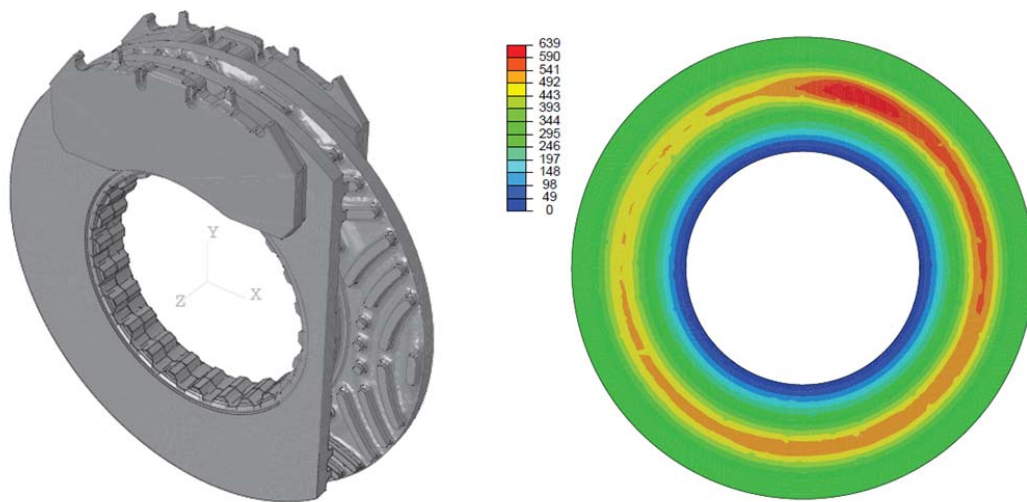


# Termomekanisk simulering och optimering av skivbromssystem



Författare: Staffan Johansson and Per Hasselberg

Date: 2014-08-19

Delprogram inom < Fordons & Trafiksäkerhet >



## Innehåll

<b>1. Sammanfattning</b> .....	<b>3</b>
<b>2. Bakgrund</b> .....	<b>4</b>
<b>3. Syfte</b> .....	<b>5</b>
<b>4. Genomförande</b> .....	<b>8</b>
4.1 Generell projektbeskrivning .....	8
<b>5. Resultat</b> .....	<b>9</b>
5.1 Bidrag till FFI-mål .....	9
5.2 Sammanställning av resultat i referens till den generella projektbeskrivningen .....	10
5.3 Ökning av noggrannheten och effektiviteten för bromsberäkning .....	11
<b>6. Spridning och publicering</b> .....	<b>12</b>
6.1 Kunskaps- och resultatsspridning .....	12
6.2 Publikationer .....	13
<b>7. Slutsatser och fortsatt forskning</b> .....	<b>14</b>
<b>8. Deltagande parter och kontaktpersoner</b> .....	<b>15</b>
<b>9. References</b> .....	<b>15</b>

### FFI in short

FFI is a partnership between the Swedish government and automotive industry for joint funding of research, innovation and development concentrating on Climate & Environment and Safety. FFI has R&D activities worth approx. €100 million per year, of which half is governmental funding. The background to the investment is that development within road transportation and Swedish automotive industry has big impact for growth. FFI will contribute to the following main goals: Reducing the environmental impact of transport, reducing the number killed and injured in traffic and Strengthening international competitiveness. Currently there are five collaboration programs: **Vehicle Development, Transport Efficiency, Vehicle and Traffic Safety, Energy & Environment and Sustainable Production Technology.**

For more information: [www.vinnova.se/ffi](http://www.vinnova.se/ffi)



# 1. Sammanfattning

Bromssystemet är ett viktigt system i alla fordon som måste fungera tillfredställande i alla driftsförhållande i trafik. Skivbromsen är vanligt förekommande i dessa system och används idag även till stor del i bromssystem för tunga fordon. En viktig orsak till detta är att automatisk bromsreglering är enklare att anpassa till skivbromsen än den traditionella trumbromsen. När ett fordon inbromsas transporteras stora effekter i form av rörelseenergi till värme via friktionsförluster mellan skiva och bromsbelägg. Värmeenergin leder till temperaturökningar i systemet som kan vara flera hundra grader i exempelvis bromsskivan. Höga temperaturer eller många stora temperaturcykler kan leda till att systemet tappar bromsförmågan eller mister bromsförmåga. Det senare är självklart ett förlopp som ej får ske i trafik. Bromssystemet måste därför vara tillräckligt robust och tillförlitligt för att utesluta sådana scenarios. Ett väl definierat processfönster för bromssystemet är därför nödvändigt, speciellt vid användningen av automatisk reglering. Idag skapas sådana processfönster uteslutande av fysiska bromsförsök som i stor utsträckning genomförs i bromsrigg. Dessa försök är kostsamma och tar lång tid att genomföra. Det vore önskvärt om försöken kunde kompletteras med datorsimuleringar. Tyvärr är beräkningstiden för lång med standardmetoder som finns i dagens kommersiella mjukvaror. Anledningen finns i den etablerade formuleringen (Lagrange) som används för solida kroppar där det finita elementberäkningsmätet (meshen) följer med kroppen. I fallet med bromsskivan blir det kostsamt att rotera meshen flera varv i kombination med lösning av det termomekaniska friktionsproblemet.

