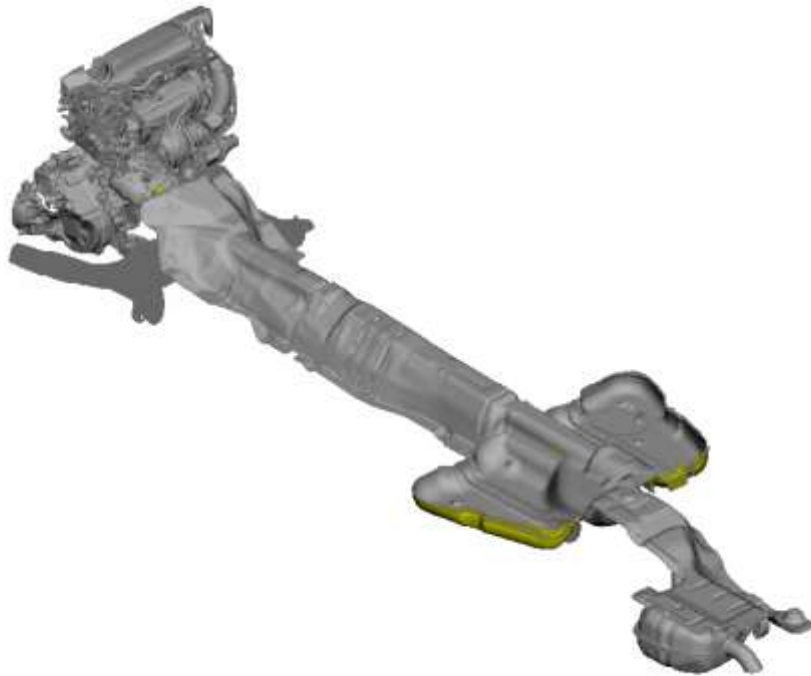


# Numerisk innovativ termisk modellering i syfte att öka fordonskomponenternas livslängd för hållbar utveckling



Författare: Alexander Broniewicz, Per Westin, Petter Östlund

Datum: 2016-06-14

Delprogram: Programmet för Metoder och Verktyg för Fordonsutveckling



# Innehållsförteckning

<b>1 Sammanfattning</b> .....	<b>3</b>
<b>2 Executive summary</b> .....	<b>4</b>
<b>3 Bakgrund</b> .....	<b>6</b>
<b>4 Syfte, frågeställningar och metod</b> .....	<b>7</b>
4.1 Syfte .....	7
4.2 Frågeställningar .....	8
4.3 Metod .....	8
4.3.1 Kravbild och kvalitetsstyrning.....	8
4.3.2 Generell metodbeskrivning .....	9
4.3.3 CFD modell.....	10
4.3.4 Termisk modell .....	10
4.3.5 Koppling mellan CFD- och termisk modell.....	11
4.3.6 Transient modellering av komponenter.....	13
4.3.7 Termisk strålning vid "Termisk soak" .....	14
4.3.8 Lufttemperatur efter kylfläkt vid fläkteftergång .....	16
4.3.9 Provning i Vindtunnel.....	17
4.3.10 Naturlig konvektion .....	17
<b>5 Mål</b> .....	<b>20</b>
<b>6 Resultat och måluppfyllelse</b> .....	<b>20</b>
6.1 Resultat.....	20
6.2 Måluppfyllelse .....	29
6.2.1 Projekt mål.....	29
6.2.2 FFI:s målsättning .....	30
<b>7 Spridning och publicering</b> .....	<b>30</b>
7.1 Kunskaps- och resultat spridning.....	30
7.2 Publikationer .....	30
<b>8 Slutsatser och fortsatt forskning</b> .....	<b>30</b>
<b>9 Deltagande parter och kontaktpersoner</b> .....	<b>31</b>

# 1 Sammanfattning

Det övergripande produktutvecklingsmålet är att kraftigt reducera (~halvera) tiden för framtagningen av nya bilmodeller. För att nå dit måste analyser på fysiska provserier minskas. Den långsiktiga visionen är att all utveckling och verifiering sker med virtuella modeller. Vägen dit innebär att antal provbilar succesivt minskas och ersätts med virtuell verifiering i den takt som det bedöms möjligt med hänsyn taget till kvalitet och tillförlitlighet. Transient termisk modellering är ett område där denna strategi appliceras, men långt ifrån det enda.

Den utvecklade metoden skall, med tillräcklig noggrannhet, prediktera temperaturer på luft och komponenter i motorrummet och längs avgassystemet. Inom ramen för projektet har vi valt att fokusera på transient analys. Även om metoden är användbar för de flesta typer av transienta termiska förlopp så har verifieringen av metoden koncentrerats på s.k. "termisk soak". Bilen kommer då från ett tillstånd med hög belastning, som kan innebära körning i höga hastigheter, branta backar, släpvagn samt varma klimat. Bilen stannas sedan plötsligt och motorn stängs av. Kylningen från fartvinden och elkyllfläkten uteblir och den konvektiva värmeöverföringen begränsas till naturlig konvektion. Detta är ett vanligt scenario som medför höga temperaturer för många komponenter. Det transienta förloppet från inbromsning till dess att alla kritiska komponenter passerat sina högsta temperaturer varar ca 20 minuter.

För att kunna hantera de olika tidsskalor som fysiken kräver, så har en pseudo-transient metod utvecklats. Denna innebär att flödesfältet beräknas stationärt vid ett antal utvalda tillfällen ("kopplingspunkter") med CFD (ANSYS<sup>®</sup> Fluent<sup>®</sup>) medan den termiska lösningen beräknas transient (RadTherm<sup>®</sup>, ThermoAnalytics). De båda beräkningarna kopplas samman vid kopplingspunkterna genom att yttemperaturer från RadTherm<sup>®</sup> överförs till Fluent<sup>®</sup>, medan lokala lufttemperaturer och värmeövergångstal går motsatt håll. Antalet kopplingspunkter bestäms av eventuell fläkteftergång när bilen stängts av, samt vilken noggrannhet som eftersträvas. I de flesta fall hamnar antalet kopplingstillfällen i intervallet 5 till 10.

Att definiera kriterier för när beräkningsresultaten är tillräckligt bra är en komplex uppgift, som beror på en mängd faktorer. Hänsyn måste tas till noggrannheten för de jämförande mätresultaten och de onoggrannheter i beräkningarna som inte går att lösa ut. Som en grov approximation används  $\pm 10$  °C jämfört med fysiska prov som acceptabel avvikelse för komponenternas maximala temperaturer. För vissa komponenter, såsom värmesköldar med temperaturer på flera hundra grader, kommer detta krav att vara näsan omöjligt att nå, medan komponenter som är placerade nära termostatstyrda delar nästan automatiskt hamnar inom intervallet. En avvikelse på  $\pm 10$  °C för en polymer påverkar livslängden med en faktor  $\sim 2$  (+10 = halverar, -10 = dubblar), således är det viktigt att förstå och absolut nödvändigt att den slutgiltiga bedömningen görs med stora mått av sunt förnuft och ingenjörsmässigt kunnande baserat på lång erfarenhet av termodynamik för bilar. Den accepterade noggrannheten hos den slutgiltiga metoden beror på tillämpning och den tidsram som finns tillgänglig för verifieringsarbetet. På sikt är förhoppningen att denna kunskap skall kunna konkretiseras i nedskrivna kriterier, åtminstone delvis.

Randvillkoren som används av beräkningar är av tre typer:

- Avgivet värme i värmeväxlare (kylare, laddluftkylare och kondensor för AC).
- Temperaturer för omgivning och "heta" delar (motorblock, turbo, grenrör, avgassystem).
- Beräknade komponenter (komponenter av intresse för att verifiera metoden).

Resultaten, från modellerna använda i denna studie, omfattar beräknade transienta temperaturer för ca 50 komponenter och ca 200 mätpunkter. Överensstämmelsen med testdata kan bedömas utifrån olika aspekter.

- Överensstämmelse vid steady state ( $t=0$ ). Detta ingår egentligen inte i detta projekt och hanteras i andra projekt inom ramen för Volvo Cars metodutveckling.
- Jämförelse av temperaturändringar,  $dT/dt$ .
- Jämförelse av komponenternas maximala temperatur. Detta är den parameter som används för den slutgiltiga bedömningen i ett bilprojekt, och som bestämmer om komponenten är kompatibel med den tilltänkta designen.

Arbetet har i sin huvuddel bestått i modellering och simulering med åtföljande analys av resultaten. Utbyte av data mellan de olika programvarorna har implementerats i metoden via omfattande skript som utvecklats speciellt för ändamålet. Fullskalig vintunnelprovning för två bilar ingår som en viktig del av projektet. Jämförelse av temperaturer mellan provning och simulering har utgjort kärnan i projektet. Avvikelserna har analyserats och osäkerheter har identifierats, och om möjligt, kvantifierats och eliminerats. Metod och modeller beskrivs i kapitel 4, medan en sammanfattning av resultaten ges i kapitel 6.

Arbetet har medfört en markant ökning av förståelsen för de utmaningar som krävs för att etablera en virtuell simuleringsmetod för transienta termiska beräkningar. Erfarenheter har adderats till metoden och viktiga steg har tagits mot en simuleringsbaserad verifieringsmetod. Metodens mognadsgrad medger ännu inte att beräkningarna kan ersätta fysisk provning i syfte att fullt ut verifiera komponenttemperaturer för en bil. Metoden kan i nuläget användas som ett komplement till tester, främst i tidigare faser i projekten då tillgången på fysisk testdata är dålig. Fortsatt utveckling av metoden är en nödvändighet för att nå de långsiktiga målen. Förslag på fortsatt arbete ges i kapitel 8.

## 2 Executive summary

This project deals with the development of a method for virtual simulation in the field of thermodynamics. A long term aim in vehicle development is to shift from physical testing towards a virtual simulations tool for thermal verification. The overall product development goal is to significantly reduce (~ halve) the time for development of new models. To achieve this, the number of physical tests series must be reduced. The vision is that all development and verification is done with virtual models. Getting there means that the number of test cars is gradually reduced, and replaced with virtual verification at the pace deemed possible, taking into account quality and reliability. The new method will facilitate cost reductions as it decreases the number of physical tests, decreased energy consumption during the development process and increased capability to foresee and enhance life time of critical components.

The work is done within the scope of thermodynamic optimization, where the responsibility includes securing desired component temperature limits. Specifically, this means that the method should, with sufficient accuracy, predict the temperatures of the air and components in the engine compartment and along the exhaust system. Within the framework of this project the focus is on transient thermal analysis. Although the method is useful for most types of transient thermal processes, the work done in this particular project is focused on transient modelling with special applicability to thermal soak. In thermal soak, the car comes from a state of high load, which could involve high speeds, steep hills, trailers and hot climate. The car is quickly brought down to standing still, followed by key off. The cooling from the wind speed is ceased, sometimes the electrical fan is operating for a while (fan-after-run) followed by a convective heat transfer that is restricted to natural convection only. This is a common scenario that entails high temperatures for many components. The transient process, from deceleration until all critical components have passed their maximum temperatures, lasts about 20 minutes.

In order to manage the different time scales that physics require, a pseudo-transient method is developed. This means that the flow field is calculated stationary at a selected number of discrete "coupling points" in the time domain by CFD simulations while the thermal solution is calculated transient. The method consequently is based on two separate models used in a co-simulation process:

1. A CFD model (ANSYS® Fluent®) is used to calculate the flow field including air temperatures by enabling the energy equation. The model comprises the complete externals of the car and the wind tunnel. It consists of a volume mesh up to 100 million cells.
2. A thermal model (RadTherm®) is used to calculate the temperature of surfaces and solids. This model contains the parts that are relevant to model the radiation and conduction heat transfer effects during thermal soak. This model is a subset of the CFD model with only second half (backside) of the engine and the exhaust system and its heat shields. This model consisting of approximately 2 million cells.

The two calculations are connected at the coupling points by the surface temperatures from RadTherm<sup>®</sup> transferred to Fluent<sup>®</sup>, while local air temperatures and heat transfer coefficients going the opposite direction. The number of coupling points is determined by the complexity of the fan-after-run and the precision sought. This process is carried out iteratively until a converged solution is achieved. Between the coupling points, linear interpolation of convective boundary condition is used in the thermal calculation. Therefore, the accuracy of the results is linked to the number of coupling points used during thermal soak. In most cases, the number of coupling points ends up in the range 5 to 10. The boundary conditions for the model used are of three types:

- Heat from the heat exchangers (radiator, charge air cooler and condenser for AC).
- Temperatures for the environment and hot parts (engine block, turbocharger, manifold, exhaust).
- Calculated components (critical components used for verification of the calculation method).

It should be noted that even though the present method requires assigned temperatures on the hot parts of the engine and exhaust system, the long term aim is to have a method that can accurately predict these temperatures as well.

During thermal soak, the modelling of natural convection and radiation are the two most critical aspects in order to achieve accurate results. Components will be affected differently by the two thermal phenomena depending mainly on component location. The pluming effect due to natural convection has a large influence on components above the exhaust system on the backside of the engine while radiation has a greater influence on components close to and exposed to the exhaust system.

The challenge in simulating natural convection is to capture the correct flow field in order to obtain correct local air temperatures around the critical components. The pluming effect during natural convection entails large temperature gradients of the air and it is essential to have a mesh with sufficient quality to resolve the physics behind this phenomenon. A study carried out in this project reveals that a mesh with a worst cell skewness better than 0.97 generally provides a converged solution for all physics involved. Another important mesh parameter to be taken into consideration is the number of prism layers. The study shows that one or two prism layers are sufficient to capture the flow and temperature field of the rising air. The average temperature difference for components sensitive to natural convection was found to be a  $\pm 3$  °C between a mesh with one prism layer and a mesh without prism layers.

Radiation on the other hand is the major type of heat transfer for components that are exposed to the hot parts of the engine block and the exhaust system. During the final part of thermal soak, the convective heat transfer is limited to natural convection with a typical HTC value of 5-10W/m<sup>2</sup>K based on free stream reference temperatures. For under hood components with high temperatures and high emissivity such as the exhaust system (500 °C), the HTC<sub>r</sub> becomes close to 100W/m<sup>2</sup>K. A key factor to calculate the component temperature due to radiation is to have the correct emissivity value of the components surface. Emissivity is not a material property, it is a surface property affected by dust, coatings and structure, among other parameters. Most metal surfaces (without paint) are affected over time and the actual emissivity value often differs from the value found in the literature. Incorrect emissivity can lead to high deviations between simulated and measured temperatures. At Volvo Cars, a portable emissometer was used to measure the emissivity on surfaces that are included in the virtual model. Measurements on the heat shields in the exhaust tunnel showed the high level of sensitivity of the emissivity to the surface properties. The emissivity of the metallic surface was measured "as is" (dirty) and cleaned resulting in a difference of factor 3 with a significant component temperature difference of 10 - 15 °C.

