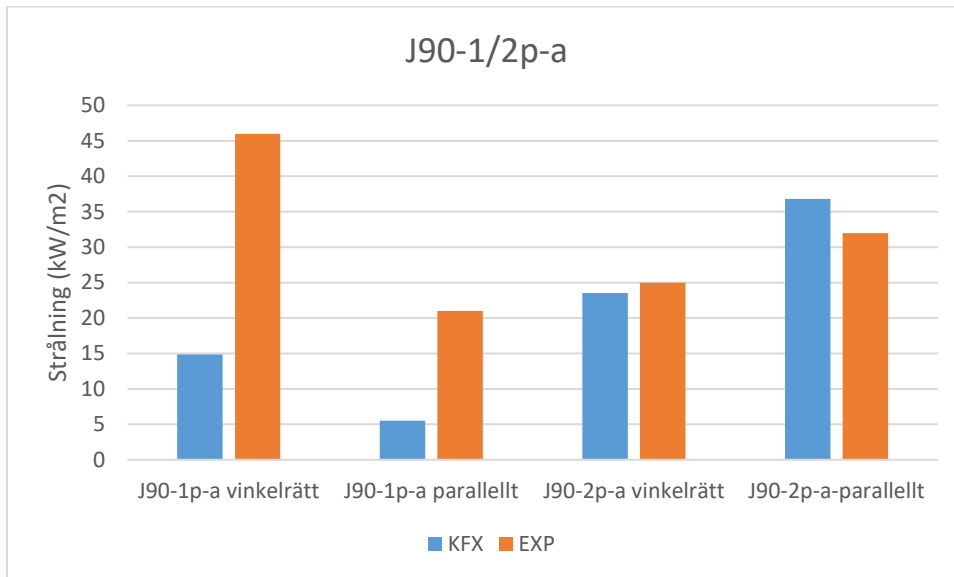
J45-2p-a



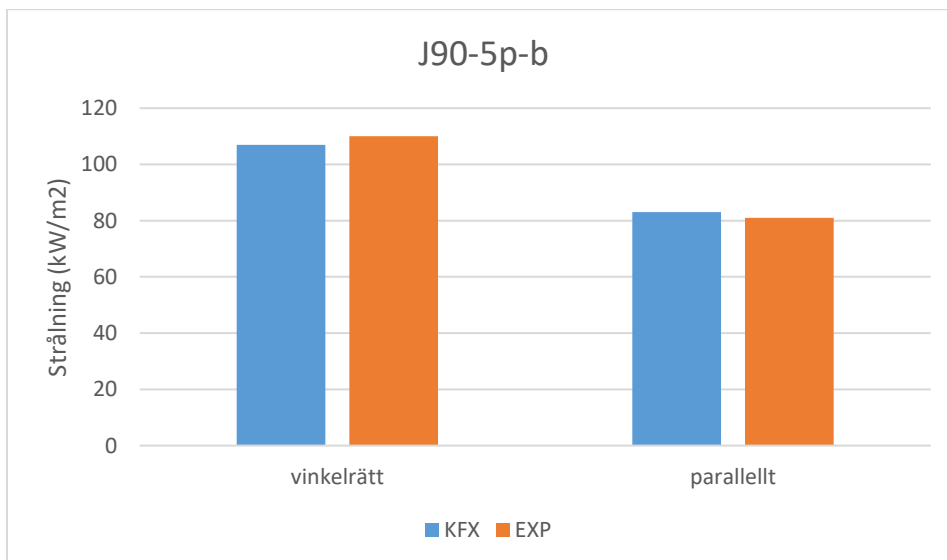
Figur 28. Temperatur för KFX respektive experiment.

5.3 Maximal strålning

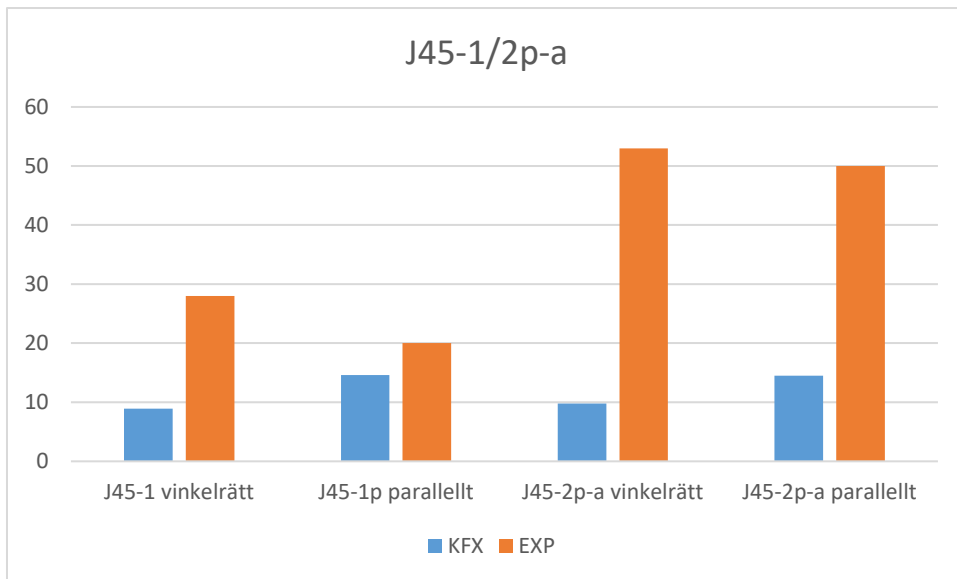
I följande avsnitt redovisas en jämförelse mellan maximal strålningsnivå vid mätpunkter (vinkelrätt & parallellt) för KFX respektive experimenten. För att jämföra strålningsnivåerna för respektive scenario användes utdata för strålningsnivåer på valda axlar. Strålningsnivåerna för KFX jämfördes mot uppmättastrålningsnivåer som uppnåddes under experimenten baserat mätpunkter på de koordinater som redovisas i tabell 4. I tabell 11 i bilaga A redovisas maximal strålning för mätpunkter vinkelrätt respektive parallellt mot jetflamman för KFX och experimenten.