En idé vore att istället formulera skivan med en fixerad mesh (Eulerskt) som typiskt används i fluidmekanik och låta skivan rotera igenom meshen. I detta projekt har denna idé använts för att utveckla en toolbox där värmeutveckling i bromsskiva och bromsbelägg kan studeras virtuellt både effektivt och noggrant. Toolboxen är utvecklad för 3-dimensionell geometri med kontakt, friktion och nötning mellan skiva och bromsbelägg. Friktionsvärmens leds bort med klassisk värmeledning, och skivan och bromsbelägget utvidgas och deformeras med klassisk termoelasticitet. Temperaturhistorik från fysiska bromsförsök är simulerad med toolboxen och mycket god överensstämmelse är erhållen. Ett gränssnitt mot den kommersiella programvaran Abaqus är också utvecklat. Med detta gränssnitt kan temperaturhistoriken från toolboxen användas i Abaqus för att studera termiska restspänningar. För detta ändamål har en temperaturberoende plasticitetsmodell utvecklats som beskriver bromsskivans egenskaper vid olika temperaturer. Simuleringarna visar att positiva dragspänningar i omkretsled utvecklas vid upprepade inbromsningar. Sådana spänningar kan förklara radiella sprickor som kan utvecklas i försök vid hårda upprepade inbromsningar.

Arbetet har även lett fram till en licentiatavhandling, 6 publikationer och 2 abstracts i konferenser.



Den ansvariga professorn i detta projekt initierade projektet under Jönköpings Tekniska Högskola (JTH). På grund av en dispyt mellan ledningen för JTH och den ansvariga professorn avslutades den ansvariga professorns tjänst på JTH innan projektet färdigställdes. Därmed är ej samtliga projektmedel förbrukade, projektmålen är heller ej till fullo uppfyllda. Trots ovan nämnda omständigheter har den ansvariga professorn lyckats leverera projektresultat i betydande omfattning vilket den industriella parten i detta projekt är mycket nöjda med. Del 2 av detta projekt har initierats vid Högskolan Väst och följer den ursprungliga planen (diariennr. 2012-00046).

## 2. Bakgrund

Flera "intelligenta" aktiva säkerhetssystem har utvecklats de senaste åren, denna utveckling kommer mest sannolikt att fortsätta i framtiden. Många av dessa "intelligenta" system använder bromsen på olika sätt, som kontrolleras av algoritmer som använder mätsignaler som beskriver hastighet, hjulslip, GPS-signal, avstånd (radar, laser) etc. Exempel på dessa system är Electronic Brake System (EBS), Adaptive Cruise Control (ACC) där föraren ställer in önskad hastighet och om ett fordon kommer för nära framför bilen bromsas automatiskt fordonet, köassistens där föraren får hjälp i bilköer, bromsregleralgoritmer etc.

Aktiva säkerhetssystem som påverkar bromsens användande kommer att utsätta skivbromskomponenter för en ny typ av belastningscykel (t.ex. att värmebelastningen på bromsskivan förändras). Detta kan medföra att de rådande konstruktionskriterierna kan komma att behöva uppdateras. Det krävs förbättrad kunskap om de bakomliggande mekanismerna för värmeskivsprickor och om komponenternas utmattningshållfasthet etc. Det krävs också kunskap om vilken typ av driftsfall de aktiva säkerhetssystemen påverkar (och hur dessa påverkas) primärt för utveckling av bromskomponenter men också framåt för att till fullo kunna utnyttja den fulla potentialen i framtida aktiva säkerhetssystem. Flera tidigare studier, examensarbete samt projektarbete på Volvo har visat på vikten av kunskap inom termiska aspekter och bromsprestanda och komponentlivslängd och hur i vilken utsträckning nya aktiva säkerhetssystem påverkar utformningen av bromsarnas hårdvara.

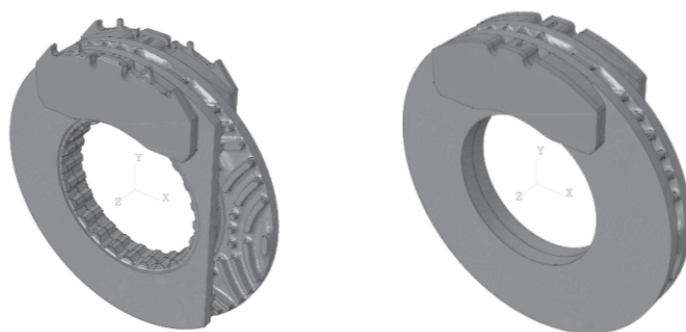
Valideringsdelen inom utvecklingsprocessen i ett skivbromssystem är mycket kostnadskrävande, detta på grund av omfattande riggtester som krävs. På grund av komplexiteten i skivbromssystem kan det vara svårt att kvantifiera samtliga viktiga parametrar som är mycket viktiga för ökad förståelse i ett riggprov. Sett ur ett längre perspektiv kan det framåt vara svårt att analysera de effekter som olika aktiva säkerhetssystem ansätter bromssystemet för i vanliga testriggar.

