

Department of Mechanical Engineering
Solid Mechanics

ISRN LUTFD2/TFHF-07/5125-SE(1-69)

Utveckling av termisk analys med avseende på val av analyserade tidpunkter gällande HT-turbinen i RM12

Master's Dissertation by
Johan Svensson

Supervisors

Magnus Andersson, Volvo Aero Corporation, Sweden
Per Pettersson, Volvo Aero Corporation, Sweden
Håkan Hallberg, Div. of Solid Mechanics, Lund University, Sweden
Ulf Nyman, Div. of Solid Mechanics, Lund University, Sweden

Copyright © 2007 by Div. of Solid Mechanics,
Volvo Aero Corporation, Johan Svensson

Printed by Media-Tryck, Lund University, Lund, Sweden

For information, adress:

Division of Solid Mechanics, Lund University, Box 118, SE-221 00 Lund, Sweden

Homepage: <http://www.solid.lth.se>

Förord

Detta examensarbete har utförts på Volvo Aero Corporation i Trollhättan våren 2006.

Personer på Volvo Aero som jag speciellt skulle vilja tacka är mina handledare Magnus Andersson och Per Pettersson. Även Tommy Rosheden, som har varit handledare till andra ex-jobbare, har fått stå ut med många frågor. Magnus Jönsson som jobbar som konsult har ändå varit mitt största bollplank vad gäller själva uppgiften i examensarbetet. Ett stort tack till er alla!

På Lunds tekniska högskola skulle jag vilja tacka mina handledare Håkan Hallberg och Ulf Nyman som har varit en stor hjälp vid skrivandet av rapporten.

Andra personer som ska nämnas är Andreas Gustafsson, Axel Starborg och Zoran Zivkovic. Att vi fyra ex-jobbare kunde sitta tillsammans i ett rum gjorde att vi kunde ta hjälp av varandra och därmed avlasta våra handledare lite grann.

Trollhättan, 2006-06-30

Johan Svensson

Sammanfattning

Volvo Aero Corporation i Trollhättan sysslar bland annat med uppföljning av slitage på reaktionsmotorn RM12 som sitter i JAS 39 Gripen. Ett utvecklat system för denna uppföljning finns och en del av arbetet är nu att få det så effektivt som möjligt med avseende på beräkningstiden.

För varje flugget uppdrag beräknas hur mycket av de olika motordelarnas livslängd som har förbrukats. En del av motorn är högtrycksturbinen som utsätts för stora termiska påfrestningar vilket i sin tur ger upphov till stora spänningar. För denna modul i motorn är det då viktigt att utföra en noggrann termisk FE-analys för att få fram ett så korrekt resultat av den beräknade livslängdsförbrukningen som möjligt.

Under motorgång med varierande varvtal varierar även de termiska spänningarna kraftigt i de olika delarna av högtrycksturbinen. Vad som är viktigt är att finna de tidpunkter då max- och min-värden uppstår i dessa cykler. Detta eftersom det är temperaturspannets omfång som ger information om hur stort slitaget blir. Att finna dessa tidpunkter är enkelt löst genom att utföra analysen i tillräckligt täta intervall. Men eftersom tidsåtgången för analysen är direkt proportionell mot antalet analyserade tidpunkter innebär detta att analysen blir ineffektiv. En av uppgifterna i detta examensarbete är därför att ta fram en metod som, innan den termiska analysen har utförts, kan förutsäga när dessa viktiga tidpunkter inträffar. En idé på hur man skulle kunna gå till väga togs fram men utan att en färdig metod blev klar.

Det har även undersökts hur valet av tidpunkter påverkar livslängdsresultatet. Detta utfördes endast genom att variera antalet tidpunkter i analysen för ett par analyserade flyguppdrag. Bland annat har tidpunktsvalet som används idag utvärderats och slutsatsen blev att noggrannheten i livslängdsresultatet är god nog. Denna slutsats har dragits genom att jämföra dessa livslängdsresultat med resultat där den termiska analysen innehöll många fler tidpunkter. Avvikelsen i livslängdsresultat varierar beroende på vilken komponent i högtrycksturbinen som studeras men överlag avviker livslängden bara med någon enstaka procent.

Ett försök att ta fram ett nytt tidpunktsval gjordes. Förhoppningen var att kunna minska antalet analyserade tidpunkter utan att göra avkall på noggrannheten i beräkningen av livslängdsförbrukningen. Avvikelsen i livslängd ökade dock något men analystiden förkortades med ungefär 26 %.

Abstract

Volvo Aero Corporation, situated in Trollhättan, Sweden, is responsible for follow-up on the RM12 engine mounted in JAS 39 Gripen. A developed system exists and some work is now focused on making the system more effective with respect to calculation time.

For every flown mission the amount of consumed lifetime is estimated for some engine components. One part of the engine is the high pressure turbine which is exposed to large thermal stresses during flight. It is then very important to perform a careful thermal FE-analysis on this module so that an accurate result for the calculated consumed lifetime is achieved.

During a flight mission the thermal stresses are in many parts of the high pressure turbine fluctuating rapidly. To capture the size of these cycles it is important to perform the analysis in time points when a maximum or minimum appears. Finding these time points is easily accomplished by performing the analysis with time steps small enough. But performing the analysis in this fashion will make it ineffective since the calculation time is direct proportional to the amount of time points. One of the objectives in this thesis is to develop a method that, prior the actual FE-analysis, can predict when these time points arise. An idea for this was evaluated though a complete method was never developed.

In what extent the choice of time points affects the calculated consumed lifetime was also evaluated. This was done by performing the analysis for a couple of flown missions with different choices of analyzed time points. The choice of time points used today was evaluated and the conclusion was that they give an accurate result. This conclusion was drawn by comparing the result with lifetime calculations founded on analyses containing a lot more time points. The deviation is under or around one percent depending on which component in the high pressure turbine that is studied.

A new choice of time points was evaluated. The hope was to reduce the amount of analyzed time points without lowering the accuracy in the calculated consumed lifetime. This was not quite accomplished but on the other hand the calculation time was reduced by 26 %.

Nomenklatur

Ord	Förklaring
A3B3-mixen	En samling flyguppdrag som är framtagna manuellt. Uppdragen är döpta till mXX, där XX ersätts med siffror.
Ansys	Kommersiellt finita element-program
Avdrag	Minskning av varvtal
Burst	Engelska för pådrag
CFD	Computational Fluid Dynamics. Numerisk lösningsmetod för fluiddynamikproblem
Chop	Engelska för avdrag
Cumfat	Program i LAS som utför beräkning av livslängdsförbrukning
Driftfall	Ett tillstånd då turbinerna har ett visst varvtal
Ebk	Efterbrännkammare
FEM	Finita Element-Metoden
Gaskanal	Den kanal i brännkammaren och vidare bak i motorn där den heta gasen flödar
HT	Högtryck. T.ex. HT-skiva
Hybridmodell	FE-modell med både 2D- och 3D-mesh
LAS	Life Analysis System. Benämningen på analyskedjan som utför beräkningar för livslängdsförbrukningen
LT	Lågtryck
LTS	Life Tracking System. Ett utvecklat system för uppföljning av slitage
Mesh	Elementindelningen i modellen för finita element-beräkningar
Motorprov	Tester utförs på en uppriggad motor utrustad med mätinstrument
Pådrag	Ökning av varvtal
RM12	Reaktionsmotor 12
Steady State	Det tillstånd då temperaturen efter en transient förändring har nått en stadig nivå
Thermal Loads	Program i LAS som sätter tar fram randvillkor till den termiska analysen
Transient	I detta fall en snabb förändring av temperatur
VAC	Volvo Aero Corporation
VoLD	Volvo LastData. En databas innehållandes resultat från motorprov
Volter	Program i LAS som utför spänningsberäkningar för olika områden i högtrycksturbinen

Innehållsförteckning

Förord	i
Sammanfattning	ii
Abstract	iii
Nomenklatur	iv
1 Introduktion	1
1.1 RM12	1
1.2 Bakgrund	2
1.3 Problemformulering	3
1.4 Metod	5
2 FEM	6
2.1 FE-formulering	6
2.2 Transient termisk analys	12
3 LAS	14
3.1 Termisk analys	14
3.2 Volter	19
4 Val av tidpunkters betydelse för beräkning av livslängdsförbrukning	23
4.1 Felaktiga randvillkor	25
4.2 Utvärdering av dagens tidpunktsval	30
4.3 Undersökning av den termiska analysens känslighet	31
4.3.1 Övergripande känslighetsanalys	31
4.3.2 Temperaturavvikelse på grund av antalet analyserade tidpunkter	33
4.3.3 Livslängdsavvikelse på grund av miss av extrempunkt	34
4.4 Undersökning av nytt tidpunktsval	36
4.5 Slutsats och diskussion	40
5 Metod för att förutspå extrempunkter i temperaturgradienter	42
5.1 Simulering av temperaturrespons	43
5.2 Slutsats och diskussion	51
6 Sammanfattning och förslag till vidare arbete	52
Referenser	53
A Beräknat temperaturfel	54
B Matlab-skript	59

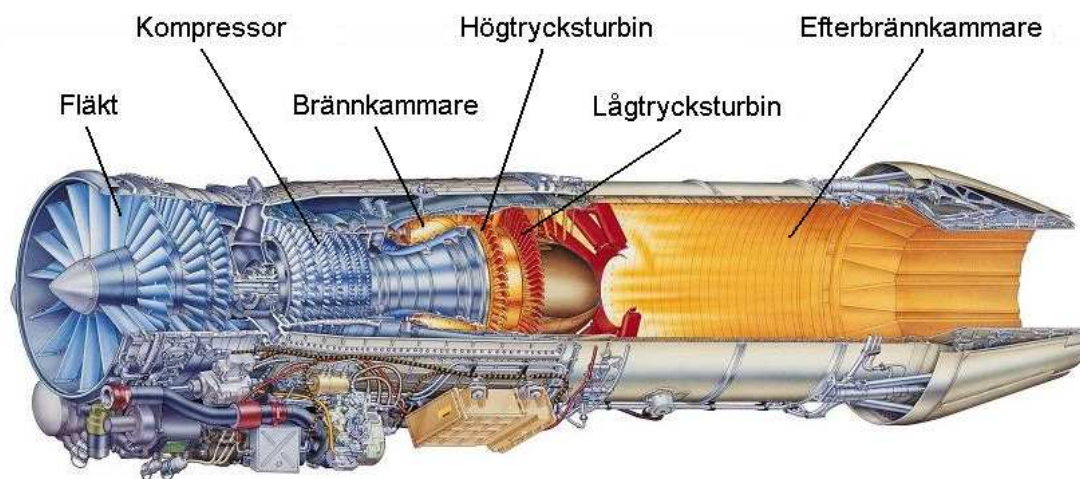
1 Introduktion

Volvo Aero Corporation, VAC, i Trollhättan utvecklar och tillverkar komponenter till flyg- och raketmotorer. Företaget är ledande i världen när det gäller tillverkning av de motorkomponenter som just VAC har inriktat sig mot. I 80 % av de större passagerarflygplanen i världen sitter motorkomponenter tillverkade av VAC. På den militära sidan ansvarar VAC för utveckling och tillverkning av motorn RM12 till JAS 39 Gripen samt för produktstöd under hela motorns livslängd.

1.1 RM12

Reaktionsmotorn RM12 är i grunden General Electrics F404-motor som sitter parvis i amerikanska stridsflygplan. Versionen RM12 är modifierad, med tonvikt på säkerhet och prestanda, för att ensam kunna driva JAS 39 Gripen. Bland annat är fläkten förstärkt för att kunna motstå fågelkollision bättre.

Konstruktionen består av två rotoror. Fläkten och lågtrycksturbinen är sammankopplade och bildar en rotor. Samma gäller för kompressorn och högtrycksturbinen vars rotoraxel är monterad utanpå lågtrycksrotorns axel.



Figur 1.1 RM12

Motorn fungerar enligt principen att luft sugns in i den främre delen och lufttrycket höjs i fläktens tre steg. Det mesta av luften går sedan vidare till kompressorn där trycket höjs ytterligare i sju steg. Den komprimerade luften blandas efter det i brännkammaren med bränsle och antänds. Den heta gasen expanderar sedan bakåt i hög hastighet och driver hög- och lågtrycksturbinen som i sin tur driver fläkten respektive kompressorn. Energin i gasen när den sedan har gått igenom hela motorn är stor nog för att driva flygplanet

framåt. Den luft som inte leds in i kompressorn går vidare utanför själva kärnmotorn och leds in i efterbrännkammaren. För extra dragkraft kan ytterligare bränsle antändas här och därmed öka motorns maximala dragkraft från 54.0 kN till 80.5 kN. Med tänd efterbrännkammare ökar alltså motorns dragkraft med nästan 50 % men samtidigt ökar bränsleåtgången med över 200 %. Därför används endast tänd EBK när det verkligen behövs, t.ex. vid start på kort startbana. För ytterligare prestanda och data se Tabell 1.1 och Tabell 1.2 [1].

	Dragkraft (kN)	Specifik bränsleförbrukning (mg/sN)	Luftflöde (kg/s)
Max. Pådrag (tänd EBK)	80.5	50.6	68.0
Max. Pådrag (släckt EBK)	54.0	23.9	68.0

Tabell 1.1 Motorprestanda RM12

Längd	4.04 m
Max. Diameter (utloppsmunstycke)	0.88 m
Vikt (utan bränsle)	1055 kg
Totalt tryckförhållande	27.5:1

Tabell 1.2 Motordata RM12

Varje motordel som visas i Figur 1.1 är en utbyttbar modul i sig. Detta gör att underhållet blir enklare och att reparationer kan ske smidigt.

1.2 Bakgrund

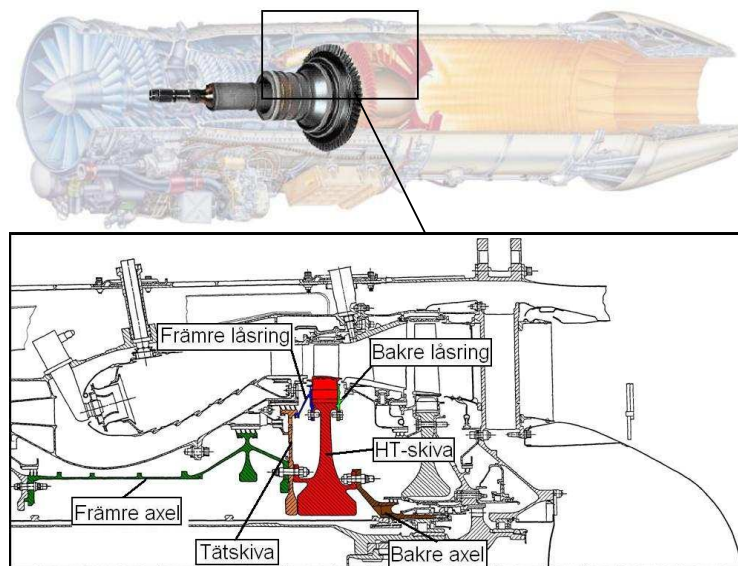
På VAC pågår just nu en utveckling av uppföljningssystemet LTS, Life Tracking System, för att analytiskt följa slitaget på varje motorkomponent i RM12 på ett noggrant sätt. Att kunna uppskatta hur mycket av en motorkomponents livslängd som har förbrukats efter ett flugets uppdrag är viktigt för underhållet av motorn. För att göra detta registreras lastdata, t.ex. varvtalet för HT- och LT-turbinen, varje gång ett plan flyger och detta utnyttjas sedan i beräkningarna av livslängdsförbrukningen.

Vissa komponenter i motorn utsätts för extremt stora termiska påfrestningar. Den termiska spänningen är i dessa komponenter det dominerande spänningsbidraget vilket då har en stor påverkan på livslängdsberäkningarna. Att utföra en noggrann termisk analys vid varje flugets uppdrag är alltså viktig för att få fram en sanningsenlig livslängdsförbrukning i motorn. Att utföra hela livslängdsanalysen på ett noggrant sätt är inget problem i sig utan det svåra är att utföra den på ett effektivt sätt med avseende på tidsåtgången. Ett första rimligt mål med LTS är att hela livslängdsanalysen för ett flugets uppdrag inte ska ta längre tid än flygningen i sig. I dagsläget är man en bra bit ifrån detta mål. Enbart den termiska analysen tar ofta längre tid än själva flygningen. Denna analys är också den mest tidskrävande delen i hela analyskedjan, så att effektivisera den är av stort intresse.

1.3 Problemformulering

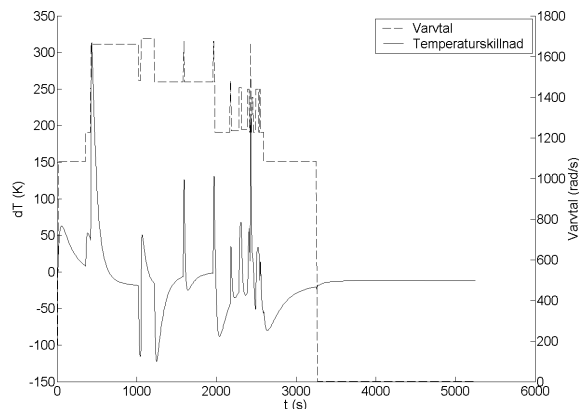
Den termiska analysen utförs i finita element-programmet Ansys. Teorin bakom finita element-metoden hittas i Kapitel 2. Två faktorer är av absolut störst vikt för tidsåtgången för analysen. Den ena är detaljrikedomen i den modell av motorn som används i analysen och den andra är antalet tidpunkter som analysen utförs i. Uppgiften i detta examensarbete är att minimera antalet analyserade tidpunkter utan att göra avkall på noggrannheten i livslängdsberäkningen.

Betydande termiska spänningar uppstår när det termiska fältet inte är konstant utan varierar stort över ett område under en kort tid. Ett område i motorn där ett sådant termiskt beteende uppstår är framförallt i högtrycksturbinen. Därför är den termiska analysen extra viktig här. Högtrycksturbinen och dess komponenter kan ses i Figur 1.2.



Figur 1.2 Högtrycksturbinen med dess komponenter

Spänningen i vilket område som helst i högtrycksturbinen beror mer eller mindre av det termiska fältet i hela högtrycksturbinen. Men för att här kunna föra en diskussion om problemet görs följande ganska grova antagande. Ett godtyckligt område i högtrycksturbinen studeras. Det termiska fältet som styr den termiska spänningen antas här endast ges av två punkter. Temperaturskillnaden som visas i Figur 1.3 ger alltså upphov till den termiska spänningen i detta område. Här plottas temperaturskillnaden mellan två punkter tillsammans med högtrycksturbinens varvtal för ett visst flyguppdrag.

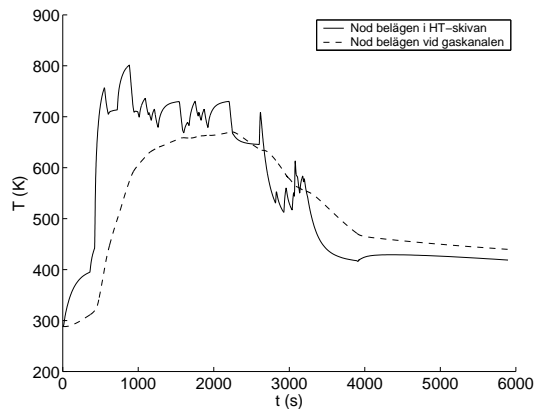


Figur 1.3 Exempel på global temperaturgradient

Eftersom den termiska spänningen ger ett stort bidrag till den totala spänningen är det viktigt att fånga omfånget i denna temperaturskillnad. Detta omfång har en stor inverkan på storleken av spänningscyklerna. Med andra ord behöver man i den termiska analysen se till att analysera de tidpunkter där en extrempunkt i temperaturskillnaden uppstår. Intressanta extrempunkter är lokala sådana som inte uppstår direkt efter driftfallsändring. Med dagens analysmetod uppnås detta genom att utföra analysen med relativt små tidssteg efter det att ett driftfallsbyte har skett och man kan förvänta sig ett extremvärde i temperaturgradienten. Detta innebär att man troligen får med en hel del "onödiga" tidpunkter i analysen som inte har någon större inverkan på den slutliga livslängdsberäkningen. Man vill ju ha med så få tidpunkter som möjligt utan att göra avkall på livslängdsresultatet. Vad som då hade varit värt mycket är att kunna förutsäga när i tiden en extrempunkt uppstår. Först då är det möjligt att minimera antalet analyserade tidpunkter.

Tidsstegen i de ointressanta områdena kan dock inte göras för stora eftersom FE-beräkningen då kommer ge ett för stort fel i den beräknade temperaturen.

Den termiska responsen är också olika för olika komponenter i HT-turbinen. För områden längst upp i närheten av gaskanalen varierar temperaturen hastigt medan den längre ner i HT-skivan har en mera långsam variation. Detta inverkar stort på den termiska spänningen i olika delar av HT-turbinen vilket gör problemet med att fånga extremvärden än mer komplicerat. Ett exempel på detta kan ses i Figur 1.4.



Figur 1.4 Temperaturvariation i två olika områden i HT-turbinen

Uppgiften i examensarbetet är indelad i två delar.

- Utreda vilken påverkan antalet tidpunkter i den termiska analysen har på den beräknade livslängdsförbrukningen på ett antal flygna uppdrag.
- Utveckla en metod för att fastställa de tidpunkter som behöver analyseras för att fånga när temperaturgradienten är maximal för varje driftfall.

På grund av sekretess kommer inga beräknade livslängdsförbrukningar att presenteras utan endast hur den beräknade livslängdsförbrukningen varierar mellan analyser med olika tidpunktsval. De komponentområden i HT-turbinen som beräkningarna utförs i har döpts till *Volter-noder* numrerade från 1 till 21.

1.4 Metod

Inledningsvis var upplägget följande.

- Studera valet av tidpunkter som används i den termiska analysen och uppskatta dess påverkan av livslängdsberäkningen. Uppskatta noggrannheten av tidpunktsvalet som används idag i LTS.
- Ta fram en metod som innan analysen i Ansys kan förutspå vart det termiska bidraget till spänningen blir som störst för varje driftfall.

Först studerades hela analyskedjan för livslängdsberäkningen. Extra noga studerades de på VAC framtagna program som används fram till den termiska analysen och dessa programs indatafiler. Sedan utfördes ett antal livslängdsanalyser av ett specifikt flyguppdrag med olika val av termiska tidpunkter. Detta för att få en första uppfattning om tidpunkternas betydelse.

