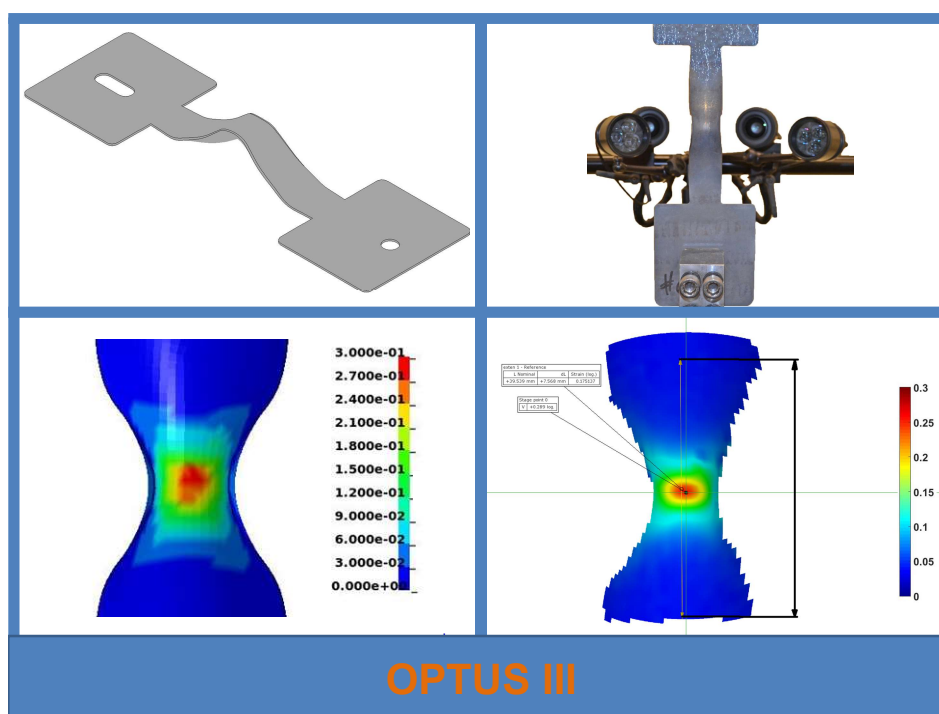


# Implementation and validation of multiphase steel failure models for crash analyses – OPTUS III

Publik rapport



Författare: Mats Oldenburg  
Datum: 2018-11-15  
Projekt inom Hållbar produktion

**FFI** Fordonsstrategisk  
Forskning och  
Innovation

VINNOVA

Energimyndigheten

TRAFIKVERKET

FKG

VOLVO

SCANIA

VOLVO

# Innehållsförteckning

|                                                     |           |
|-----------------------------------------------------|-----------|
| <b>1 Sammanfattning .....</b>                       | <b>3</b>  |
| <b>2 Executive summary in English.....</b>          | <b>3</b>  |
| <b>3 Bakgrund.....</b>                              | <b>4</b>  |
| <b>4 Syfte, forskningsfrågor och metod .....</b>    | <b>4</b>  |
| <b>5 Mål .....</b>                                  | <b>4</b>  |
| <b>6 Resultat och måluppfyllelse .....</b>          | <b>5</b>  |
| 6.1 Måluppfyllelse.....                             | 5         |
| 6.2 Resultat .....                                  | 5         |
| <b>7 Spridning och publicering .....</b>            | <b>9</b>  |
| 7.1 Kunskaps- och resultatspridning .....           | 9         |
| 7.2 Publikationer.....                              | 9         |
| <b>8 Slutsatser och fortsatt forskning .....</b>    | <b>10</b> |
| <b>9 Deltagande parter och kontaktpersoner.....</b> | <b>10</b> |

## Kort om FFI

FFI är ett samarbete mellan staten och fordonsindustrin om att gemensamt finansiera forsknings- och innovationsaktiviteter med fokus på områdena Klimat & Miljö samt Trafiksäkerhet. Satsningen innebär verksamhet för ca 1 miljard kr per år varav de offentliga medlen utgör drygt 400 Mkr.