Defining criteria for when the accuracy of the calculated results is good enough, is a complex task that depends on various factors. Consideration must be taken to the accuracy of the measurements, and those inaccuracies in the calculations that cannot be resolved. As a rough approximation  $\pm 10$  °C is used as a general acceptable deviation of the component temperatures. For some components, such as heat shields with temperatures of several hundred degrees, this requirement will be almost impossible to reach, while components placed near the thermostat-controlled parts almost automatically falls within the range. It is imperative that the final judgment is done with large amount of common sense and based on long experience of vehicle thermodynamics. At term, this knowledge can hopefully be embodied in written criteria, at least partially.

The overall results show that the methodology has a good potential and at its present stage it can predict the maximum temperatures and trends during thermal soak with an acceptable accuracy for almost half of the components. An overall estimate of the latest results is classified as follows:

- Group 1: Good correlation for the max temperature and transient trend. Which represents about 45% of the components.
- Group 2: Good correlation for the max temperature but bad correlation for the transient trend. Which represents about 10% of the components.
- Group 3: Bad correlation for the max temperature, but good correlation for the transient trend. Which represents about 25% of the components.
- Group 4: Bad correlation for the max temperature and transient trend. Which represents about 20% of the components.

There are a lot of different components used to evaluate the method. Some which are directly exposed to the hot parts of the exhaust system, some have internal fluids and some are mainly influenced by air temperature. The air temperature itself is measured on the backside of the engine and along the exhaust system to quantify the quality of the CFD model as well as a reference to evaluate if air temperature sensitive components have the correct temperature for the right reason. The results show that the method in its present state can accurately predict the air temperature on the backside of the engine cover during thermal soak. Consequently most of the components in that region, with a large convective heat transfer contribution falls under the classification group one above. Unfortunately, air measurement points closer to the exhaust system don't show a similar behavior and large deviations is present. The components in this region on the other hand are not mainly affected by convective heat transfer but radiation instead. Equipment used to measure the correct emissivity decreases the number of uncertainties but it is still hard to achieve correct temperature for the components in this region. Part of the reason for the deviation may be that the assigned temperature is not an accurate representation of the real temperature distribution along the exhaust system. It has been concluded that more tests and analysis are needed to evaluate this further. Likewise, simulations of components located underneath the engine is mainly affected by air temperature. Cold air from ventilation ducts in the under-shield mixed with heated air from the engine block creates an (unexpected) challenging flow underneath the engine. With no air measurements in the region the simulated air temperature can't be quantified. Further measurements of the air temperature is needed in this region in order to resolve the correct flow in the simulations.

The work has mainly consisted of modeling and simulation with subsequent analysis of the results. The exchange of data between the different software has been implemented in the method through extensive scripts, developed specifically for the purpose. Full-scale wind tunnel testing for two cars is an important part of the project. Comparison of temperatures between testing and simulation has been the core of the project. The differences have been analyzed and uncertainties identified and, if possible, quantified and eliminated.

The work has resulted in a significant increase in the understanding of the challenges needed to establish a virtual simulation method for transient thermal calculations. Experiences have been added to the method, and numerous steps have been taken towards a simulation-based verification method. However, the maturity of the method is not yet at a level where it can replace physical testing in order to fully verify the component temperatures for a car. New uncertainties for future measurement and simulation analyses is still being revealed as the work continues. For now, the method can be used as a complement, especially at early stages in the development when the amount of physical test data is limited. Further work is necessary to achieve the long term goals. Suggested actions are given in Chapter 8. The goals, as they were defined in the application, are regarded as fulfilled, and important contributions to the striving towards sustainability are attributed.

### **3 Bakgrund**

Ekonomisk och miljömässig uthållighet är i dag egenskaper som krävs för att nå framgång på en konkurrensutsatt marknad, som för personbilar. Att bara fokusera på den ena kan få förödande konsekvenser. Det har den senaste "dieselgate" visat med all önskvärd tydlighet. Att förkorta ledtiden för framtagandet av en ny bil med bibehållande

av nödvändiga kvalitetsmått är därför en nyckelparameter. Under utvecklingsarbetet behöver egenskaper verifieras löpande. I dag används i första hand olika typer av tester på fysiska objekt (testbilar) som verifieringsmetod. Detta är en beprövad process som framgångsrikt använts och förfinats under många år. Nackdelen är att framtagandet av testobjekt kräver avsevärda resurser, och tar en betydande andel av den totala tidsåtgången i anspråk. Genom att använda virtuella verifieringsmetoder kan antalet provobjektsloopar minskas, vilket leder till kortare ledtider och lägre kostnader, vilket starkt bidrar till den ekonomiska uthålligheten. Eftersom framtagandet av provobjekt kräver stora resurser i form av material och energi, så medför en reduktion av antal provobjekt på ett direkt sätt även ökad miljömässig uthållighet. Simuleringsbaserad verifiering av temperaturer har dessutom en del fördelar jämfört med traditionell provning. Medan temperaturmätningar ger resultat i diskreta punkter så medför beräkningsresultaten att kompletta temperaturfält kan analyseras, och eventuella "hot spots" lättare identifieras. Genom en simuleringsbaserad verifiering kommer det även att vara möjligt att göra analyser i ett tidigt skede då det normalt inte finns några provbilar att tillgå.

Egenskapsansvaret för termodynamik innebär bland annat att inga komponenter i motorrummet eller längs avgassystemet skall få märkbart försämrad funktion eller driftsbortfall på grund av termiska laster. Kundupplevelsen är alltid i fokus! Vad som inte heller får glömmas bort är att tillförlitligheten på komponenterna även är kopplat till säkerhetsaspekten. Att få stopp vid körning i otillgängliga/farliga miljöer kan leda till fara, och kunder som kör på sådana platser värderar tillförlitlighet extra högt. I praktiken innebär det att säkerställa att alla komponenter får maximala temperaturer som är lägre än tillåtna värden.

Att beräkna komponenttemperaturer kräver att det finns en beräkningsmetod som har validerats och verifierats genom jämförelse med etablerade fysiska provmetoder. Innan en virtuell metod implementeras fullt ut måste kvalitet och tillförlitlighet garanteras.

På Volvo Cars pågår ett stort antal aktiviteter som syftar till att bidra till en succesiv övergång från verifiering på fysiska objekt till virtuella modeller, varav ett antal kan hänföras till termodynamik och värmeöverföring. I detta specifika projekt ligger fokus på transient termisk modellering. Den mest påtagliga appliceringen är modellering av s.k. "termisk soak". Detta innebär att bilen kommer från ett driftsfall med hög belastning, för att sedan hastigt stanna och stängas av. Detta medför att kylningen från fartvinden uteblir, och den konvektiva kylningen begränsas till naturlig konvektion. För att förhindra att vissa kritiska komponenter överhettas så används eftergång på kylfläkten. Detta medför både energiförbrukning och kundupplevt buller, och bör därför minimeras. Den transienta fasen omfattar förloppet från inbromsning, via avstängning och fläkteftergång, till passiv avsvälning tills alla kritiska komponenter passerat sin högsta temperatur, och varar ca 20 minuter.

En komplett simuleringsmetod omfattar alla former av värmeöverföring (värmelledning, konvektion och termisk strålning). För att lösa konvektionsproblemet måste även flödesfältet för luftströmningen lösas. Det senare innebär att CFD av nödvändighet är en del av lösningen. Att basera en metod på full transient CFD-simulering låter sig inte göras. Problemet innehåller tidsskalor med olika storleksordning, från <1 sekund för lösning av turbulens till 20 minuter för termiska tidskonstanter för komponenter med stor massa. Den resurs som skulle behövas för att lösa detta med transient CFD finns inte tillgänglig inom en överskådlig framtid, så metoden måste innehålla någon typ av överföringsfunktion för att koppla de olika tidsskalorna.

## 4 Syfte, frågeställningar och metod

### 4.1 Syfte

Syftet är att virtuella beräkningsmetoder på sikt skall ersätta befintliga testmetoder som verktyg för termisk verifiering. Detta kommer att leda till kortare ledtider för framtagning av nya bilar vilket på ett tydligt sätt bidrar till de övergripande målen för ekonomisk- och miljömässig uthållighet. Konkret innebär detta att metoden skall, med tillräcklig noggrannhet, prediktera transienta temperaturer på luft och komponenter i motorrummet och längs avgassystemet.

Utmaningen ligger i att nå uppsatta mål med hänsyn taget till de begränsningar som oundvikligen finns för resurser såsom datorkapacitet och tidsåtgång i bilprojekten.

## 4.2 Frågeställningar

Grundfrågeställningen är hur vi skall säkerställa kvaliteten på beräkningarna så att resultaten skall kunna användas i verifierande syfte. Första steget är att räkna "rätt", d.v.s. producera beräkningsresultat som stämmer överens med motsvarande testresultat. Detta kan brytas ner i antal tekniska frågeställningar. Vid projektets start identifierades bland annat följande:

- Hur skall lufttemperaturer efter fläkt vid fläkteftergång hanteras? När pumpen på vätskesidan av värmeväxlaren inte går så gäller inte de ekvationer som normalt används för värmeväxlare.
- Hur ofta behöver den termiska modellen uppdateras med nya värmeövergångstal och lokala lufttemperaturer med hjälp av CFD-simuleringar?
- Vilka krav måste vi ställa på CFD-modellen för att vi ska kunna beräkna naturlig konvektion med acceptabel kvalitet?

## 4.3 Metod

### 4.3.1 Kravbild och kvalitetsstyrning

Komponenter som utsätts för temperaturer som är högre än de är konstruerade för löper stor risk att falla, vilket är en uppenbar säkerhetsrisk. Exakt vid vilken termisk belastning en komponent slutar fungera är en vetenskap i sig, som ligger utanför omfattningen av detta projekt som enbart fokuserar på möjligheten att prediktera rätt temperatur. Där "rätt" definieras av de temperaturer som erhålls vid provning på fullskaliga bilar i vindtunnel.

Temperaturmätningen vid proverna görs med termoelement typ K. Dessa har en noggrannhet på  $\pm 2.5$  °C upp till drygt 300 °C för att sedan öka till  $\pm 7.5$  °C vid 1000 °C. Sedan tillkommer osäkerheter från mätsystemet, som om det är korrekt kalibrerat får anses försumbart i jämförelse. I områden med stora temperaturgradienter är termoelementens placering viktig. Att matcha rätt cell i beräkningsnätet mot givarens exakta position innebär en ökad osäkerhet, som kan uppgå till flera grader i värsta fall. Denna typ av systematiska fel går att delvis korrigera, men inte eliminera helt.

Slutsatsen av ovanstående blir att det inte är relevant att prata om korrelation mellan uppmätta och beräknade temperaturer bättre än ca  $\pm 5$  °C. För att ha ett mätbart mål att jobba mot så sätts  $\pm 10$  °C som ett generellt "krav" inom det här projektet. För vissa komponenter, såsom värmesköldar med temperaturer på flera hundra grader, kommer detta krav att vara näsan omöjligt att nå, medan komponenter som är placerade nära termostatstyrda delar nästan automatiskt hamnar inom intervallet. Det är absolut nödvändigt att den slutgiltiga bedömningen görs med stora mått av sunt förnuft och ingenjörsmässigt kunnande baserat på lång erfarenhet av termodynamik för bilar, samt djup kunskap inom områden som CFD, termisk analys och termoprovning. På sikt är förhoppningen att denna kunskap skall kunna konkretiseras i nedskrivna kriterier, åtminstone delvis.

Noggrannheten i de beräknade temperaturerna beror på en mängd faktorer som bidrar med "fel" som lite grovt kan delas in följande grupper:

- Numeriska fel
  - Iterationsfel
  - Diskretiseringsfel
  - Avrundningsfel
- Modelleringsfel
  - Skillnaden mellan en "exakt" lösning av modellens ekvationer och en analytisk lösning (=verkligheten)
- Systematiska fel
  - Approximationer av den verkliga geometrin ("geometrirensning" och "wrapping")
  - Approximationer för randvillkor
  - Noggrannhet i NGD ("Non Geometrical Data")
  - Approximationer av transienta fysiska förlopp i beräkningen av strömningsfältet
- Användarfel



- All manuell inmatning av data medför en risk för användarfel. Genom utbildning och träning kan risken minimeras, men aldrig elimineras.

Det mesta arbetet riktar in sig på modelleringsfel och systematiska fel. Numeriska fel skall normalt vara små i jämförelse, men vid stora komplexa modeller finns alltid risken att den numeriska lösningen inte vill konvergera ordentligt. Vedertagen praxis för att kontrollera eventuella numeriska fel används. Användarfel kan i princip försummas då resultaten verifieras mot mätdata. Eventuella fel kommer då att detekteras och åtgärdas. Eftersom vi under utvecklingen av metoden jämför med testdata så kommer alla fel att identifieras som avvikelser. När metoden i senare skede skall implementeras i en verifieringsprocess skall den ersätta fysiska provbilar. Det kommer då inte att finnas några testdata att jämföra med. Detta ställer speciella krav när det gäller metodens tillförlitlighet, speciellt när det gäller användarfel. För att säkerställa rätt kvalitet varje gång, måste metoden inkludera en process för resultatutvärdering och kvalitetssäkring. Detta är dock inget som beaktats inom ramen för detta projekt.

Målet är att räkna "rätt", dvs. att de beräknade temperaturerna skall överensstämma med testdata. Detta är inte självklart eftersom syftet med beräkningarna är verifiering. En konsekvens är att all data som används, t.ex. materialdata, baseras på nominella värden. Toleranser i angivna värden får vägas in när noggrannheten bedöms. I vissa fall kan parameterstudier användas för att avgöra kriticiteten i ingående osäkerheter. Ett annat alternativ hade varit att göra strikt konservativa beräkningar baserade på "worst case"-data. Bedömningen är dock att detta i vissa fall leder till för stora marginaler, vilket skulle leda till onödiga kostnader. Detta strider mot syftet att verka för ekonomisk uthållighet, därav valet av nominella analyser.

Metoden måste också beakta att den tillgängliga resursen är begränsad. Processorer och lagring kostar pengar, och bilprojektens tidsramar måste respekteras. CFD-beräkningarna har under metodutvecklingsarbetet körts på ca 400 CPU:er. För ett typiskt bilprojekt så uppskattas den tillgängliga tiden för en transient simulering till ca två veckor.

#### **4.3.2 Generell metodbeskrivning**

För att beräkna temperaturer så måste både flödesfält och temperaturfält hanteras. Värmeöverföringen inkluderar värmeledning, konvektion och termisk strålning. Problemformuleringen innehåller ett flertal olika tidsskalor, allt från någon sekund för turbulens (integrerat värde) upp till ca 20 minuter för tidskonstanten för en del temperaturtröga komponenter. Baserat på detta så föll valet på en pseudo-transient metod baserad på 2-vägs koppling mellan CFD (ANSYS<sup>®</sup> Fluent<sup>®</sup>) och termisk modell (RadTherm<sup>®</sup>). Metodens grunder bygger på vedertagen praxis för problem med olika tidsskalor. Liknande tillvägagångssätt används inom stora delar av fordonsindustrin. Den använda modellen har anpassats speciellt för att passa behoven på Volvo Cars.