2 FEM

Modellering av olika fysiska problem leder ofta till att differentialekvationer behöver lösas. Detta innefattar bland annat spännings- och värmefält i något objekt. Ofta är problemet så komplext att det ej går att lösa med vanliga analytiska metoder. Finita element-metoden, FEM, är en numerisk approximation som då kan tillämpas. Vad man gör är att dela in objektet i element där varje element var för sig innehåller en approximativ funktion för den studerade variabeln. Enklast möjliga approximation är antagandet att den studerade variabeln, t.ex. temperaturen, har en linjär variation inom varje element. Har man då delat in hela det studerade objektet i tillräckligt små element ger denna metod en bra approximation trots att variabeln har ett olinjärt beteende sett över hela objektet. Hela elementindelningen kallas *mesh* och de punkter där element binds samman kallas *noder*.

2.1 FE-formulering

Eftersom detta examensarbete i huvudsak är inriktat mot termisk analys ges FE-formuleringen för just detta ändamål. Först ska olika definitioner för värmeflöde presenteras.

Värmeflödet i en tvådimensionell kropp representeras av vektorn \mathbf{q} , kallad värmeflödesvektorn. Denna vektor motsvarar mängden värme per enhetstid som passerar genom en enhetsarea som är vinkelrät mot värmeflödet. I två dimensioner, x och y , har vektorn \mathbf{q} utseendet

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} q_x \\ q_y \end{bmatrix}, \quad (2.1)$$

där komponenterna har dimensionen $[\text{J}/\text{m}^2\text{s}]$.

Värmeflödesriktning genom en gränssyta kan vara godtycklig. Det intressanta är att få ett värde på hur mycket värme som faktiskt passerar genom gränssytan. Detta motsvaras av flödet, q_n , som är givet genom

$$q_n = \mathbf{q}^T \mathbf{n}, \quad (2.2)$$

där \mathbf{n} är normalvektorn till gränssytan.

Det konstitutiva sambandet mellan flödesvektorn och temperaturgradienten ges av Fouriers lag om värmekonduktivitet,

$$\mathbf{q} = -\mathbf{D}\nabla T, \quad (2.3)$$

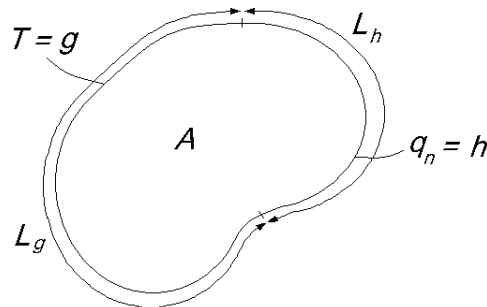
där temperaturgradienten, ∇T , ges av

$$\nabla T = \begin{bmatrix} \frac{\partial T}{\partial x} \\ \frac{\partial T}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

och matrisen, \mathbf{D} , som anger värmeledningsförmågan i de olika riktningarna ges av

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} \\ k_{yx} & k_{yy} \end{bmatrix}. \quad (2.5)$$

För att ställa upp en differentialekvation som beskriver värmeflödet i en tvådimensionell kropp görs följande ansatser. Mängden värme som tillförs någon kropp per enhetsvolym och enhetstid benämnes Q . Variabeln Q är positiv då värme tillförs och har dimensionen $[J/m^3s]$. En balansekvation ställs nu upp och anger att den mängd värme som tillförs ett godtyckligt område, A , av en kropp per enhetstid är lika med den mängd värme som bortförs från området per enhetstid. Detta antagande kan göras när värmeflödesproblemet är stationärt vilket är fallet här.



Figur 2.1 Området, A , med randen $L = L_g + L_n$.

Om A anger områdets area och $t=t(x,y)$ är kroppens tjocklek i z -riktningen blir balansekvationen

$$\int_A Q t dA = \oint_L q_n t dL. \quad (2.6)$$

Högersidan av (2.6) kan med hjälp av (2.2) och Gauss divergensteorem skrivas om till

$$\oint_L q_n t dL = \oint_L \mathbf{q}^T \mathbf{n} t dL = \int_A \text{div}(\mathbf{q}t) dA. \quad (2.7)$$

Med (2.7) kan nu (2.6) skrivas som

$$\int_A (Q t - \text{div}(\mathbf{q}t)) dA = 0. \quad (2.8)$$

Området, A , valdes som godtyckligt och därför kan balansekvationen ställas upp för hela kroppen

$$\operatorname{div}(\mathbf{q}t) = Qt. \quad (2.9)$$

Utnyttjas det konstitutiva sambandet (2.3) kan (2.9) skrivas om till

$$\operatorname{div}(\mathbf{D}\nabla Tt) + Qt = 0. \quad (2.10)$$

För att lösa denna differentialekvation behövs randvillkor. Dessa kan anges på olika sätt och ett vanligt förekommande sätt är följande,

$$q_n = \mathbf{q}^T \mathbf{n} = h \quad \text{på } L_h \quad (2.11)$$

$$T = g \quad \text{på } L_g \quad (2.12)$$

där h och g är kända. Ränderna L_h och L_g utgör tillsammans hela randen L . Se Figur 2.1. Differentialekvationen (2.10) tillsammans med randvillkoren (2.11) och (2.12) kallas *stark formulering* för värmeflödet. För att anpassa formuleringen till FEM behöver vissa omskrivningar göras. Utgå från (2.9) och multiplicera denna med en viktfunktion, v , vilket ger

$$\int_A v \operatorname{div}(\mathbf{q}t) dA - \int_A v Qt dA = 0 \quad (2.13)$$

Partiell integration av den första termen i (2.13), Green-Gauss teorem, ger att den kan skrivas som

$$\int_A v \operatorname{div}(\mathbf{q}t) dA = \oint_L v \mathbf{q}^T \mathbf{n} t dL - \int_A (\nabla v)^T \mathbf{q} t dA. \quad (2.14)$$

Insättning av (2.14) i (2.13) och utnyttjande av randvillkoret (2.11) ger

$$\int_A (\nabla v)^T \mathbf{q} t dA = \oint_{L_h} v h t dL + \oint_{L_g} v q_n t dL + \int_A v Qt dA. \quad (2.15)$$

Används det konstitutiva sambandet (2.3) i (2.15) fås slutligen.

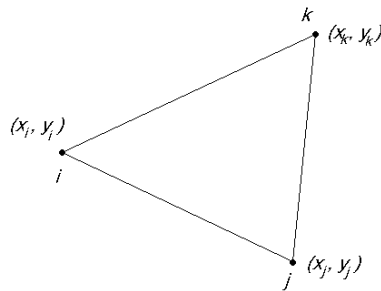
$$\int_A (\nabla v)^T \mathbf{D}\nabla Tt dA = -\oint_{L_h} v h t dL - \oint_{L_g} v q_n t dL + \int_A v Qt dA \quad (2.16)$$

$$T = g \quad \text{på } L_g \quad (2.17)$$

Denna form kallas den *svaga formuleringen* och som synes är nu ett randvillkor inbakat i differentialekvationen. En annan stor fördel med den svaga formen är det faktum att funktionen $T(x,y)$ nu bara behöver vara deriverbar en gång. I (2.10) förekommer en andraderivata vilket ju betyder att en linjär approximation av T ej hade varit möjlig.

För att ställa upp FE-formuleringen behöver temperaturfunktionen, T , och viktfunktionen, v , bestämmas.

Det kommer nu att redovisas hur FEM formuleras för enklast möjliga element i två dimensioner, triangulära element med en linjär approximation av temperaturen. Ett sådant element innehåller då tre noder, belägna i hörnen, med koordinaterna (x_i, y_i) , (x_j, y_j) och (x_k, y_k) . Se Figur 2.2. Temperaturen i en godtycklig punkt inuti elementet består av en interpolation av de tre nodtemperaturerna. Temperaturerna i noderna kallas *nodtemperaturer*.



Figur 2.2 Triangulärt element med noderna i , j och k .

En linjär approximation av temperaturen ger att den kan skrivas som

$$T = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y, \quad (2.18)$$

där α_1 , α_2 och α_3 är konstanter. På matrisform kan detta skrivas som

$$T = \bar{\mathbf{N}}\mathbf{a}, \quad (2.19)$$

där

$$\bar{\mathbf{N}} = [1 \quad x \quad y]; \quad \mathbf{a} = \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \end{bmatrix}. \quad (2.20)$$

Sätts de tre nodtemperaturerna in i en vektor \mathbf{a}^e kan dessa uttryckas på vektorform enligt den approximerade temperaturfunktionen (2.18) som

$$\mathbf{a}^e = \mathbf{C}\mathbf{a}, \quad (2.21)$$

där

$$\mathbf{a}^e = \begin{bmatrix} T_i \\ T_j \\ T_k \end{bmatrix}; \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & x_i & y_i \\ 1 & x_j & y_j \\ 1 & x_k & y_k \end{bmatrix}. \quad (2.22)$$

Indexet e indikerar att endast ett element studeras. Bryts nu ut \mathbf{a} ur (2.21) och sätts in i (2.19) kan temperaturapproximationen i elementet skrivas som

$$T = \mathbf{N}^e \mathbf{a}^e, \quad (2.23)$$

där

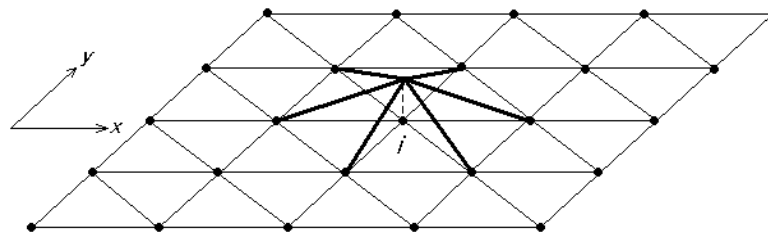
$$\mathbf{N}^e = \bar{\mathbf{N}}\mathbf{C}^{-1} = [N_i^e \quad N_j^e \quad N_k^e]. \quad (2.24)$$

Funktionerna $N_{i,j,k}^e$ i (2.24) kallas elementets *formfunktioner* och är kända funktioner av x och y . Dessa formfunktioner har ett karaktäristiskt beteende som gäller för alla slags element i FEM. Följande samband gäller för N_i^e och motsvarande för N_j^e och N_k^e .

$$N_i^e = \begin{cases} 1 & \text{i nod } i \\ 0 & \text{i övriga noder} \end{cases} \quad (2.25)$$

För formfunktionernas exakta uppbyggnad och även andra elements formfunktioner hänvisas till [5].

Innan den slutliga FE-formuleringen härleds ska inriktning ske mot den globala formuleringen. Hittills har endast den lokala formuleringen i ett element hanterats. En mesh av linjära triangulära element visas i Figur 2.3 där den globala noden i och dess globala formfunktion är utritad. Den globala formfunktionen är uppbyggd av lokala formfunktioner från intilliggande element och är alltså fortfarande lika med ett i noden.



Figur 2.3 Mesh av triangulära element med formfunktionen för nod i .

Om hela elementnätet består av n stycken noder kan temperaturapproximationen över hela kroppen skrivas som

$$T = \mathbf{N}\mathbf{a}, \quad (2.26)$$

där

$$\mathbf{N} = [N_1 \quad N_2 \quad \dots \quad N_n]; \quad \mathbf{a} = \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \vdots \\ T_n \end{bmatrix}. \quad (2.27)$$

I (2.16) ingår temperaturgradienten, ∇T , och kan skrivas som

$$\nabla T = \mathbf{B}\mathbf{a}, \quad (2.28)$$

där

$$\mathbf{B} = \nabla \mathbf{N}. \quad (2.29)$$

Nu återstår endast valet av viktfunktionen, v . Detta görs enligt Galerkins metod vilket innebär att v skrivs som

$$v = \mathbf{N}\mathbf{c}, \quad (2.30)$$

där \mathbf{c} är en vektor med godtyckliga konstanter. Eftersom v är en godtycklig skalär är $v = v^T$. Detta ger att

$$v = \mathbf{c}^T \mathbf{N}^T \quad (2.31)$$

och

$$(\nabla v)^T = \mathbf{c}^T \mathbf{B}^T. \quad (2.32)$$

Insättning av (2.28), (2.31) och (2.32) i (2.16) ger

$$\int_A \mathbf{c}^T \mathbf{B}^T \mathbf{D}\mathbf{B}\mathbf{a}t \, dA = -\oint_{L_h} \mathbf{c}^T \mathbf{N}^T h t \, dL - \oint_{L_g} \mathbf{c}^T \mathbf{N}^T q_n t \, dL + \int_A \mathbf{c}^T \mathbf{N}^T Q t \, dA. \quad (2.33)$$

Vektorerna \mathbf{a} och \mathbf{c}^T kan brytas ut ur integralerna eftersom de är oberoende av x och y . Då kan även \mathbf{c}^T strykas vilket ger

$$\left(\int_A \mathbf{B}^T \mathbf{D}\mathbf{B}t \, dA \right) \mathbf{a} = -\oint_{L_h} \mathbf{N}^T h t \, dL - \oint_{L_g} \mathbf{N}^T q_n t \, dL + \int_A \mathbf{N}^T Q t \, dA. \quad (2.34)$$

Definieras styvhetsmatrisen, randvektorn, lastvektorn och kraftvektorn enligt

$$\mathbf{K} = \int_A \mathbf{B}^T \mathbf{D}\mathbf{B}t \, dA \quad (2.35)$$

$$\mathbf{f}_b = -\oint_{L_h} \mathbf{N}^T h t \, dL - \oint_{L_g} \mathbf{N}^T q_n t \, dL \quad (2.36)$$

$$\mathbf{f}_l = \int_A \mathbf{N}^T Q t dA \quad (2.37)$$

$$\mathbf{f} = \mathbf{f}_b + \mathbf{f}_l \quad (2.38)$$

kan den slutliga FE-formuleringen skrivas som

$$\mathbf{K}\mathbf{a} = \mathbf{f} . \quad (2.39)$$

Här är styvhetsmatrisen, \mathbf{K} , känd och har man även tillgång till randvillkor kan \mathbf{a} lösas ur (2.39) och man får fram det approximerade temperaturfältet i den studerade kroppen.

2.2 Transient termisk analys

I Kapitel 2.1 redovisades hur FE-formuleringen gick till för statisk analys. D.v.s. temperaturfältet varierar inte med tiden. Men om så vore fallet måste (2.39) omformuleras något och skrivs då

$$\mathbf{C}\dot{\mathbf{a}} + \mathbf{K}\mathbf{a} = \mathbf{f} . \quad (2.40)$$

Här är \mathbf{C} den specifika värme-matrisen, \mathbf{K} är nu konduktivitetmatrisen och \mathbf{a} är tidsderivatan av nodtemperaturerna. Härledningen till (2.40) kan återfinnas i [6]. Lösningen av (2.40) utförs i diskreta tidpunkter. I lösningen appliceras den generaliserade trapetsregeln:

$$\mathbf{a}_{n+1} = \mathbf{a}_n + (1 - \theta)\Delta t \dot{\mathbf{a}}_n + \theta\Delta t \dot{\mathbf{a}}_{n+1} , \quad (2.41)$$

där

θ = integrationsparameter

$$\Delta t = t_{n+1} - t_n$$

\mathbf{a}_n = nodtemperatur vid tiden t_n

\mathbf{a}_{n+1} = nodtemperatur vid tiden t_{n+1}

Vid tiden t_{n+1} kan (2.41) skrivas som

$$\mathbf{C}\mathbf{a}_{n+1} + \mathbf{K}\mathbf{a}_{n+1} = \mathbf{f} . \quad (2.42)$$

Utbyggnad av \mathbf{a}_{n+1} ur (2.41) och insättning i (2.42) ger

$$\left(\frac{1}{\theta\Delta t} \mathbf{C} + \mathbf{K} \right) \mathbf{a}_{n+1} = \mathbf{f} + \mathbf{C} \left(\frac{1}{\theta\Delta t} \mathbf{a}_n + \frac{1-\theta}{\theta} \dot{\mathbf{a}}_n \right) . \quad (2.43)$$

Ur (2.43) kan \mathbf{a}_{n+1} lösas och därefter kan \mathbf{a}_{n+1} uppdateras efter omskrivning av (2.41),

$$\mathbf{a}_{n+1} = \frac{1}{\theta \Delta t} (\mathbf{a}_{n+1} - \mathbf{a}_n) - \frac{1-\theta}{\theta} \mathbf{a}_n. \quad (2.44)$$

När nodtemperaturerna löses sker det iterativt med hjälp av Newton-Raphson's metod. Detta eftersom \mathbf{K} i sig är beroende av nodtemperaturerna och (2.43) därmed är en olinjär procedur. Ekvationssystemet för Newton-Raphson's metod är följande:

$$\mathbf{K}_i \Delta \mathbf{a}_i = \mathbf{f} - \mathbf{f}_i^{\text{int}} \quad (2.45)$$

$$\mathbf{a}_{i+1} = \mathbf{a}_i + \Delta \mathbf{a}_i \quad (2.46)$$

där

i = Index som representerar aktuellt jämviktssteg

$\mathbf{f}_i^{\text{int}}$ = Den inre kraften beräknad utifrån elementens värmefflöde

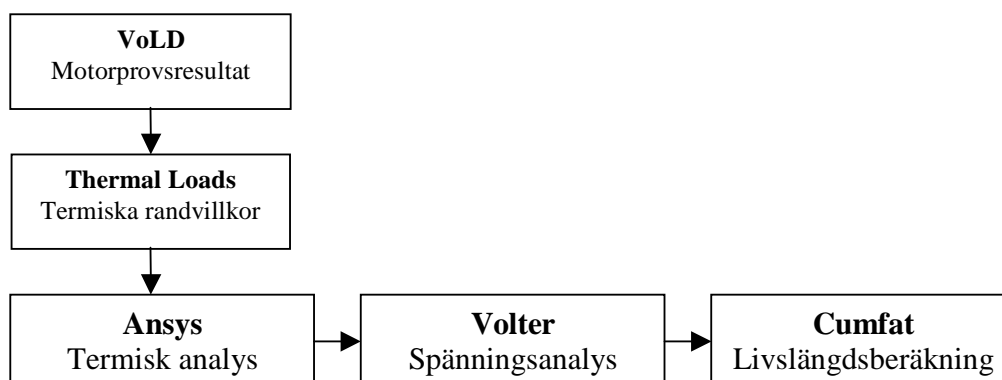
Högersidan av (2.45) benämnes residualen, \mathbf{R} , och om den är lika med noll fås jämvikt i systemet.

Algoritmen för iterationerna följer följande schema:

1. Bestäm \mathbf{a}_0 . Normalt sätts $\mathbf{a}_0 = \mathbf{a}_{n-1}$ där \mathbf{a}_{n-1} är den konvergerade lösningen från förra tidssteget.
2. Beräkna \mathbf{K}_i och $\mathbf{f}_i^{\text{int}}$ utifrån \mathbf{a}_i .
3. Beräkna $\Delta \mathbf{a}_i$ med hjälp av (2.45).
4. Beräkna \mathbf{a}_{i+1} med hjälp av (2.46).
5. Upprepa steg 2-4 tills konvergens är uppnådd. Med konvergens menas $\|\mathbf{R}\| \leq \epsilon \mathbf{R}_{\text{ref}}$, där ϵ är ett toleransvärde och \mathbf{R}_{ref} är ett referensvärde. Vanligt använda värden är till exempel $\epsilon = 0.001$ och $\mathbf{R}_{\text{ref}} = \|\mathbf{f}\|$.

3 LAS

Att ta fram livslängdsförbrukning för ett flugat uppdrag kräver en lång kedja av analyser och beräkningar. De faktorer som ger betydande spänningar i HT-turbinen är det termiska fältet och turbinens varvtal. För att kunna utföra en spänningsanalys behövs alltså först ett resultat från en termisk analys. För att kunna utföra en sådan behöver randvillkor bestämmas. Detta görs med hjälp av resultat från motorprov för ett visst antal driftfall. Dessa resultat finns i lastdatabasen VoLD (Volvo LastData). Framtagning och beräkning av randvillkor sker sedan i programmet Thermal Loads. Efter den termiska analysen i Ansys är nästa steg i kedjan spänningsanalysen som görs i programmet Volter. När väl spänningscyklerna är kända i varje komponentdel i motorn beräknas livslängdsförbrukningen för aktuellt flyguppdrag i programmet Cumfat. Hela analyskedjan går under namnet LAS, Life Analysis System. Det ska anmärkas att fler mindre steg i kedjan ingår men endast de som kommer att nämnas i detta arbete visas i Figur 3.1.



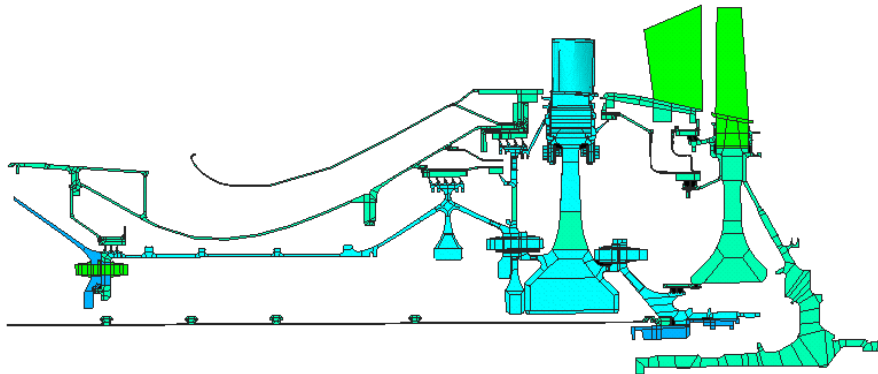
Figur 3.1 Flödesschema för beräkning av förbrukad livslängd

3.1 Termisk analys

Den termiska analysen av HT-turbinen utförs i Ansys som är ett kommersiellt finita element-program.

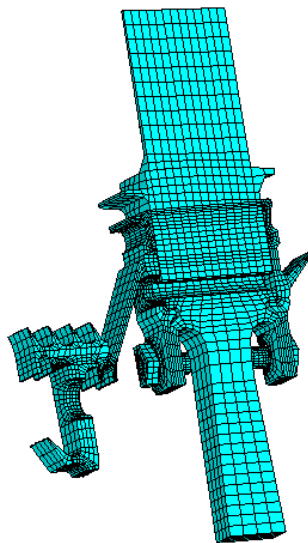
FE-modellen för den termiska analysen består till största del av en 2D-mesh. I vissa delar av modellen där det termiska fältet visar på stor variation och där modellen inte är axisymmetrisk utan innehåller bulthål mm har man dock använt sig av 3D-mesh. Detta för att den termiska variationen i tangentiell led här misstänks ha en sådan inverkan på den slutliga spänningen att den inte går att försumma. De komponenter som består av 3D-mesh är främre låsring, bakre låsring och övre delarna av yttre tätskiva och HT-skiva. Parallellt med detta arbete har ett annat pågått som har gått ut på att undersöka om denna 3D-effekt verkligen är så betydande. En ny ren 2D-modell har skapats och antalet noder har halverats från 40 000 till 20 000 och därmed även avsevärt förkortat den totala

analystiden. Om noggrannheten med denna nya modell duger till den slutliga livslängdsanalysen är dock ännu inte utrett.