De ingående komponenterna i skivbromsen som beaktas i detta arbete visas i Figur 1, Vänster, i figuren visas en snittvy av skivan för att bättre beskriva dess interna design



(patenterad [1]). Detta är de ingående komponenterna i ett skivbromssystem för en Volvolastbil (dock alla komponenter i bromssystemet inte medtagna i Figur 1).

Ytan på den inre periferin på skivan används för att montera skivan till hjulnavet genom mha. ett splinesförband. Vid simuleringen av friktionsuppvärmningen är splinesförbandet ej beskrivet eftersom förbandet antas ha liten effekt på värmetransporten, man har således valt att förenkla modellen på detta vis. Likaså har även viss form av bromsbelägget förenklats. Den förenklade modellen av bromssystemet visas i Figur 1, Höger.



**Figur 1. Vänster: Ingående komponenter i skivbromsen. Höger: Ingående komponenter i skivbromsen sett från ett simuleringsperspektiv där komponenternas geometrier är något förenklade**

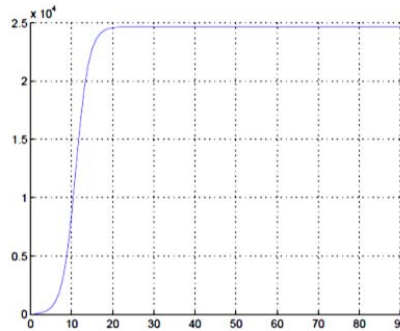
### 3. Syfte

Detta projekt ämnar analysera den värme som alstras vid bromsning; prediktion av värmeökningen, konsekvenserna av ökad temperatur på komponenter och ökad termisk cykling samt hur denna värmeenergi kan hanteras ur ett designperspektiv. Den inre temperaturen i bromsskivan kan snabbt öka redan vid relativt låg broms användning. Detta kan exemplifieras med följande händelseförlopp: Förmoda en bromsapplikation med en varaktighet på 20 s vid ett bromstryck som endast uppgår till 10% av det maximala bromstrycket. Förmoda att denna bromsapplikation upprepas fem gånger med 60 s ”kylningstid” mellan bromstillämpningarna. Den initiala temperaturen antas vara 100 ° C vilket anses som en typisk arbetstemperatur. Efter 1:a applikationen är bromsskivans temperatur är 160° C, efter 2:a 220° C, efter 3:e 250° C, efter 4:e 340° C och efter den 5:e 400° C. Som angivits ovan, är dessa de interna skivtemperaturen. Det är det dock inte i kärnan av bromsskivan som utmattningssprickorna initieras; det är på ytan av skivan. Temperaturen på ytan kommer att vara betydligt högre för bromsförfarandet som angetts ovan; närmare bestämt 625° C efter den 5:e iteration.

De senaste årens utveckling har givit en stor ökning av beräkningskraft vilket har öppnat nya möjligheter för avancerade datorbaserade simuleringar. I dag används det fullt kopplade Lagrange-strategin i kommersiell programvara för att simulera friktionsuppvärmning av skivbromsar. Med detta angreppssätt roteras det finita element-rutnätet (meshen) som beskriver bromsskivan relativt den mesh som beskriver bromsbelägget. Vid detta förfarande utförs den termiska och mekaniska analysen

samtidigt. Även om detta tillvägagångssätt fungerar bra är det inte praktiskt möjligt att använda på grund av extremt långa beräkningstider. För att lösa problemet med de långa beräkningstiderna har en sekventiellt kopplat angreppssätt använts, i detta utförs den termiska och den mekaniska analyserna sekventiellt. En ”in-house”-programvara har utvecklats vilken den termiska analysen m.h.a. ett Eulerskt beräkningsrutnät, i detta roterar inte bromsskivans meshen i förhållande till bromsbelägget, istället strömmar materialet genom meshen. Temperaturhistoriken från analysen av friktionsvärme används som input i en kopplad spänningsanalys som utförs i den kommersiella programvaran Abaqus. Denna sekventiella metod kräver betydligt lägre beräknings tid jämfört med den ovan nämnda Lagrange-strategin.

Utvecklingen av mjukvaran var uppdelat i *två delar*; I den *första delen* har den interna programvara utvecklats för att utföra termisk analys av en bromsskiva. I denna analys tillämpas inte bromskraften momentant utan den ”rampas” upp med hjälp av en log-sigmoid funktion. Figur 2 visar en typisk upprampning av bromskraften.



Figur 2. Upprampning av bromskraft vid termiskt analys

På grund av de högt påkända driftscyklerna för bromsen kan radiella makrosprickor initieras bromsskivan [II, III]. Det är därför viktigt att studera hur en bromsskiva är påkänd och slutligen uppskatta dess utmattningstidslängd. I den *andra delen* har de termiska spänningar för bromsskivan analyserats. Analysresultaten visar att under hård inbromsning genereras tryckspänningar i omkretsriktningen på skivyten som orsakar plasticering. När sedan skivan svalnar omvandlas dessa tryckspänningar till dragspänningar. För upprepad bromsning de denna form av spänning-töjning upprepas genereras (efter en viss tid) spänningar med mycket hög amplitud som möjligvis kan generera lågcykelutmattning med propagerande utmattningssprickor som följd.