Metoden omfattar alltså två separata modeller. En CFD modell av hela bilen inklusive vindtunnel, samt en termisk modell som består av de delar som har betydelse för värmeöverföringen. Dataöverföringen mellan modellerna baseras på koordinater, vilket medför att beräkningsnäten inte behöver vara identiska.

De steg som ingår i beräkningsprocessen är:

1. Val och preparering av geometri för komplett bil
2. Beräkningsnät (mesh) för ytor på samtliga delar. Eftersom geometrin består av CAD-geometri så är storlek och komplexitet för modellen stort. Detta medför att många delar "wrappas" för att på acceptabel tid få fram en komplett ytmesh.
3. Eftersom resultaten jämförs med vindtunneltester så måste även vindtunneln modelleras. Detta definierar beräkningsdomänen.
4. Beräkningsnät för volymer. Förutom den stora luftvolymen definieras även element för valda solider och värmeväxlare (poröst media).
5. Definition av NGD, vilket innebär termisk konduktivitet, densitet, värmekapacitet och IR-emissivitet för samtliga ingående delar.
6. Definition av randvillkor. Målet är att alla randvillkor skall vara baserade på beräkningar från angränsande system. Där är vi inte riktigt än, utan randvillkoren kompletteras med testdata för

"värmekällorna", d.v.s. motorkropp, grenrör och avgassystem. Arbetet med att ersätta temperaturrandvillkor på ytor med avgastemperaturer pågår för fullt.

7. Lösning av stationärt flödesfält för ett antal strategiska "kopplingspunkter" längs tidslinjen.
8. Lösning av temperaturfältet transient, med koppling till flödesfältet vid kopplingspunkterna, enligt processflödet i figur 4.3.5-1.

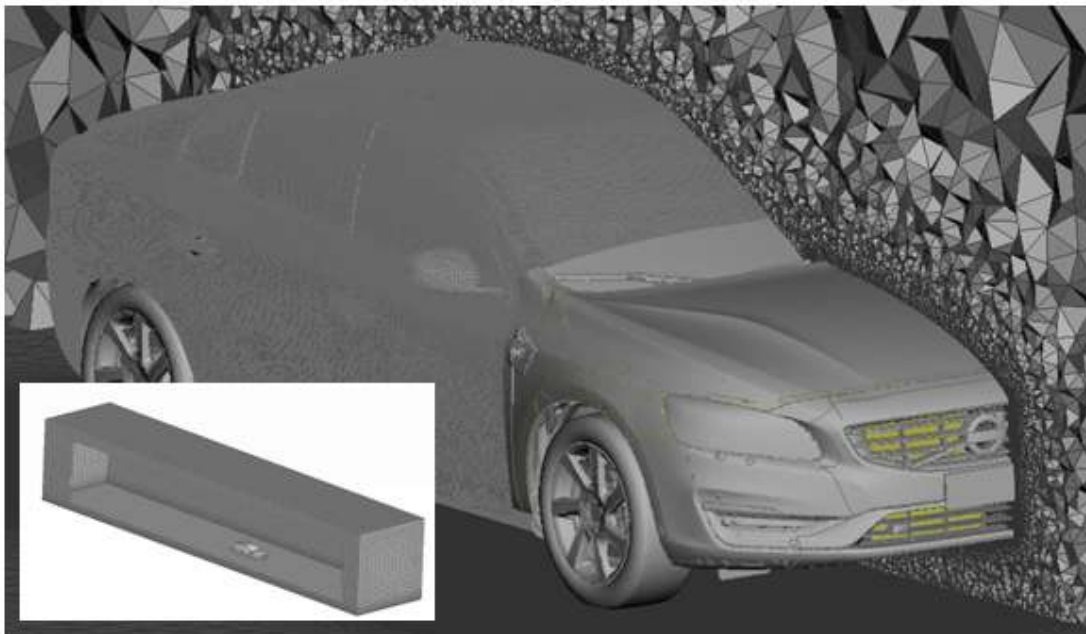
#### 4.3.3 CFD modell

Beräkningsdomänen för CFD-modellen omfattar hela bilen (alla ytor som har kontakt med omgivande luft) samt vindtunneln. Modellen används för att beräkna flödesfältet samt luftens temperaturfält inklusive värmeövergångstal mot alla ytor för vilka värmeöverföring skall beräknas.

Parametrar för CFD-beräkningarna, i urval:

- Totalt ca 80-100 millioner celler
- Cellstorlek från ca 500 mm (friströmning i vindtunnel långt från bil och väggar) ner till 1 mm (runt komplicerade detaljer). Typisk cellstorlek för värmeöverförande ytor 3-5 mm.
- Ett lager med prismformade celler används på värmeöverförande ytor. För att följa vedertagen "best practice" för värmeöverföring så hade det varit önskvärt med ca 5 lager. Den komplexa geometrin tillåter tyvärr inte detta.
- Värmeväxlare (motorkylare, laddluftkylare och kondensor) modelleras som poröst media, medan fläktar modelleras som MRF-zoner.
- Inlopp: "Velocity inlet" ("Pressure inlet" kan användas vid förhållanden med vindhastighet=0)
- Utlopp: "Pressure outlet"
- Turbulensmodell: K-epsilon / enhanced wall function
- Luften modelleras som ideal gas och gravitationsfältet används vid låga lufthastigheter.

CFD-modellen för en av de analyserade bilarna visas i Figur 4.3.3-1.

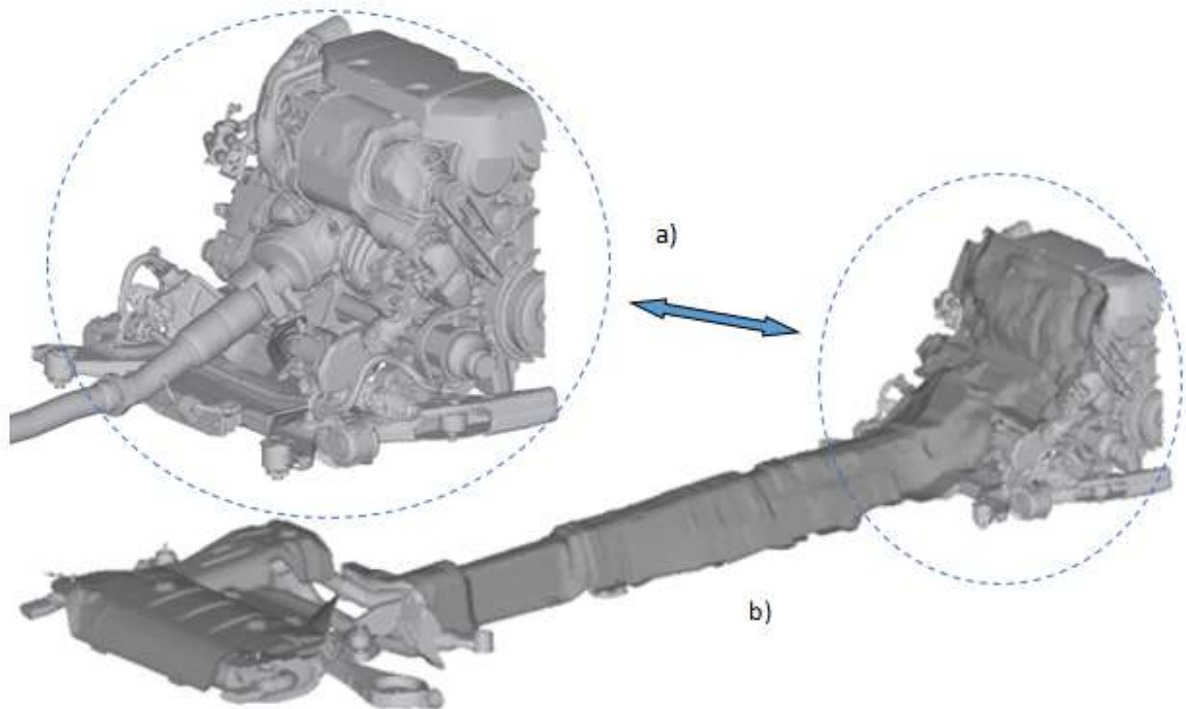


Figur 4.3.3-1 CFD modell av bil i vindtunnel.

#### 4.3.4 Termisk modell

Den termiska modellen (RadTherm<sup>®</sup>) består av alla ytor för vilka värmeöverföring beräknas. Lokala lufttemperaturer och värmeövergångstal importerar från CFD modellen, medan de beräknade ytemperaturerna

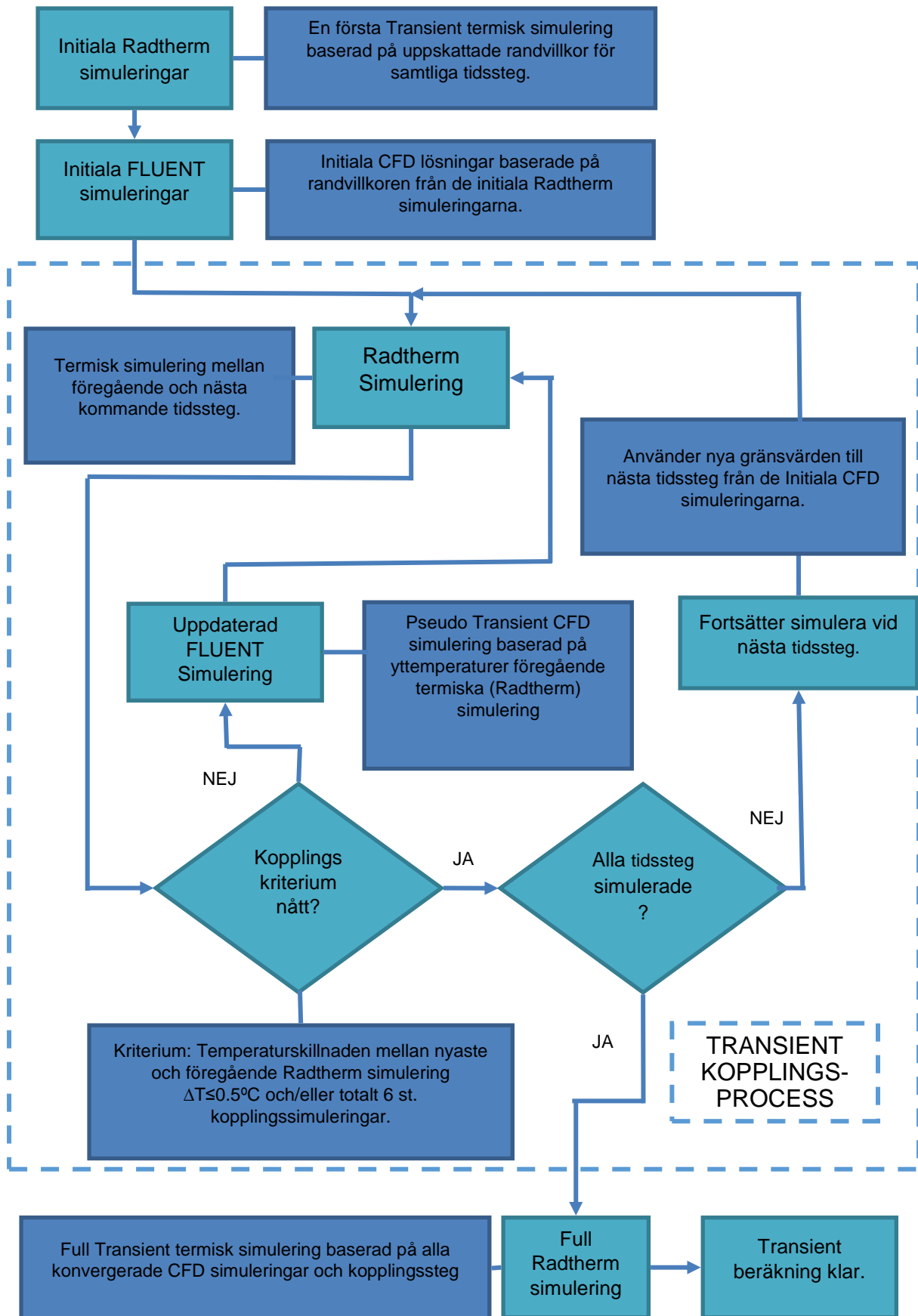
exporteras tillbaka till CFD modellen. Innehållet i den termiska modellen kan variera mellan olika bilmodeller i syfte att inkludera placeringen för de mest kritiska komponenterna. För de bilar som analyserats i detta projekt har t.ex. främre delen av motorn uteslutits eftersom inga komponenter som ingått i verifisering av metoden är placerade där. Istället sätts dessa delar till temperaturrandvillkor baserade på testdata i CFD-beräkningarna. De största ytorna i detta område styrs av kylvätskans temperatur, och uppvisar endast en mindre variation. Den termiska modellen (RadTherm<sup>®</sup>) består av ca 900 000 ytelement och ca 800 000 solidelement, och är således betydligt mindre omfattande än CFD-modellen. Den termiska modellen framgår av Figur 4.3.4-1.



Figur 4.3.4-1 Termisk modell (RadTherm<sup>®</sup>): a) närbild av baksida motor utan brandsköld, b) hela RadTherm<sup>®</sup> beräkningsmodellen.

#### 4.3.5 Koppling mellan CFD- och termisk modell

Hela kopplingsprocessen styrs av ett omfattande Linux-script som är egenutvecklat på Volvo Cars inom ramen för projektet. Det styrande scriptet supporteras av ett flertal mindre script, både Linux-script och speciella script för de använda programvarorna (Fluent<sup>®</sup> & RadTherm<sup>®</sup>). Det iterativa kopplandet bygger på växelvis beräkningar av Fluent<sup>®</sup> och RadTherm<sup>®</sup>. Temperaturerna från en RadTherm<sup>®</sup>-körning jämförs med motsvarande resultat från föregående RadTherm<sup>®</sup>-körning. När skillnaderna i alla punkter är mindre än ett fördefinierat värde så anses lösningen konvergerad, och analysen fortsätter med nästa tidssteg. Alternativt så stoppas kopplingen av att antal iterationer uppnått ett maxvärde. Den transienta kopplingsprocessen förklaras i Figur 4.3.5-1 nedan.



Figur 4.3.5-1 Process för koppling mellan CFD och termisk modell.