Figur 3.2 FE-modell av HT-turbinen

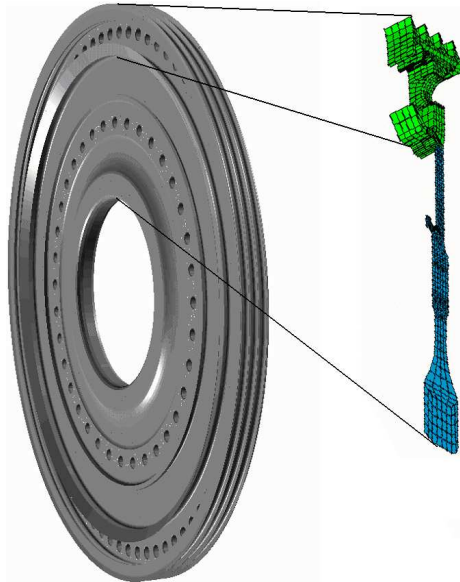
I Figur 3.2 visas hela FE-modellen av HT-turbinen. De gröna delarna till höger i figuren tillhör LT-turbinen och är med i modellen för att få till ett verklighetstroget värmefflöde.



Figur 3.3 3D-mesh i FE-modellen

Figur 3.3 visar de delar som är modellerade i 3D och även deras mesh visas här. För att urskilja de olika komponenterna kan Figur 1.2 studeras. Överst i Figur 3.3 syns en av de 64 skovlarna som finns i HT-turbinen. Skovlarna är monterade på HT-skivan och är alltså de komponenter som tar upp kraften från gasen. Dess geometri är grovt förenklad eftersom inga beräkningar sker på skovelns utan dess enda syfte i modellen är att leda ner värme till övriga delar. I verkligheten är de formade på ett sätt så att de kan fånga kraften från gasen. En intressant liten detalj är att det inuti skovlarna finns små luftkanaler för

kylning. Detta är nödvändigt eftersom skovlarna utsätts direkt för den heta gasen vilket medför stora påfrestningar.



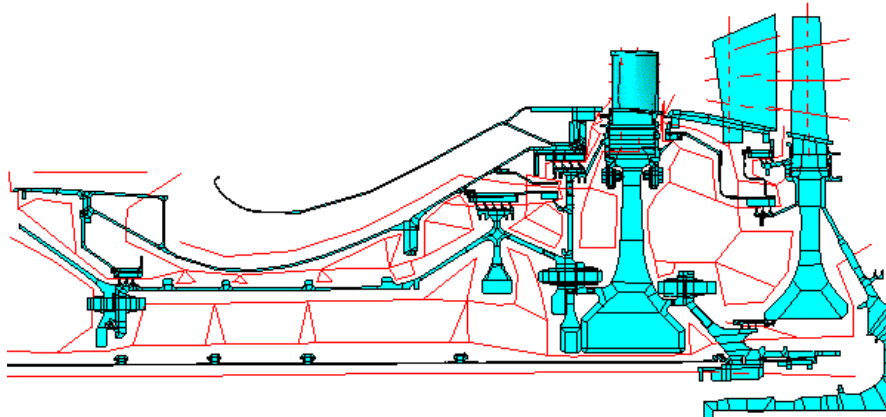
Figur 3.4 Tåtskivans utseende i FE-modellen

FE-modellen och ritningarna som har representerats hittills kan vara svåra att översätta till verkligheten, därför ges som exempel i Figur 3.4 hur tåtskivan är modellerad. De delar av modellen som består av 2D-mesh är axisymmetriska och motsvarar ett snitt var som helst i komponenten. Eventuella bulthål mm som förekommer i 2D-mesh är omöjliga att efterlikna. En kompensation görs istället genom att ge metallen en lägre densitet och värmekonduktivitet i områden med bulthål. Proceduren kallas Coomers metod och gör att hålen kan efterliknas på ett godtagbart sätt.

De delar som består av 3D-mesh motsvarar 1/128 av hela varvet runt symmetriaxeln i motorn. HT-turbinen har som sagt var 64 skovlar och därför är det lämpligt att modellera 128 symmetriska delar. Detta eftersom varje 1/64 är symmetrisk i sig.

För att efterlikna den heta gasen som strömmar genom högtrycksturbinen använder man sig av fludelement. Se Figur 3.5. I dessa element beräknas värme- och massflöde, varav värmeflödet i Ansys och massflödet i Thermal Loads. Hur fludelementen är utplacerade i modellen är byggt på resultat från CFD-analyser. Fluidnätet har ett konstant mönster och är alltså oberoende av driftfall.

På alla metallytor i modellen är ytelement applicerade. Dessa ytelement är kopplade till lämplig nod tillhörande något fludelement. På detta sätt simuleras konvektiv värmeövergång mellan metall och fluid.



Figur 3.5 Fluidelementnätet i FE-modellen

På metalldelar där ytan inte är fri utan sitter tätt intill en annan metalldel är istället så kallade link-element applicerade. Dessa element simulerar då värmeledningen mellan de olika komponenterna.

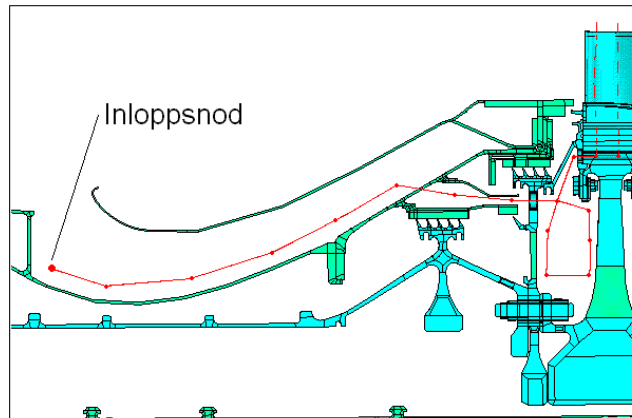
Som nämnts bestäms randvillkoren i programmet Thermal Loads. Programmet kräver en del indatafiler, en uppsättning filer som endast är beroende av den analyserade modellen och en uppsättning som är beroende av det flygna uppdraget. De sistnämnda filerna tas fram av programmet VoLD, eller den mer användarvänliga versionen JVoLD som är implementerad i Java.

En av filerna som skapas med VoLD är tran_'uppdagsnamn'.txt. Den innehåller alla de tidpunkter som ska analyseras i den termiska analysen. Någon valfrihet i framtagandet av tidpunkter fanns inte när examensarbetet påbörjades. Därför skapades ett skript i Matlab som skapar denna fil fast med total valfrihet i antal och placering av tidpunkter.

Andra filer som Thermal Loads får från VoLD är de så kallade k-filerna (konvektionsfiler). En k-fil för varje driftfall. Dessa innehåller steady state-värden för temperatur och massflöde i specifika noder. Med hjälp av dessa filer beräknar Thermal Loads temperatur i gasens inlopp, massflöde i gasen samt värmeövergångstal mellan gas och metall.

Beräkning av inloppstemperatur

Alla fluidelementnät har minst en inloppsnod. Se Figur 3.6. I dessa inloppsnoder beräknar Thermal Loads temperaturen. I resterande delar av fluidelementnätet sköter Ansys beräkningarna. Den steady state-nivå som temperaturen i alla inloppsnoder går mot i aktuellt driftfall är given i k-filerna.



Figur 3.6 Exempel på inloppsnod till fluidelementslinga

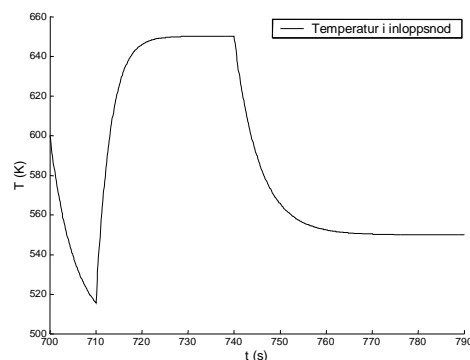
Vad som ytterligare behöver beräknas är hur temperaturen varierar mellan den tidpunkt då ett nytt driftfall inträffar och den tidpunkt då temperaturen har nått sin steady state-nivå. Detta görs med s.k. responsfunktioner, (2.1). Varje inloppsnod tilldelas en egen responsfunktion som beskriver hur temperaturen ska ta sig till sin nya nivå.

$$f_{respons} = 1 - (2 - a) \cdot d^{-bt} + (1 - a) \cdot d^{-ct} \quad \begin{cases} = 0 & \text{om } t = 0 \\ \rightarrow 1 & \text{om } t \rightarrow \infty \end{cases} \quad (2.1)$$

Dessa responsfunktioner är oberoende av driftfall men konstanterna a , b , c och d får olika värde beroende på om det är pådrag eller avdrag som sker. Varje inloppsnod har alltså tilldelats två uppsättningar konstanter, en för pådrag och en för avdrag [2].

Responsfunktionerna är framtagna med hjälp resultat från motorprov. Den transienta temperaturförändringen kan då beräknas för alla tidpunkter enligt (2.2), där T_i är temperaturen i varje beräknad tidpunkt, T_{start} är temperaturen då driftfallsförändringen inträffar och ΔT är temperaturförändringen i aktuellt driftfall.

$$T_i = T_{start} + \Delta T \cdot f_{respons} \quad (2.2)$$

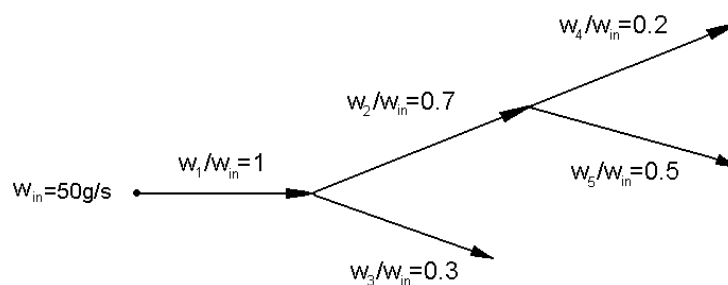


Figur 3.7 Beräknad inloppstemperatur av Thermal Loads

Vid en ny transient tas ingen hänsyn till temperaturens nuvarande tidsderivata. Responserna i inloppsnoderna är så snabba att då en ny transient temperaturförändring inträffar antas den ske momentant. Detta kan ses i Figur 3.7 vid tidpunkten 710 sekunder.

Beräkning av massflöde

Inloppsnoderna tilldelas sitt massflöde via k-filerna. För att sedan beräkna hur massflödet förändras längre in i fluidnätet har varje fludelement tilldelats ett specifikt massflödesvärde. För att beräkna massflödet i varje fludelement multipliceras dessa specifika värden med massflödet i inloppsnoden tillhörandes aktuellt fluidnät. En illustration av detta visas i Figur 3.8.



Figur 3.8 Grafisk beskrivning av beräkning av massflöde

I varje fluidnod ska summan av massflödet igenom den bli noll. Massflödet på inloppsnoden gäller för stationärt tillstånd. För att få ett transient beteende används här inga responsfunktioner utan massflödet förändras linjärt med varvtalet.

Beräkning av värmeövergångstal

Ytor där värmeövergångstal ska beräknas har delats in i ett flertal olika kategorier. Exempel på detta är olika slags ytor på roterande skivor, ytor runt små spalter eller ytor runt hål. Exakt hur formlerna för att beräkna värmeövergångstalen på de olika ytorna kommer inte att beskrivas här.

Massflödet används för beräkningen av värmeövergångstalet. Eller rättare sagt flödes hastigheten [3].

3.2 Volter

Till en början utfördes spänningsanalysen i Ansys vilket är extremt tidskrävande. På en modern beräknings-PC tar varje analyserad tidpunkt i genomsnitt 15 minuter att beräkna och den totala analystiden hamnar då på flera dygn för ett typiskt flyguppdrag. För att kunna uppnå en rimlig tidsåtgång för livslängdsanalysen med dagens processorprestanda och metoder är alltså spänningsanalyser med Ansys inte hållbara. Visionen med LTS är

ju att den totala analys tiden för ett flugat uppdrag inte ska vara längre än flygtiden i sig. Därför har programmet Volter utvecklats.

Volter är inget FE-program utan spänningen simuleras på ett annat sätt. Av erfarenhet vet man på VAC vilka områden i de olika motorkomponenterna som är mest livslängdsbegränsade. Därför behöver bara spänningen beräknas i ett visst antal noder i modellen, närmare bestämt 21 st. För att beräkna de olika spänningskomponenterna i varje nod har en relativt enkel formel tagits fram för att kunna representera de viktiga spänningsbidragen. Alla spänningar i tangentiell led antas i Volter vara lika med noll. Då återstår de tre komponenterna σ_{xx} (radiell led), σ_{yy} (axiell led) och σ_{xy} (skjuvspänningen mellan radiell och axiell led). Antagandet är att varje spänningskomponent i aktuell nod kan beräknas på följande sätt.

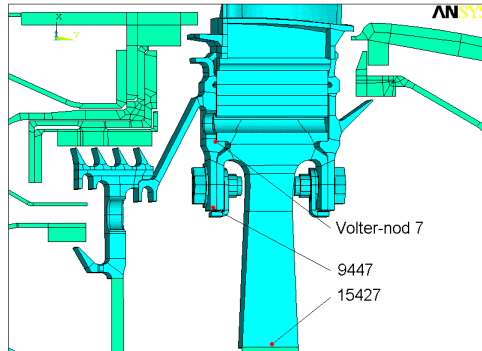
$$\sigma_{xx} = a_0 + a_1 \frac{dT}{dx} + a_2 \frac{dT}{dy} + a_3 \frac{dT}{dz} + a_4 \frac{dT}{dg_1} + a_5 \frac{dT}{dg_2} + a_6 \frac{dT}{dg_3} + a_7 \omega^2. \quad (2.3)$$

Konstanten a_0 i (2.3) [4] är en term som representerar förspänningarna i motorn. D.v.s. även om motorn står still och temperaturen är konstant i hela motorn finns det ändå en kvarvarande spänning från monteringen av motorn.

Alla varvtalsberoende spänningar antas bero av varvtalet i kvadrat. Den sista termen i (2.3) motsvarar därför denna spänning.

För att representera det termiska spänningsbidraget fullt ut hade man behövt ta med temperaturen i alla noder i motorn. Detta har förenklats genom att man tagit fram en uppsättning av nodpar som var för sig representerar en termisk gradient. Vid urvalet av dessa noder väljer man först manuellt ut ett antal noder runt omkring den aktuella spänningsnoden. Inget krav ställs på vilka noder som väljs utan de kan befinna sig var som helst i HT-turbinen. När detta är gjort bestämmer man sig för hur många nodpar man vill ha i den slutliga spänningsmodellen. I dagens version av Volter används tre lokala och tre globala nodpar. De lokala nodparen befinner sig väldigt nära den aktuella spänningsnoden och de globala kan befinna sig i stort sett var som helst i FE-modellen. Urvalet av dessa sex nodpar görs av Volter själv genom en identifiering mot en Ansys-analys. Volter loopar då igenom alla kombinationer av manuellt utvalda noder och genom en kurvanpassning med minsta kvadrat-metoden väljs de sex nodpar ut som bäst representerar den termiska spänningen. I samma identifiering kurvanpassas även konstanterna a_0 och a_7 i (2.3). Termerna dT/dx , dT/dy och dT/dz är lokala termiska gradienter tillhörande aktuell spänningsnod. Likaså är dT/dg_1 , dT/dg_2 och dT/dg_3 globala gradienter. Valet av dessa nodpar görs alltså en gång för alla. Ekvation (2.3) gäller för en spänningsnod i ett 3D-område. Om noden befinner sig i ett 2D-område används endast två lokala och två globala nodpar.

Som ett exempel redovisas här det termiska spänningsbidraget till Volter-nod 7 i den främre låsringen. Indata till Volter från den termiska analysen är alltså temperaturer från de utvalda noder som ska ge det termiska spänningsbidraget. I Figur 3.9 visas ett av de tre globala nodparen, med nodnummer, för Volter-nod 7.



Figur 3.9 Globalt nodpar till Volter-nod 7

Egentligen är det elementspänningar och elementtemperaturer som används i spänningsanalysen men i rapporter om Volter används termen ”nodpar” därför kommer det att användas här också. Det som kallas nod 9447 och 15427 i Figur 3.9 utgör egentligen två element i spänningsmodellen. Spänningsmodellen har inte heller samma mesh som temperaturmodellen så det sker en mappning av temperaturen mellan den termiska analysen och spänningsanalysen.

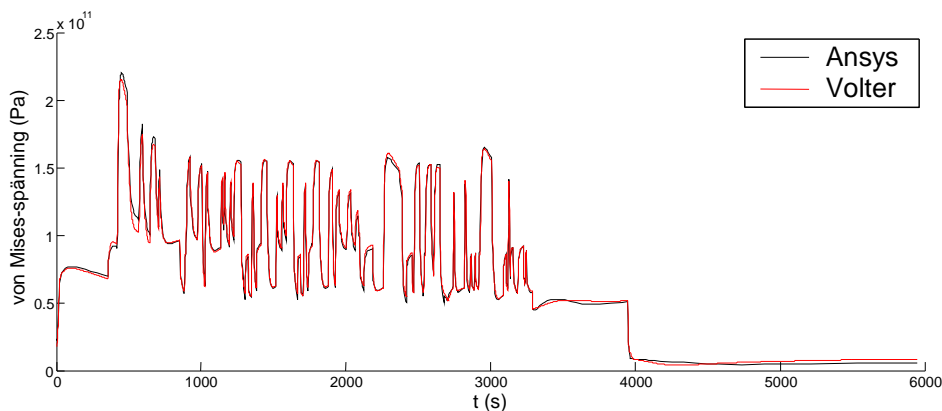
$$\sigma_{von\ Mises} = \sqrt{\sigma_{xx}^2 + \sigma_{yy}^2 + \sigma_{zz}^2 - \sigma_{xx}\sigma_{yy} - \sigma_{xx}\sigma_{zz} - \sigma_{yy}\sigma_{zz} + 3\sigma_{xy}^2 + 3\sigma_{xz}^2 + 3\sigma_{yz}^2} \quad (2.4)$$

I Figur 3.10 visas en jämförelse mellan beräknad von Mises-spänning, se (2.4), med Ansys och Volter. Nivån på spänningen är inte den sanna i detta exempel. Två saker behöver göras för att få spänningen till rätt nivå.

För det första ska spänningarna multipliceras med en skalningsmatris. Man har innan gjort FE-analyser med en större och finare modell helt i 3D och får med en sådan analys mer sanningsenliga resultat. Sedan har man tagit fram en matris som skalar spänningarna beräknade med hybridmodellen till de beräknade med den fina 3D-modellen. På detta sätt kan man göra analyser med en mindre modell och sedan korrigera resultaten i efterhand för att uppnå ett mer noggrant resultat.

För det andra tas ingen hänsyn till plasticitet i spänningsberäkningarna.

Spänningsnivåerna blir alltså för höga. En kompensation för detta görs i efterhand.



Figur 3.10 Jämförelse av beräknad Von Mises-spänning med Ansys och Volter

Examensarbete kommer att inrikta sig mot Volter och dess globala nodpar. Detta för att mycket tyder på att de lokala nodparen gör att spänningssimuleringen i Volter inte blir så stabil som man önskar.

Även ett examensarbete som går ut på att utvärdera just Volter pågår parallellt med detta. Bland annat undersöks de lokala gradienternas påverkan.

När spänningarna är beräknade i Volter går resultatet vidare till programmet Cumfat, vilket är det program som beräknar den förbrukade livslängden för ett flugets uppdrag.

4 Val av tidpunkters betydelse för beräkning av livslängdsförbrukning

De tidpunkter som ska ingå i den termiska analysen väljs i dag i LTS ut på ett förenklat sätt. När en driftfallsändring sker uppstår det stora transienta temperaturförändringar i HT-turbinen. Detta innebär att analysen måste utföras med täta tidssteg för att felet i beräkningarna ska bli så litet som möjligt. Temperaturfältet stabiliseras sedan mer och mer så länge varvtalet ligger kvar på samma nivå och tidsstegen kan då göras större. För närvarande är det enligt denna princip tidpunkter sätts ut i LTS. Hur tätt man ska sätta tidpunkterna är valt till vad man tror är rimligt utan någon större undersökning. Alla driftsfall analyseras med samma tidpunktsindelning. Tidpunktsvalet görs genom att man i varje nytt driftfall först tar fem steg med 0.9 sekunders intervall, sedan fem steg med 2 sekunders intervall och sedan fortsätter man med samma princip och dubblar tidssteget var femte tidpunkt. Nämns LTS i samband med en analys menas härmed en analys utförd med ett tidpunktsval enligt Tabell 4.1.

Tidpunkter i LTS	
Steglängd (s)	Fram till tiden (s)
0.5	0.5
0.9	5
2	15
4	35
8	75
16	155
32	315
64	635
128	1275
256	2555
500	-

Tabell 4.1 Tidpunktsvalet i LTS

Det ska nu utredas vilken påverkan antalet analyserade tidpunkter har på den beräknade livslängdsförbrukningen. Något som gör det mer komplicerat är det faktum att en avvikelser i beräknad livslängd kan bero på tre olika saker i den termiska analysen.

- För långa tidssteg vilket ger fel temperaturresultat.
- Ingen befintlig termisk lösning i den tidpunkt då det termiska fältet har störst spänningsbidrag.
- Ingen befintlig termisk lösning i den totala spänningstoppen.

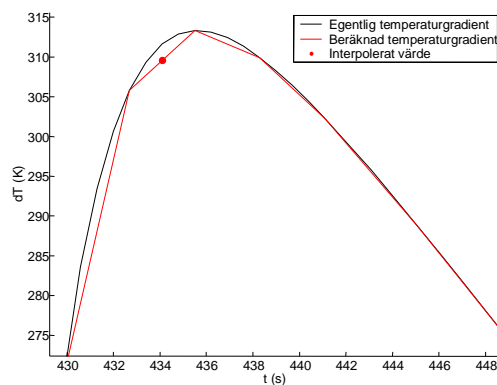
Den första punkten kommer inte få mycket utrymme i detta examensarbete. Endast en enkel undersökning kommer att göras.

Punkt två är svår att undvika utan att sätta ut fler tidpunkter än nödvändigt med avseende på punkt ett. Enda sättet att undvika för många ”onödiga” tidpunkter är om man i förväg

kan ta reda på när i tiden det termiska fältet har störst spänningsbidrag. Kapitel 4 ägnas åt detta problem.