Figur 29. Maximal strålning för KFX respektive experiment.



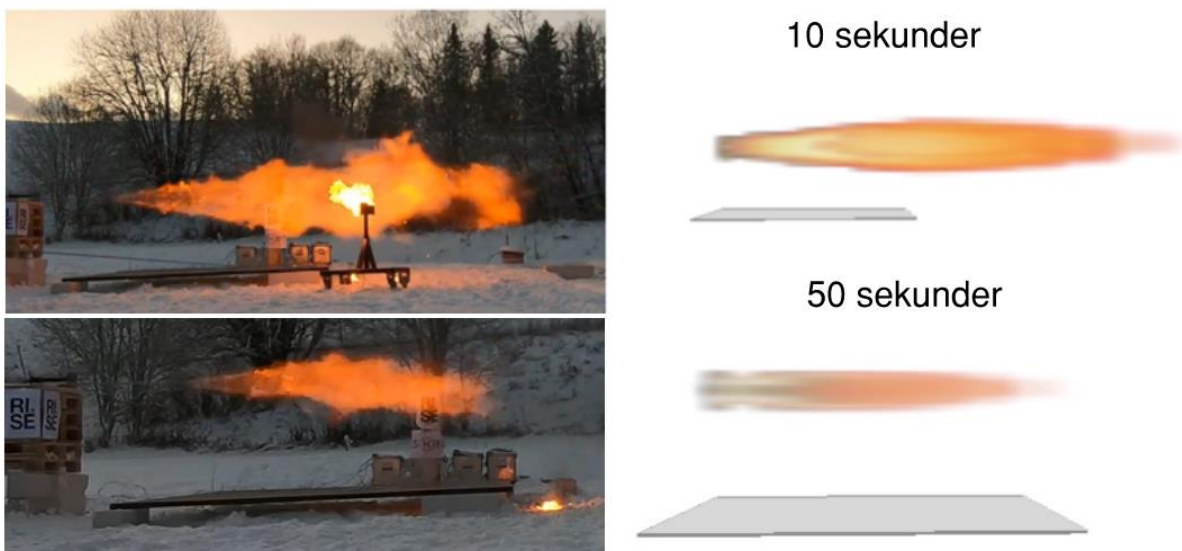
Figur 30. Maximal strålning för KFX respektive experiment.



Figur 31. Maximal strålning för KFX respektive experiment.

5.4 Visuell jämförelse av KFX och Experiment

I följande avsnitt utförs en kvalitativ jämförelse mellan KFX och experimenten. I figur 32 redovisas bilder på jetflamman för J90-1p-a i syfte att visuellt jämföra jetflamman vid simulering i KFX respektive experiment. Bilderna är tagna efter ca 10 respektive 50 sekunder efter antändning. Som figurerna visar finns det lift-off, som förklaras i figur 5, både vid simulering i KFX och i experimenten med approximativt samma storleksordning.



Figur 32. J90-1p-a experiment vs KFX

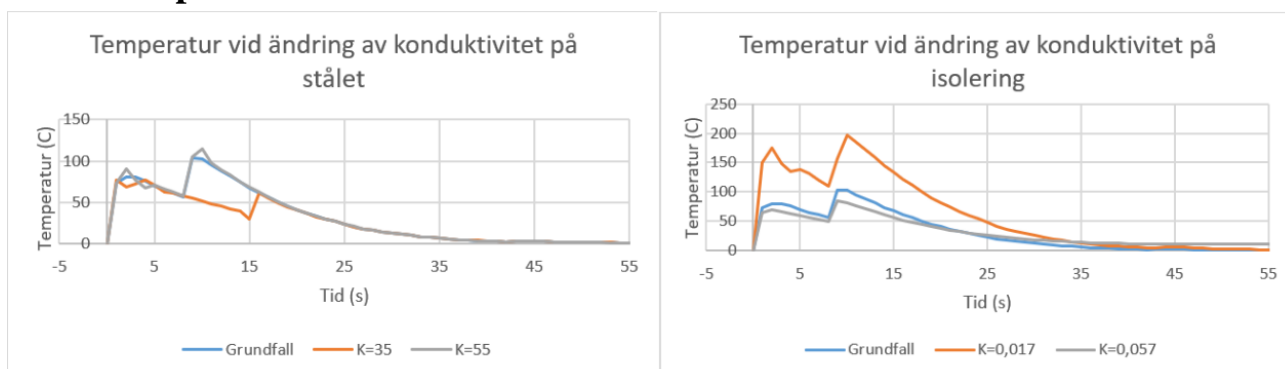
5.5 Känslighetsanalys

I följande avsnitt redovisas känslighetsanalyser i syfte att studera skillnader i resultat beroende på hur olika variabler har ändrats samt hur känsligt resultaten är för respektive variabel. Jämförelser görs för scenario J90-1p-a. Variabler som har valts att studeras är konduktivitet i stålet respektive isolering (K), kontraktionsfaktor (C_d) och vindhastighet i omgivning. Dessutom utfördes en simulering med 300 000 celler. Hur mycket variablerna varierar redovisas i tabell 6 nedan. Anledningen till att just dessa variabler har valts att undersökas är eftersom de förväntas påverka simuleringen med hänsyn till strålningen och/eller temperaturen på plattan. Exempelvis påverkar konduktiviteten värmeöverföringen genom plattan.

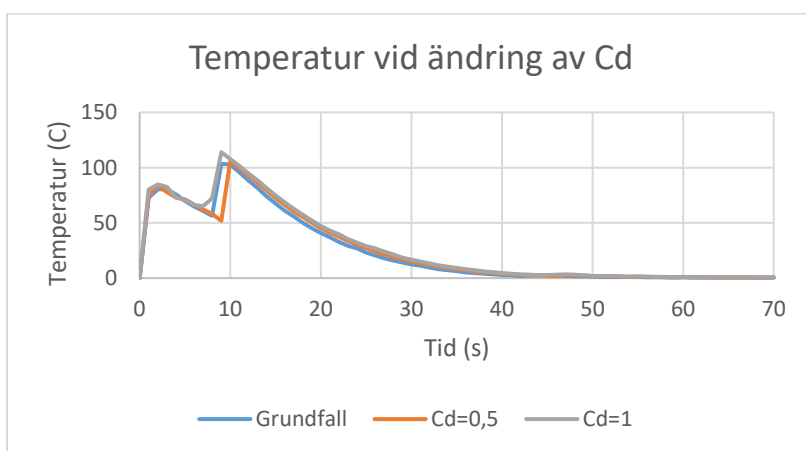
Tabell6. Varierade variabler.