För närvarande finns fem delprogram; Energi & Miljö, Trafiksäkerhet och automatiserade fordon, Elektronik, mjukvara och kommunikation, Hållbar produktion och Effektiva och uppkopplade transportsystem. Läs mer på [www.vinnova.se/ffi](http://www.vinnova.se/ffi).

# 1 Sammanfattning

Den dominerande tekniken för lättviktsdesign av bilstrukturer bygger på presshårdning. Tekniken är en Svenskt innovation och har utvecklats till en global teknik med Sverige fortfarande som världsledande inom forskning och industriell utveckling. Drivkrafterna är minskade utsläpp och ökad fordonssäkerhet. Användningen av presshårdade komponenter i nästa generations bilstrukturer förväntas över 40%. En förutsättning för effektivt införandet av nya högpresterande material är tillgången på effektiva och noggranna metoder för simulering av brott i krockanalyser. Sådana metoder har utvecklats i tidigare doktorandprojekt. Detta projekt bedrivs i samarbete mellan Luleå tekniska universitet, Gestamp Hardtech, Dynamore Nordic, Scania och Volvo Cars. I projektet ingår validering av brottmodeller och brottkriterier med tillämpningar inom presshårdade komponenter. Fokus ligger på modeller för brott i komponenter med varierande mikrostruktur. Projektet har utvecklat relevanta testkomponenter samt metoder och strategier för prediktering av materialbrott vilka har jämförts med de metoder som används industriellt idag, se kapitel 6 Resultat och målpuppfyllelse. Resultat från aktuellt projekt och tidigare projektet OPTUS II är också redovisade i en doktorsavhandling: Stefan Golling, "A study on microstructure-dependent deformation and failure properties of boron alloyed steel", Luleå University of Technology (2016) ISBN 978-91-7583-728-4.

## 2 Executive summary in English

The present and for a long time ahead dominant technology for lightweight design of vehicle structures is based on the use of press-hardened ultra-high strength steel (UHSS) components. The technology is a Swedish innovation and is industrialized in Sweden. During the last decade, press hardening has developed into a global technology but Sweden is still the world leader in terms of both research and industrial implementation. The main driving forces are the reduction of emissions from vehicles and the demand for increased vehicle safety. The use of ultra-high strength component enables light-weight design while maintaining and also increasing the passive safety of the car. The usage of press hardened components in vehicle structures has increased from 8% to 25% in just one generation of cars and the content in the new generation is expected to be up to 40%. During product development, careful evaluations of the risk for structural failure in crash situations have to be performed and special design solution are often needed. One such design solution is the introduction of soft zones with tailored material properties to extend the deformation of the material before failure at certain locations in the component. A prerequisite for efficient and fast introduction of new high performance materials is the availability of efficient and accurate methods for simulation of deformation and fracture in crash analyses. Such methods have been developed in previous PhD projects (OPTUS I and OPTUS II). The methods are used successfully in industrial product development within Gestamp Hardtech and evaluated data from experiments is used by e.g. Ford and Volvo. Within the latter project, failure models for components with continuously varying micro-structure have been developed as part of the technology with "tailor-made" material properties.

The project has been conducted in collaboration between Luleå University of Technology, Gestamp Hardtech, Dynamore Nordic, Scania and Volvo Cars. Within the OPTUS III project a strategy for industrial implementation of the OPTUS failure model for multiphase materials is developed and the implementation has been distributed within the industrial project partners. A laboratory scale component was developed during this project; Components with fully hardened and a variety of mixed microstructures are produced and tested under tensile deformation. The experimental results are taken for validation of the OPTUS failure model for general phase compositions. It can be stated that the failure experimentally obtained failure of the components could be predicted by the OPTUS failure model. However, for some microstructure compositions the failure prediction was not sufficient, which might mainly be due to the high bainite fraction. Here more studies on the material data for different bainitic materials must be made. The overall goals of this project are reached.