#### 4.3.6 Transient modellering av komponenter

Geometrin som beräkningsmodellerna bygger på kommer från det kompletta CAD-underlaget för bilen. Antal detaljer är stort och komplexiteten är påtaglig. För att ha en chans att skapa ett beräkningsnät med rimlig tidsåtgång så används "surface wrapping" på de flesta delar. Detta innebär att man återskapar ytan av en komplex struktur, oftast flera olika detaljer, genom att "foliera" den med en ny yta där man kan styra parametrar som upplösning och avvikelser från de ursprungliga ytorna. Detta leder till att man på ett tidseffektivt sätt skapar en yta som väl representerar den "riktiga" ytan, och luftflödet kan beräknas utan graverande förenklingar som påverkar noggrannheten på strömningsfältet. När denna yta skall användas för att beräkna stationära temperaturer så behöver skalelementen kompletteras med en tjocklek som ger representativ värmeledningsförmåga. Detta låter sig göras tillfredsställande i de flesta fall. För att lösa det stationära problemet så är värmeledningsförmågan (termisk konduktivitet) den enda materialparameter som finns i ekvationerna som skall lösas.

För transienta termiska beräkningar adderas ytterligare komplexitet till problemet, då den termiska värmelagringsförmågan måste beaktas. Densitet och specifik värmekapacitet ( $C_p$ ) är de materialparametrar som tillkommer. Eftersom ytmeshen baserad på "wrapping" saknar information om den fullständiga geometrin så blir det inte trivialt hur komponenterna modelleras för att få korrekt transient respons på de randvillkor som appliceras. För komponenter som kan beskrivas som primitiva geometrier typ plattor, cylindrar, sfärer, etc. så fungerar det bra att definiera en tjocklek. För mer komplexa geometrier så används andra tillvägagångssätt. Det mest uppenbara är att hantera kritiska komponenter separat och modellera de som solider. Detta är en oerhört resurskrävande metod och, med tanke på modellens storlek och komplexitet, inget möjligt alternativ inom ramen för detta projekt. På lite längre sikt är det antagligen den metod som kommer att gälla. Genom att solidmodellera komponenter så elimineras de osäkerheter som oundvikligen uppstår med alla andra alternativ. För att erhålla en adekvat modell för transienta beräkningar har ett antal olika tekniker används, anpassade efter de möjligheter/begränsningar som RadTherm<sup>®</sup> erbjuder. Utgångspunkten är då att de flesta komponenter är modellerade som skal med enbart en ytmesh.

- Utgångsalternativet är att anpassa tjockleken på skalelementen. Det är så värmeledningen modelleras för stationära beräkningar. För enkla geometrier finns inget motsatsförhållande, och "rätt" tjocklek medför att både värmeledning och värmelagring blir korrekt. För mer komplicerade geometrier, t.ex. en flänsad yta kommer den tjocklek som bäst beskriver värmeledningen att underskatta värmelagringen. Då måste någon av de övriga teknikerna användas.
- Komponenter som till sin yttre form kan beskrivas väl med skalelement, men där temperaturgradienten i tjockleksriktningen inte är försumbar, modelleras som "Multi layers". De modelleras då med valfritt antal lager med individuella material och tjocklekar. Metoden passar speciellt bra för isolerade värmesköldar och elektriskt kablage.
- Vissa komponenter har i huvudsak en konstant tjocklek, men med lokala masskoncentrationer. Det kan t.ex. vara ett rör med kraftiga flänsar i ändarna. Dessa masskoncentrationer modelleras som termiska kapacitanser utan geometri, och kopplas till den ursprungliga geometrin.
- För något mer komplicerade geometrier används adaptiva materialegenskaper. Det innebär att tjockleken optimeras för korrekt värmeledning, sedan justeras  $C_p$ -värdet så att värmelagringsförmågan blir optimal. Observera att denna metod bara fungerar för detaljer med relativt små interna temperaturgradienter. Temperaturfältet bestäms av den termiska diffusiviteten, och med denna metod så gör vi våld på denna. Så länge komponenten är isoterm, eller åtminstone nära isoterm, så ger dock denna metod acceptabla resultat.
- Den bästa metoden, och den enda som inte innehåller några approximationer, är solidmodellering baserad på korrekt ursprungsgeometri. För komponenter med komplex geometri och dålig värmeledningsförmåga (innebär stora interna temperaturgradienter) är detta den enda metod som fungerar. Inom detta projekt har det applicerats på en rad detaljer av plast och/eller gummi som t.ex. upphängningsanordning för avgassystem.

#### 4.3.7 Termisk strålning vid "Termisk soak"

Strålningens olinjära karakteristik ( $Q \sim T^4$ ) medför att strålningens betydelse ökar med temperaturen. Vid de temperaturer som är aktuella för ett avgassystem under drift är strålningen alltid av stor betydelse. Vid "termisk soak" har den konvektiva kylningen reducerats till naturlig konvektion, och strålningens betydelse ökar ytterligare. För många detaljer med hög emissivitet och betydande vyfaktor till heta delar så blir strålningen helt dominerande. För att få bra noggrannhet i beräkningar av termisk strålning ställs i princip två krav.

- En beräkningskod som kan beräkna vyfaktorer och strålningskopplingar mellan alla ingående ytor
- Emissivitetstal av god kvalitet för alla ytor.

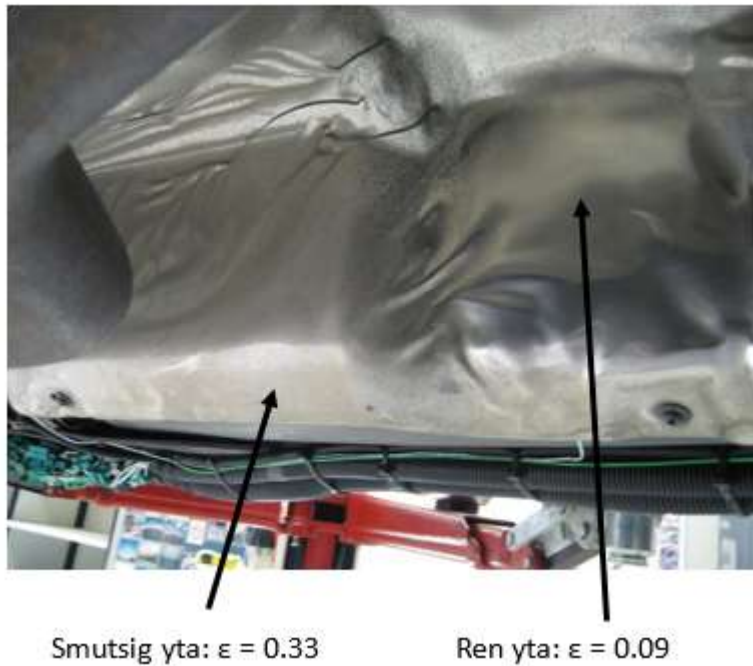
Det första kravet är att mjukvaran har en dokumenterat god noggrannhet för denna typ av beräkningar. Valet av RadTherm<sup>®</sup> känns därför helt rätt då detta är ett av kodens kärnvärden.

Emissivitet är ingen materialegenskap utan ett ytegenskap. Parametrar som oxidskikt, smuts och ytstruktur spelar stor roll. För icke-metaller hamnar den hemisfäriska emissiviteten i princip alltid på värden mellan 0.8 och 0.9. Eftersom en yta med hög emissivitet har motsvarande låg reflektivitet i samma våglängdsområde så kommer energin som lämnar dessa ytor som reflekterad termisk strålning att vara låg, och kraven på beräkningsmetoden för att uppnå godtagbar noggrannhet blir måttliga. Utmaningen hamnar istället på modelleringen av metalliska ytor. Rena metaller har låg emissivitet, men så gott som samtliga externt exponerade olackerade metallytor på en bil uppvisar oxidskikt och/eller smuts vilket bidrar till att den aktuella emissiviteten kommer att hamna ganska långt från handboksvärden angivna för metaller. För en metodutveckling blir kravet att data för emissivitet måste mätas på de fysiska provobjekt som beräkningsmetoden jämförs med. Detta projektkrav bedöms som nödvändigt för att nå den erforderliga noggrannheten på NGD, och har medfört att Volvo Cars under 2015 inköpt en portabel emissiometer, se Figur 4.3.7-1, för att kunna mäta emissiviteten på aktuella provbilar.



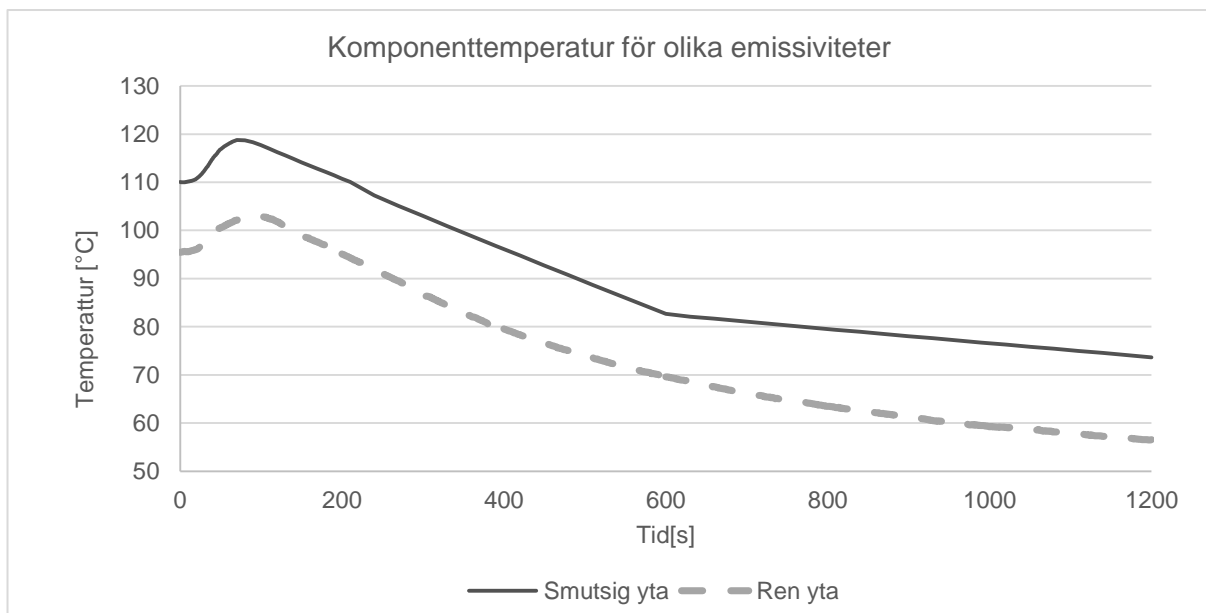
Figur 4.3.7-1 Portabel emissiometer "ET100" från Surface Optics i USA.

Ett exempel på problematiken är värmeskyddsplåtarna i avgastunneln, se Figur 4.3.7-2. En smutsig yta har delvis rengjorts, och skillnaden i uppmätt emissivitet mellan de olika områdena är en faktor >3!



Figur 4.3.7-2 Inverkan av smuts på emissiviteten för en värmeskyddsplåt.

För att kvantifiera inverkan av den uppmätta emissiviteten på temperaturen över värmesköld, gjordes en jämförelse mellan de två fall. Figur 4 visar resultatet av denna analys vid användning av en emissivitet värde på 0,33 för den "smutsiga" ytan och 0,09 för den "rena" ytan.



Figur 4.3.7-3 Temperaturkurvor för den bakre ljuddämparvärmeskölden för olika emissiviteter.

Att minska emissiviteten med en faktor 3 leder till en genomsnittlig minskning av temperaturen av värmeskölden med 10-15 °C. Detta är en stor skillnad för en komponent med en maximal temperatur på 120 °C och kan inte

försummas. Denna skillnad speglar vikten av att förvärva korrekta emissivitetvärden för att uppnå tillförlitliga resultat.

#### 4.3.8 Lufttemperatur efter kylfläkt vid fläktergång

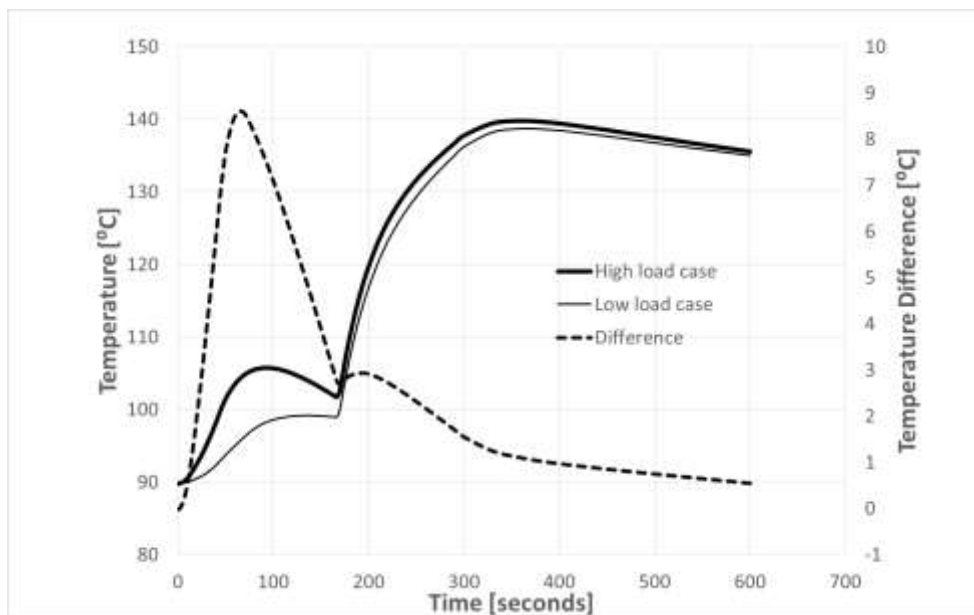
När luften passerar värmeväxlarna tar den upp värme och ökar sin temperatur. Under drift så beräknas värmeutbytet baserat på vedertagna ekvationer för värmeväxlare och uppmätt prestanda från leverantören. Baserat på NTU-metoden så implementeras värmeväxlarberäkningarna i Fluent<sup>®</sup> och temperaturhöjningen på luften beräknas med acceptabel noggrannhet. När flödet på varma sidan stängs av (kylvätska för radiator och kondensor samt luft för laddluftkylare) så upphör giltigheten för värmeväxlarberäkningarna och den värme som finns kvar i systemet måste beräknas på annat sätt. Att ignorera denna värme helt har provats, men det ger inte godtagbara resultat.

Inom ramen för detta projekt har en metod utvecklats och använts. Värmeväxlarna betraktas som en isoterm kropp

med en termisk massa baserad på värmeväxlare inklusive kylvätska. Avsvlningsförloppet beräknas med ett Matlab-script, och den energi som avges från värmeväxlaren tillförs den passerade luften. Detta görs som en källterm i definitionen för poröst media i Fluent<sup>®</sup>.