För spänningsanalysen analyseras först mängden friktionsvärme som produceras. Detta analys har visat att s.k. ”hot band” dvs. ring(ar) av höga v höga temperaturer kan urskiljas i mitten av skivyten. I denna simulering har en bromskraft av 24,5 [kN] appliceras i 20 [s] på den bakre ytan av bromsbelägget. Vinkelhastigheten för skivan är 45 [rad/s], denna hålls konstant genom hela simuleringförloppet. Bromskraften rampas upp med hjälp av en log-sigmoid funktion under 20 tidssteg och sedan hålls konstant under de kommande 80 beräkningssteg med tidssteg  $t = 0.2$  [s]. Detta lastfall motsvarar en lastbil som bromsar (men håller en konstant hastighet) i en nerförsbacke. Friktionskoefficienten i beräkningen

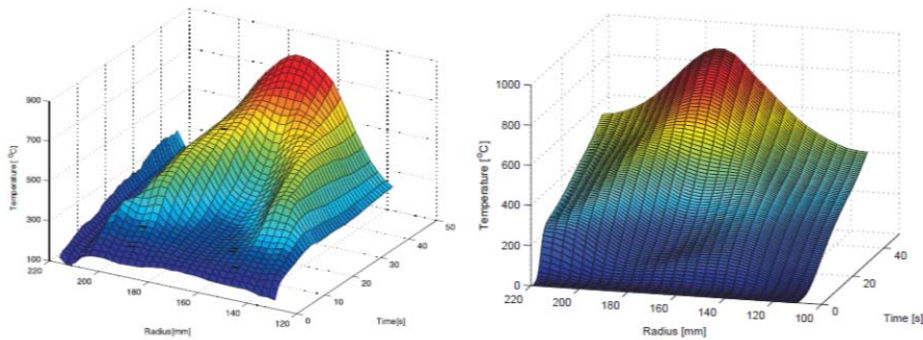


är  $\mu = 0.3$  konduktanskoefficienten satt till  $\varphi = 0.1$  [W/NK] och konvektionskoefficienten sätts till 50 [W/m<sup>2</sup>K]. Efter bromsning kyls bromsskivan i 5000 [s] med ett tidssteg på 5 [s], efter denna tid nås ursprungstemperaturen. Temperaturer som beräknats fram importerats till den kommersiella programvaran Abaqus i vilken spänningsanalys utförs. För upprepad bromsning antas det att förhållandena är lika vid bromsningen oavsett om det är en upprepning eller om det är den första bromsningen som utförs, detta medför att de temperaturer som beräknas fram kommer att vara likartade för samtliga upprepningar. Resultaten från simuleringen visar att den termiska spänningsökningen ger en större amplitud än spänningsökningen som beror av mekanisk påkänning. Detta kan förklaras av den temperaturberoende värmeutvidgningskoefficient. De ovan nämnda spännings-töjnings cyklerna kan ge upphov till lågcykelutmattning vilket kan generera radiella sprickor på bromsskivan.

Efter beräkningen de ingående spänningarna kan livslängden räknas fram för bromsskivan. Detta bygger dock på att materialparametrarna som beskriver utmattningshållfasthet är kända. Eftersom att det är uppenbart att materialet på skivans yta genomgår betydande plastisk deformation krävs en beräkningsmetod som tar spänning-töjningsförloppet i beaktande, detta är nödvändigt om det skall vara möjligt att förutsäga bromsskivans utmattninglivslängd. En sådan studie har genomförts i detta projekt genom att använda den modellen/ekvationen framtagen av Coffin-Manson. Materialparametrarna i denna studie erhöles från litteraturen. Det resulterande termiska beteendet och hur temperaturökningen formmässigt på bromskomponenterna finns beskriven i resultatkapitlet.

Slitage på ett bromsbelägg ser kanske inte ut att spela en stor roll då endast en broms cykel analyseras, men ackumulerat slitage under flertalet broms cykler påverkar temperaturfördelningen och därmed påverkas även det termomekamekaniska beteendet för bromsskivan. För att studera hur slitaget för bromsbelägget utvecklades togs en simuleringsmodell fram, i denna modell användes samma parametrar som för modellen i föregående stycken (bromskraft, tid för bromsning, vinkelhastighet, friktionskoefficient, slitage koefficient, konduktans koefficient och konvektiv koefficient). Totalt analyserades 40 bromsansättningar i vilka bromsbeläggets slitage analyserades kontinuerligt. Resultatet från denna beräkning visade att slitaget blev koncentrerat mitt på bromsbelägget, detta möjliggör de s.k. "hot bands". Intuitivt kan det tänkas att slitaget bör vara större mot den yttre kanten av bromsskivan men beräkningsresultatet visar att slitaget koncentreras runt mitten av dynan yta.