Variabel	Variation	Grundfall
K (W/mK)	35 & 55 (stål)	45
	0,017 & 0,057 (isolering)	0,037
C_d	0,5 & 1,0	0,6
Vindhastighet (m/s)	2,4	0,6
Antal celler	300 000	100 000

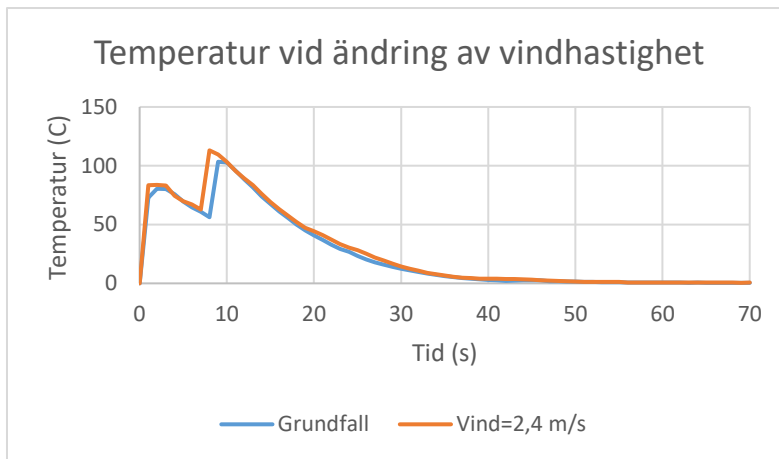
5.5.1 Temperatur



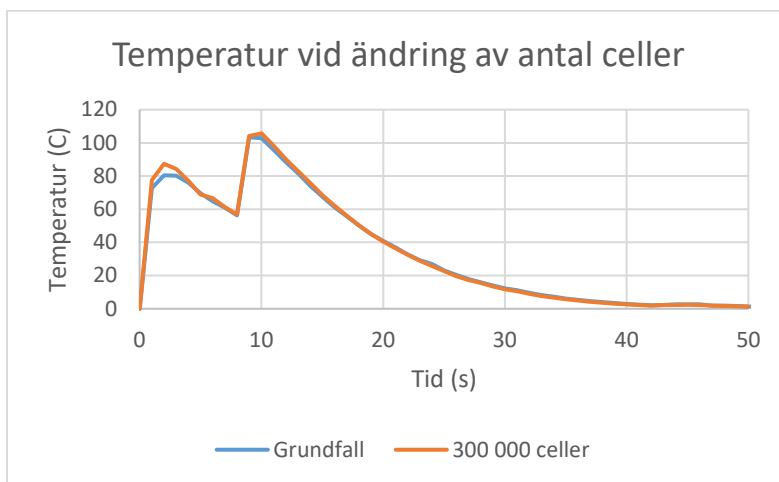
Figur 33. Temperatur för grundfall respektive ändring av konduktivitet.



Figur 34. Temperatur för grundfall respektive ändring av C_d .

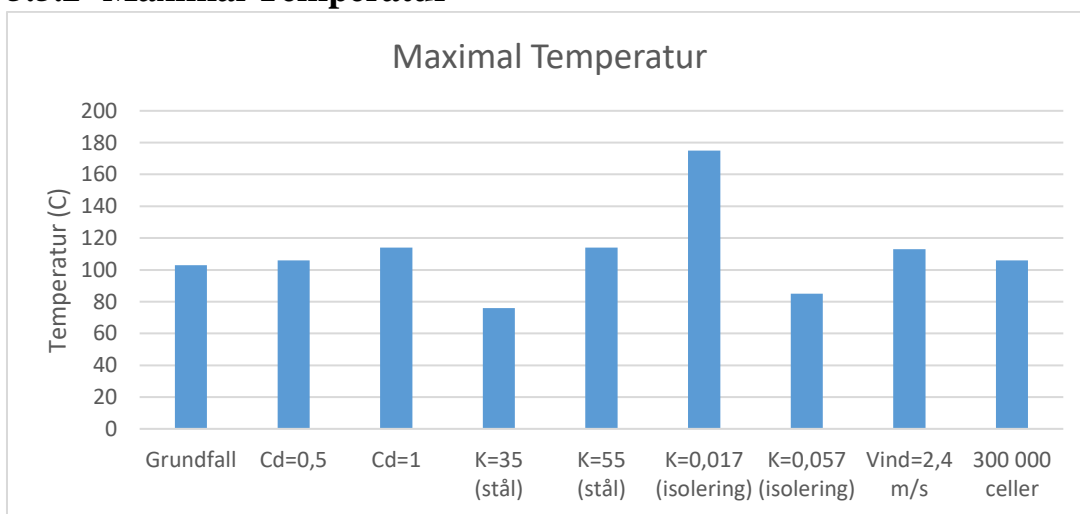


Figur 35. Temperatur för grundfall respektive ändring av vindhastighet.



Figur 36. Temperatur för grundfall respektive ändring av antal celler.