Den använda metoden har en del begränsningar. Flödet genom värmeväxlarna antas jämnt fördelat, och läckage mellan värmeväxlarna hanteras inte. Eventuell själv-cirkulation efter pumpstopp hanteras inte heller, men detta är en osäkerhet oavsett vald metod.

Jämförelser med testdata har gjorts och empiriska faktorer inkluderats i modellen. Trots detta så uppnåddes inte den överensstämmelse som först eftersträvades. För att nå längre måste en mer detaljerad modell med värmeväxlarna indelade i fler sektioner användas. Som en konsekvensanalys så studerades inverkan på några kritiska komponenter placerade på baksidan av motorblocket. Två fall där avgivet värme i värmeväxlarna skilde sig kraftigt (en faktor 2) åt beräknades. Den stora skillnaden i avgivet värme är större än osäkerheten i beräkningen med den använda metoden. Skillnaden i lufttemperatur efter fläkten är markant och även komponenternas temperaturer skiljer sig åt inledningsvis. Men komponenternas maximala temperaturer, som inträffar efter fläktergången, påverkas inte nämnvärt av den stora skillnaden i avgivet värme under fläkt-eftergången, se Figur 4.3.8-1. Slutsatsen blir att den använda metoden anses acceptabel för sitt syfte. Eventuellt kan en vidareutveckling bli aktuell i framtiden.



Figur 4.3.8-1 Jämförelse av komponenttemperaturer för två fall med olika avgivet värme under fläkt-eftergången.



#### **4.3.9 Provning i Vindtunnel**

Referensmätningarna, dvs. de prover vars temperaturer används som jämförelse för de beräknade temperaturer, har genomförts som fullskaliga prov på testbilar i Volvo Cars vindtunnel i Torslanda. Prover har gjorts på två bilar:

- En S80 med dieselmotor (flera provtillfällen)
- En S60 med bensinmotor (ett provtillfälle)

En mängd driftsfall har körts. För transienta beräkningar så är det "termisk soak" som är av störst intresse. Händelseförloppet i stort är:

- Körning till stabila förhållanden för vald testkod. Många olika fall är möjliga. De som främst används i detta syfte är "top speed" dvs. körning vid maxfart, och "Hill Climb Trailer" dvs. körning med släp uppför backe.
- Inbromsningsfas där hastigheten minskas från initialhastigheten ner till stillastående
- Tomgångskörning (kort fas på några sekunder)
- Avstängning ("key off") följt av fläkteftergång. Den senare kan väljas i ett eller flera steg med olika varaktighet, eller inte användas alls
- Avsvalningsfas med alla system avslagna. Den totala tiden, tills alla kritiska komponenter passerat sina maxtemperaturer, bedöms till ca 20 minuter. Beräkningarna för dieselbilen gjordes för endast 10 minuter. Detta är ok för metodutveckling.

En viktig punkt är att beräkningarna anpassas till händelseförloppet i vindtunneln, och inte till någon provspecifikation. T.ex. går lufthastigheten i vindtunneln inte att reducera lika fort som vid en normal inbromsning på väg.

Temperaturer mäts med termoelement typ K i ca 260 punkter. Mätpunkterna omfattar utvalda komponenter samt lufttemperaturer där denna information bedöms ha intresse för utvärderingen. Antal mätpunkter ligger ganska nära den praktiska gränsen med hänsyn taget till kabeldragning.

Vilka komponenter som väljs ut för verifiering bestäms från bil till bil, beroende på vilka komponenter som bedöms som mest kritiska för den aktuella bilen. I detta fall handlar det om metodutveckling, så komponenterna är valda

för att täcka in många komponenttyper och placeringar, med temperaturer som påverkas olika av värmeledning, konvektion och termisk strålning.

Alla genomförda prover har varit omfattande och av hög kvalitet. Resultaten utgör en viktig hörnsten i projektet då pålitliga referenstemperaturer är en förutsättning för att beräkningsresultaten skall kunna bedömas på ett riktigt sätt.

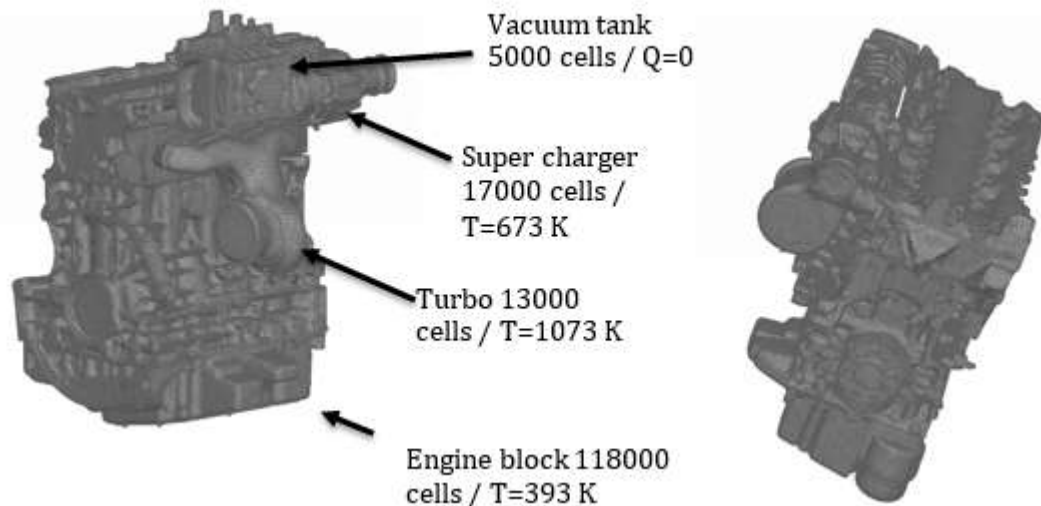
#### **4.3.10 Naturlig konvektion**

Under termisk soak så är den konvektiva kylningen begränsad till naturlig konvektion, och luftströmningen drivs endast av de densitetsskillnader som temperaturen orsakar. Jämfört med forcerad strömning så blir värmeöverföringen betydligt sämre, och komponenttemperaturerna högre. Utmaningen för simuleringsmetoden är främst att fånga ett korrekt flödesfält. Varm luft stiger uppåt från de heta delarna och temperaturgradienten i luften blir i vissa områden stor. Att noggrant kunna beräkna hur luften strömmar är nödvändigt för att avgöra om en komponent hamnar i eller utanför den heta luftströmmen.

Under byggandet av beräkningsmodellen så är beräkningsnätet en betydande parameter. Det har visat sig att det beräkningsnät som producerar bra resultat vid vanliga körfall, ibland inte alls duger till beräkningar med naturlig konvektion. Beräkningsnätet måste matchas till all fysik som skall hanteras. Beräkningsnätets kvalitet kan beskrivas med en mängd parametrar som alla har gränser som måste respekteras. Erfarenheten från detta

projekt säger att om Fluent<sup>®</sup> "skewness" för de sämsta cellerna är bättre än 0,97 så producerar CFD-beräkningen ett konvergerat resultat.

För att få en ökad förståelse för naturlig konvektion så har en studie på en lokal modell använts. Modellen innehåller ett motorblock och ett antal komponenter. Syftet är att studera hur variationen i ett antal parametrar påverkar resultatet, där stora variationer innebär att problem med metodens tillförlitlighet. Hur väl resultaten stämmer med verkligheten (testdata) bedöms inte, utan det är bara beräkningar som jämförs med varandra. Nedan följer en sammanfattning av undersökningen.



Figur 4.3.10-1 Lokal modell (Fluent<sup>®</sup>) för studie av naturlig konvektion.

- Kvalitetskrav ytmesh (inga avvikande element)
  - Aspect ration: 5
  - Skewness: 0.75
  - Warping: 40
  - Min length: 1 mm
- Kvalitetskrav volymsmesh (inga avvikande element)
  - Aspect ration: 20
  - Skewness: 0.85
  - Min length: 1 mm
  - No negative volums
- Fluent<sup>®</sup> parametrar
  - Pressure based / steady / gravity on /energy on
  - K-ε /realizable / enhanced wall treatment / thermal effects
  - Fluid: Density as incompressible ideal gas. Otherwise constant properties
  - Domain: Box with side = 2.5 meter (3-5 times model size)
  - Boundary conditions: Inlet: Pressure inlet (0 Pa); Outlet: Pressure outlet (0 Pa); Others: symmetry
  - Vacuum tank Q=0; other parts as fixed temperatures
  - No shell conduction or radiation, ONLY natural convection
  - Coupled solver
  - Flow courant number 20 / Explicit relax. numbers momentum and pressure 0.15

- Otherwise Fluent<sup>®</sup> default settings
- Parametrar inkluderade i studien
  - Flödestyp (laminärt, turbulent eller med omslag)
  - Turbulensmodell ("K-Epsilon realizable/enhanced wall function" samt "K-Omega SST")
  - Turbulens vid inlopp (intensitet och längdskala)
  - Antal lager med prism-element
- Analyserade resultat
  - Temperatur på vakuumentank
  - Värmeövergångstal (baserade på väggfunktion), både medel- och maxvärde
  - Flödesfält – visuell bedömning av hastigheter och temperaturer i fixa plan
  - Antal iterationer till konvergerat resultat

Sammanfattning av resultat:

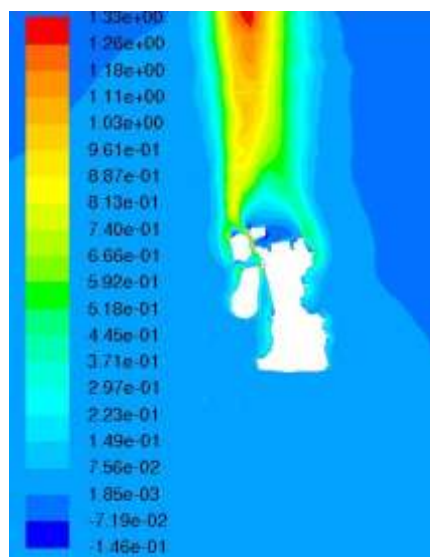
Studien av hur antal lager av prismaformade celler påverkar resultatet fallerade devis. Ett respektive två lager gav bra överensstämmelse och skilde sig något åt jämfört med lösning utan prismor. Detta visar att denna typ av element behövs för att beskriva strömningen nära väggar. Vid tre lager, eller fler, så erhöles ingen konvergerad lösningen. Enligt "best practice" så bör ca 5 lager användas vid denna typ av flöde men för varje lager som genereras så sjunker kvaliteten på de skapade cellerna och vid fler än två lager så blev skewness > 0.97. Detta går att åtgärda med manuell korrigering av modellen, men eftersom metoden måste bygga automatgenererade beräkningsnät så användes inte denna möjlighet.

Genom överslagsberäkningar av Rayleigh-talet så framgår det att strömningen delvis är av laminär karaktär. Omslaget till turbulent flöde sker vid en höjd av allt från några centimeter till flera decimetrar, beroende på temperaturen. Resultaten mellan helt laminärt och helt turbulent flöde skiljer sig åt ganska markant, medan de olika turbulensmodellerna ger överensstämmande resultat. Alla försök med omslagsmodeller misslyckades med att producera konvergerade resultat. Det kvarstår dock vidare analys av flödet och hur det skall modelleras.

Måttliga variationer på turbulensparametrarna vid inloppet ger inga betydande förändringar i resultatet. Som utgångsvärde används 5% intensitet och en längdskala på 0,2 m.

För alla fall med turbulent flöde som producerar ett konvergerat resultat så hamnar spridningen i temperatur på vakuumentanken inom  $\pm 3$  °C. De beräknade medelvärdena för värmeövergångstalet visar också god överensstämmelse, medan maxvärdena uppvisar en betydligt större spridning. Detta är en lokal effekt som beror på dålig elementkvalitet lokalt i områden med komplex geometri.

Flödesfältet uppvisar hastigheter och temperaturer enligt förväntan. Flödesbilden i närheten av motorn uppvisar liknande flödesbilder, medan flödet vid domänens ränder varierar en del mellan de olika fallen, speciellt återcirkulationen vid utloppet. En typisk flödesbild i ett snitt visas i Figur 4.3.10-2.



Figur 4.3.10-2 Konturplot av Z-hastigheter (vertikalt) i ett snitt i mitten av modellen.

## 5 Mål

Projektmålen, som de formulerades i projektansökan, är att *undersöka, identifiera och utveckla*:

- a. Numeriska metoder för transienta termodynamiska förhållanden
- b. Ökad CAE tillförlitlighet
- c. Minimerat behov av fysiska testobjekt och experimentella prov, därigenom minskat miljöpåverkan
- d. Innovativa, tids- och kostnadseffektiva utvecklingsprocesser
- e. Reducerade produktdesign och optimeringsfaser
- f. Förbättrad hållbarheten i termer av färre överhettade komponenter
- g. Optimeringsprocess av kompletta avgassystem
- h. Hanteringen av värmeöverföring, d.v.s. luft och värme flöden
- i. Miljövänliga och hållbara produkter

Det slutgiltiga målet är att ha en simuleringsmetod som har en kvalitet och tillförlitlighet som medger att den används för termisk verifiering av komponenter. Eftersom beräkningarna omfattar komplexa system med många osäkerheter involverade så är detta en långsiktig vision, och som inte kan nås inom ramen för detta projekt. Målet för detta projekt är att öka förståelsen och skapa en klarare bild av vad som behöver göras för att nå det slutgiltiga målet.

## 6 Resultat och måluppfyllelse

### 6.1 Resultat

Beräkningsmetoden producerar temperaturer för de valda fallen. Dessa temperaturer skall sedan jämföras med motsvarande testtemperaturer från vindtunnelproven. Analysen innehåller, förutom en numerisk jämförelse, en uppskattning av kvalitet och tillförlitlighet för de erhållna resultaten.

I en perfekt värld så hade metoden för den stationära analysen varit klar, och den transienta simuleringen startat från korrekta initialtemperaturer. Så är inte fallet, metodutvecklingen för stationära beräkningar pågår fortfarande. Denna metod har nått en högre mognadsgrad än den transienta metoden, men är inte färdig för implementering i verifieringsprocessen. Detta innebär att även avvikelser pga. inkorrekta stationära starttemperaturer måste analyseras. Vi får således beräknade temperaturer med avvikelser av olika slag.