I områden där den termiska spänningen är den dominerande spänningen sammanfaller ofta punkt två och tre, vilket gäller för de flesta områden i HT-turbinen. Annars är egentligen punkt tre den viktigaste av de två eftersom det är extremvärden i den totala spänningen som ger storleken på spänningscyklerna och därmed även livslängdsförbrukningen.

Det som sker om det inte finns en termisk lösning i den tidpunkt där spänningen beräknas är en interpolation mellan de två närmsta termiska lösningarna. Detta kan innebära att värdet på temperaturgradienten som går till spänningsberäkningen är felaktigt. Ett exempel kan ses i Figur 4.1 där det interpolerade värdet är lägre än det egentliga.



Figur 4.1 Exempel på interpolation av två termiska resultat

För att få en första uppfattning om vilken betydelse valet av tidpunkter har utfördes först tre stycken analyser på flyguppdraget m06. En med extremt många tidpunkter, en med samma tidpunkter som används idag i LTS och en med extremt gles med tidpunkter. Beräkning av livslängd gjordes och variationen i resultatet blev överraskande stort. Att det kunde vara stora variationer mellan den täta och den glesa analysen kanske var väntat men inte att det skulle skilja så stort mellan den täta och den med de nuvarande tidpunkterna i LTS. Detta visade sig till stor del bero på fel i framtagningen av randvillkoren till analyserna. Detta beskrivs mer i Kapitel 4.1.

Efter att detta åtgärdats utfördes samma analyser en gång till och mer rimliga livslängdsresultat uppnåddes. Dock visade det sig att resultaten inte riktigt gick att lita på, eftersom ett fel i modellen upptäcktes i ett annat examensarbete, och proceduren fick göras om ytterligare en gång. Efter alla dessa olika analyser uppnåddes en förståelse för vad som var många tidpunkter nog och vad som var alldeles för få. Med en *fin* analys menas härmed en analys med ett tidpunktsval enligt Tabell 4.2. Livslängdsberäkningar med en sådan analys får anses vara facit eftersom en analys utförd med ytterligare antal tidpunkter inte ger någon betydande skillnad i beräknad livslängdsförbrukning.

Fin analys	
Steglängd (s)	Fram till (s)
0.4	8
0.8	24
1	44
2	64
5	114
10	214
20	414
50	914
100	1914
200	3914

Tabell 4.2 Tidpunktsvalet i LTS

Resultat från hittills utförda analyser presenteras inte, förutom de i Kapitel 4.1, utan istället hänvisas det till Kapitel 4.3.1 där liknande analyser har utförts fast med mer utförligt planerade tidpunktsval.

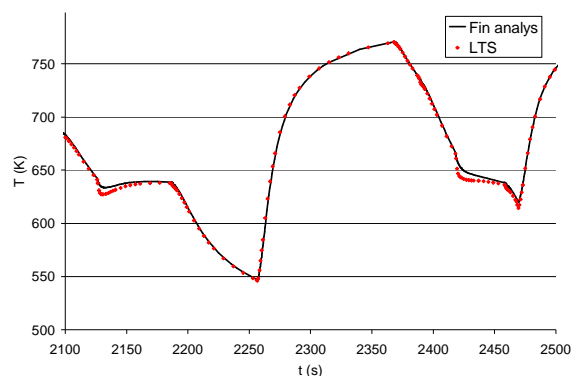
4.1 Felaktiga randvillkor

Undersökningen av vilken påverkan antalet tidpunkter har på beräknad livslängdsförbrukning var från början svårtolkad. Oförklarliga resultat uppstod både i beräknad livslängd och i nodtemperatur när analyser på samma uppdrag kördes med olika tidpunktsindelningar. Förväntat resultat var att livslängdsförbrukningen för en komponent i regel skulle avvika mer och mer desto längre tidssteg man tog. Så var också fallet men avvikelserna blev allt för stora. Tre analyser döpta till gles, LTS och fin har utförts. Dessa innehöll totalt 628, 1375 respektive 4442 stycken analyserade tidpunkter. I Tabell 4.3 presenteras hur de beräknade livslängdsförbrukningarna skiljer sig från de beräknade med den fina termiska analysen.

Volter-nod	Skillnad i livslängdsförbrukning (%)	
	Fin - LTS	Fin - Gles
1	0.2	-0.6
2	0.4	0.7
3	-0.2	3
4	-5.2	-9.9
5	0.8	0.5
6	0.8	1.9
7	2	5.6
8	-3.6	-2.6
9	-5.8	-7.3
10	0.5	-0.3
11	-0.1	-0.3
12	-1.3	-2
13	-1.7	-1.7
14	16.9	21.9
15	-1.3	-1.5
16	-0.1	-0.5
17	0.4	-2.1
18	2.9	4
19	-3.5	-5.5
20	-1.3	-1.3
21	-0.2	-1

Tabell 4.3 Procentuell skillnad i beräknad livslängdsförbrukning för två analyser jämfört med den fina analysen.

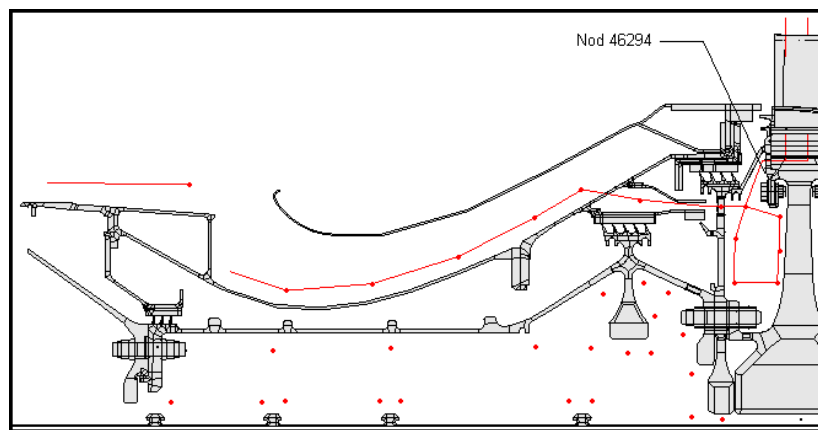
I resultatet kunde man även se att i analyser utförda med färre tidpunkter uppstod ”dalar” i temperaturen som inte gick att förklara. Figur 4.2 visar hur en analys med de tidpunkter som används i LTS skiljer sig från en analys med många fler analyserade tidpunkter. Skulle detta resultat visa sig vara helt korrekt skulle det innebära negativa slutsatser angående tidpunktsvalet. Uppenbarligen hade det i så fall i dagsläget varit för få tidpunkter i analysen, med avseende på temperaturresultatet, vilket ju inte är det hållet man önskar gå åt i LTS.



Figur 4.2 Oförklarliga "dippar" i temperaturresultatet

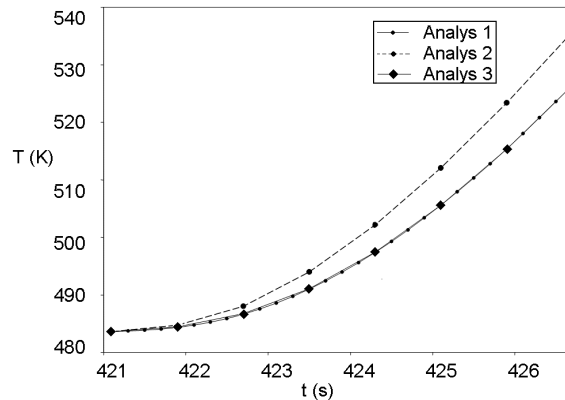
Dessa oväntade resultat i livslängdsförbrukning och temperaturresultat var svåra att tro på så en undersökning av analysmetoden fick påbörjas. Det som ligger närmst i analyskedjan att kontrollera är randvillkoren till analysen, dvs. s-filerna som skapas av

programmet Thermal Loads. För att göra detta skapades två uppsättningar s-filer till en analys av ett flyguppdrag. De båda analyserna innehöll exakt samma tidpunkter fram till en specifik transient. Där sattes steglängden till 0.2 sekunder i den ena analysen, kallad analys 1, och 0.8 sekunder i analys 2. Samma tidpunkter som används i den andra analysen finns alltså också i den första och randvillkoren för dessa ska då vara identiska. Efter att ha kollat detta med ett filjämförningsprogram upptäcktes att så var inte fallet. Värmeövergångstalet och massflödet skiljde sig för vissa fluidnoder och fluidelement. Det kunde även urskiljas att det blir fel på fler och fler ställen i fluiden desto längre fram i tiden man undersökte. En kontroll av var i modellen dessa noder och element sitter och hur felet sprider sig in i modellen sammanfattades för att sedan låta någon mer insatt identifiera felet. Som synes i Figur 4.3 nedan är det en fluidslinga som har stor påverkan på flera intressanta områden i livslängdsanalysen. Massflödet i fluidelementen fick alltså här fel värden och därmed även värmeövergångstalen runt omkring fluidslingan.



Figur 4.3 Fluidelement med felaktiga massflöden

För att uppskatta hur dessa fel i randvillkoren påverkade temperaturfältet gjordes en enkel kontroll. Kontrollen utfördes genom att temperaturresultatet för en nod plottades för de båda analyserna. En tredje analys utfördes sedan vid samma tidpunkter som analys 2 fast med randvillkoren tagna från analys 1. Var fjärde tidpunkt togs alltså bort från analys 1 och analys 3 fick då exakt de randvillkor som analys 2 borde ha. Den aktuella noden visas i Figur 4.3 och sitter på ytan av främre låsring.



Figur 4.4 Temperaturreultat för analys ett, två och tre

Resultaten från de tre analyserna kan ses i Figur 4.4. Analys 2 borde alltså egentligen ha gett samma resultat som analys 3. Som synes verkar det som att felet har en väldigt stor påverkan på temperaturfältet i modellen runtomkring den aktuella fluidslingan. Enbart efter fem sekunder in i transienten skiljer sig analys 2 med nästan 10K i denna nod.

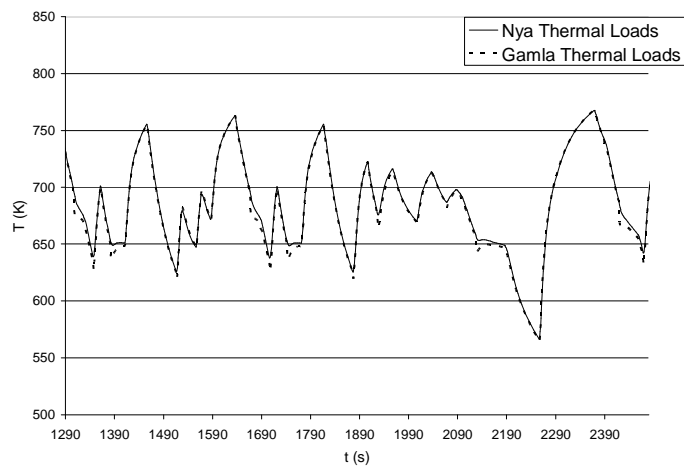
Ett fel i k-filerna visade sig vara orsaken till de felaktiga randvärdena. Ett felaktigt variabelnamn hade smugit sig in vilket gjorde att beräkningen av massflödet blev fel. Numera sätter en uppdaterad version av Thermal Loads rätt randvillkor.

För att göra en kontroll av vilken påverkan detta har haft på livslängdsberäkningarna utfördes två analyser på uppdraget m06, en med den gamla versionen och en med den nya versionen av Thermal Loads. Dagens tidpunktsindelning i LTS användes. Resultatet visas i Tabell 4.4 och uppenbarligen har det påverkat livslängden avsevärt på ett antal komponentdelar. Resultatet presenteras relativt mot den gamla versionen av Thermal Loads. Detta innebär att för Volter-nod 7, som påvisar störst skillnad, har livslängdsförbrukningen för detta uppdrag halverats när beräkningarna utförs med nya versionen av Thermal Loads. Måttet på livslängdsförbrukningen är ju hur många fler av det analyserade uppdraget komponentdelen klarar av.

Volternod	Skillnad i beräknad livslängd (%)
1	-0.2
2	1.7
3	10.4
4	-4.4
5	0.7
6	0.0
7	49.2
8	-0.1
9	2.4
10	0.6
11	1.5
12	0.8
13	2.7
14	29.7
15	-2.5
16	-0.3
17	-0.5
18	10.5
19	-0.5
20	-2.3
21	-0.7

Tabell 4.4 Skillnad i livslängdsförbrukning mellan nya och gamla Thermal Loads.

En plot av en nodtemperatur med dessa analyser verifierar också att de märkliga dalarna också berodde på felet i Thermal Loads. Detta kan tydligt ses i Figur 4.5.



Figur 4.5 Nodtemperatur beräknad med nya och gamla Thermal Loads

4.2 Utvärdering av dagens tidpunktsval

För en kontroll av hur väl noggrannheten i livslängdsberäkningen är med dagens tidpunktsindelning i LTS har livslängdsförbrukningen för ett par uppdrag kontrollerats. Fem stycken relativt livslängdskrävande uppdrag har valts ut. Valet av uppdrag byggde på att försöka få med uppdrag med varierande antal driftfall, och därmed varierande längd på driftfallen, i sig. Dom utvalda uppdragen är m06, m20, m42, m44 och m60. För varje uppdrag har två analyser gjorts. En med dagens tidpunkter i LTS och en med fin indelning av tidpunkter.

I Tabell 4.5 visas livslängdsförbrukningens avvikelse från de beräknade med de fina analyserna. Ett medelvärde presenteras också här som är beräknat på absolutvärdet av avvikelsen från varje uppdrag. Detta är det bästa sättet att presentera ett sammanfattande värde för resultaten eftersom variationen i livslängdsförbrukningen slår åt bägge håll för de olika uppdragen.

Volter-nod	Avvikelse i livslängd för LTS-tidpunkter (%)					
	m06	m20	m42	m44	m60	Medel
1	0.40	0.39	0.66	0.91	0.87	0.65
2	-0.38	-0.36	0.86	-0.08	0.16	0.36
3	-0.38	0.24	0.56	0.84	0.95	0.59
4	0.45	0.50	0.48	0.27	0.29	0.40
5	-0.04	-0.06	1.29	0.96	1.12	0.69
6	1.42	0.03	2.08	1.08	0.97	1.12
7	0.17	0.05	0.00	0.73	-0.14	0.22
8	0.07	0.07	2.87	2.32	2.29	1.53
9	-0.02	-0.01	2.48	2.18	2.88	1.51
10	-0.31	-0.10	0.06	0.11	0.07	0.13
11	0.06	0.03	0.14	0.06	0.09	0.08
12	0.03	0.16	2.31	1.25	1.68	1.09
13	-0.14	0.08	-0.33	-0.24	-0.35	0.23
14	0.23	0.20	3.87	3.72	4.34	2.47
15	0.05	0.12	-0.05	0.06	-0.07	0.07
16	0.04	-0.10	0.71	1.47	0.24	0.51
17	0.44	-0.30	-0.21	-3.20	0.02	0.83
18	-0.20	-0.17	-0.60	0.66	1.06	0.54
19	-1.36	-0.31	1.74	-0.39	-2.64	1.29
20	0.07	0.07	1.73	1.63	1.51	1.00
21	-0.37	0.46	1.10	1.19	1.02	0.83

Tabell 4.5 Avvikelsen i beräknad livslängdsförbrukning jämfört med fin analys

Som synes har vissa komponentdelar något större avvikelser för vissa uppdrag. Anmärkningsvärt är Volter-nod 19 som befinner sig i bakre låsring och är en komponentdel med relativt kort livslängd. Annars är avvikelsen godtagbar.

4.3 Undersökning av den termiska analysens känslighet

Det ska undersökas hur känslig den beräknade livslängdsförbrukningen är då antalet och placering av tidpunkter varieras. Först görs en övergripande känslighetsanalys där tre analyser har utförts med olika antal tidpunkter. Återigen jämförs dessa termiska analyser med en termisk analys som har utförts med tillräckligt många tidpunkter, ett slags facit. Vid en sådan undersökning har man ingen kontroll över varför resultatet för den beräknade livslängdsförbrukningen varieras. Som nämnts tidigare i detta kapitel kan det bero på ett antal faktorer. Därför görs ytterligare två undersökningar, en där felet i beräknad temperatur undersöks för ett antal noder och en där det kontrolleras hur känslig livslängdsberäkningen är när extrempunkter i temperaturgradienten inte fångas.

4.3.1 Övergripande känslighetsanalys

För dessa analyser kommer principen att ta steg med täta tidsintervall vid transientstart att bibehållas. En tätare analys än den idag använda tidpunktsindelningen kommer inte att testas utan den i LTS anses vara tät nog. Däremot kommer större tidssteg att testas. Tre analyser på uppdraget m06 gjordes (totalt fem med LTS-tiderna och fin analys). Metoden för att sätta ut tidpunkterna ser ungefär ut som den i LTS fast med längre steg. I de tre analyserna är steglängden ökad med ungefär 25, 50 och 100 procent jämfört med LTS-analysen. Tidpunktsvalet visas i Tabell 4.6.

-- Analys 1 --		-- Analys 2 --		-- Analys 3 --	
Steglängd(s)	Fram till (s)	Steglängd(s)	Fram till (s)	Steglängd(s)	Fram till (s)
1.25	5	1.5	4.5	2	4
2.5	15	3	13.5	4	12
5	35	6	31.5	8	28
10	75	12	67.5	16	60
20	155	24	139.5	32	124
40	315	48	283.5	64	252
80	635	96	571.5	128	508
160	1275	192	1147.5	256	1020
320	2555	384	2299.5	512	2044
625	-	750	-	1000	-

Tabell 4.6 Tidpunktsval i analys 1, 2 och 3

För detta uppdrag innehöll analysen med LTS-tidpunkter totalt 1419 stycken tidpunkter, analys 1 innehöll 1041 stycken, analys 2 innehöll 849 tidpunkter och analys 3 innehöll 607 tidpunkter.

Livslängdsförbrukningen för de olika analyserna beräknades och avvikelserna från den fina analysen presenteras i Tabell 4.7.

Volter-nod	Avvikelse i livslängd (%)			
	LTS	Analys 1	Analys 2	Analys 3
1	0.40	0.91	0.83	0.59
2	-0.38	-0.29	-0.78	-0.91
3	-0.38	0.29	0.23	2.56
4	0.45	-0.31	-0.21	-0.37
5	-0.04	0.81	0.68	1.26
6	1.42	1.74	1.94	2.18
7	0.17	1.15	1.25	5.03
8	0.07	-0.66	-0.56	0.47
9	-0.02	-0.02	0.07	-0.08
10	-0.31	-0.20	-0.50	0.08
11	0.06	0.17	0.26	0.39
12	0.03	0.50	0.95	3.80
13	-0.14	-0.98	-0.78	-0.71
14	0.23	0.04	0.13	-0.22
15	0.05	-0.41	0.05	0.28
16	0.04	0.04	-0.02	-0.02
17	0.44	-0.15	-1.11	-2.17
18	-0.20	0.36	-0.51	-0.58
19	-1.36	-2.40	-3.07	-2.03
20	0.07	-0.04	-0.60	0.85
21	-0.37	-0.87	-0.93	-1.99

Tabell 4.7 Avvikelsen i beräknad livslängdsförbrukning jämfört med fin analys

Tas medelvärdet av livslängdsavvikelserna för komponentdelarna i varje analys kan ett samband mellan antal analyserade tidpunkter och beräknad livslängd anas och kan ses i Tabell 4.8. Avvikelsen ökar när antalet tidpunkter minskar vilket var väntat.

	LTS	Test 1	Test 2	Test 3
Medelavvikelse (%)	0.31	0.59	0.74	1.27

Tabell 4.8 Medelavvikelse av beräknad livslängdsavvikelse för varje analys

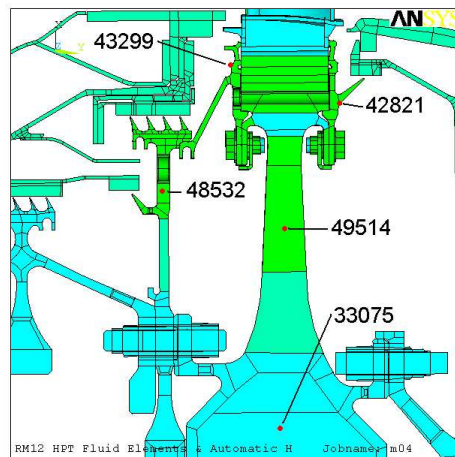
Byggt på resultaten av analyserna på detta uppdrag verkar det som om att smärtgränsen för antalet tidpunkter får dras innan man kommer ner till så få som i analys 3. Ingen bestämd gräns för godtagbar avvikelse är definierad, men studerar man Tabell 4.7 ser man att flera av de komponentdelar som har en relativt liten avvikelse i de tre första analyserna har fått en stor ökning i analys 3. Detta gäller speciellt Volter-nod 7.

Som framgår i Tabell 4.7 kan en analys med färre tidpunkter ge bättre livslängdsresultat än en med fler. En trolig förklaring är att man i analyser med färre analyserade tidpunkter fortfarande kan ha träffat extrempunkter i temperaturgradienten bättre än en med fler.

4.3.2 Temperaturavvikelse på grund av antalet analyserade tidpunkter

Att kontrollera hur endast en temperaturavvikelse påverkar livslängdsresultatet är svårt utan att blanda in andra felkällor. Därför kommer endast temperaturresultaten från analyserna i Kapitel 4.3.1 att studeras.

Fem olika noder utspridda i modellen väljs ut för att undersökas. Två i HT-skivan, en i vardera låsring och en i tätskivan. Se Figur 4.6.