### 3 Bakgrund

Den dominerande tekniken för lättviktsdesign av bilstrukturer bygger på presshårdning. Tekniken är en Svenskt innovation och har utvecklats till en global teknik med Sverige fortfarande som världsledande inom forskning och industriell utveckling. Drivkrafterna är minskade utsläpp och ökad fordonssäkerhet. Användningen av presshårdade komponenter i nästa generations bilstrukturer förväntas bli upp till 40%. En förutsättning för effektivt införandet av nya högpresterande material är tillgången på effektiva och noggranna metoder för simulering av brott i krockanalyser. Sådana metoder har utvecklats i tidigare doktorandprojekt. I projektet ingår validering av brottmodeller och brottkriterier med tillämpningar inom presshårdade komponenter. Fokus ligger på modeller för brott i komponenter med varierande mikrostruktur. Projektet kommer att utveckla relevanta testkomponenter och jämföra olika metoder och strategier för prediktering av materialbrott.

### 4 Syfte, forskningsfrågor och metod

Det finns behov inom bilindustrin att kunna öka effektiviteten i produkt- och processutveckling samt förkorta ledtider från utveckling till produktion. För att optimera fordonskonstruktioner med avseende på vikt- och krockprestanda, finns det ett behov av att ta önskade och oönskade variationer i materialegenskaperna i beaktande vid krocksäkerhetsanalyser. För att uppnå dessa mål är avsikten att effektivt validera nya modeller för deformation och brott i komponenter baserade på ultrahöghållfast stål med skräddarsydda materialegenskaper.

Forskningsfrågorna som dom har formulerats i ansökan: "The project should answer the question if the results obtained in modelling and simulation of multi-phase models validated in a laboratory environment also are relevant for more general loading conditions obtained in component and structure level tests that are found in industrial applications. The project should also answer the question of how a strategy for implementing multiphase failure models based on manufacturing simulations in an industrial environment should be defined."

Projektet omfattar genomförande, validering och utvärdering av brottmodeller och brottkriterier. De huvudsakliga aktiviteterna är:

- Validera tidigare utvecklade brottmodeller på komponentnivå och jämföra resultaten med metoder som idag används inom industrin.
- Implementera modeller i en kommersiell kod för validering med analyser av presshårdade ultrahöghållfasta komponenter i produktion.
- Utveckla en industriell strategi för användning av brottmodeller för komponenter i stålmaterial med kontinuerligt varierande skräddarsydda materialegenskaper.

### 5 Mål

Det övergripande målet för projektet är att öka effektiviteten i produkt och processutvecklingen och korta ledtiden från utveckling till produktion. En förutsättning för effektivt och snabbt införandet av nya högpresterande material är tillgången på effektiva och noggranna metoder för simulering av brott i krockanalyser. Sådana metoder har utvecklats i tidigare doktorandprojekt. I projektet ingår implementering och validering av brottmodeller och brottkriterier med tillämpningar inom presshårdade komponenter. Fokus ligger på modeller för brott i komponenter med varierande mikrostruktur, avsiktliga eller oavsiktliga. Projektet kommer att utveckla relevanta testkomponenter och jämföra olika metoder och strategier för prediktering av materialbrott.

- Validering av tidigare utvecklade brottmodeller på komponentnivå
- Implementering av modeller i kommersiell kod
- Kortare ledtid för avancerade komponenter
- 15 % viktninskning

## 6 Resultat och måluppfyllelse

### 6.1 Måluppfyllelse

Projektet bidrar till programmets mål inom områdena "Nya produkter med hög livscykeeffektivitet" samt "Leditid". Det största bidraget till måluppfyllelsen kommer ifrån användning av tillverkningsmodeller för att säkerställa tillverkningsmetodens genomförbarhet och möjligheten att bestämma parametrar för simuleringar av produktens funktion. Detta möjliggör effektiv utformning och optimering av fordonsstrukturer med avseende på säkerhet, vikt och miljöpåverkan.