5.5.2 Maximal Temperatur



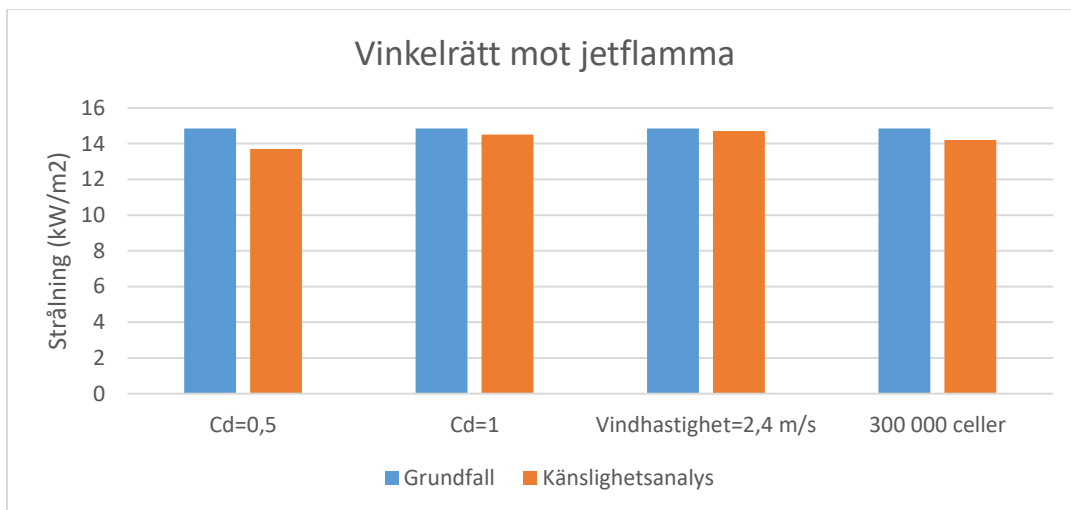
Figur 37. Maximal temperatur för grundfall och samtliga parametrar.

Tabell7. Skillnad i maximal temperatur beroende på variation.

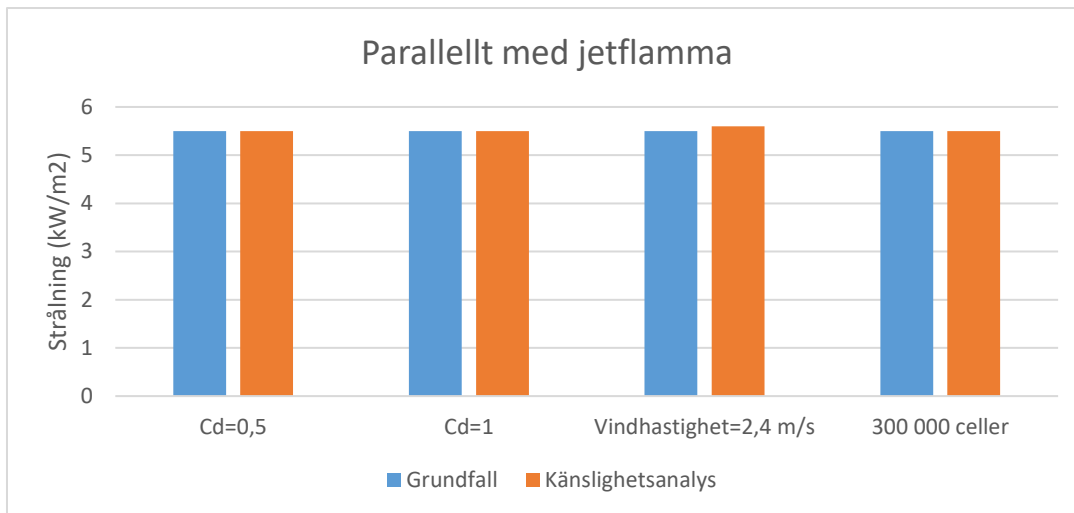
Ändring	Maxtemperatur (°C)	Skillnad (%)
Grundfall	103	-
Cd=0,5	106	+2,9
Cd=1	114	+10,6
K=35 (stål)	76	-26
K=55 (stål)	114	+10,6
K=0,017 (isolering)	175	+70
K=0,057 (isolering)	85	-17
Vindhastighet=2,4	113	+9,7
300 000 Celler	109	+2,9

5.5.3 Maximal Strålning

Vid jämförelse av strålning har endast variation av Cd, vindhastighet och antal celler valts att undersökas eftersom konduktiviteten inte förväntas påverka den infallande strålningen markant vid mätpunkterna som redovisas i tabell 4.



Figur 38. Maximal strålning för grundfall respektive ändrad parameter – vinkelrätt mot jetflamma.



Figur 39. Maximal strålning för grundfall respektive ändrad parameter – parallellt med jetflamma.

Tabell8. Skillnad i strålning beroende på variation.

Ändring	Maxstrålning Vinkelrätt (kW/m ²)	Skillnad (%)	Maxstrålning Parallellt (kW/m ²)	Skillnad (%)
Grundfall	14,85	-	5,5	-
Cd=0,5	13,7	-7,7	5,5	0
Cd=1	14,5	-2,4	5,5	0
Vindhastighet=2,4	14,7	-1	5,6	+1,8
300 000 Celler	14,2	-4,3	5,5	0