Figur 4.6 Placering av de utvalda noderna

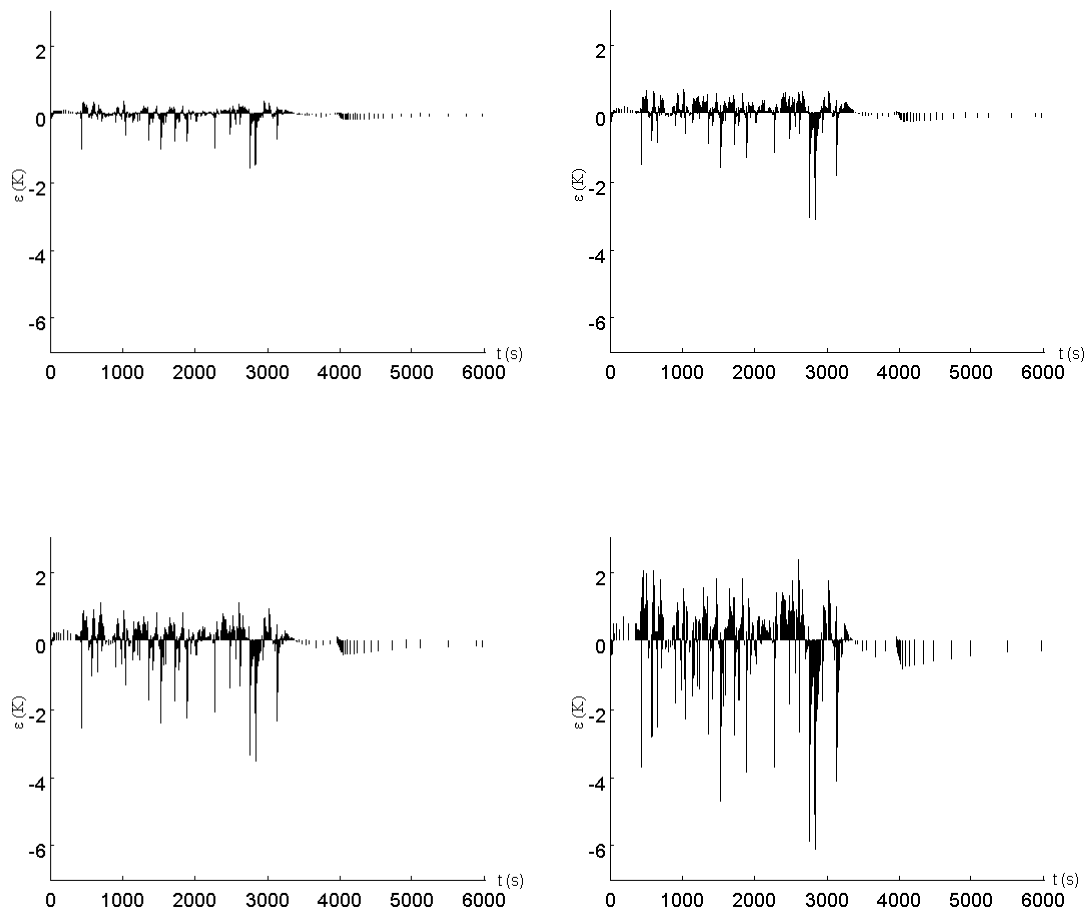
För varje analys beräknas avvikelsen från den fina analysen som $\varepsilon = T_{fin} - T_{analys}$.

Jämförelsevärden från den fina analysen har interpolerats fram för de önskade tidpunkterna. Som ett mått på hur stort felet i temperaturen är presenteras i Tabell 4.9 normen av felet för alla tidpunkter, $normen := \sqrt{\varepsilon^T \varepsilon}$. Av detta går inte att dra någon slutsats om vilka tidpunkter som är godtagbara men man kan se, förutom i nod 33075 som är en nod med väldigt långsam temperaturrespons, att för analys 3 ökar felet drastiskt.

Norm av felet					
	nod 33075	nod 49514	nod 42821	nod 43299	nod 48532
LTS	3.8	2.0	8.9	5.5	4.3
Analys 1	14.7	3.3	13.8	8.8	6.9
Analys 2	11.9	3.6	16.7	11.5	9.6
Analys 3	16.6	6.5	29.5	20.4	16.9

Tabell 4.9 Normen av temperaturfelet

Av dessa fem noder är den i bakre låsring mest känslig för valet av antalet analyserade tidpunkter. Temperaturen blir störst här och har även den snabbaste transienta temperaturförändringen vid driftfallsändringar. Figur 4.7 visar hur felet utvecklas när tidsstegen ökar för denna nod.



Figur 4.7 Felet för beräknad temperatur för LTS-analysen och analys1, 2 och 3. Nod 42821

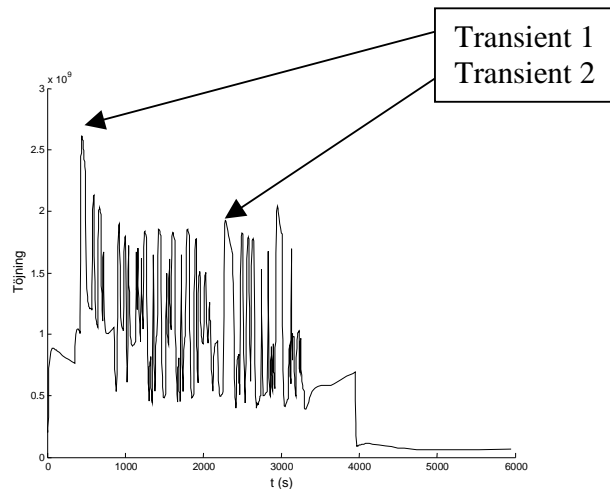
Resultat för temperaturfel i de andra noderna återfinns i Appendix A.

4.3.3 Livslängdsavvikelse på grund av miss av extrempunkt

När tidpunkter till den termiska analysen sätts ut som idag, utan att i förväg ha någon uppfattning om temperaturfältets beteende, så är det slumpen som avgör om man träffar intressanta extrempunkter i temperaturgradienterna eller inte. Ju tätare med tidpunkter desto större sannolikhet att få med extrempunkter. För att göra en kontroll av hur denna felkälla påverkar livslängdsresultatet kommer speciellt utvalda transienter att analyseras i detalj.

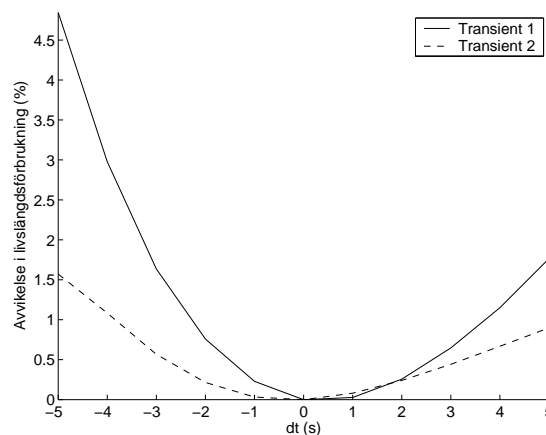
Kontrollen gick till på följande vis. En fin termisk analys kördes och sedan togs alla tidpunkter vidare till spänningsanalysen. Livslängdsberäkning för Volter-nod 7 utfördes och den egentliga livslängdsförbrukningen för detta uppdrag togs fram.

Volter använder sig av en fil per analyserad tidpunkt när spänningen i noderna ska beräknas. I det tidsspannet där den förväntade maximala livslängdsförbrukningen ligger, vilket är i närheten av huvudspänningens topp, togs sedan alla filer med temperaturresultat bort utom ett. På detta sätt kan antalet tidpunkter varieras utan att spänningsresultatet kommer att skilja sig i de tidpunkter där man har utfört en termisk analys. Sedan beräknas livslängden igen och man kommer att få en annan livslängd för uppdraget om det inte är så att man har tagit med just den tidpunkt som är mest livslängdskrävande. Denna procedur görs sedan om för flera olika tidpunkter. Resultatet blir att varje tidpunkts unika livslängdsförbrukning kan plottas. Kontrollen utfördes på två transienter i uppdraget m06, den stora startcykeln plus en cykel mitt i uppdraget.



Figur 4.8 De två undersökta transienterna

Förväntat är att om man missar i startcykeln så kommer detta att ge större livslängdsvariation än om man missar i cykeln mitt i uppdraget. Spänningen i denna cykel blir störst eftersom motorn då är relativt kall längst in, radiellt sett, medan temperaturen stiger fort längre ut närmare gaskanalen.



Figur 4.9 Procentuell avvikelse från den samma livslängdsförbrukningen

Undersökningen utfördes och resultatet visas i Figur 4.9. Tolkningen är att om man missar den mest livslängdskrävande tidpunkten i en transient mitt i uppdraget med t.ex. 3 sekunder kan det ge ett utslag på en halv procent i den beräknade livslängdsförbrukningen. Detta förutsatt att man har fångat alla andra extrempunkter i analysen.

4.4 Undersökning av nytt tidpunktsval

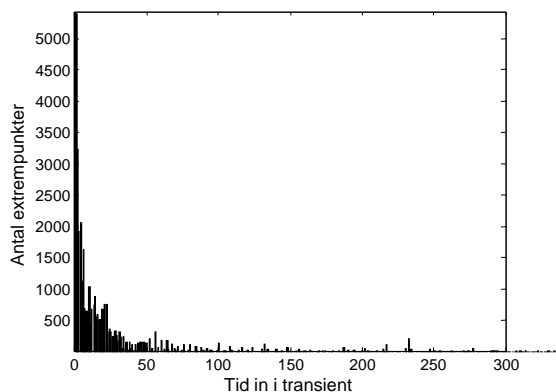
Framtagandet av nya tidpunkter bygger på resultat från detta kapitel. Utgångspunkten är de tidpunkter som används idag i LTS och sedan har dessa modifierats byggt på tidigare resultat i detta kapitel. Samma undersökning som gjordes i Kapitel 4.2 görs sedan på dessa nya tidpunkter.

Vad gäller storlek på tidssteg i början av varje transient för att fånga temperaturen verkar det rimligt att ta något längre steg än vad som görs idag i LTS. Dock bör man se till att ha ett par tidpunkter i de första två - tre sekunderna för att fånga över- och undersläng. Tidsstegen efter ett par hundra sekunder in i ett driftsfall kommer att ökas ganska rejält. Temperaturfältet i HT-turbinen är då ganska konstant och troligtvis går det då att ta långa steg. Inte heller kan man förvänta sig några spetsiga extrempunkter så långt in i en transient.

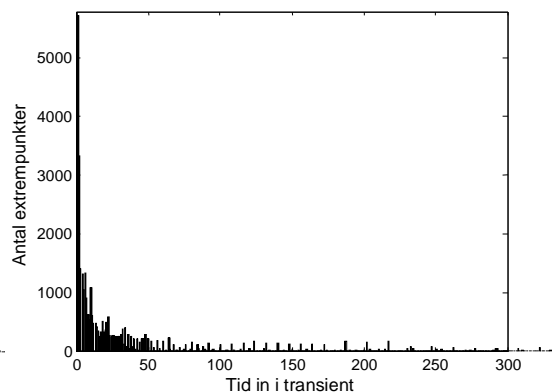
Runt tidpunkter då man kan misstänka att det kan uppstå extrempunkter bör man ha tätare med tidpunkter i startcykeln än i resterande cykler. Eftersom undersökningar här har gjorts på Volter-nod 7 kan man sätta ut tidpunkterna byggt på resultatet från Kapitel 4.3.3. Detta eftersom denna komponent är ett av dom som reagerar fortast på den termiska spänningen och därmed får mest ”spetsigt” utseende. En mer flat temperaturgradienttopp innebär att en miss av toppen kommer ge mindre utslag i spänningen och därmed även i livslängden. Så enligt resultatet från samma kapitel kan det vara rimligt med en stegstorlek på en till två sekunder här. För övriga cykler kan man sätta ut tidpunkterna lite glesare. Kanske steg på upp till fyra sekunder. Man kommer då i snitt missa extremvärdena med 1 sekund. Enkelt räknat och med hänvisning till Figur 4.9 blir det då en avvikelse med ungefär 0.05% per cykel. Då ska man även lägga märke till att den analyserade cykeln i förra kapitlet var den största förutom den i starten vilket betyder att avvikelsen i livslängd blir lägre på övriga cykler.

Nya tidpunkter att undersöka blir följande.

De första 3 sekunderna sätts en tidpunkt per sekund. Detta för att fånga över- och undersläng i temperaturgradienter. Fram till tider där man kan misstänka att extrempunkter i gradienter förekommer tas stegen så glest som möjligt byggt på resultat från Kapitel 4.3.1 och 4.3.2. För att ta reda på när sådana extrempunkter inträffar samlas data in från 25 stycken analyserade uppdrag. Alla globala nodpar som går till Volter studeras. Tiden från när varvtalet ändrades till tiden en extrempunkt uppkommer sparas och antalet förkommande extrempunkter per tidpunkt plottas. I Figur 4.10 visas resultatet för pådrag och i Figur 4.11 för avdrag.



Figur 4.10 Antalet förekommande extrempunkter vid pådrag.



Figur 4.11 Antalet förekommande extrempunkter vid avdrag.

Av dessa figurer dras slutsatsen att upp till ungefär 50 sekunder in i en transient kan man förvänta sig stöta på en extrempunkt i något av de globala nodparen. Efter denna tid är förekomsten glesare. Samma tidpunkter sätts alltså ut oberoende om det är pådrag eller avdrag som sker. Tidssteget sätts till 4 sekunder förutom för den stora starttransienten där det sätts till 2 sekunder.

Vid tider efter 50 sekunder kan det fortfarande uppstå extrempunkter men det antas att toppar och dalar i gradienterna är mer flata och därmed mindre känsliga för längre tidssteg. Tidpunkterna glesas då ut mer och mer. I Tabell 4.10 och Tabell 4.11 kan de nya tidpunkterna ses.

Analyserade tidpunkter relativt transientstart (s)																	
1	2	4	6	8	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36
38	40	44	50	56	64	72	80	100	150	200	250	300	400	500	650	800	1000
1300	1600	2000	2500														

Tabell 4.10 Analyserade tidpunktsval för starttransienten.

Analyserade tidpunkter relativt transientstart (s)																	
1	2	3	5	8	12	16	20	24	28	32	36	40	48	56	64	72	80
100	150	200	250	300	400	500	650	800	1000	1300	1600	2000	2500				

Tabell 4.11 Analyserade tidpunktsval för övriga transienter.

Livslängdsanalys utfördes med detta tidpunktsval på samma uppdrag som i undersökningen av LTS-tiderna. Antalet totala tidpunkter för varje uppdrag minskade för de nya tiderna och analysstiden förkortades med ungefär 26 % jämfört med LTS-analyserna vilket kan ses i Tabell 4.12.

	Antal tidpunkter		CPU-tid (min)	
	LTS	Nya	LTS	Nya
m06	1419	1043	152	113
m20	785	591	87	62
m42	894	679	98	72
m44	1176	888	126	96
m60	948	696	103	75

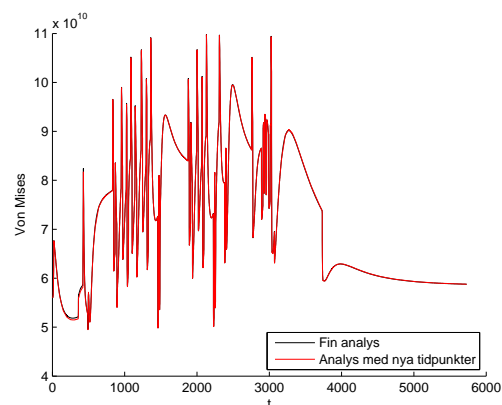
Tabell 4.12 Jämförelse mellan analys med LTS-tidpunkter och nya tidpunkter

I Tabell 4.13 kan man se att jämfört med LTS-tiderna ger dessa nya tider överlag något större avvikelser.

Volter-nod	Avvikelse i livslängd för nya tidpunkter (%)					
	m06	m20	m42	m44	m60	Medel
1	0.12	-0.19	0.65	0.87	0.84	0.53
2	-0.01	0.05	1.36	0.27	0.52	0.44
3	0.42	0.25	1.13	1.02	1.37	0.84
4	-0.08	-0.34	-0.08	-0.60	-0.54	0.33
5	0.50	0.38	1.36	1.29	1.33	0.97
6	1.72	0.24	2.30	1.25	0.80	1.26
7	0.44	1.84	0.57	1.52	2.02	1.28
8	-0.67	-0.04	1.10	1.01	2.26	1.02
9	-0.11	-0.07	3.30	3.30	2.78	1.91
10	0.20	0.22	0.13	-0.13	0.58	0.25
11	0.15	0.17	0.23	0.08	0.42	0.21
12	0.69	1.13	0.31	0.58	3.83	1.31
13	-0.24	0.03	-0.50	-0.47	1.36	0.52
14	0.37	0.36	3.31	2.66	4.56	2.25
15	-0.90	-0.11	0.35	-0.21	-0.25	0.36
16	-0.03	1.72	1.03	2.04	-0.14	0.99
17	0.80	0.00	-0.06	-3.23	0.18	0.85
18	0.41	0.55	-0.81	0.57	1.57	0.78
19	-2.62	-1.72	2.72	-1.61	-6.53	3.04
20	-0.09	0.22	1.09	1.53	1.51	0.89
21	-0.45	0.81	1.01	1.38	1.01	0.93

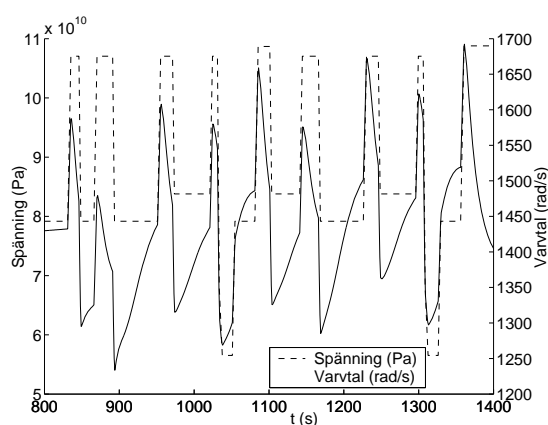
Tabell 4.13 Avvikelsen i beräknad livslängdsförbrukning jämfört med fin analys

Fortfarande verkar det som att Volter-nod 19 i bakre låsring är väldigt känsligt. Därför görs en närmare undersökning av de beräknade spänningarna. Von Mises-spänningen för uppdraget m60 plottas eftersom avvikelsen i livslängd är störst för detta uppdrag.



Figur 4.12 Beräknad von Mises-spänning för uppdraget m60.

Inga märkliga variationer i spänningsresultat mellan den fina analysen och den med nya tidpunkter kan urskiljas så eventuella misstankar mot Volter kan läggas åt sidan. Vad som däremot är anmärkningsvärt är den enormt snabba responsen för spänningen i de flesta transienter. Det kan ses i Figur 4.13 att dessa spänningar växer så länge accelerationen av turbinen varar. Sedan uppstår en spik så fort accelerationen slutar. Detta spänningsbeteende tillsammans med vilket område som studeras, en bult långt ut i motorns radie, ledde till tolkningen att det var spänningsspikar som uppstod mest på grund av motorns varvtal. Efter en diskussion med handledare på VAC gavs dock förklaringen att spikarna uppstår på grund av snabb termisk respons.



Figur 4.13 Stora spänningsspikar i bulthål i uppdraget m60.

Vad som då kan tänkas vara felkällan för den stora livslängdsvariationen i analyserna här är punkt 3 som nämns i början av detta kapitel. Dvs. att ingen termisk lösning finns i den totala spänningstoppen. I flera, och framförallt de största transienterna för detta uppdrag är spänningsresponsen näst intill maximal. Dvs. en spänningstopp uppstår precis efter det att varvtalsförändringen har skett eller max någon sekund efter. Därför kommer det nu att testas vad som händer med livslängdsberäkningarna om en extra tidpunkt sätts ut just här. Uppdragen m60 kördes om igen fast denna gång med en extra tidpunkt i varje driftfall. Alltså i den tidpunkt då varvtalet har uppnått en ny nivå. Analysen kallas *nya+1*.

Volter-nod	Avvikelse i livslängd (%)	
	Nya	Nya+1
1	0.84	0.42
2	0.52	0.46
3	1.37	2.13
4	-0.54	-0.52
5	1.33	1.35
6	0.80	0.76
7	2.02	2.32
8	2.26	2.29
9	2.78	2.94
10	0.58	0.59
11	0.42	0.22
12	3.83	3.76
13	1.36	-0.38
14	4.56	4.61
15	-0.25	-0.29
16	-0.14	0.22
17	0.18	0.19
18	1.57	1.46
19	-6.53	-5.59
20	1.51	1.48
21	1.01	0.96

Tabell 4.14 Avvikelsen i beräknad livslängdsförbrukning för analys med extra tidpunkt

De två analyserna i Tabell 4.14 är alltså identiska förutom att en extra tidpunkt per driftfall är med i den ena. Den nya analysen med en extra tidpunkt per driftfall gav endast en allmän förbättring.

4.5 Slutsats och diskussion

Förhoppningen var att kunna se ett mer lättolkat samband mellan antal tidpunkter och livslängdsavvikelsen. Möjligtvis hade detta varit fallet om spänningsanalyserna hade utförts med Ansys. Men att utföra någon större undersökning med Ansys uteslöts från början pga. tidsåtgången och det faktum att det är Volter som används idag i LTS.

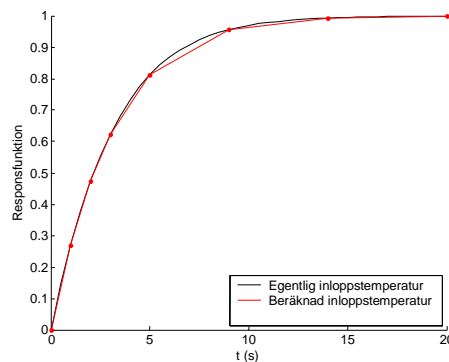
Det faktum att analyser med färre tidpunkter ofta ger att livslängdsförbrukningen för en komponentdel ökar är inte så bra. I alla tabeller presenteras avvikelsen som den fina analysens resultat minus den jämförda analysens resultat. Eftersom de flesta avvikelser är positiva innebär det att livslängdsresultatet är mindre för den undersökta analysen. Dvs. en analys med färre tidpunkter ger ofta att komponentdelar klarar av färre uppdrag än vad det ger med en fin analys. Teoretiskt sett hade man helst sett att resultatet alltid blev tvärt om. Eftersom sannolikheten att träffa extrempunkter i temperaturgradienten minskar med färre tidpunkter, och därmed ger mindre omfång i spänningscyklerna, borde man få en lägre livslängdsförbrukning vid en sådan analys. Men tydligen spelar andra faktorer in och positivt är att man ofta får resultat som är konservativa.

Vad gäller undersökningen med ett nytt tidpunktsval gav det ett ganska bra resultat. I snitt sparar man 26% analystid. För att jämföra resultaten i förbrukad livslängd för komponenterna beräknas ett medelvärde av alla beräknade livslängdsförbrukningar för de båda tidpunktsvalen. D.v.s. medelvärdet av kolumnerna döpta till *medel* i Tabell 4.5 och

Tabell 4.13.. Termiska analyser utförda med det tidpunktsval som används idag i LTS ger en genomsnittlig avvikelse på 0.8 % i beräknad livslängdsförbrukning. Analyser utförda med de tidpunkter framtagna i detta arbete ger en genomsnittlig avvikelse på 1.0 %. Vilken avvikelsen i beräknad livslängdsförbrukning som är godtagbar får bedömas från ett vidare säkerhetsperspektiv, där även andra riskfaktorer vägs in.