Som ett led i valideringen av den utvecklade simuleringsmetoden har temperaturerna som predikterats m.h.a. "in-house"-programvaran jämförts med de temperaturer som mätts m.h.a. värmekamera under ett fysiskt test. Den mätta temperaturen visade sig vara något högre än den framräknade temperaturen, se Figur 3. Med hjälp av värmekamera var det möjligt att validera den specifika temperaturvariation, de s.k. "hot bands". Som framgår av figuren bekräftas två "hot bands", återkommande både i simuleringsresultatet och mätningen, dock var det termiska fenomenet något mer distinkt i mätningen jämfört med simuleringsresultatet.



**Figur 3. Temperatur plottad som en funktion av tid och bromsskivageometri (radie)**Vänster: Mätresultat från värmekamera mätt i bromsdynamometer. Höger: Resultat från jämförbar bromssimulering

De observerade skillnaderna kan bero på ofullständiga parametrar såsom materialdata, friktionskoefficient och slitagekoefficient. För mer realistiska resultat bör temperaturberoende materialdata användas, se Slutsatser och framtida arbete avsnitt för mer detaljer kring detta.

## 4. Genomförande

### 4.1 Generell projektbeskrivning

På grund av projektets komplexitet projektet delades upp i fyra faser.

#### Fas Ett

I fas Ett skapades den globala modellanalysen av skivbromssystemet m.h.a. modellering, definiering av randvillkor etc. Korrelation mellan simulerade och uppmätta resultaten sker på en global nivå, t.ex. genom att liknande termiska mönster på bromsskivans yta och jämförbara temperaturnivåer inom väl definierade områden uppnås. I denna del har flera parametrar studerats såsom beteendet friktionsegenskaperna mellan bromsskiva och bromskloss, egenskaper för omfördelning av den termiska belastningen, ledning och konvektion. Komplexiteten ökar ytterligare på grund av materialegenskaper som ev. är temperaturberoende. För att kunna lösa FE beräkningar effektivt skapades en egen programvara, denna programvara har sedan vidareutvecklats och används i alla faser.

#### Fas två

Nu när den globala simuleringsmodellen väl var korrelerad mot fysiska tester fortsätts arbetet i Fas Två med att bygga upp detaljkunskap om friktionsvärme, värmespanningar, skivsprickor och utmattningslivslängd, slitage på skiva bromsbelägg. För en fullständig av förloppet är det även viktigt att ta tillverkningsaspekter i beaktande, t.ex.





restspänningar. Under en broms cykel kan restspänningar lättas upp vilket bidrar till en osymmetrisk deformation av bromsskivan.

### **Fas tre**

Med den djupare kunskap som erhållits i Fas Två, initierades Fas Tre i undersökning om sambandet mellan termiska spänningar, materialparametrar, slitage etc. för att ta reda på vad vilka parametrar som möjliga att optimera. Huvudfokus kommer att ligga på optimering av de mest signifikanta parametrarna, t.ex. utmattningstidslängd. Denna analys kommer att grunda sig i optimering av responsytor.

### **Fas fyra**

Fas fyra har mer eller mindre bara inletts i detta projekt. Det huvudsakliga arbetet är avsett för fortsättningsprojektet, 2012-00046. I det pågående projektet utfördes fåtalet simuleringar av bromssekvenser i Volvos bromssimuleringstestrigg. Dessa analyser genererade de mest signifikanta indataparametrarna (fordonets hastighet, bromstrycks, etc.) som användes i de termiska FE beräkningar.

## **5. Resultat**

Resultaten är indelade i tre sektioner, (1) Bidrag till FFI-mål som specificerar resultaten enligt målen för <Fordons & Trafiksäkerhet> programmet, (2) Sammanställning av resultat i referens till den generella projektbeskrivningen och (3) Ökning av noggrannheten och effektiviteten för bromsberäkning som ger en ögonblicksbild av de resultat som är av största akademiska relevans.

### **5.1 Bidrag till FFI-mål**

Detta projekt kommer att bidra till en del av de mål som fastställs för <Fordons & Trafiksäkerhet> program. I det långa loppet kommer förvärvade kunskaper från detta projekt resultera i förbättrad bromsprestanda (t.ex. kortare stoppsträcka)

Volvos erfarenhet av aktiva säkerhetssystem som använder bromsen är att automatiska system kommer att generera en annan typ av energifördelning jämfört med "manuell" bromsning av erfarna förare. Följaktligen kommer de mekaniska komponenter som idag används för ett visst lastspektrum kan tvingas, tack vare de aktiva säkerhetssystemen arbeta i ett betydligt mer påkänt lastspektrum. För att illustrera detta låt oss anta att ett ACC-systemet kommer att leda till en ökad framtida lastspektrum. För att möjliggöra täckning av nämnda ökad belastning man skulle välja mellan två alternativ; (1) designa skivbromskomponenter och omgivande komponenter för att förbättra kylningsprestanda med motsvarande den temperaturökning som orsakas av högre belastning eller (2) skaffa



sig kunskap om de olika fenomen som är påverkar energitransporterna i bromssystemet och vad som styr bromsens prestanda och dess egenskaper. Det första alternativet ger begränsade förbättringar (men det är givetvis tänkbart att kombinera alternativ 1 och 2). Om det andra alternativet efterföljs ger detta förutsättningen att tillgodogöra och förstå beteendet hos de olika fenomen som skivsprickor, termisk utmattning etc. Med kunskap kan komponenternas utformning till en större grad skapa en större grad av temperaturbeständighet. Sammantaget har det huvudsakliga resultatet av detta projekt varit att öka kunskapen om hur man designar mer robusta och tillförlitliga skivbromskomponenter för att konstruera komponenter som med de rätta säkerhetsmarginalerna mot termiska fenomen och för att tillåta de aktiva säkerhetssystemen att använda bromsen i önskvärd omfattning.