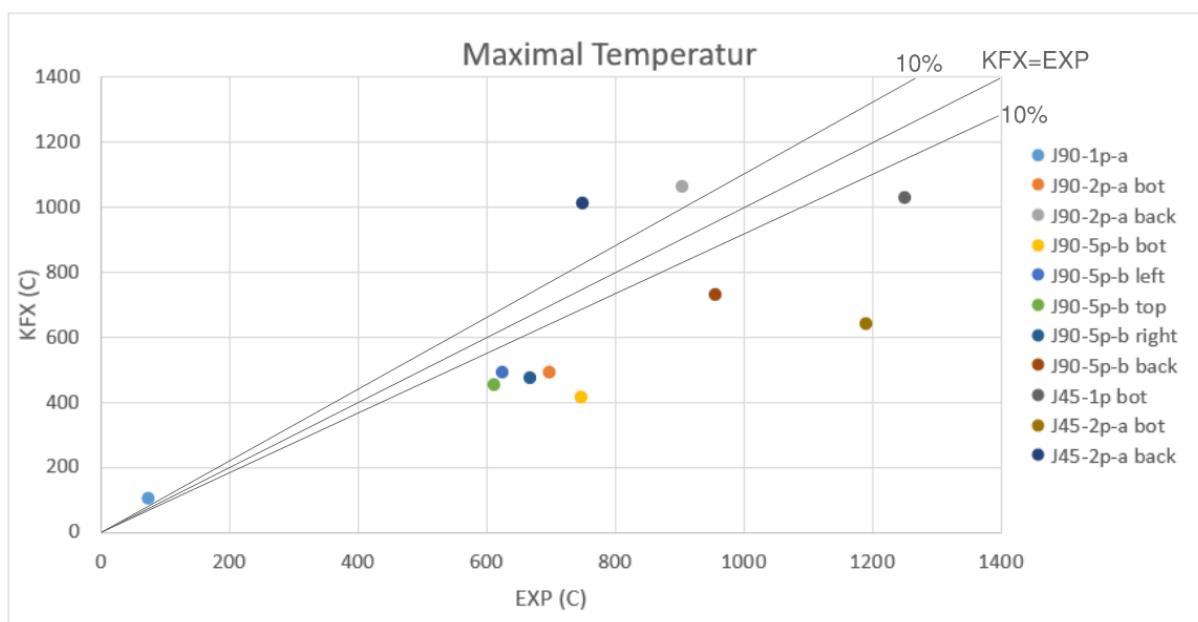
6 Diskussion

I följande avsnitt sker en diskussion och jämförelse av resultaten som KFX framställde och experimenten. Dessutom sker en generell diskussion kring möjliga felkällor som kan ha påverkat resultaten.

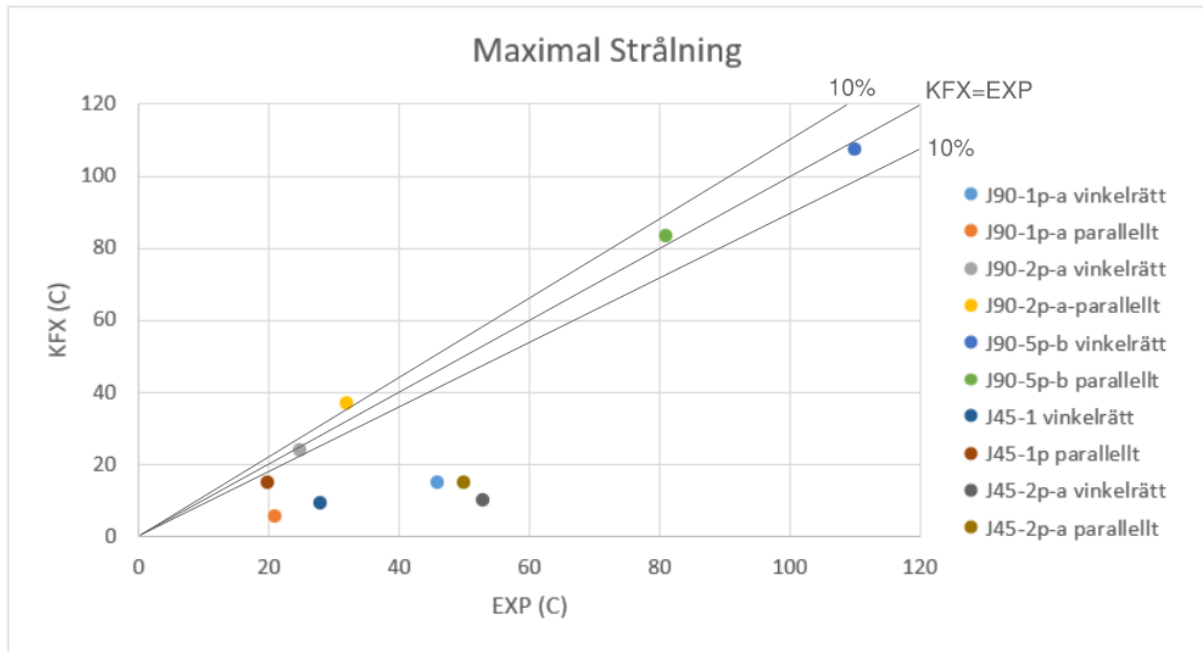
6.1 Jämförelse av KFX och experiment

Vad gäller maximal temperatur för respektive platta vid simulering i KFX i jämförelse med experiment, sker en underskattning i KFX för majoriteten av fallen. Dock finns det fall där KFX ger i goda uppskattningar av den maximala temperaturen, som för J90-1p-a och J90-2p-a back, där det endast är en överskattning på 28 °C grader respektive 167 °C. Vidare sker det även goda uppskattningar på strålningsnivåer vid mätpunkterna i anknötning till plattorna vid två fall, J90-2p-a och J90-5p-b. Resterande fall ger strålningsnivåer i KFX som är långt ifrån de strålningsnivåer som uppmättes vid experimenten. Se figur 40 och 41 för hur temperatur respektive strålning förhåller sig mellan KFX och experiment.

Som resultaten visar är precisionen varken beroende av storhet eller fall utan ger goda resultat ibland och ibland inte, utan några tydliga mönster. Det hade varit mer förväntat att det hade berott på vinkel på flamma och antal plattor, men så är inte fallet. Anledningen till att resultatet har blivit som det blivit är okänt och kan därför inte kommenteras.



Figur 40. Förhållandet mellan KFX och experiment för samtliga fall.

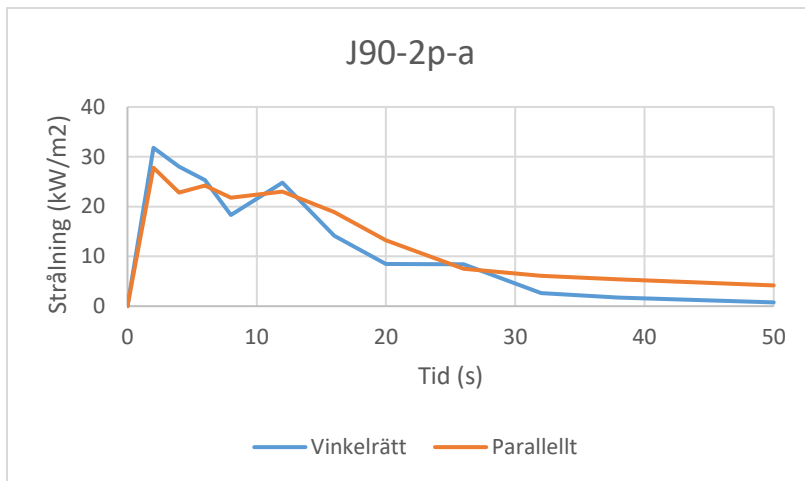


Figur 41. Förhållandet mellan KFX och experiment för samtliga fall.