Att lägga till en extra tidpunkt vid varvtalsförändringar verkar onödigt. Ingen större förbättring kunde ses. Avvikelsen i livslängdsberäkningen för Volter-nod 19 i bakre låsring verkar alltså inte bero på att inga termiska lösningar finns i de tidpunkter när spänningen har ett absolut maximum. Men mer troligt är ändå att avvikelsen beror på varierande temperaturresultat i de olika analyserna. I Figur 4.7 visas hur felet av den beräknade temperaturen i nod 42821 snabbt ökar med tidsstegen. Denna nod befinner sig nära Volter-nod 19. Eftersom de lokala gradienterna som går vidare till Volter, för denna komponentdel, har sina noder i detta område är det troligt att dessa varierar mellan de olika analyserna. Variationen är större än de lokala gradienterna för t.ex. Volter-nod 7 eftersom den termiska analysen inte är lika känslig här. Se Figur A.4. Att minska antalet tidpunkter utan att göra avkall på noggrannheten i livslängdsberäkningen verkar inte vara möjligt med avseende på Volter-nod 19 i bakre låsring. Om detta även gäller om spänningsanalysen utförs med Ansys är inte kontrollerat.

En idé för hur man skulle kunna kompensera för det beräknade felet i temperatur vid längre tidssteg kom upp. Inget arbete lades dock på att undersöka detta. Idén bygger på att modifiera responsfunktionerna för inloppstemperaturerna efter valet av tidpunkter. När tidsstegen blir långa innebär det att mindre energi tillförs i modellen vid pådrag och tvärt om vid avdrag. Se Figur 4.14 för ett exempel för ett pådrag.



Figur 4.14 Exempel på beräknad inloppstemperatur i Thermal Loads

Arean under den svarta kurvan är större än den under den röda. Om man skulle höja responsfunktionens värde något i de tidpunkter där ett långt tidssteg innebär att mindre värme tillförs modellen skulle kanske en mer korrekt analys uppnås. Vid tidpunkten 5 sekunder i Figur 4.14 kan ett exempel på ett sådant tidssteg ses.

Ett sätt att dra ner ytterligare på antalet tidpunkter är att i förväg avgöra när i tiden man behöver sätta ut fler tidpunkter för att fånga temperaturgradientens max- och minvärden. Målet med nästa kapitel är att ta fram en algoritm som klarar av just detta.

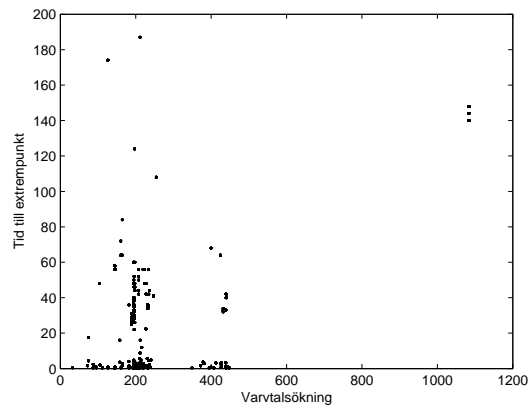
5 Metod för att förutspå extrempunkter i temperaturgradienter

Målet med denna del av examensarbetet är att ta fram en metod som kan förutspå när i tiden temperaturskillnaden mellan två noder får sitt absoluta maximum vid en driftfallsförändring. Tiden som menas är alltså tiden från det då en driftfallsändring sker tills en extrempunkt uppstår. Dom intressanta extrempunkterna i temperaturskillnaden är de som är lokala i varje driftfall. Extrempunkter inträffar nästan alltid vid, eller strax efter, driftfallsförändringar men dessa kommer alltid att fångas ganska väl. Man är ändå tvungen att ha ganska tätt med tidpunkter för att felet i temperaturen inte ska bli för stort.

Det flesta uppdragen i mixen A3B3 har analyserats med fin indelning av tidpunkter för att få så mycket data som möjligt. Sedan har ett Matlab-skript skapats för att samla in temperaturdata för alla noder som går till Volter. I samma skript har även temperaturskillnader mellan nodpar och tider till extrempunkter tagits fram (Appendix B, mmtider.m).

I en första undersökning antogs det att tiden till extrempunkter endast beror av storleken på varvtalsförändringen. Om det är ett pådrag eller avdrag som sker är klart av stor betydelse. Endast pådrag kommer att studeras i första hand.

Tid till extrempunkt plottas mot storleken på varvtalsökningen. Det nodpar som har analyserats är det för Volter-nod 7 i Figur 3.9. Även resterande undersökningar i detta kapitel är gjort på detta nodpar.



Figur 5.1 Tid till extrempunkt i temperaturgradienten relativt transientstart för olika pådrag.

I Figur 5.1 ser man inget direkt samband mellan tid till extrempunkt och varvtalsändring. De flesta varvtalsändringarna sker med en ökning av ungefär 200 rad/s. För denna ökning uppstår extrempunkter, förutom vissa undantagsfall, ganska jämnt utspritt mellan 0 och 70 sekunder in i driftfallet. Av detta resultat kan slutsatsen dras att tiden till extrempunkt vid pådrag är beroende av andra faktorer än endast varvtalsökningen. Efter detta gjordes andra tester där andra faktorer blandades in. Först och främst antogs det att det var av

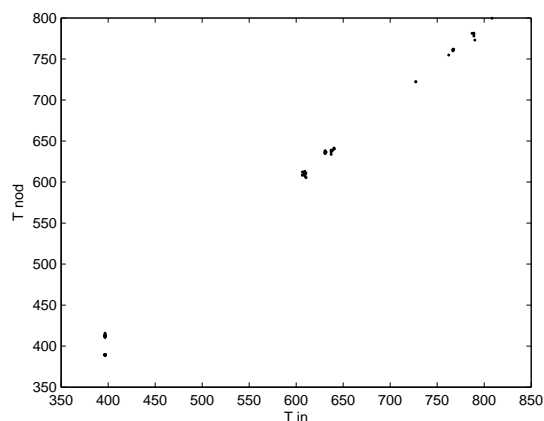
betydelse vilket varvtal pådraget skedde ifrån. Nya samband plottades men endast liknande resultat som i Figur 5.1 kunde tydas. Istället för att jobba vidare med att försöka hitta samband mellan varvtalsdata och tid till extrempunkter angreps problemet på annat sätt.

5.1 Simulering av temperaturrespons

För att kunna förutsäga när extrempunkter i en nodtemperatur uppstår räcker det troligtvis inte med att endast ha tillgång till varvtalsdata. Man behöver, innan man kan uppskatta extrempunktstider, skaffa sig en uppfattning om hur temperaturen beter sig i de olika noderna. Det är de två nodernas tidsderivata som styr när en extrempunkt i temperaturskillnad mellan dem uppstår. I den tidpunkt då temperaturskillnaden mellan två noder har ett extremvärde är tidsderivatan av temperaturskillnaden lika med noll. Dvs. temperaturen i de båda noderna ökar eller minskar med samma hastighet och de båda nodernas tidsderivata är då per definition lika.

Ett försök ska här göras att simulera tidsderivatan, eller responsen, i två olika noder. Det exakta värdet på temperaturen är alltså inte av vikt i detta försök. Ändock behövs någon slags rimlig uppskattning av vilken temperatur de utvalda noderna kommer att under det analyserade flyguppdraget.

För varje driftfall finns inloppsnodernas steady state-temperaturer angivna i k-filerna. Likaså bör alla andra noder i modellen ha ett steady state-värde om HT-turbinens varvtal hålls konstant lång tid nog. För att uppskatta dessa steady state-värden gjordes följande; Ur alla de uppdrag som har analyserats samlades de temperaturer, för nod 9447, in där den har nått, eller är i närheten av, steady state. Dessa temperaturer plottas sedan mot temperaturen i den inloppsnod som har störst effekt på utvald nod. Denna temperatur är känd från motorprov och sätts som randvärde till Ansys-analysen. Den aktuella inloppsnoden kan ses i Figur 3.6.



Figur 5.2 Nodtemperatur beroende av inloppstemperatur.

Det ganska grova antagandet görs nu att nodtemperaturen är linjärt beroende av inloppstemperaturen. Detta ger att nodtemperaturen kan beräknas som

$$T_{nod} = T_0 + k \cdot T_{inlopp}. \quad (5.1)$$

Den aktuella noden är en global nod till Volter-nod 7 och sitter i främre låsring. Den har en relativt snabb respons och når upp till steady state i flera uppdrag. För andra noder som sitter längre ner i modellen, och därmed inte reagerar lika fort, kan man alltid kolla på uppdraget Elcf och då nöja sig med endast 2 datapunkter för identifikationen. Elcf innehåller nämligen väldigt långvariga transienter. Detta gäller t.ex. för den andra globala noden, nr 15427, i det studerade nodparet.

Enligt (5.1) beräknas alltså vilken temperatur varje nod ska gå mot i aktuellt driftfall. Nästa steg är att beräkna responsen i noderna. Dvs. hur temperaturen ska ta sig till sitt steady state-värde. Vilken respons noden har vid ett visst tillfälle antas här bero på endast tre parametrar.

- Temperaturens tidsderivata vid driftfallsförändring, $\frac{dT}{dt}$.
- Temperaturens nivå vid driftfallsförändring, T_{start} .
- Storleken på temperaturförändringen i aktuellt driftfall, $\Delta T = T_{steady\ state} - T_{start}$.

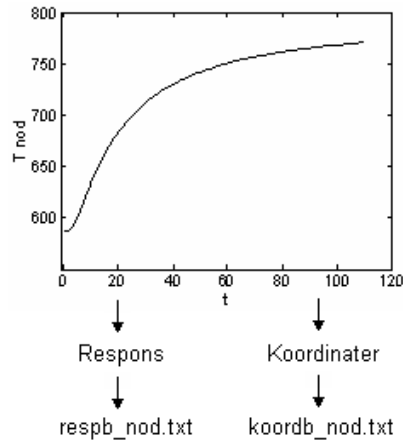
Dessa tre parametrar kommer från och med nu kallas koordinater. Detta för att dessa parametrar senare kommer att sparas i ett normerat koordinatsystem. Tanken är alltså att om noden har en viss uppsättning koordinater så kommer responsen att vara given oberoende av i vilket uppdrag eller när i ett uppdrag man befinner sig.

Responsen tillsammans med uppskattad sluttemperatur kommer då att representera en transient temperaturförändring enligt följande formel.

$$T = T_{start} + R \cdot \Delta T \quad (5.2)$$

Responsfunktionen, R , i (5.2) är en funktion som går från noll till ett vilket ger att temperaturen då går från T_{start} till $T_{steady\ state}$. Tjugofem uppdrag ur A3B3-mixen analyserades och vid varje nytt driftfall identifierades responsfunktionerna i de två noderna. Identifikationen gjordes genom att responsvärdet sparades direkt i en textfil för varje analyserad tidpunkt och nod. På detta vis får man en exakt identifikation till skillnad från om man t.ex. hade försökt göra en kurvanpassning av responsfunktionerna för någon manuellt framtagen funktion.

Ett Matlab-skript skapades för responsidentifieringen (Se Appendix B, respid.m). I skriptet loopas alla driftfall igenom och vid varje nytt sådant sparas de aktuella koordinaterna i en textfil och responsvärdet i alla analyserade tidpunkter i en annan textfil. Avdrag och pådrag sparas var för sig i egna filer.



Figur 5.3 Grafisk beskrivning av responsidentifikation.

Här följer ett kort exempel av hur responsidentifieringen går till.

För transienten i Figur 5.3 är koordinaterna $\left[\frac{dT}{dt} \Delta T T_{start} \right] = [-2.1 \ 223 \ 588]$.

Responsvärdet identifieras, enligt (5.2), vid varje analyserad tidpunkt och sparas i två kolumner med tid och responsvärde.

$$[t \ R] = \left[t \ \frac{T_{nod} - T_{start}}{\Delta T} \right] = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 2 & -0.02 \\ 10 & 0.22 \\ 20 & 0.43 \\ 60 & 0.73 \\ 110 & 0.82 \end{bmatrix}$$

Alla analyser är utförda med fin tidpunktsindelning så givetvis sparas data för fler tidpunkter än i exemplet ovan.

Identifieringen av dessa uppdrag gav att 336 stycken pådragstransienter och 491 stycken avdragstransienter kunde identifieras.

För att få lite bättre kontroll och översikt över koordinaterna normerades dom med avseende på sitt identifierade max- och minvärde. T.ex. får ΔT -komponenten ett nytt mått av formeln $\Delta T \equiv (\Delta T - \Delta T_{min}) / (\Delta T_{max} - \Delta T_{min})$. Detta ger att alla koordinater får ett värde mellan noll och ett.

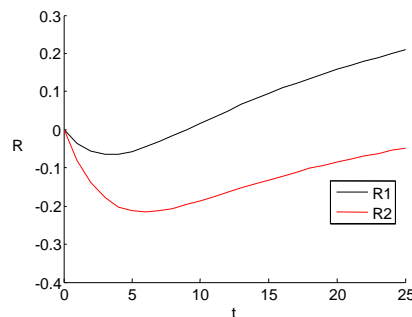
För att kontrollera att grundidén stämmer, dvs. att lika koordinater ger lika respons, gjordes följande. Alla identifierade koordinater jämfördes med varandra och i de fall som varje koordinatkomponent skiljde sig med mindre än 0.05 gjordes en jämförelse av de två motsvarande responserna. Eftersom de två responserna kan ha olika längd jämfördes de

endast fram tills dess den ena är slut. För att få ett värde på avvikelsen mellan två responser gjordes följande beräkning.

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{(R_1 - R_2)^T (R_1 - R_2)}{n}}, \text{ där } n \text{ är längden på responsvektorena.} \quad (5.3)$$

För varje fall då koordinaterna är lika, med given marginal, sparas dess responser tillsammans med det beräknade felet. För en kontroll väljs sedan de med störst fel ut och plottas. Resultatet blev att responserna kan skilja sig avsevärt för de fall då ΔT är nära noll. Detta beror på att känsligheten för temperaturresponsen är stor vid sådana fall. En ökning av varvtal behöver inte betyda att temperaturen i aktuell nod kommer att stiga. Detta betyder att när antagandet av sluttemperatur i driftsfallet görs, vilken kan vara flera grader ifrån den verkliga, så kan det relativa förhållandet mellan antagen och verklig temperatur bli stor. Detta har påverkan på identifieringen av responsen eftersom den antagna temperaturen används där.

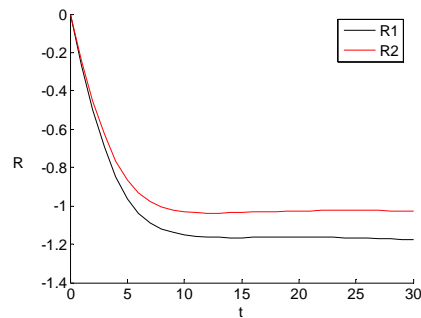
För att gå vidare och få en verifikation av andra sorts transienter ändras kravet på kontrollen ovan. Samma värde för den maximala skillnaden för koordinaterna används men nu endast för transienter där temperaturökningen är större än 20 grader. Detta är fortfarande en relativt liten ökning. I Figur 5.4 nedan visas de två transienter med störst avvikelse sinsemellan.



Figur 5.4 De två responser som skiljer sig mest med given felmarginal 0.05.

Trots att detta är de två responser som skiljer sig mest, med givna marginaler, så är dess utseende fortfarande ganska lika. Temperaturderivatan i de båda jämförda responserna skiljer sig endast något vid samma tidpunkter. Responsfunktionerna i Figur 5.4 skiljer sig ganska mycket i tidsderivata vid lika tidpunkter i början av transienten. Men tidsskillnaden mellan de tillfällena då de har samma derivata är relativt liten.

Minskas felmarginalen mellan koordinaterna till 0.01 fås bättre resultat i verifikationen vilket kan ses i Figur 5.5. Detta utan att någon gräns sätts för ΔT .



Figur 5.5 De två responser som skiljer sig mest med given felmarginal 0.01.

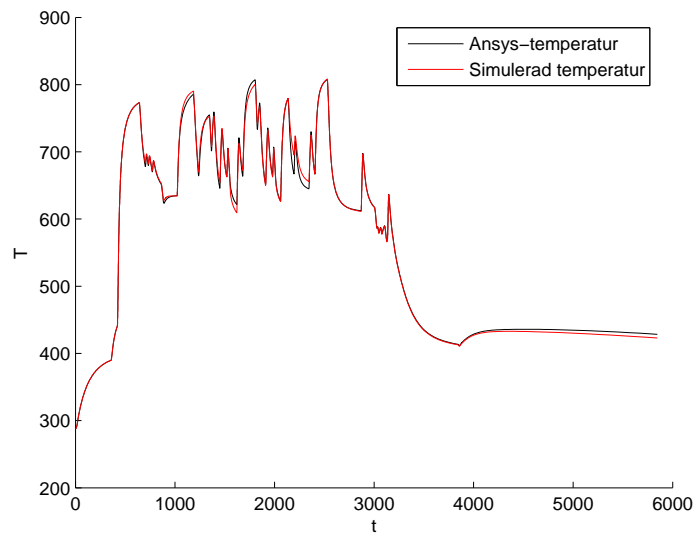
Samma kontroll gjordes även på nod 15427 samt för avdragsresponser för de båda noderna. Samma resultat fås även vid dessa fallen. Det är känsligt vid små temperaturförändringar i noderna men annars stabilt.

Simuleringen går sedan till på följande vis i Matlab (Se Appendix B, Tsim.m). Filerna med koordinater och responser laddas in. Dessa är döpta till koordb_nod.txt, koordc_nod.txt, respb_nod.txt och respc_nod.txt där b och c står för burst respektive chop. Filer med inloppnodens temperatur och varvtalet för uppdraget laddas även in som är indata till simuleringen. För varje nytt driftfall tas sedan de aktuella koordinaterna fram och i koordinatfilerna görs en sökning efter lika koordinater. Normen av felet mellan koordinaterna tas och sparas i en tabell med minst fel överst. Om de identifierade koordinaternas motsvarande respons inte är lång nog för att täcka in den som ska simuleras söker simuleringsskriptet vidare i tabellen tills en tillräckligt lång respons hittas. Simuleringen görs sedan med funktionen

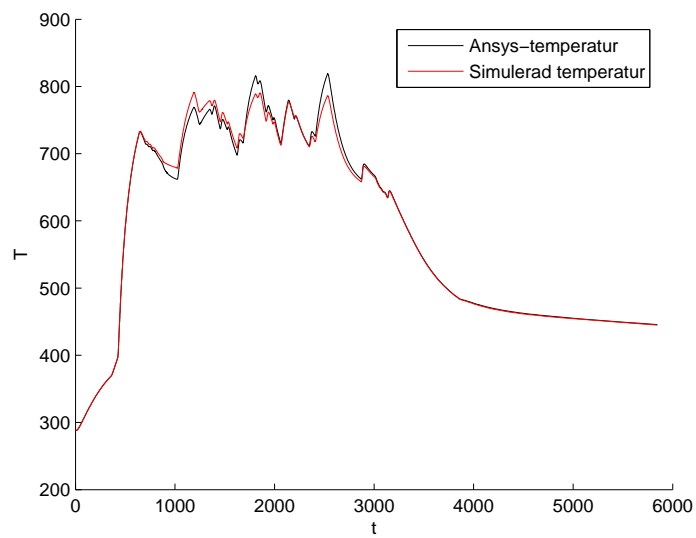
$$T = T_{start} + R \cdot \Delta T . \quad (5.4)$$

Om inte exakt likadana koordinater finns identifierade som de som ska simuleras tyder resultatet från undersökningen av responserna förut att en någorlunda lik respons ändå kommer att fås.

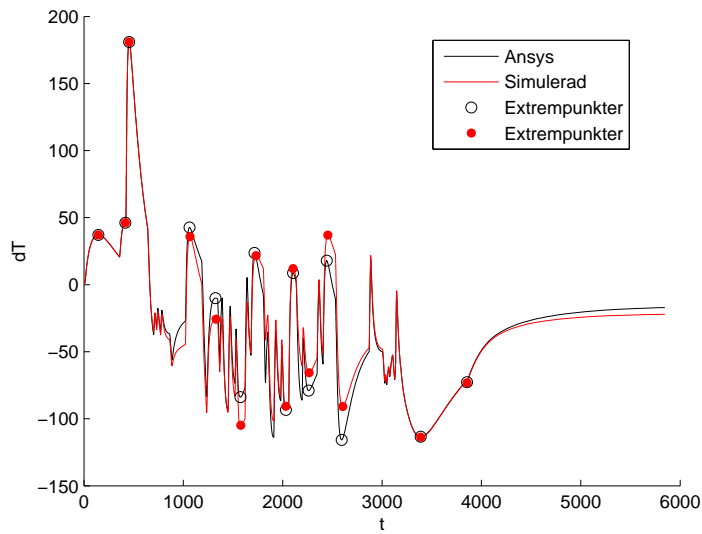
Simuleringen utförs på uppdragen m28 och m40 och för ett av de globala nodparen till Volter-nod 7. Identifiering har inte skett på något av dessa uppdrag. Resultaten redovisas nedan.



Figur 5.6 Resultat av simulering av temperatur för uppdraget m40. Nod 9447.

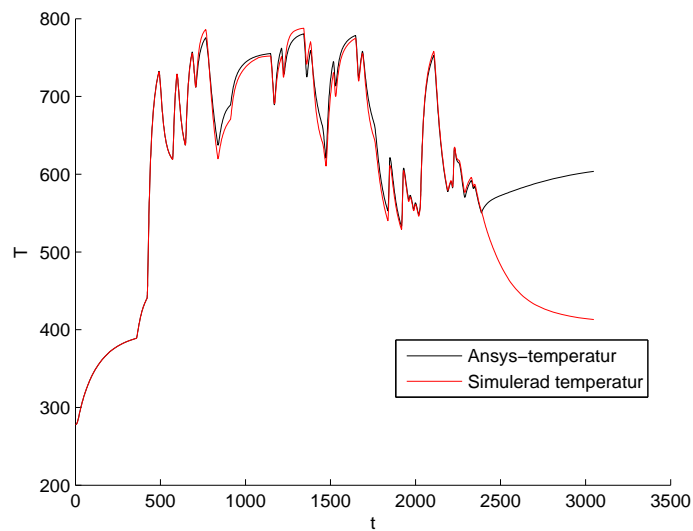


Figur 5.7 Resultat av simulering av temperatur för uppdraget m40. Nod 15427.