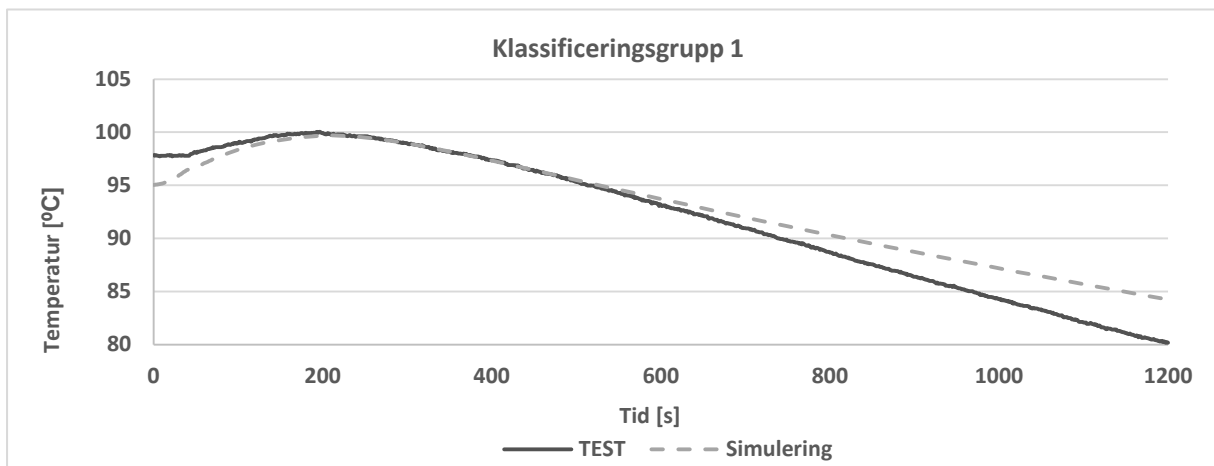
- Grupp 1: Bra överensstämmelse både i nivå och trend (dT/dt)
- Grupp 2: Bra maxtemperatur, men avvikande trend
- Grupp 3: Fel maxtemperatur, men med bra trend
- Grupp 4: Fel maxtemperatur och avvikande trend

En del av de identifierade avvikelserna är dessutom av en natur som gör att det inte är möjligt att eliminera "felet" inom ramen för detta projekt.

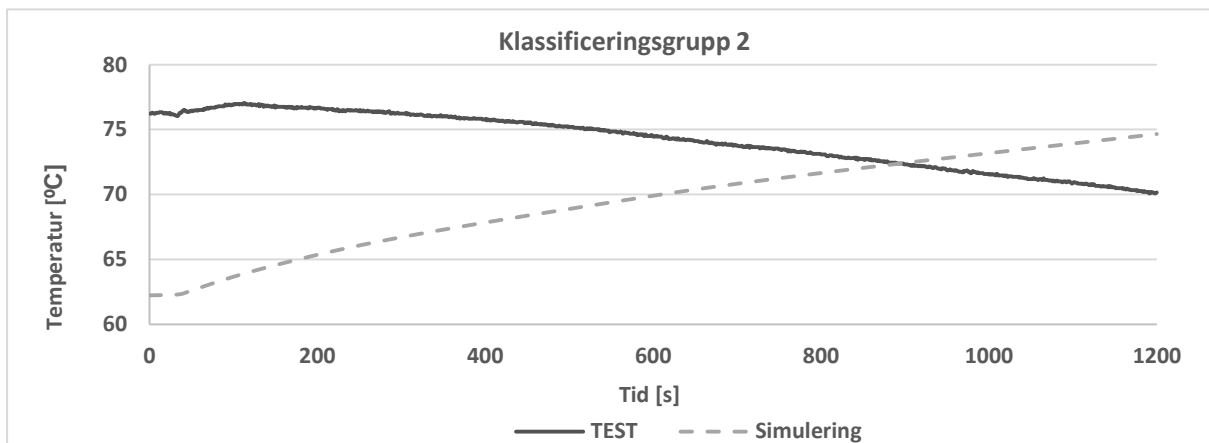
Som nämnts tidigare, så är bedömningen av resultaten en delikat uppgift som går långt bortom den rent numeriska jämförelsen. I det följande görs ett försök att sammanfatta resultaten från den metodutveckling som gjorts. En övergripande bedömning av de senaste resultaten kan klassificeras med ovanstående grupperingar enligt följande:

- Grupp 1: Står för cirka 45% av de analyserade komponenterna.
- Grupp 2: Står för cirka 7.5% av de analyserade komponenterna.
- Grupp 3: Står för cirka 27.5% av de analyserade komponenterna.
- Grupp 4: Står för cirka 20% av de analyserade komponenterna.

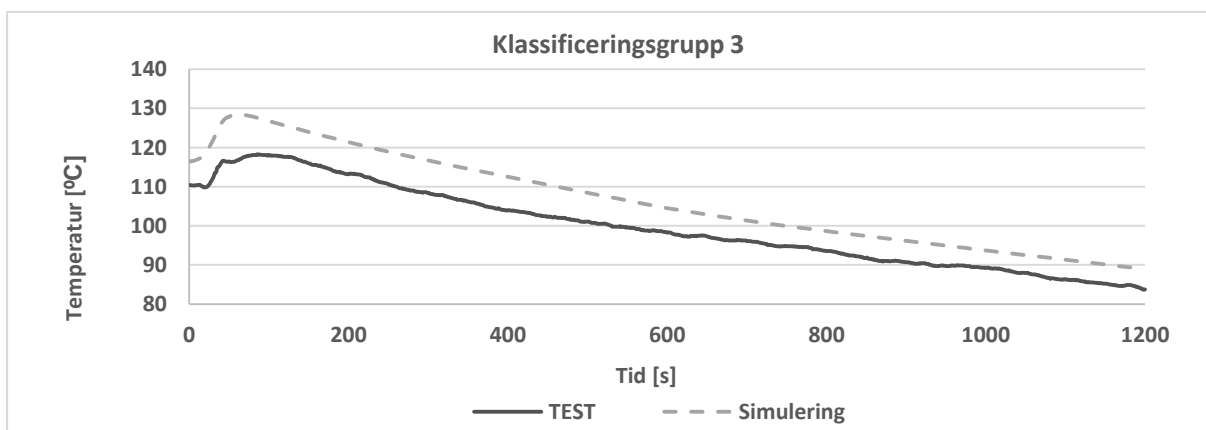
I Figur 4.3.10-1, Figur 4.3.10-2, Figur 4.3.10-3 och Figur 4.3.10-4 ses exempel de olika klassificeringsgrupperna.



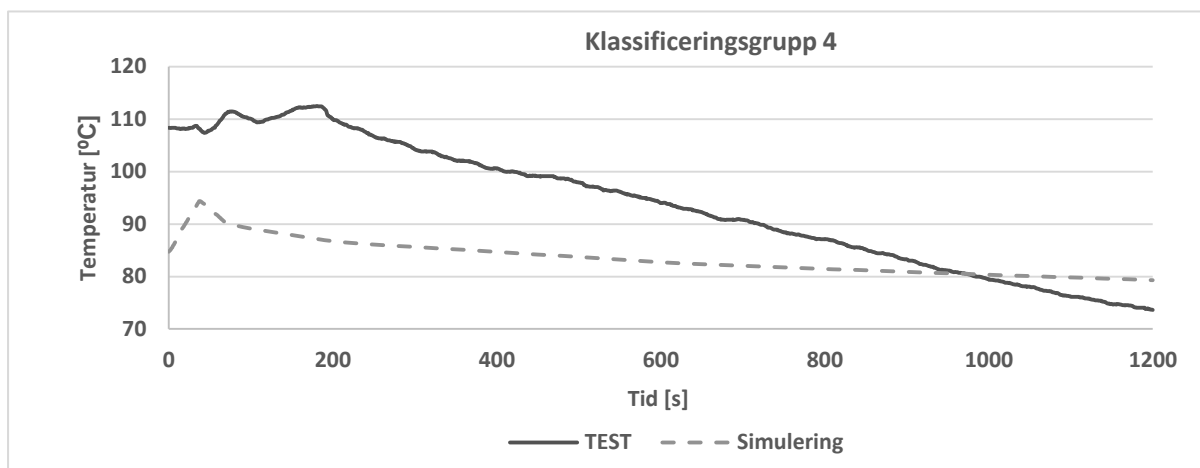
Figur 4.3.10-1 Exempel på resultat för analyserad komponent som hamnar under klassificeringsgrupp 1.



Figur 4.3.10-2 Exempel på resultat för analyserad komponent som hamnar under klassificeringsgrupp 2.



Figur 4.3.10-3 Exempel på resultat för analyserad komponent som hamnar under klassificeringsgrupp 3.



Figur 4.3.10-4 Exempel på resultat för analyserad komponent som hamnar under klassificeringsgrupp 4.

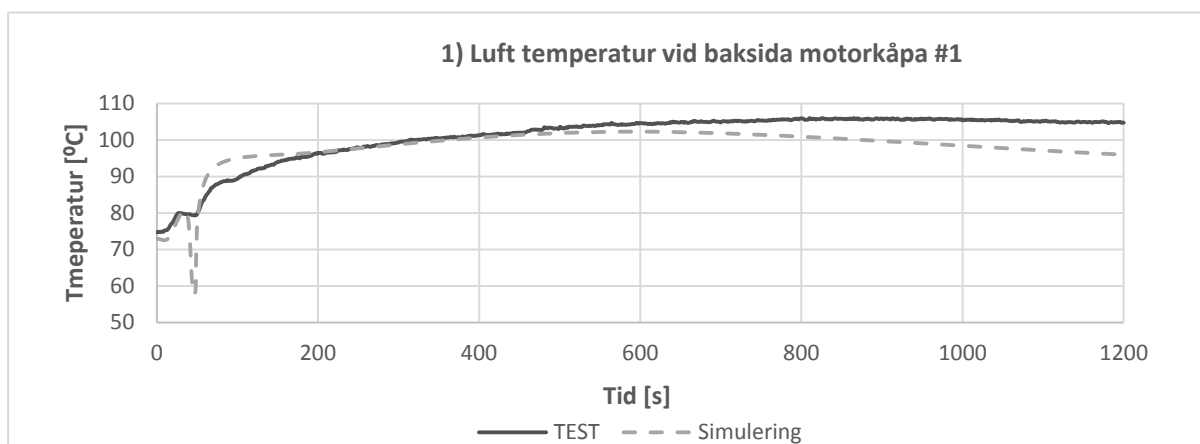
Den övergripande bedömningen av resultaten visar att metoden för att kunna prediktera korrekta komponenttemperaturer under "termisk soak" är på god väg. Ungefär hälften av de analyserade komponenterna har en bra överensstämmelse och den andra hälften behöver ytterligare analyser för att uppnå önskad överensstämmelse mellan uppmätta och simulerade temperaturer. Avvikelser presenterade i klassificeringsgrupp 2 och 3 ovan kan ofta beror på avvikelser av andra komponenter eller fel NGD, medan modelleringen av komponenter och/eller dess omgivning inom grupp 4 inte har en tillräcklig överensstämmelse med verkligheten.

Som tidigare nämnts, är fokus för arbetet gjort i detta projekt lagt på utvärderingen av "termisk soak" där den konvektiva värmeöverföringen är begränsad till naturlig konvektion. En sätt att utvärdera noggrannheten för metoden att simulera det korrekta flödet och temperaturen av den stigande luften under "termisk soak" är att mäta lufttemperaturen på flera positioner av baksida motor och längs avgassystemet. En del av de områden där temperaturen jämförts visas i **Error! Reference source not found.** nedan.

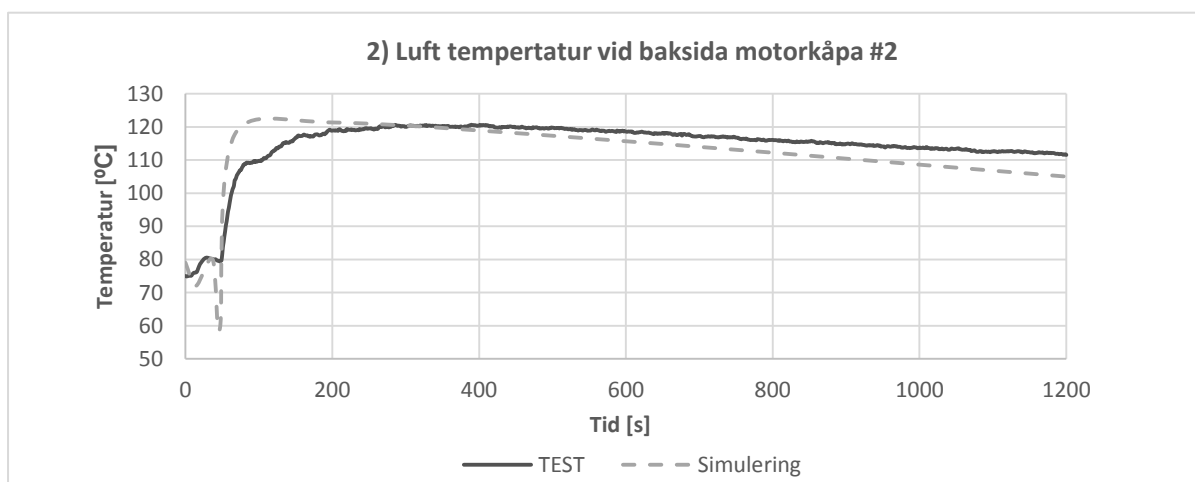


Figur 4.3.10-5. Luftmätpunkts positioner vid baksida motorkåpa och avgassystem.

Ett av områdena i figuren ovan som uppvisar bra överensstämmelse mellan beräknande och uppmätta lufttemperaturer är mätpunkterna vid baksidan av motorkåpan, se Figur 4.3.10-6 och Figur 4.3.10-7.

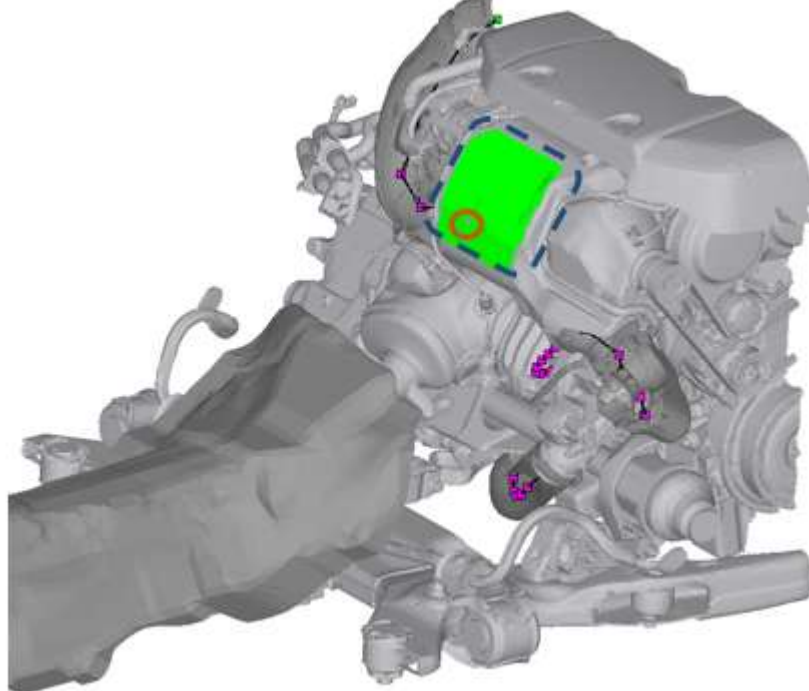


Figur 4.3.10-6. Jämförelse mellan test och simulering för luft temperatur vid baksida motorkåpa #1.