6.2 Diskussion och Felkällor - KFX

Först och främst är det viktigt att nämna att varken författaren eller handledaren hade erfarenhet inom simuleringsprogrammet KFX. Dessutom användes många standardvärden som KFX använder som default vid simuleringarna, så som emissiviteten. Denna brist på erfarenhet samt att simuleringarna är utförda på en grundlig nivå, är osäkerheter för resultatet. En validering utförd av personer som har erfarenhet inom programmet skulle ha bättre förutsättningar att utföra valideringen med färre osäkerheter. Samtidigt är det värt att nämna att många personer som arbetar med riskhantering och använder KFX som verktyg, inte har erfarenhet på en expertnivå, särskilt när det gäller nyexaminerade.

Som figurerna i avsnitt 5.1 visar, blir temperatur över tid i plattorna vid simulering i KFX annorlunda vid jämförelse med experimenten. I samtliga plattor nås den maximala temperaturen i KFX tidigare än vid experimenten. I många fall har även temperaturen sjunkit till omgivningens temperatur innan den maximala temperaturen nåtts vid experimenten. Detta är i sig en osäkerhet i resultaten eftersom värmeöverföringen hos materialen i plattorna inte blir representativa i jämförelse med verkligheten. Anledningen till att temperaturen över tid blivit så olika är okänt, men vid undersökning av strålningen i KFX för scenario J90-2p-a är det tydligt att strålningsnivån närmar sig 0 kW/m^2 redan efter 50 sekunder, se figur 42.



Figur 42. Strålning vid mätpunkter för J90-2p-a.

Eftersom temperaturen på plattan beror på den infallande strålningen från flammen kan den tidiga avsvälningen vid simuleringar i KFX förklaras av detta. Den infallande strålningen på dessa punkter är dock inte ekvivalent med strålningen som når plattan, men är representativt nog för att bedöma strålningen runt om jetflammen.

För att kvantifiera påverkan av osäkerheten hos de parametrar som anges vid simuleringarna i KFX utfördes en känslighetsanalys. Nya simuleringar, baserade på J90-1p-a, utfördes där utvalda parametrar ändrades för att analysera hur mycket ändringarna påverkade resultaten. Parametrarna valdes ut baserat på vad som förväntades påverka resultaten mest. Som avsnitt 5.5 visar, påverkades inte resultaten markant med aktuella variationer. Den största skillnaden som känslighetsanalysen resulterade i var en ny konduktivitet (K) på 0,017 W/mK hos isoleringen i plattan, vilket är en minskning på 0,02 W/mK. Detta gav en ökning på den maximala temperaturen på 70 %, vilket inte är en stor ökning när konduktiviteten minskade med 54 %. Detta betyder att denna variation har en stor påverkan på resultatet, särskilt då konduktiviteten är konstant under brandförloppet. Troligtvis beror detta på att den lägre konduktiviteten i isoleringen minskade värmeöverföringen genom materialet, vilket gjorde att temperaturen på ytan blev högre. När det gäller strålningsnivåerna resulterade känslighetsanalysen i låga skillnader. Med de låga skillnader som uppstod görs bedömningen att det osäkerheterna hos de valda parametrarna är låga. Skillnaderna mellan simuleringarna i KFX och experimenten beror därmed högst troligen på andra parametrar eller på de modeller som används i KFX (t.ex. strålningsmodellen).

Som tidigare nämnt, är det rekommenderat använda sig av ca 500 000 celler vid simulering av jetflamman i KFX (DNV, 2022b). För samtliga fall har endast 100 000 celler använts vilket endast är 20 % av det rekommenderade. Detta kan påverka resultaten då antalet celler ofta påverkar kvaliteten på resultaten av simuleringarna. Eftersom storleken på cellerna ökar ju längre bort från jetflammen man kommer, kan detta påverka värmeöverföringen särskilt för fallen med fem plattor. Detta eftersom flödet och rörelsen av flammor och gas påverkas av plattorna, där cellerna är större. Samtidigt beskriver DNV (2022b) att den aktuella celltypen för utsläppskällan möjliggör en grövre mesh i jämförelse med andra celltyper. Dock är 100 000 celler mycket lågt i jämförelse med det rekommenderade värdet, vilket kan förklara de stora skillnaderna på resultaten mellan KFX och experiment. Som tidigare nämnt utfördes en simulering med 300 000 celler för J90-1p-a, som visade att en sådan stor ökning av celler

inte påverkade resultatet markant. Anledningen till att ett större antal celler inte utfördes för ett av fallen med 5 plattor berodde primärt på att känslighetsanalysen utfördes i slutet av arbetet och tidsbristen gjorde att författaren inte hann göra detta. En simulering med 300 000 celler för ett fall med 5 plattor hade tagit för lång tid. För att sätta detta i perspektiv tog en simulering med 100 000 celler för ett fall med 1 platta minst 10–12 timmar.

Vidare ansattes en fast konduktivitet på 0,037 W/mK för isoleringen i plattan vilket är en felkälla som kan ha påverkat värmeöverföringen i materialet och därmed resultaten. Detta beror på att konduktiviteten ökar med ökad temperatur i materialet eftersom det uppstår konvektion i luften som finns i isoleringen. En fast konduktivitet blir därför inte representativt för värmeöverföringen verkligheten.