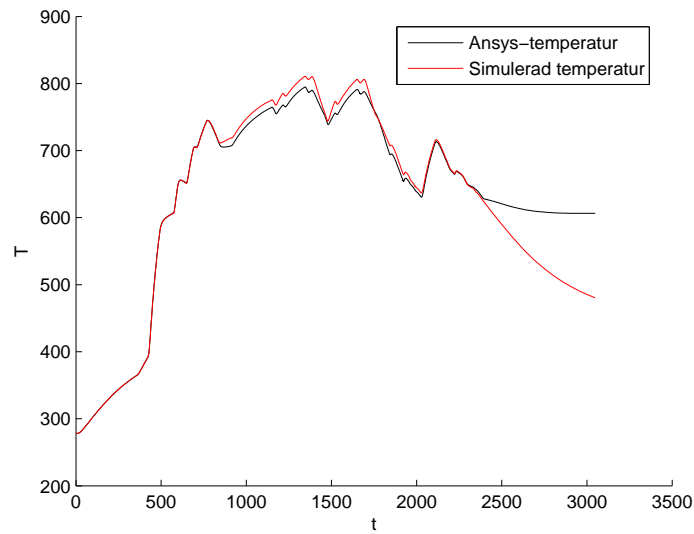


Figur 5.8 Resultat av simulering av temperaturgradient för uppdraget m40.

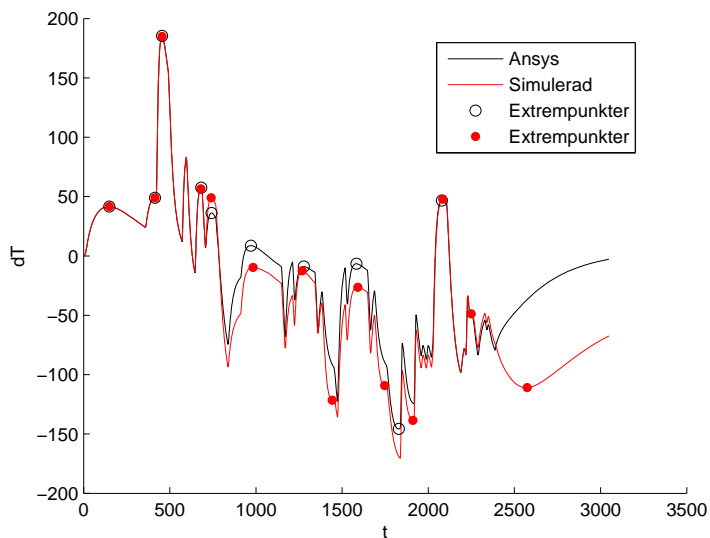
I Figur 5.8 visas var extrempunkter hamnar i beräkningar med Ansys och i den simulerade beräkningen. Endast extrempunkter som uppstår efter minst sex sekunder in i varje transient visas. För detta uppdrag missar simuleringen extrempunkter med mellan 0 och 5 sekunder. Undantag är dock pådraget och avdraget runt tidpunkten 2500 s där extrempunkterna missas med 12 respektive 10 sekunder.



Figur 5.9 Resultat av simulering av temperatur för uppdraget m28. Nod 9447.



Figur 5.10 Resultat av simulering av temperatur för uppdraget m28. Nod 15427.



Figur 5.11 Resultat av simulering av temperaturgradient för uppdraget m28.

Den stora skillnaden i sista transienten i uppdraget m28 beror inte på simulationen utan på felaktig indata till analysen i Ansys. I den version av uppdraget som har använts här går inte varvtalet ner till noll vilket är orimligt. Denna sista transienten bör alltså ignoreras.

Annars har simuleringen även för detta uppdrag samma precision som i det förra.

5.2 Slutsats och diskussion

Den framtagna metoden att förutspå var temperaturgradienter har sitt max- och minvärde är för närvarande inte praktiskt användbar. För det första är den endast framtagen för ett nodpar.

Mer kontroll över identifieringen är att föredra. Ett problem är att flera av de identifierade responserna är väldigt korta. Om metoden anses användbar kanske en uppsättning skraddarsydda uppdrag för identifiering kan skapas.

Just nu beror responsen i en nod enbart på temperaturen i just den noden. Detta är ett för enkelt antagande. Att försöka hitta en uppsättning noder som beror av varandra ger troligtvis ett bättre resultat. Försök har gjorts med detta genom att lägga till en parameter i koordinaterna. Nämligen temperaturen i en nod längre ner i HT-skivan för att representera värmen långt in i motorn. Enbart en ytterligare vald nod gav dock inget bättre resultat.

Ett bättre sätt att uppskatta steady state-temperaturer kan nog ge bättre precision i responsidentifieringen och simuleringen. Fast detta är ett mycket svårt problem. Skulle det lyckas har man kommit en bra bit på vägen mot att kunna ersätta FE-beräkningar för hela analysen.

Trots dessa brister ser metoden lovande ut. Temperaturens respons överensstämmer väl med de beräknade av Ansys och extremvärden hamnar ungefär vid samma tidpunkt.

6 Sammanfattning och förslag till vidare arbete

En av uppgifterna i examensarbetet var att ta fram en metod som kunde förutsäga extrempunkter i temperaturderivatan. En sådan metods betydelse ifrågasätts. Det verkar som att beräkningen av livslängdsförbrukning är känslig för avvikande temperaturresultat. Det vill säga när antalet tidpunkter i den termiska analysen minskar avviker temperaturresultatet så mycket att det har stor påverkan på livslängdsberäkningarna. Denna slutsats bygger på studien av Volter-nod 19 i bakre låsring och temperaturavvikelsena i figurerna i Appendix A. Troligtvis skulle man kunna effektivisera analysen något med avseende på tidsåtgången men inte med en allt för betydande faktor. Helt obrukbar skulle dock inte en sådan metod vara eftersom man skulle få en mer korrekt beräkning av livslängdsförbrukningen.

Antag att man måste sätta ut tidpunkter med max 8 sekunders mellanrum. Då missar man extrempunkter med max 4 sekunder och i snitt 2 sekunder. Att ta fram en metod som kan bidra att man träffar extrempunkter med bättre precision måste då vara väldigt precis. Om metoden dessutom bygger på att simulera temperaturen i noderna, och om man uppnår den precision som krävs, har man troligtvis kommit nära en metod som kan simulera temperaturen bra nog för att ersätta FE-beräkningar.

Metoden kan kanske vara en vidareutveckling av den framtagna i detta arbete. Men vad som då skulle krävas är ett större antal noder som beror av varandra. Detta för att på ett grövre sätt kunna representera temperaturfältet i hela HT-turbinen. En matematisk modell som bygger på resultat från Ansys skulle då behöva ställas upp. Förslag till en sådan modell har inte tagits fram här.

För vidare arbete med att göra den termiska analysen mer effektiv föreslås att man inriktar sig mot ett av två alternativ. Antingen försöker man optimera antalet, och placeringen av, tidpunkter som i Kapitel 4.4. Dessa framtagna tidpunkter kanske går att förbättra ännu mer. Ett förslag är att testa om det inte går att sätta ut ännu färre tidpunkter då det inte har skett en driftfallsförändring på en längre tid.

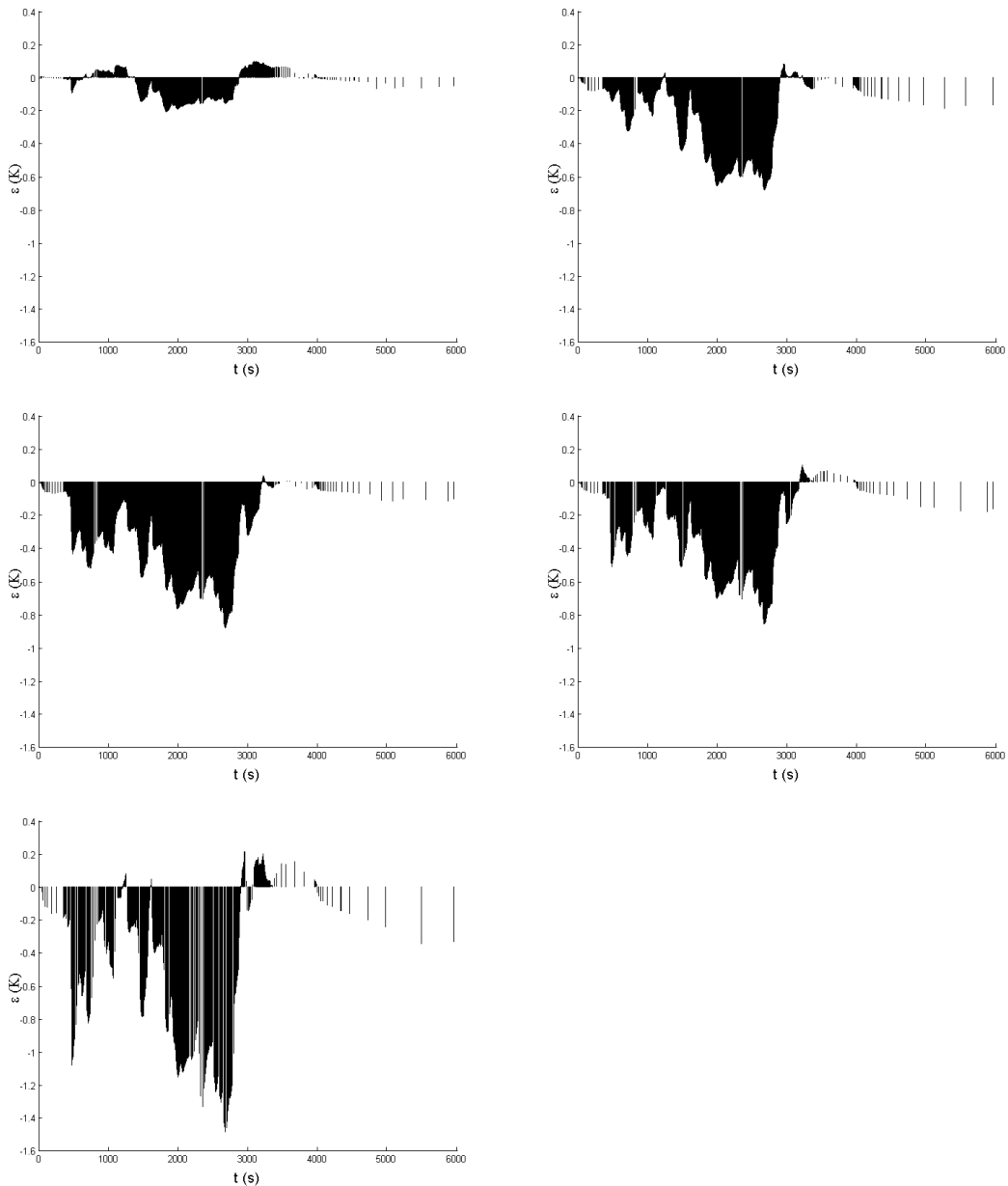
Eller så satsar man på att försöka utveckla en metod som kan ersätta tidskrävande FEM-beräkningar. Sådana försök har gjorts tidigare på VAC utan att lyckas.

Referenser

- [1] Fokus på uppdraget VOLVO RM12. Broschyr från VAC.
- [2] Magnus Jönsson. Termisk analys av HT-turbin, RM12. 2002-03-14. Intern företagsrapport, VAC.
- [3] Patrik Lenart. Komplettering av fludelementmetoden för beräkning av värmeövergångstal i ANSYS. 2000-08-23. Intern företagsrapport, VAC.
- [4] Bo Karlsson. Volter, ett fortranprogram för simulering av temperatur och termiska spänningar i motorstrukturer vid militära flygupdrag. Intern företagsrapport, VAC.
- [5] Niels Ottosen och Hans Petersson, Introduction to the finite element method. 1992, ISBN 0-13-473877-2
- [6] ANSYS, Inc. Theory Reference, Release 8.0 Documentation.

A Beräknat temperaturfel

Fel i beräknad temperatur jämfört med analys med fin tidpunktsindelning. De undersökta noderna är 33075, 49514, 42821, 43299 och 48532. Uppdraget m06 analyserades med tidpunktsvalen från Kapitel 4.3.1 och Kapitel 4.4. I figurerna nedan presenteras de i ordningen LTS, nya, analys 1, analys 2 och analys 3.



Figur A.1 Beräknat temperaturfel för nod 33075. I ordningen LTS, nya, analys 1, analys 2 och analys 3

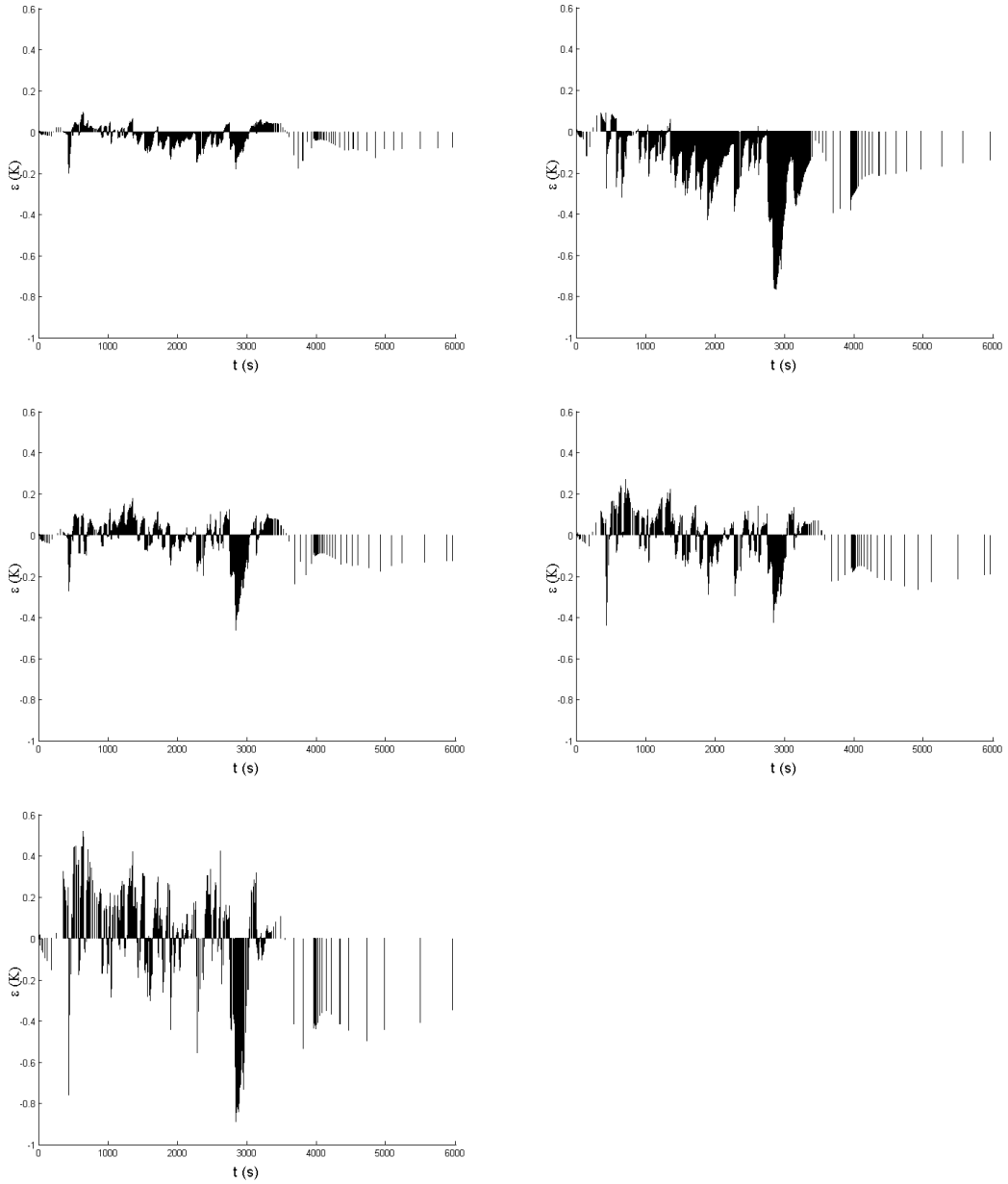
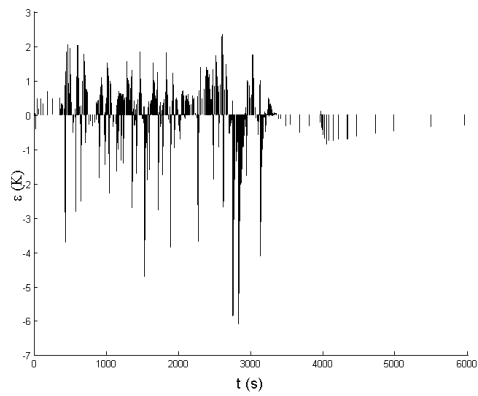
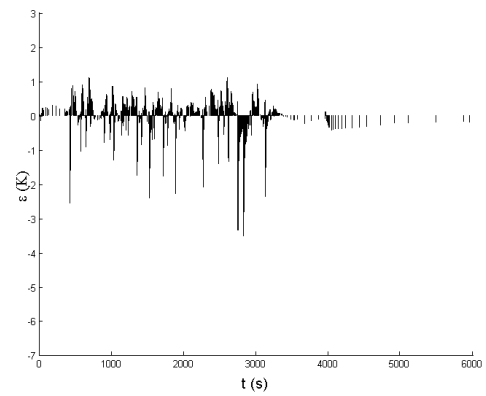
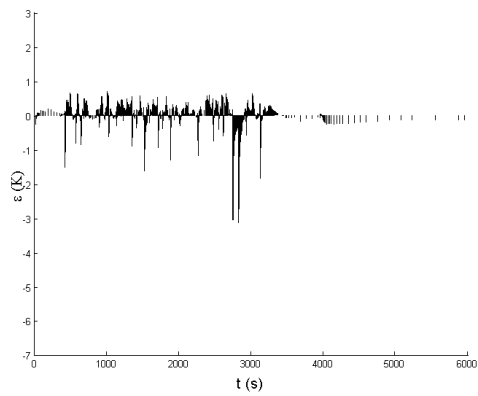
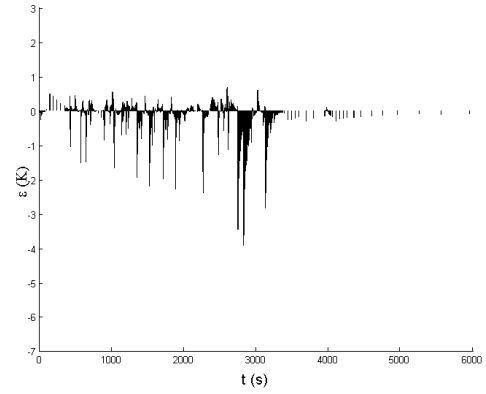
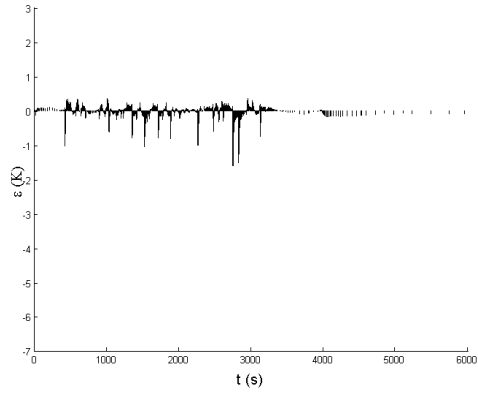
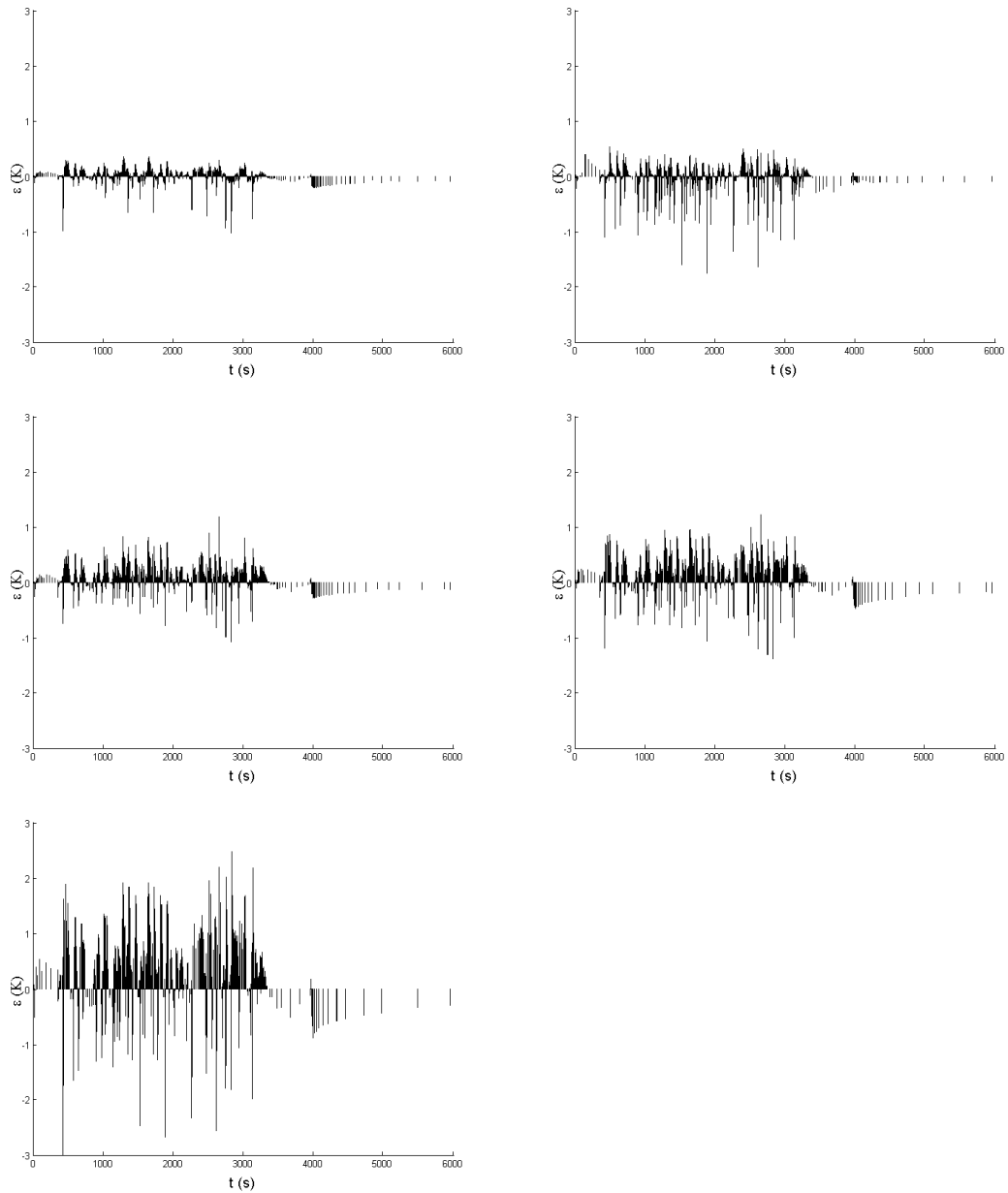