Den kunskap som erhållits i detta projekt kommer att tjäna som grund för kommande aktiva säkerhetssystem i vilka där bromsarna används. Följaktligen kommer kunskap från detta projekt att öppna upp för möjligheten till nya eller förbättrade aktiva säkerhetssystem t.ex. EBS, ESP, ACC, queue support etc.

Detta projekt har fungerat som en mycket viktig del i att bygga upp samarbetet mellan industri och universitet gällande datorbaserad analys av skivbromssystem och virtuell validering av skivbromssystem kopplade till aktiva säkerhetssystem.

Virtuell testning av skivbroms-cykler med olinjär FE har utförts i detta projekt. Det är tydligt att termomekanisk analys av FE-analys kan användas för att simulera olika fenomen som förekommer i en broms-cykel.

Ett långsiktigt mål i detta och kommande projekt är att initiera studier i s.k. ”optimisation driven design” för skivbromssystemet. Den traditionella designprocessen kan i detta sammanhang benämnas som iterativ/intuitivt, i denna typ av process görs manuella (iterativa) designförändringar som inte bygger på slutsatser eller trender från avancerat beräkningsunderlag.

## **5.2 Sammanställning av resultat i referens till den generella projektbeskrivningen**

Eftersom omfattningen av detta projekt länkar till ett eventuellt framtida projekt ingår båda projekt ingår i denna sammanfattning.

”Bas” projekt (diariernr. 2009-00086))

- Grundforskning, ökning av generell kunskapsnivå → **Basplattform**
- Numerisk plattform, simulation-toolbox för robusta and effektiva simuleringar

Fortsättningsprojekt (diariernr. 2012-00046))

- Detaljerade studier av parametrar och mekanismer
- Förbättrad korskoppling med bromssimuleringstriggen
- **Implementering** av de utvecklade metoderna och kunskapens i design- och valideringsprocessen

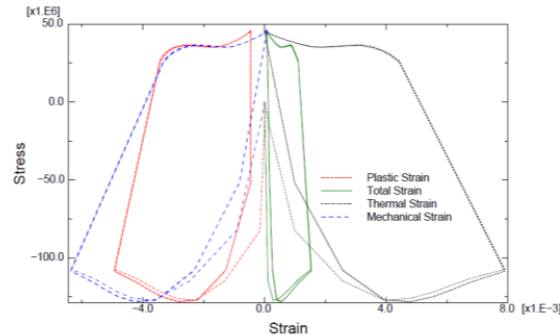
	Pågående (diariernr. 2009-00086)		Fortsättning (diariernr. 2012-00046)	
	Uppfyllande av planerat	Uppfyllande av totalt scope	Uppfyllande av planerat	Uppfyllande av totalt scope
Fas Ett				
Fas Två				
Fas Tre				
Fas Fyra				

Figur 4. Sammanfattning av projektplanen (innehållande dess fyra faser) och dess fullföljande

### 5.3 Ökning av noggrannheten och effektiviteten för bromsberäkning

En komplett simuleringmodell, dvs termisk analys och spänningsanalys som endast kräver en bråkdel av beräkningstiden jämfört med samma analys som utförs i kommersiell mjukvara baserad på Lagrange ramverk har utvecklats i detta projekt. Resultatet från simuleringen och dess spänningsanalys visar att under hård inbromsning skapas stora tryckspänningar i skivans omkretsledd som ger plasticering av bromsskivans yta. Efter bromsapplikationer då bromsskivan svalnar omvandlas dessa tryckspänningar till dragspänningar. Vid upprepade bromsningar när denna form av spänning-töjningsförlopp återupprepas skulle dessa spänningscykler med höga amplituder kunna generera lågcykelutmattning med sprickpropagering som följd.

I Figur 6 exemplifieras de olika spänningarna i bromsskivan i omkretsledd som inträder vid upprepade bromsningar. Det kan konstateras att den termiska töjningen har större total amplitud jämfört med den mekaniska töjningen ( $\epsilon^c + \epsilon^p$ ), den termiska töjningen ger därav ett större bidrag till den totala töjningen. Formen på detta diagrammen kan förklaras av den temperaturberoende termiska expansionskoefficienten och von Mises materialmodell. Denna typ av spännings-töjningscykler kan generera radiella sprickor efter relativt få bromsningar orsakade av lågcykelutmattning.



Figur 5. Fyra olika beskrivningar av spännings-töjningsförloppet i en bromsskiva orsakade av tre upprepade bromsansättningar.