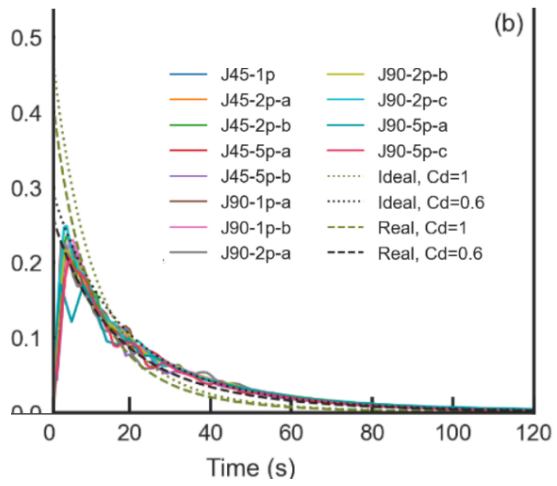
I avsnitt 5.4 presenterades en kvalitativ jämförelse av jetflamman för KFX och experimenten. Som figur 20 visar reproducerar KFX jetflammas längd relativt bra. Dessutom kan man se en viss skillnad i jetflammas bredd, jetflamman i experimentet är något bredare än för KFX. Eftersom flammans bredd påverkar den infallande strålningen (Karlsson & Quintiere, 2000) kan detta förklara varför temperaturen för vissa fall blir för låg och strålningen sjunker för tidigt.

Vidare gjordes antagandet att initialtemperaturen hos materialen i plattorna var samma som omgivningens temperatur vid simuleringar i KFX. Detta är en felkälla eftersom initialtemperaturen som uppmättes vid experimenten inte var samma som omgivningens temperatur, utan temperaturen kunde vara över 10 °C högre. Detta påverkar temperaturmätningarna eftersom, som tidigare nämnt, konduktiviteten i materialet ökar med ökad temperatur. Detta hade kunnat undvikas genom att använda samma data för initialtemperatur från utdatafilerna i stället för att anta att initialtemperaturen i plattan är omgivningens temperatur.

6.3 Diskussion och Felkällor - Experiment

Vidare finns det även felkällor och osäkerheter i experimenten. Exempelvis nämner Meraner et al. (n.d) att några av temperaturmätningarna är inkorrekta eftersom termoelementen har tappat kontakt med stålplattan, vilket ledde till att värmeledning mellan stålet och termoelementen har försämrats. Att termoelementen och stålplattorna tappade kontakt berodde på att det blev bucklor i stålet.

Som tidigare nämnt beskriver Meraner et al. (n.d) att $C_d = 0,6$ vid jämförelse med massflödet för samtliga experiment. Genom en visuell bedömning går det att argumentera för att ett något lägre C_d -värde, runt 0,5, är mer passande än 0,6. Se figur 43 för massflöde för samtliga fall. Känslighetsanalysen tyder även på detta eftersom en simulering med $C_d = 0,5$ gav en mindre skillnad på maxtemperatur mellan KFX och experiment.



Figur 43. Massflöde för samtliga experiment (Meraner et al., n.d)

7 Slutsats

Baserat på de resultat som erhållits genom simuleringar i KFX kan de aktuella frågeställningarna besvaras.

1. Hur väl reproducerar KFX resultaten för jetflammar som träffar ytor?

KFX reproducerar väl maximal temperatur på platta för de scenarierna med endast en platta på mark (J45/90-1p), men ger generellt felaktiga temperaturer för resterande scenarier.

KFX reproducerar goda resultat av strålningsnivåer för scenario J90-2p-a och J90-5p-b, men ger generellt felaktiga strålningsnivåer för resterande scenarier.

På grund av de oregelbundna resultaten, kan inte KFX anses vara validerat för värmetransport från vätgasjetflammar baserat på resultaten från denna studie.

2. Hur känsligt är resultatet för osäkerhet i ingående parametrar?

Baserat på känslighetsanalysen är resultaten relativt robusta för osäkerheter i de parametrar som har valts att undersökas som är C_d , konduktion, vindhastighet och antal celler. Resultatet är känsligast för en variation av konduktiviteten (K) i isolering, då en minskning på 54% av K gav en ökning av maximal temperatur på 70%. Detta betyder att denna variation har en stor påverkan på resultatet, särskilt då konduktiviteten är konstant under brandförloppet.

8 Vidare studier

Eftersom aktuell studie inte kan validera KFX för vätgasjetflammar som träffar ytor, kan vidare studier utföras i syfte att validera programmet för liknande geometrier. Som tidigare nämnt reproducerar KFX goda resultat i jämförelse med experimenten för vissa scenarier, men inte för samtliga. Det kan därför vara intressant att utföra liknande studier, särskilt genom att förbättra upplösningen av domänen. Genom att utföra simuleringar med ett antal celler som ligger närmare det rekommenderade antalet kan förbättringar av resultatet förväntas, särskilt för komplexa geometrier.

9 Referenser

- Arsad, A., Hannan, M., Al-Shetwi, A., Mansur, M., Muttaqi, K., Dong, Z., & Blaabjerg, F. (2022). *Hydrogen energy storage integrated hybrid renewable energy systems: A review analysis for future research directions*. Elsevier.
- Back, D., & Berg, S. (2022). *En studie av vätgas som alternativ energibärare till elektricitet för transmission av energi*. Stockholm: KTH.
- Bertram, V. (2012). *Practical Ship Hydrodynamics*.
- Bjerndal, K. (2023). *Minskad elanvändning under 2022*. Retrieved from Elmyndigheten: <https://www.energimyndigheten.se/nyhetsarkiv/2023/minskad-elanvandning-under-2022-i-sverige/>
- DNV. (2022a). *Advanced Dispersion, Fire and Explosion Simulations with KFX*. DNV.
- DNV. (2022b). *KFX - User Manual*. DNV.
- Evanger, T. (2018). *Artificial Intelligence and Machine Learning - KFX and FLACS*. NAFEMS.
- Fischer, S., Forsén, R., Hertzberg, O., Jacobsson, A., Koch, B., Runn, P., . . . Winter, S. (1998). *Vådautsläpp av Brandfarliga och Giftiga Gaser och Vätskor*. Försvarets Forskningsanstalt (FOA).
- FN-förbundet. (2023a). *Agenda 2030 och de globala målen för hållbar utveckling*. Retrieved from FN-förbundet UNA SWEDEN: <https://fn.se/vi-gor/vi-utbildar-och-informerar/fn-info/vad-gor-fn/fns-arbete-for-utveckling-och-fattigdomsbekampning/agenda2030-och-de-globala-malen/>
- FN-förbundet. (2023b). *De globala målen för hållbar utveckling*. Retrieved from FN-förbundet UNA SWEDEN: <https://fn.se/globala-malen-for-hallbar-utveckling/>
- IEA. (2021). *Final Consumption - World total final consumption by source*. Retrieved from IEA: <https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2021/final-consumption>
- Isover. (2023). *Vad är Mineralull?* Retrieved from Isover Saint-Gobain: <https://www.isover.se/faq/vad-ar-mineralull>
- Jeon, J., & Sung Joong, K. (2020). *Recent Progress in Hydrogen Flammability Prediction for the Safe Energy Systems*.
- Karlsson, B., & Quintiere, J. (2000). *Enclosure Fire Dynamics*. London: CRC Press.
- Kotchourko, A., & Jordan, T. (2022). *Hydrogen Safety for Energy Applications*. Elsevier.
- Linde Gas. (2023). *Vätets egenskaper*. Retrieved from Linde Gas: https://www.linde-gas.se/sv/products_ren/gas_school/properties_hydrogen/index.html
- Länsstyrelsen i Skåne Län. (2007). *Riktlinjer för riskhänsyn i samhällsplaneringen - Bebyggelseplanering intill väg och järnväg med transport av farligt gods*.