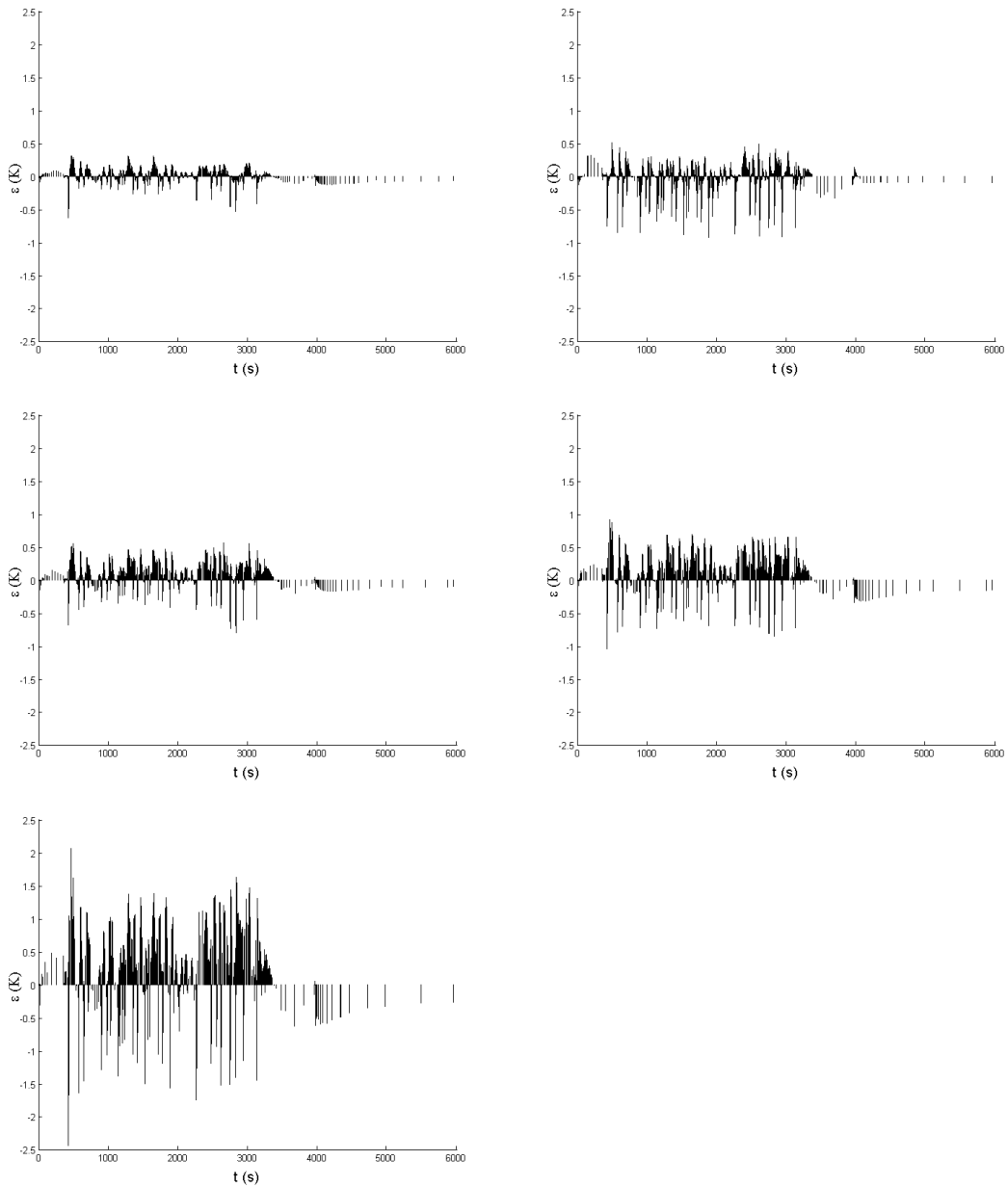
Figura.2 Beräknat temperaturfel för nod 49514. I ordningen LTS, nya, analys 1, analys 2 och analys 3



Figur A.3 Beräknat temperaturfel för nod 42821. I ordningen LTS, nya, analys 1, analys 2 och analys 3



Figur A.4 Beräknat temperaturfel för nod 43299. I ordningen LTS, nya, analys 1, analys 2 och analys 3



Figur A.5 Beräknat temperaturfel för nod 48532. I ordningen LTS, nya, analys 1, analys 2 och analys 3

B Matlab-skript

mmtider.m

Samlar in temperaturresultat och beräknar de globala gradienterna till Volter. Rättare sagt beräknas temperaturskillnader. Även tid från transientstart till extrempunkter beräknas.

```
clear
uppdrag={'m42','m51','m60','m62','m69','m16','m18','m22','m26','m34','m47','m59','m67','m06','m08','m44','m24','m68','m02','m30','m20',
'm04','m56','m64','m65'};

%% Läser in uppdragsdata
%% transient = [starttid sluttid fall/stig-tid totaltid startomega slutomega höjd]
for i=1:length(uppdrag)
    [tw{i} w{i}] = textread(['D:\Termiska_analyser\matlab\Ome2_', uppdrag{i},'.txt'], '%f %f', 'headerlines', 11);
    nr=0;
    rad=1;
    while rad <= length(tw{i}) - 2
        nr=nr+1;
        if w{i}(rad+1) - w{i}(rad) > 0
            transient{i}(nr,1:7) = [tw{i}(rad) tw{i}(rad+2) tw{i}(rad+1)-tw{i}(rad) tw{i}(rad+2)-tw{i}(rad) w{i}(rad) w{i}(rad+2) w{i}(rad+2)-w{i}(rad)];
            rad=rad+2;
        else
            transient{i}(nr,1:7) = [tw{i}(rad) tw{i}(rad+3) tw{i}(rad+2)-tw{i}(rad) tw{i}(rad+3)-tw{i}(rad) w{i}(rad) w{i}(rad+3) w{i}(rad+3)-w{i}(rad)];
            rad=rad+3;
        end
    end
end

%%
% Bolthole Rabbet_Fillet Small_radius Venthole
elementtabell_flasring={ [10348 15427 9998 15423 15463 15420] [13231 13217 13240 13226 15427 9447] [10211 9465 15400 15420 15427 9998]
[15463 9998 15400 15420 10321 10310]};

% Bolthole Rabbet_fillet
elementtabell_blasring={ [10891 7976 15423 7964 15463 7538] [9998 15463 15400 15420 15427 7890]};

% Dovetail Fwd_arpmit Fwd_upper_bolthole Rear_arpmit
Rear_upper_bolthole Bore Fwd_lower_bolthole Fwd_lower_radius Rear_lower_bolthole
elementtabell_htskiva={ [11124 15427 15815 15827 9891 15831] [9998 15463 10211 15427 15409 9772 15423 9998 15463] [9998
15463 10211 15427 15722 15837] [9998 10348 10211 15463 11100 15423] [15262 15227 15230 2806] [2348 15258 1415 15153] [2261 2532 2348
2510] [15265 16345 1208 17829]};

% Airhole Bolthole Bore
elementtabell_tatskiva={ [2348 14535 15153 14012 14559 14032] [15153 2294 2290 2532] [2549 14559 2532 2261]};

% Fwd_bolthole Rear_bolthole
elementtabell_fskaft={ [15879 317 6977 7378] [2611 15153 2510 2290]};

% Fwd_bolthole
elementtabell_bskaft={ [15591 3697 15265 5612]};

elementtabell={elementtabell_flasring elementtabell_blasring elementtabell_htskiva elementtabell_tatskiva elementtabell_fskaft elementtabell_bskaft};

%% Beräknar nodtemperaturer och temperaturskillnader
for i=1:length(uppdrag)
    for j=1:length(elementtabell)
        for k=1:length(elementtabell{j})
            element=num2str(elementtabell{j}{k}(1));
            [t{i} T{i}{j}{k}{1}] = textread(['D:\Termiska_analyser\Analyser\ mapping\', uppdrag{i}, '\tn', element, '.res'], '%f %f', 'headerlines', 2);
        end
        for l=1:length(elementtabell{j}{k})/2
            G{i}{j}{k}{1}=T{i}{j}{k}{2*1}-T{i}{j}{k}{2*1-1};
        end
    end
end
end
```

```

%%%% Beräknar tid in i driftfall där extrempunkter uppstår %%%
for i=1:length(uppdrag)
    m=1;
    transient_index{i}{m}=[];
    for j=1:length(t{i})
        if t{i}(j)>transient{i}(m,2)
            m=m+1;
            transient_index{i}{m}=[];
        end
        transient_index{i}{m}=[transient_index{i}{m} j];
    end

    for j=1:length(elementtabell)
        for k=1:length(elementtabell{j})
            for l=1:length(G{i}{j}{k})
                p=1;
                q=1;
                for m=2:length(transient{i})
                    for n=1:length(transient_index{i}{m})-1
                        if G{i}{j}{k}{l}(transient_index{i}{m}(n))<G{i}{j}{k}{l}(transient_index{i}{m}(n-1)) &
G{i}{j}{k}{l}(transient_index{i}{m}(n))<G{i}{j}{k}{l}(transient_index{i}{m}(n+1))
                            if transient{i}(m,7)>0
                                t_max{i}{j}{k}{l}(p)=transient_index{i}{m}(n);
                                p=p+1;
                            else
                                t_min{i}{j}{k}{l}(q)=transient_index{i}{m}(n);
                                q=q+1;
                            end
                        elseif G{i}{j}{k}{l}(transient_index{i}{m}(n))>G{i}{j}{k}{l}(transient_index{i}{m}(n-1)) &
G{i}{j}{k}{l}(transient_index{i}{m}(n))>G{i}{j}{k}{l}(transient_index{i}{m}(n+1))
                            if transient{i}(m,7)>0
                                t_max{i}{j}{k}{l}(p)=transient_index{i}{m}(n);
                                p=p+1;
                            else
                                t_min{i}{j}{k}{l}(q)=transient_index{i}{m}(n);
                                q=q+1;
                            end
                        end
                    end
                end
            end
        end
    end
end

clear i j k l m n element nr p q rad
save('D:\Termiska_analyser\matlab\mmtider');

```

respid.m

Identifierar respons i utvald nod.

```

clear
load mmtider
load Tk
load T0

tbss={};
Tin={};

for upp_nr=1:length(uppdrag)
    for i=1:length(transient{upp_nr})
        l=num2str(i);
        if upp_nr>18
            tbss_str = textread(['D:\Termiska_analyser\Analyser\', uppdrag{upp_nr}, '\k_', uppdrag{upp_nr}, I, '.mac'], '%s', 'headerlines', 362);
        else
            tbss_str = textread(['D:\Termiska_analyser\Analyser\', uppdrag{upp_nr}, '\k_', uppdrag{upp_nr}, I, '.mac'], '%s', 'headerlines', 363);
        end
        tbss{upp_nr}(i)=str2num(tbss_str{1}(6:length(tbss_str{1})));
    end
    tbss{upp_nr}=tbss{upp_nr}*Tk+T0;
end

koordb(1,1:3)=[-1 -1 -1];
koordc(1,1:4)=[-1 -1 -1 -1];

b=1;

```

```

c=1;
for upp_nr=1:length(uppdrag)
    for i=2:length(transient{upp_nr})
        Tstart=T{upp_nr}{1}{2}{6}(transient_index{upp_nr}{i}(1)-1);
        Tslut=tbss{upp_nr}(i);
        dT=Tslut-Tstart;
        dTdt=(T{upp_nr}{1}{2}{6}(transient_index{upp_nr}{i}(1)-1)-T{upp_nr}{1}{2}{6}(transient_index{upp_nr}{i}(1)-2))/(T{upp_nr}(transient_index{upp_nr}{i}(1)-1)-T{upp_nr}(transient_index{upp_nr}{i}(1)-2));
        ttrans={upp_nr}([transient_index{upp_nr}{i}(1)-1 transient_index{upp_nr}{i}])'-t{upp_nr}(transient_index{upp_nr}{i}(1)-1);
        Ttrans=T{upp_nr}{1}{2}{6}([transient_index{upp_nr}{i}(1)-1 transient_index{upp_nr}{i}]);
        R=(Ttrans-Tstart)/(Tslut-Tstart);
        maxtid=ttrans(length(ttrans));
        dTdtR=(R(length(R))-R(length(R)-1))/(maxtid-ttrans(length(ttrans)-1));
        dTdtR_1=(R(length(R)-1)-R(length(R)-2))/(ttrans(length(ttrans)-1)-ttrans(length(ttrans)-2));
        Tbore=T{upp_nr}{3}{6}{3}(transient_index{upp_nr}{i}(1)-1);
        if transient{upp_nr}(i,7)>0
            finnsTstart=find(koordb(:,3)>0.999*Tstart & koordb(:,3)<1.001*Tstart);
            finns=0;
            for leta=1:length(finnsTstart)
                if abs(koordb(finnsTstart(leta),1)-dTdt)<0.05 & abs(koordb(finnsTstart(leta),2)-dT)<0.5
                    finns=1;
                    plats=finnsTstart(leta);
                end
            end
            if finns==1
                if maxtid>koordb(plats,4)
                    koordb(plats,1:4)=[dTdt dT Tstart maxtid];
                    respb{plats}=[ttrans R];
                end
            else
                koordb(b,1:4)=[dTdt dT Tstart maxtid];
                respb{b}=[ttrans R];
                b=b+1;
            end
        end
        finnsTbore=find(koordc(:,4)>0.999*Tbore & koordc(:,4)<1.001*Tbore);
        finns=0;
        for leta=1:length(finnsTbore)
            if abs(koordc(finnsTbore(leta),1)-dTdt)<0.05 & abs(koordc(finnsTbore(leta),2)-dT)<0.5 & abs(koordc(finnsTbore(leta),3)-Tstart)<0.5
                finns=1;
                plats=finnsTbore(leta);
            end
        end
        if finns==1
            if maxtid>koordc(plats,5)
                koordc(plats,1:5)=[dTdt dT Tstart Tbore maxtid];
                respc{plats}=[ttrans R];
            end
        else
            koordc(c,1:5)=[dTdt dT Tstart Tbore maxtid];
            respc{c}=[ttrans R];
            c=c+1;
        end
    end
end
end
end

fid = fopen('D:\Termiska_analyser\matlab\respb_9447.txt', 'wt');
for i=1:length(respb)
    fprintf(fid, '%0.1f\t %0.5f\n', respb{i});
    fprintf(fid, '%0.1f\t %0.5f\n', [-999 -999]);
end
fclose(fid);

fid = fopen('D:\Termiska_analyser\matlab\koordb_9447.txt', 'wt');
fprintf(fid, '%0.5f\t %0.5f\t %0.5f\t %0.1f\n', koordb);
fclose(fid);

fid = fopen('D:\Termiska_analyser\matlab\respc_9447.txt', 'wt');
for i=1:length(respc)
    fprintf(fid, '%0.1f\t %0.5f\n', respc{i});
    fprintf(fid, '%0.1f\t %0.5f\n', [-999 -999]);
end
fclose(fid);

fid = fopen('D:\Termiska_analyser\matlab\koordc_9447.txt', 'wt');
fprintf(fid, '%0.5f\t %0.5f\t %0.5f\t %0.5f\t %0.1f\n', koordc);
fclose(fid);

```

Tsim.m

Simulerar temperaturen i utvald nod.

```
clear
load Tin_Tnod
load 'D:\Termiska_analyser\matlab\respb_9447.txt'
load 'D:\Termiska_analyser\matlab\respc_9447.txt'
load 'D:\Termiska_analyser\matlab\koordb_9447.txt'
load 'D:\Termiska_analyser\matlab\koordc_9447.txt'
load Tk
load T0

koordb=koordb_9447;
koordc=[koordc_9447(:,1:3) koordc_9447(:,5)];
respb=respb_9447;
respc=respc_9447;

n=1;
m=1;
for i=1:length(respb)
    if respb(i,1:2)=[-999 -999]
        n=n+1;
        m=1;
    else
        Rb{n}(m,1:2)=respb(i,1:2);
        m=m+1;
    end
end

n=1;
m=1;
for i=1:length(respc)
    if respc(i,1:2)=[-999 -999]
        n=n+1;
        m=1;
    else
        Rc{n}(m,1:2)=respc(i,1:2);
        m=m+1;
    end
end

[tw w] = textread(['D:\Termiska_analyser\matlab\Ome2_m40.txt'], '%f %f','headerlines',11);
nr=0;
rad=1;
while rad <= length(tw) - 2
    nr=nr+1;
    if w(rad+1) - w(rad) > 0
        transient(nr,1:7) = [tw(rad) tw(rad+2) tw(rad+1)-tw(rad) tw(rad+2)-tw(rad) w(rad) w(rad+2) w(rad+2)-w(rad)];
        rad=rad+2;
    else
        transient(nr,1:7) = [tw(rad) tw(rad+3) tw(rad+2)-tw(rad) tw(rad+3)-tw(rad) w(rad) w(rad+3) w(rad+3)-w(rad)];
        rad=rad+3;
    end
end

[t Tsann] = textread(['D:\Termiska_analyser\Analyser\mappning\m40\tn9447.res'], '%f %f','headerlines',2);

m=1;
transient_index{m}=[];
for j=1:length(t)
    if t(j)>transient(m,2)
        m=m+1;
        transient_index{m}=[];
    end
    transient_index{m}=[transient_index{m} j];
end

minmaxb=[-4.4167 1.6055; -89.8692 366.7069; 278.15 792.7712];
minmaxc=[-2.3941 8.6107; -278.8603 -7.14; 411.0026 811.7271];

for i=1:3
    koordb(:,i)=(koordb(:,i)-minmaxb(i,1))/(minmaxb(i,2)-minmaxb(i,1));
end
for i=1:3
    koordc(:,i)=(koordc(:,i)-minmaxc(i,1))/(minmaxc(i,2)-minmaxc(i,1));
end
```

```

for i=1:length(transient)
    I=num2str(i);
    tbss_str = textread('D:\Termiska_analyser\Analyser\m40\k_m40', I, 'mac'), '%s', headerlines, 363);
    tbss(i)=str2num(tbss_str{1})(6:length(tbss_str{1}));
end
tbss=tbss*Tk+T0;

Tsim_t{1}=[278.15 278.15 278.15 278.15];
Tstart=278.15;
for i=2:length(transient)
    Tslut=tbss(i);
    dT=Tslut-Tstart;
    dTdt=(Tsim_t{i-1})(length(Tsim_t{i-1}))-Tsim_t{i-1}(length(Tsim_t{i-1}))/((transient_index{i-1})(length(transient_index{i-1}))-
t(transient_index{i-1})(length(transient_index{i-1}))-1));
    tsim=t(transient_index{i})(1)-1-transient_index{i});-t(transient_index{i})(1)-1);
    tsim=0.1*round(10*tsim);
    maxtid=tsim(length(tsim));
    Rval=0;
    if transient(i,7)>0
        koord=[dTdt dT Tstart];
        for j=1:3
            koord(j)=(koord(j)-minmaxb(j,1))/(minmaxb(j,2)-minmaxb(j,1));
        end
        for j=1:length(koordb)
            Rval(j,1:2)=[norm(koord-koorb(j,1:3)) j];
        end
        Rval=sortrows(Rval,1);
        for j=1:length(koordb)
            R=Rb{Rval(j,2)};
            dTdtR=(R(length(R),2)-R(length(R)-1,2))/(R(length(R),1)-R(length(R)-1,1));
            dTdtR_1=(R(length(R)-1,2)-R(length(R)-2,2))/(R(length(R)-1,1)-R(length(R)-2,1));
            if koorb(Rval(j,2),4)>=maxtid
                break
            elseif (koorb(Rval(j,2),4)>50 & dTdtR>0.0001 & dTdtR<0.001) | (maxtid>=koorb(Rval(j,2),4)-10 & maxtid<koorb(Rval(j,2),4))
                k=dTdtR/dTdtR_1;
                dTdtRi=dTdtR*k;
                R0=R(length(R),2);
                tid=R(length(R),1)+0.05;
                while tid<maxtid+4
                    R=[R; [tid R0+3*dTdtRi]];
                    tid=tid+3;
                    if dTdtRi*k>0
                        dTdtRi=dTdtRi*k;
                    else
                        dTdtRi=0;
                    end
                    R0=R(length(R),2);
                end
                break
            end
            end
            R(length(R(:,1)),1)-tsim(length(tsim));
            tsim(length(tsim))-63.1;
            R=interp1(R(:,1),R(:,2),tsim);
        else
            koord=[dTdt dT Tstart];
            for j=1:3
                koord(j)=(koord(j)-minmaxc(j,1))/(minmaxc(j,2)-minmaxc(j,1));
            end
            for j=1:length(koordc)
                Rval(j,1:2)=[norm(koord-koordc(j,1:3)) j];
            end
            Rval=sortrows(Rval,1);
            for j=1:length(koordc)
                R=Rc{Rval(j,2)};
                dTdtR=(R(length(R),2)-R(length(R)-1,2))/(R(length(R),1)-R(length(R)-1,1));
                dTdtR_1=(R(length(R)-1,2)-R(length(R)-2,2))/(R(length(R)-1,1)-R(length(R)-2,1));
                if koordc(Rval(j,2),4)>=maxtid
                    break
                elseif (koordc(Rval(j,2),4)>50 & dTdtR>0.0001 & dTdtR<0.001) | (maxtid>=koordc(Rval(j,2),4)-10 & maxtid<koordc(Rval(j,2),4))
                    k=dTdtR/dTdtR_1;
                    dTdtRi=dTdtR*k;
                    R0=R(length(R),2);
                    tid=R(length(R),1)+0.05;
                    while tid<maxtid+4
                        R=[R; [tid R0+3*dTdtRi]];
                        tid=tid+3;
                        if dTdtRi*k>0
                    
```

```

        dTdtRi=dTdtRi*k;
    else
        dTdtRi=0;
    end
    R0=R(length(R),2);
end
break
end
end
R=interp1(R(:,1),R(:,2),tsim);
end
Tsim_t{i}=Tstart+dT*R;
Tstart=Tsim_t{i}(length(Tsim_t{i}));
end

Tsim=[278.15];
for i=1:length(transient)
    Tsim=[Tsim; Tsim_t{i}(2:length(Tsim_t{i}))];
end

save('D:\Termiska_analyser\matlab\Tm40_9447.txt',Tsim,'-ASCII');

```