Det är viktigt att poängtera hur tidseffektivt det utvecklade simuleringsförfarandet är, för att exemplifiera denna effektivitet beskrivs här den beräkningen som utfördes i kapitel 3. Den totala CPU-tid för denna beräkning var 3.05 [h] (beräkning av friktionsvärme) och 5,54 [h] (spänningsanalysen). Beräkningen utfördes på en arbetsstation med Intel Xeon X5672 3,20 GHz processor. Som jämförelse gjordes samma simulering av samma bromscykel med ett kommersiellt program, denna beräkning utfördes på samma arbetsstation. I denna senare beräkning applicerades bromskraften tillämpades endast i 0,1 [s]. Förutom detta användes samma randvillkor som i den sekventiella metoden. Efter bromsningen beräknades inte det termiska förloppet för bromsskivans kylning. Den totala CPU-tid för analysen var 40.12 [h]. Detta visar att det krävs en enorm mängd beräkningstid/kraft om Lagrange-strategin skall tillämpas på denna typ av problem. För en exakt upprepning av bromsberäkningen i denna rapport (20 s bromsapplicering 60 s kylning) skulle en totalt beräkningstid om ca 8024 [h] krävas förutsatt att Lagrange-strategin använts.

## 6. Spridning och publicering

### 6.1 Kunskaps- och resultatsspridning

Sett utifrån både ett akademiskt och industriellt perspektiv är resultatet från denna utvecklade bromsberäkningen mycket användbart. Till dags dato har man kunnat verifiera resultatet från beräkningar i industriella bromsprov som är utförda i bromsdynamometern i Göteborg. Man har dvs. kunnat återskapa fenomen i bromsberäkningen som bland annat har kvantifieras med hjälp av värmekamera i faktiska prov. Genom att använda den utvecklade koden och kombinera detta med försöksplanering (vilket praktiskt endast är realiserbart då beräkningstiden har minskat avsevärt) med specifik optimeringsteknik kommer det framåt vara möjligt att konstruera bromsar som ger maximerad prestanda (utmattningshållfasthet samt bromsad effekt) och samtidigt en minimerad vikt. Den utvecklade beräkningsmetoden återger en detaljerad bild över temperaturvariationerna, att kunna återge temperaturvariationerna på ett illustrativt sätt är en direkt



kunskapsuppbyggande form vilken är åtråvärd inom produktutveckling, p.g.a. flertalet orsaker kan temperaturvariationen i ett fysiskt prov vara svåra att återge med samma grad av komplexitet/detaljrikedom.

Volvo har haft direkt kunskapsutbyte med den utförande parten i form av:

- Utbildningstillfällen där den utförande parten har praktiskt och teoretiskt visat hur de utvecklade programvarorna används. Den utvecklade mjukvaran har använts inom Volvo, i dagsläget är detta i en testfas. Utbyte i form av provresultat från avancerad komponentprovning (bromsdynamometer) samt diskussioner om de bakomliggande orsakerna som styr temperaturer i bromskomponenter. Detta har höjt den teoretiska kunskapen inom Volvo till en betydligt mer detaljerad nivå.
- Utöver kunskapsutbytet inom Volvo har Niclas Strömberg representerat projektet på flertalet konferenser och seminarier samt handlett ett flertal examensarbetare

## 6.2 Publikationer

M. Hofwing, Robustness of residual stresses in brake discs by meta modeling, in the proceedings of IDETC/CIE 2011, ASME, Washington, 2011.

N. Strömberg, Development and Implementation of an Eulerian Approach for Efficient Simulation of Frictional Heating in Sliding Contacts, in the proceedings of the IV International Conference on Computational Methods for Coupled Problems in Science and Engineering, Eccomas, 20-22 June, Kos, Greece, 2011.

N. Strömberg, An Eulerian Approach for Simulating Frictional Heating in Disc-Pad Systems, European Journal of Mechanics, A/Solids, 30, 673683, 2011.

N. Strömberg, Simulering av bromsvärme i en skivbroms med en Eulerformulering, Svenska Mekanikdagar, June 13-15, Gothenburg, Sweden, 2011.

N. Strömberg, An Eulerian approach for simulating frictional heat bands in rotating discs, Euromech 514: New trends in contact mechanics, 27-31 March, Corsica, France, 2012.

N. Strömberg & A. Rashid, An Efficient Sequential Approach for Simulation of Thermal Stresses in Disc Brakes, in the proceedings of the 15th Nordic Symposium on Tribology, NORDTRIB, Trondheim, Norway, 12-15 June, 2012.

A. Rashid & N. Strömberg, Sequential Simulation of Thermal Stresses in Disc Brakes for Repeated Braking, Journal of Engineering Tribology, accepted, 2013.

A. Rashid & N. Strömberg, Thermomechanical Simulation of Wear and Hot Bands in a Disc Brake by adopting an Eulerian approach, in the proceedings of Eurobrake 2013, 17-19 June, Dresden, Germany, 2013.