- Meraner, C., Stølen, R., Synnøve Skilbred, E., & Li, T. (n.d). *Large-scale experimental study of open, impinging and confined hydrogen jet fires*. Trondheim: RISE Fire Research.
- Molkov, V. (2012a). *Fundamentals of Hydrogen Safety Engineering 1*.
- Molkov, V. (2012b). *Fundamentals of Hydrogen Safety Engineering 2*.
- MSB. (2022). *Vätgas*. Retrieved from MSB.
- Rian, E. K. (2019). *Modelling and Numerical Simulation of Hydrogen Jet Fires for Industrial Safety*. DNV.
- Svenskt Näringsliv. (2019). *Framtidens Elbehov*.
- Svenskt Trä. (2021). *Värmeegenskaper*. Retrieved from Svenskt Trä:
<https://www.traguiden.se/om-tra/material-et-tra/traets-egenskaper-och-kvalitet/termiska-egenskaper1/varmeegenskaper/>
- Sveriges Riksdag. (2010). *Lag (2010:1011) om brandfarliga och explosiva varor*.
- Vätgas Sverige. (2023). *Hur används vätgas?* Retrieved from Vätgas Sverige:
<https://vatgas.se/fakta/hur-anvands-vatgas/>
- Wengeler, U. (2020). *Förnybar energi från sol och vind ökar mest*. Retrieved from Solkraft Sverige: <https://www.solkraftsverige.se/fornybar-energi-fran-sol-och-vind-okar-mest/>
- Wickström, U. (2016). *Temperature Calculation in Fire Safety Engineering*. Springer.
- Wuebbles, D. J., & Jain, A. K. (2001). *Concerns about climate change and the role of fossil fuel use*.

Bilaga A – Resultat

Tabell9. Maxtemperatur för J90-fall.

J90 Scenario	Temperatur (°C)	
	KFX	Experiment
J90-1p-a bot	103	75
J90-2p-a bot	487	700
J90-2p-a back	1060	907
J90-5p-b bot	413	750
J90-5p-b left	490	626
J90-5p-b top	452	614
J90-5p-b right	470	670
J90-5p-b back	727	958

Tabell10. Maxtemperatur för J45-fall.

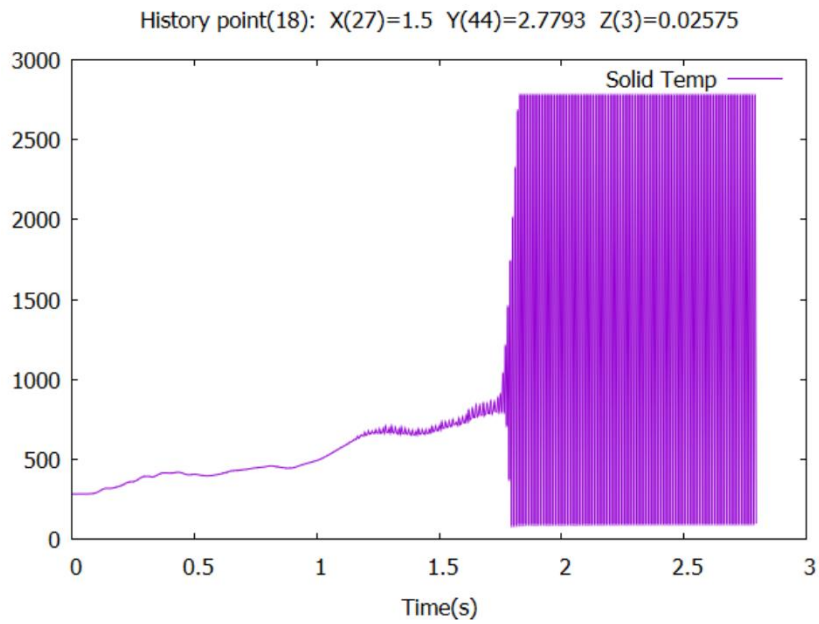
J45 Scenario	Temperatur (°C)	
	KFX	Experiment
J45-1p-a bot	1026	1252
J45-2p-a bot	638	1193
J45-2p-a back	1007	751

Tabell11. Maximal strålning för mätpunkter vinkelrätt och parallellt mot jetflamman.

Scenario	Strålning (kW/m ²)	
	KFX	Experiment
J90-1p-a vinkelrätt	14,9	46
J90-1p-a parallellt	5,5	21
J90-2p-a vinkelrätt	23,6	25
J90-2p-a parallellt	36,8	32
J90-5p-b vinkelrätt	107	110
J90-5p-b parallellt	83	81
J45-1p vinkelrätt	8,9	28
J45-1p parallellt	14,6	20
J45-2p-a vinkelrätt	9,8	53
J45-2p-a parallellt	14,5	50

J45-5p-a

Figur 44 visar temperatur-utdata i platta för J45-5p-a. Resultatet tyder på numeriska fel i beräkningarna.



Figur 44. Felaktigt resultat - temperatur vid punkt C6 för J45-5p-a. (y) temperatur K, (x) tid s.