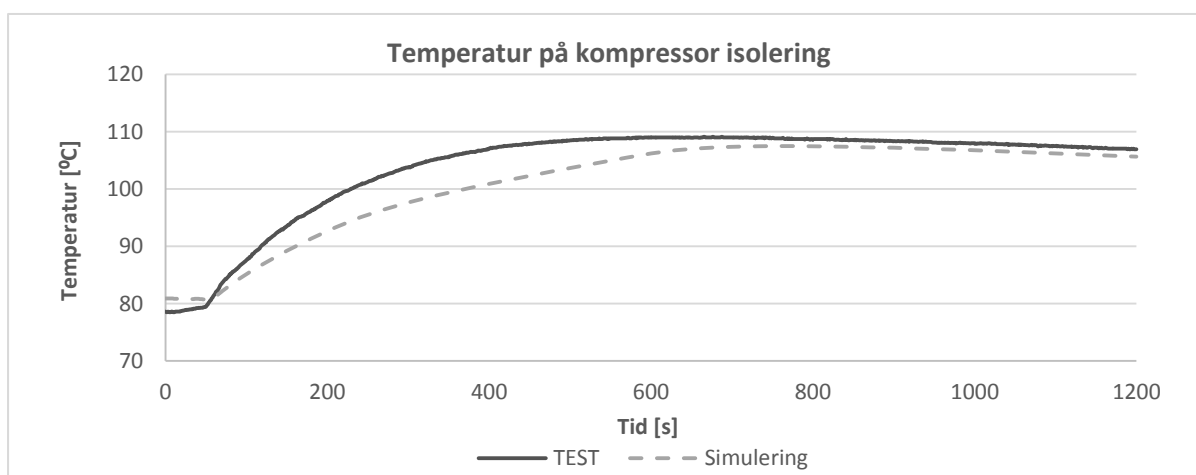


Figur 4.3.10-7. Jämförelse mellan test och simulering för luft temperatur vid baksida motorkåpa #2.

Denna goda överensstämmelse mellan simuleringar och uppmätta temperaturer för stigande luft bakom motorn under "termisk soak" ger även en positiv inverkan på komponenter, känsliga för effekten av naturlig konvention. Figur 4.3.10-8 visar positionen och Figur 4.3.10-9 visar motsvarande jämförelse i komponenttemperatur mellan fysiskt test och simulering för mätpunkten.



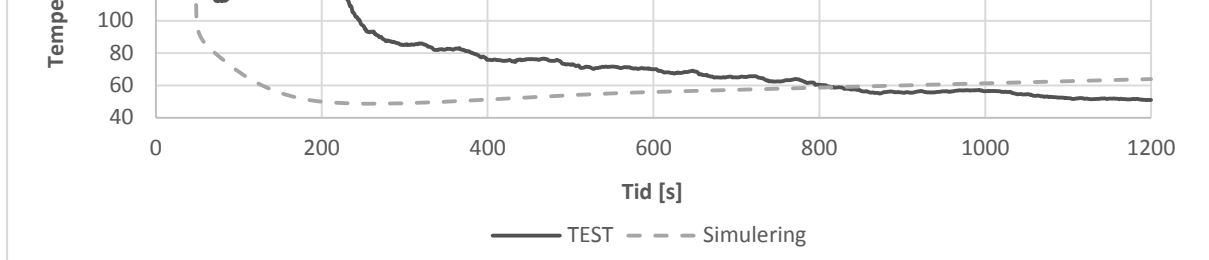
Figur 4.3.10-8. Mätpunkts placering på kompressorisolering.



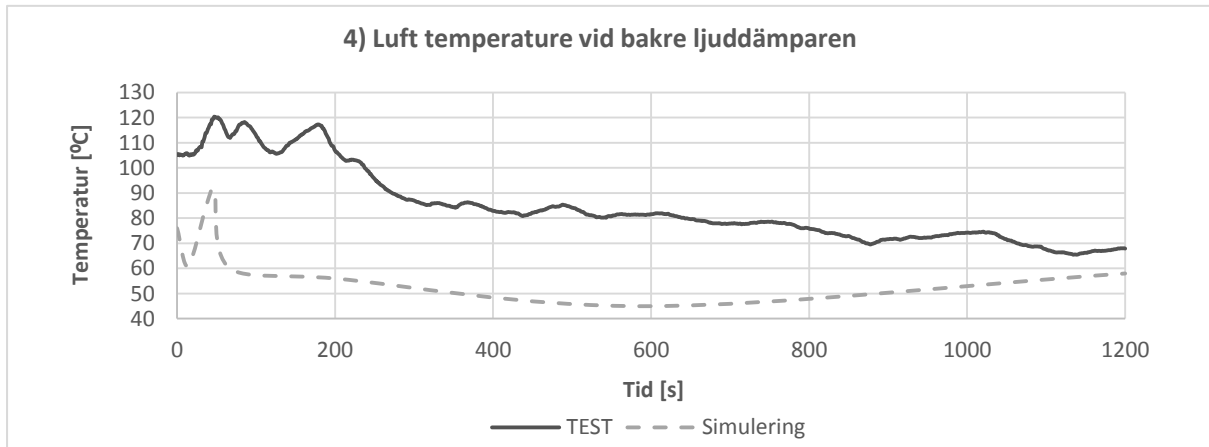
Figur 4.3.10-9. Jämförelse mellan test och simulering för uppmätt komponenttemperatur på kompressor isoleringen.

Mätpunkterna för lufttemperaturer i områdena längs avgassystemet, vid tredje avgasupphängaren och vid bakre ljuddämparen är betydligt svårare att uppnå en jämn nivå av överensstämmelse mellan uppmätta och simulerade temperaturer. Många av mätpunkterna har avvikande trender så som exemplena i Figur 4.3.10-10 och Figur 4.3.10-11.





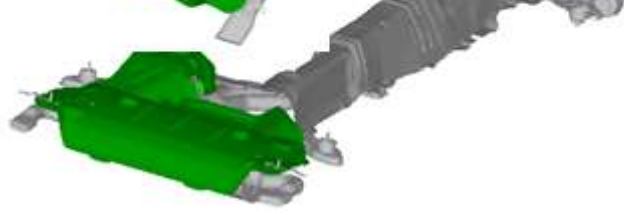
Figur 4.3.10-10. Jämförelse mellan test och simulering för uppmätt luft temperatur vid tredje avgasupphängaren.



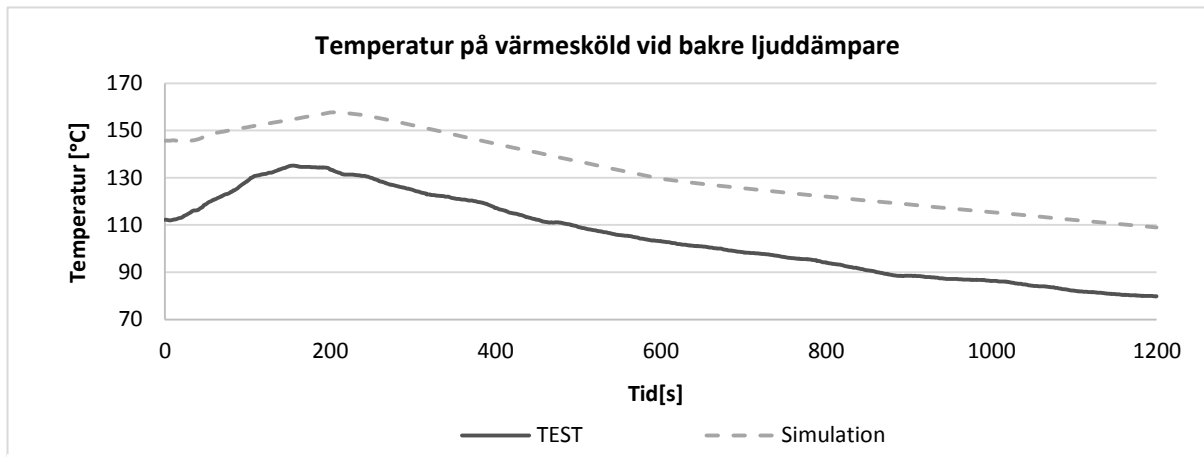
Figur 4.3.10-11. Jämförelse mellan test och simulering för uppmätt luft temperatur vid tredje avgasupphängaren.

Den konvektiva HTC (värmeöverföringskoefficienten) är en funktion av temperaturskillnaden mellan ytan och den angränsande luften. Typiska konvektiva HTC värden baserade på friströms referenstemperaturer är 5-10  $W/m^2K$ . En jämförbar strålnings HTC kan approximeras som  $HTC_r = 4 \times \epsilon \times \sigma \times T_m^3$ , där  $T_m$  är medeltemperaturen av de två ytorna är inblandade. Vid temperaturer som är typiska för ett avgassystem (500 °C) blir  $HTC_r$  nära 100  $W/m^2K$  för ytor med hög emissivitet. Värmestrålning kommer alltså vara det dominerande sättet för värmeöverföring för komponenttemperaturer kring avgassystemet. Således kommer inte de ovan presenterade avvikelserna i lufttemperaturer längs avgassystemet ha en markant påverkan på resultatet, men det är fortfarande viktigt att förstå varför dessa avvikelser uppkommer och lösa de underliggande problemen för att begränsa den totala simulerings osäkerheter för dessa och framtida analyser.

Det finns många komponenter som är svåra att prediktera korrekta temperaturer för i områden kring avgassystemet. Värmesköldar är en av dessa grupper. Figur 4.3.10-12 visar positionen och Figur 4.3.10-13 visar motsvarande jämförelse i komponenttemperatur mellan fysiskt test och simulering för en utav mätpunkterna på värmeskölden vid den bakre avgasljuddämparen.



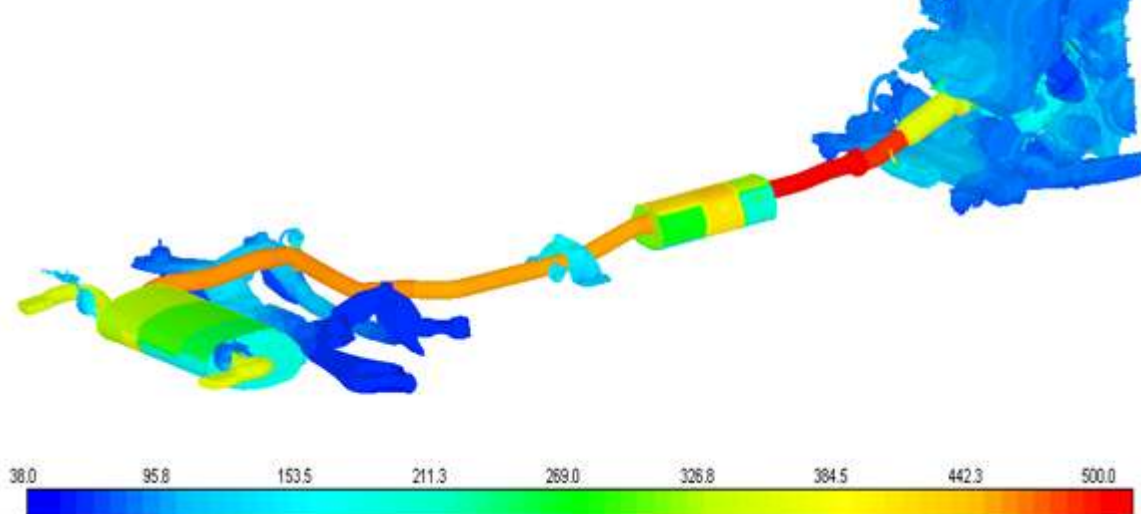
Figur 4.3.10-13. Mätpunktsplacering på värmeskölden vid den bakre ljuddämparen.



Figur 4.3.10-12. Jämförelse mellan test och simulering för uppmätt komponenttemperatur vid bakre ljuddämparen.

Det finns många faktorer som bidrar till skillanden mellan test och simulering för avgassystemets värmesköldarna. Majoriteten av de punkter som ligger på värmesköldarna presenterar en stor avvikelse i absoluta temperaturen, men har en bra trend under termisk soak, så som temperaturjämförelsen i Figur 4.3.10-13. Detta är en typisk komponent som beskrivs inom klassificeringsgrupp 3 ovan.

På grund av att värmesköldstemperaturen är starkt förbunden till strålningen från avgasröret och att den absoluta temperaturen skiljer sig avsevärt från det uppmätta värdet, är emissiviteten hos både värmesköldar och avgassystemet en kritisk parameter som skall beaktas vid modellering av strålning. Ytförhållanden såsom korrosion och smuts närvarande på sköldar och avgassystemet kommer att påverka emissionsvärdet. Mätningar av komponenter emissions är en del av ett pågående projekt vid Volvo Cars, en del av den studien presenterades i ovanstående kapitel 4.3.7. Ett annat skäl till avvikelserna mellan test och simulering kan vara att den uppdelning av avgassystemet för ansatta temperaturer inte är en giltig representation av den faktiska temperaturfördelningen. I Figur 4.3.10-14 ses den nuvarande uppdelningen.

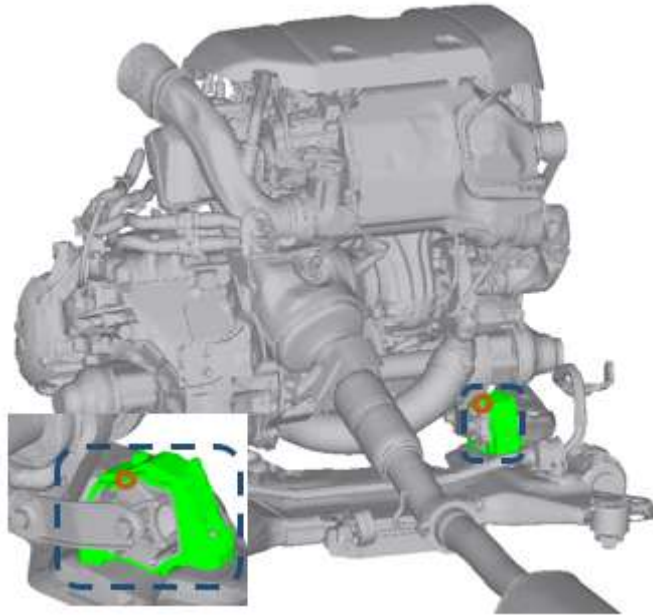


Figur 4.3.10-14. Uppdelning av ansatta temperaturer på avgassystemet.