## 7. Slutsatser och fortsatt forskning

I den andra fasen av detta arbete har det termiska spänningsförloppet beräknats för bromsskivan. En fullständig simulering, dvs termisk analys och stress analys som endast kräver en bråkdel av tiden i jämförelse med samma analys som utförs i kommersiell programvara baserat på Lagrange-ramverk har utvecklats i detta arbete. Resultatet från simuleringen och dess spänningsanalys visar att under hård inbromsning skapas stora tryckspänningar i skivans omkretsledd som ger plasticering av bromsskivans yta. Efter bromsapplikationer då bromsskivan svalnar omvandlas dessa tryckspänningar till dragspänningar. Vid upprepade bromsningar när denna form av spänning-töjningsförlopp återupprepas skulle dessa spänningscykler med höga amplituder kunna generera lågcykelutmattning med sprickpropagering som följd.

Huvudpunkten i detta projekt har varit att öka förståelsen för de termiska egenskaperna för ingående komponenter i bromssystemet. Framåt skulle det vara önskvärt att inkludera fler komponenter i simuleringsmodellen i t.ex. splinesförbandet vid den inre skivans periferi samt en mer detaljerad modell av bromsbeläggets geometri (back plate). I en framtida simuleringsmodell skulle det även vara önskvärt att inkludera närliggande komponenter såsom navet och hjullagret, både för att få en mer detaljerad modell av det termiska flödet och även kunna få möjlighet att studera termiska egenskaper på angränsande komponenter som bromsen påverkar (termiskt).

I denna studie förenklades bromsförloppet (såsom t.ex. nämns i bakgrund) med en konstant frekvens på 20 s bromsning som efterföljdes av 60 s kylning. Detta är inte en exakt återgivning av en bromscykel, ett givet nästa steg vara att använda en mer komplicerad cykel som ”spelats in” i ett befintligt fordon. Simulering av en mer komplicerad cykel kan kräva en anpassning av iterationen algoritmer, mer specifikt det tidsinkrement / tidssteg som används för en bromsning och kylningscykel .

Funktionsdugligheten för dessa parametrarna som ingår beräkningsmodellen bör analyseras djupare:

Friktionskoefficienten för ett bromsbelägg är generellt beroende av temperatur, hastighet och kontakttryck [IV], i denna simulering har dock ett konstant värde på  $\mu = 0,3$  antagits för att representera/efterlikna ett genomsnittligt beteende. På samma sätt är nötningskoefficienten beroende av temperatur och hastighet [V, VI]. I detta arbete antas dock en konstant nötningskoefficient på  $10^{-10}$  [ $\text{m}^2 / \text{N}$ ]. Det finns mest troligen ett start beroende mellan starkt beroende mellan temperatur och nötningskoefficienten, särskilt vid höga temperaturer [V, VI]. För framtida simuleringar är det önskvärt att mäta ett representativt värde av nötningskoefficienten för ett givet bromsbelägg. Dessutom görs



idag antagandet att den konvektiva koefficienten är samma för alla ytor, detta antagande kan förfinas avsevärt.

I spänningsanalysen har en materialmodell använts som antar samma materialbeteende oavsett drag- eller tryckspänning, i verkligheten gjutjärn har olika egenskaper för drag och tryckpåkänning. Materialdatan för det gjutjärn som har använts bör också förfinas, speciellt gällande egenskaper relaterade till utmattning.

## 8. Deltagande parter och kontaktpersoner



**Per Hasselberg** (Project leader),  
[per.hasselberg@volvo.com](mailto:per.hasselberg@volvo.com),  
031-32281 26  
**Staffan Johansson**,  
[staffan.sj.johansson@volvo.com](mailto:staffan.sj.johansson@volvo.com),  
031-322 99 66



**Niclas Strömberg** (Supervision), -, -  
**Asim Rashid** (PhD student),  
[asim.rashid@jth.hj.se](mailto:asim.rashid@jth.hj.se), 036-10 16 98

## 9. Referenser

- 
- [I] J. Hulten and I. Dagh. Brake disc for a vehicle disc brake, August 29 2006. US Patent 7,097,010.
  - [II] D.J. Kim, Y.M. Lee, J.S. Park, and C.S. Seok. Thermal stress analysis for a disk brake of railway vehicles with consideration of the pressure distribution on a frictional surface. *Materials Science and Engineering A*, 483-484(1-2 C):456459, 2008.
  - [III] F. Bagnoli, F. Dolce, and M. Bernabei. Thermal fatigue cracks of fire fighting vehicles gray iron brake discs. *Engineering Failure Analysis*, 16(1):152163, 2009.
  - [IV] A. Heussa, L. Dubar, T. Tison, M. Watremez, and R.F. Nunes. A methodology for the modelling of the variability of brake lining surfaces. *Wear*, 289:145-159, 2012.
  - [V] U.S. Hong, S.L. Jung, K.H. Cho, M.H. Cho, S.J. Kim, and H. Jang. Wear mechanism of multiphase friction materials with different phenolic resin matrices. *Wear*, 266(7-8):739-744, 2009.
  - [VI] A. Saffar, A. Shojaei, and M. Arjmand. Theoretical and experimental analysis of the thermal, fade and wear characteristics of rubber-based composite friction materials. *Wear*, 269(1-2):145-151, 2010.