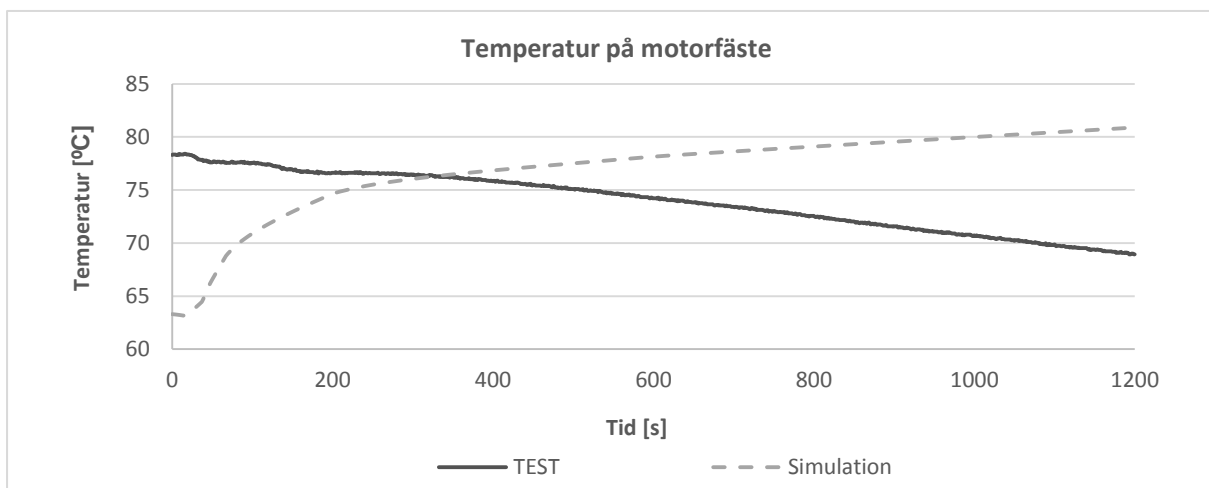
På grund av avsaknaden av en tillförlitlig virtuell metod för att beräkna yttemperaturen på avgassystemet, används medeltemperaturer från prov på uppdelade sektioner av avgassystemet. Noggrannheten hos denna förenklade metod beror på antalet uppdelningar och mätningpunkter från fysiska tester. Nya simuleringar för att förutsäga temperaturen på ljuddämparen har visat "hot spots" i ytan av den främre ljuddämparen. Om dessa "hot spots" uppkommer under test och mätpunkten placeras på en av dessa "fläckar", skulle hela det motsvarande området få en mycket högre temperatur än den faktiska medeltemperatur för den regionen. Detta är något som skulle kunna vara en orsak till avvikelsen som ses i **Error! Reference source not found.**

Geometrisk orientering av avgassystemet kommer också att ha en inverkan på resultaten. När avgasröret och ljuddämpare i avgassystemet värms upp de kommer att flytta på sig på grund av termisk expansion. Under expansionen, tros positionen av avgassystemet ändras på grund av att de gummilager, till vilka rören och ljuddämpare är bundna, drar systemet uppåt och närmare sköldarna. Detta fenomen skulle påverka både strålningen och luftens beteende under sköldarna.

Ett annat område där det har visat sig svårt att uppnå önskade resultat är under motorblocket i början av avgassystemet. En av de komponenter som avviker är ett motorfäste som sitter fast i underramen till motorn. Figur 4.3.10-15 visar positionen och Figur 4.3.10-16 visar motsvarande jämförelse i komponenttemperatur mellan fysiskt test och simulering för en utav mätpunkterna på ett av de undre motorfästena.

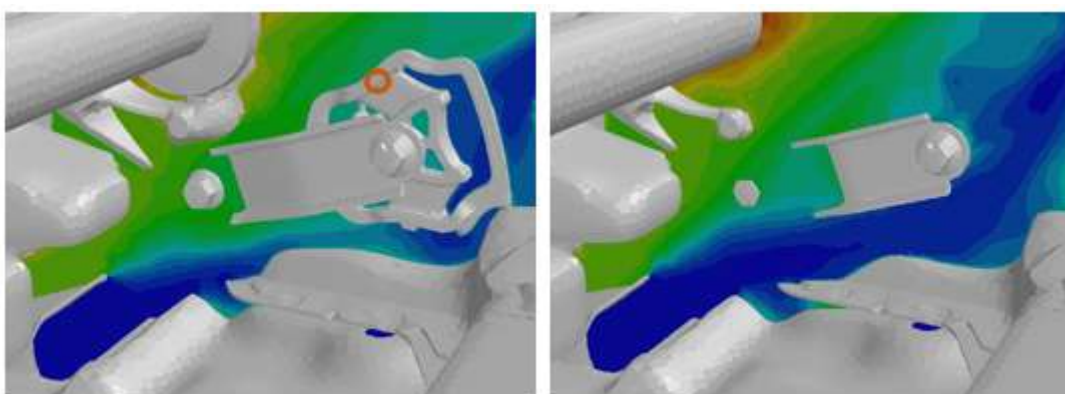


Figur 4.3.10-15. Mätpunkts placering på motorfäste. Cirkeln indikerar mätpunkten på motorfästet.

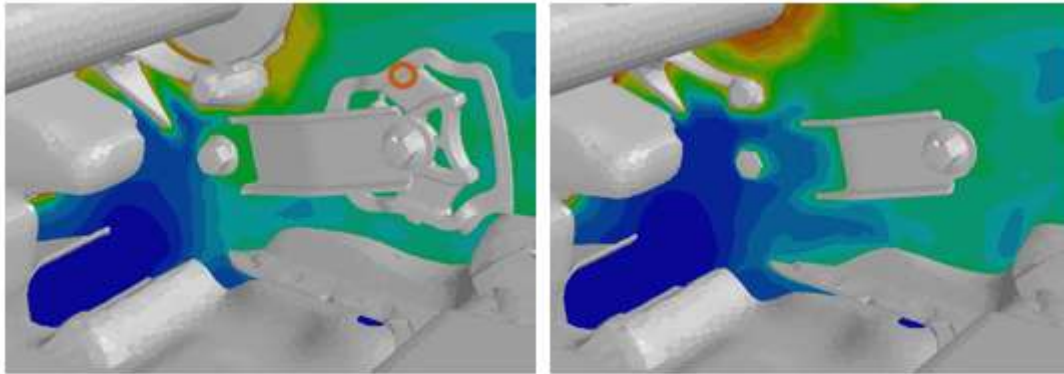


Figur 4.3.10-16. Jämförelse mellan test och simulering för uppmätt komponenttemperatur vid bakre ljuddämparen.

Det nedre motorfäste är beläget i ett område som i hög grad påverkas av lufttemperaturen runt komponenten. Luften som strömmar runt motorfästet är delvis "kall" luft från en öppning i panelen under motorn och varmare luft från framsidan av motorn som gått genom värmeväxlaren. I **Error! Reference source not found.** och **Error! Reference source not found.** visas temperatur och flödesbilden under motorn kring motorfästet under körning, respektive 10 minuter in i "termisk soak".



Figur 4.3.10-17. Lufttemperaturbild av flödet runt motorfästet innan bilen stannat. Höger: Genomsnittningsplan



Figur 4.3.10-18. Lufttemperaturbild av flödet runt motorfästet, 10 minuter in i termisk soak. Höger: Genomskärningsplan med Lufttemperaturbild av motorfästet. Vänster: Lufttemperaturbild av flödet på sidan om motorfästet. Cirkeln indikerar mätpunkten på motorfästet.

Luft som kommer in genom öppningen i underskölden skapar en "jetstråle" p.g.a. bildens hastighet, se Figur 4.3.10-17. Strålens position, separationspunkten från underskölden och strålens turbulenta spridning är starkt kopplad till kvaliteten på meshen.

Som beskrivet innan används samma mesh både för beräkningarna för den "termiska soaken" så som för beräkningar av när bilen kör. Det är viktigt att veta vad som krävs för att upplösningen är tillräcklig för båda typerna av randvillkor, eftersom tiden som kan läggas på att generera meshen för framtida transienta verifikationsprojekt är kort måste strikta riktlinjer som bygger på analyser som dessa struktureras upp.

En annan faktor som påverkar flödet under motorn är positionen på underskölden eftersom den har en direkt påverkan på positionen av öppningen från vilken den kalla luften kommer ifrån. Det är svårt att få en korrekt överenskommelse mellan positionen under testningen och simuleringar eftersom skölden rör sig upp och ner i viss utsträckning när bilen körs. En förändring på några millimeter i läget av strålen kommer att ha stor effekt på temperaturfördelningen runt omgivande komponenter. Såsom framgår av Figur 4.3.10-16 är temperaturen hos komponenten mycket lägre för simuleringen än för mätningarna från vindtunneltestet under körning. Detta indikerar att det finns en risk att strålens position simuleras i fel läge och att det bör vara närmare panelen än det är för närvarande, vilket skulle öka temperaturen hos luften runt mätpunkten. Under soak å andra sidan stiger temperaturen, och såsom framgår av Figur 4.3.10-18, har den kallare luften från öppningen inte samma påverkan på den omgivande lufttemperaturen vid mätpunkten som under de stationära förhållandena.

Precis som med den termiska expansionen av avgassystemet och dess förändrade position och medföljande påverkan är det viktigt att förstå effekten av samtliga komponenters rörelse under verkliga tester. I simuleringarna finns det inte resurser att implementera FSI (Fluid Struktur Interaktion) analyser inom en rimlig framtid varför effekterna av dessa positionsförändringar av komponenter måste analyseras och modelleras på ett tillförlitligt sätt för att kunna eliminera osäkerheter inför kommande analyser.

## 6.2 Måluppfyllelse

### 6.2.1 Projekt mål

Projektet har inneburit ökad kunskap inom området transient termisk modellering. Arbetet har i huvudsak inriktat sig på att identifiera, kvantifiera och eliminera felkällor och osäkerheter. Planerade aktiviteter har genomförts och nyvunnen kunskap har medfört att förståelsen för utmaningen har mognat. Ibland har nya insikter öppnat nya frågeställningar och arbetet har fortsatt i en något modifierad riktning. Den beskrivna metoden har utvecklats och anpassats i syfte att närma sig de övergripande målen. Avsikten är att metoden skall integreras fortlöpande i verifikationen, och att antal testbilar på sikt skall reduceras kraftigt. För att kunna ersätta fysisk provning ställs

långtgående krav på kvalitet och tillförlitlighet. Där är vi inte än, men det har heller aldrig varit något mål för detta projekt.

Projektmålen, som de definieras enligt kapitel 5, anses uppfyllda, och resultaten utgör en viktig byggsten i det övergripande arbetet med att reducera antal provobjekt, och resultaten kan användas för att förkorta det iterativa arbetet som framtagningen av en ny bilmodell innebär.

### 6.2.2 FFI:s målsättning

Målsättningen med FFI är att:

1. Minska vägtransporternas miljöpåverkan
2. Minska antalet skadade och dödade i trafiken
3. Stärka den internationella konkurrenskraften

Vi anser att genom den beskrivna metodutvecklingen så har ytterligare steg tagits mot en simuleringsbaserad verifiering. Därigenom så bidrar projektet på ett konkret sätt till FFI-målen 1 och 3 ovan.

## 7 Spridning och publicering

### 7.1 Kunskaps- och resultatspridning

Hur har/planeras projektresultatet att användas och spridas?	Markera med X	Kommentar
Öka kunskapen inom området	X	Information om projektet och dess resultat har, eller kommer att, spridas enligt: <ul style="list-style-type: none"><li>• Internt på olika möten vid ett flertal tillfällen, samt skriftlig information på hemsida.</li><li>• Externt vid två tillfällen enligt avsnitt 7.2</li><li>• Inom Chalmers kompetenscenter</li></ul>
Föras vidare till andra avancerade tekniska utvecklingsprojekt	X	Se ovan
Föras vidare till produktutvecklingsprojekt	X	Se ovan
Introduceras på marknaden		
Användas i utredningar/regelverk/tillståndsärenden/ politiska beslut		

### 7.2 Publikationer

I enlighet med projektansökan så är extern internationell publicering/presentation genomförd/planerad för två tillfällen.

- FKFS Progress in Vehicle Aerodynamics and Thermal management, Stuttgart September 2015 "Virtual Comprehensive Thermal Modelling in Order to Increase the Component Durability for Environmental Sustainability" presenterades av Per Westin 2015-09-29.
- 2016 JSAE Annual Congress, 25-27 Maj, Pacifico Yokohama. "Pseudo-transient method for under-hood thermal management in passenger cars" presenterades av Begoña Leon Moya

## 8 Slutsatser och fortsatt forskning

Det råder inget som helst tvivel om att mål och syfte för detta projekt är relevanta och eftersträvansvärda, och ligger helt rätt i tiden. En övergång till virtuell verifiering är, som redan nämnts, inte bara önskvärd utan

helt nödvändig för att på sikt nå den ekonomiska- och miljömässiga uthållighet som krävs för fortsatt konkurrenskraft.

Projektet har signifikant ökat kunskapen på VOLVO CARS gällande transient termisk modellering av bilkomponenter, och bidrar därmed till utvecklingen mot en framtid med simuleringsbaserad verifiering av nya bilmodeller. Metodutveckling innebär oundvikligen att nya upptäckter längs vägen medför ändring av de ursprungliga planerna. Nya oförutsedda utmaningar dyker upp och nyvunnen kunskap öppnar möjligheter till att avancera i en kanske oväntad riktning. Projektplaneringen har uppdaterats längs vägen, alltid med högsta prioritet till de uppgifter som bedöms som mest viktiga för att uppfylla projektmålen. Modellerna är stora, fysiken komplex och randvillkorens implementering långt från självklara. Bilden av målet när metoden är "färdig" för implementering i verifieringsprocessen är bitvis svår att beskriva och kvantifiera. Helt klart är att vi inte är där än. Det krävs fortsatt arbete på många fronter. Några nyckelområden där nödvändigheten av vidare utveckling identifierats är:

- Naturlig konvektion. Speciellt värmeöverföring i områden där omslag från laminära till turbulenta gränsskikt förväntas förekomma.
- Meshkvalitet. Hur definierar vi erforderlig kvalitet för att hantera all fysik för samtliga beräkningsfall?
- Transienta randvillkor för avgivet värme dess representation i beräkningsmodellerna.
- Process för kvalitetsstyrning och tillförlitlighet för att möjliggöra att metoden används när inte jämförande testdata finns tillgängligt.

## 9 Deltagande parter och kontaktpersoner

- Volvo Cars Corporation (Volvo Cars)
  - Kontaktperson: Alexander Broniewicz,
  - Epost: [alexander.broniewicz@volvovars.com](mailto:alexander.broniewicz@volvovars.com), Tel: 031-3254824
- ÅF Industry AB
  - Kontaktperson: Göran Bennarsten
  - Epost: [goran.bennarsten@afconsult.com](mailto:goran.bennarsten@afconsult.com), Tel: 010-5053257