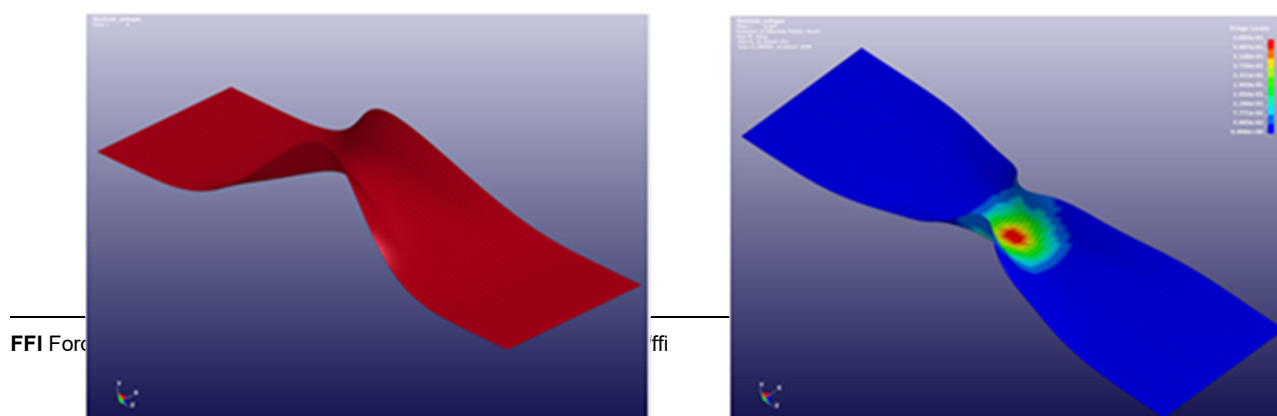
För att uppnå målet att kunna öka effektiviteten i produkt- och processutveckling samt förkorta ledtider från utveckling till produktion har modeller för deformation och brott i komponenter baserade på ultrahöghållfast stål validerats och jämförts med metoder som används inom fordonsindustrin idag. Modellerna har utvecklats inom tidigare projekt, OPTUS I och II, för fullhårdade komponenter samt för komponenter med skraddarsydd materialegenskaper inom OPTUS II. Inom det aktuella projektet har en strategi för industriell implementering av brottmodell för multifasmaterial utvecklats och implementeringen har tillgängliggjorts för industriellt användande. Målen för projektet är uppfyllda med avseende på det flesta leveranser och milstolpar i projektplanen.

Projektets konkreta resultat redovisas översiktligt i resultatkapitlet nedan.

### 6.2 Resultat

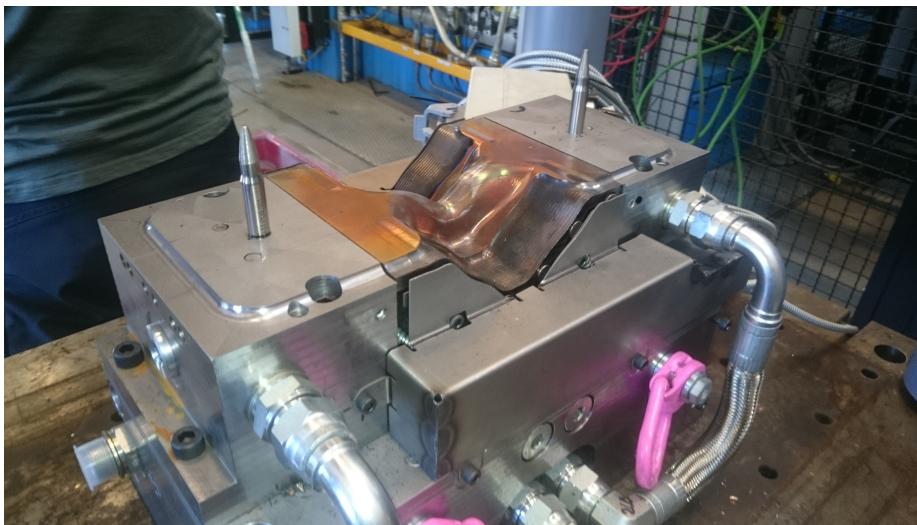
Syftet med projektet har varit att utvärdera en brottmodell, OPTUS, under så industriellt relevanta förhållanden som möjligt. Förutom detta har syftet varit att ta fram en strategi för industriellt användande av OPTUS-modellen för multifasmaterial där fassammansättningsens fördelning i komponenten är framtagen i termo-mekaniska simuleringar av presshärtningsprocessen. I detta sammanhang har också ett arbetspaket genomförts där påverkan av punktsvets på brottresultaten har provats.

En **presshärdat komponent** har utvecklats för provning i laboratoriemiljö. Komponenten är designad för att deformeras i en kombination av tryck-, drag- och böjbelastning vilket ger ett komplext spänningstillstånd fram till brott. Se figur 1. Avsikten är att efterlikna möjliga tillstånd i en verklig krockbelastning.



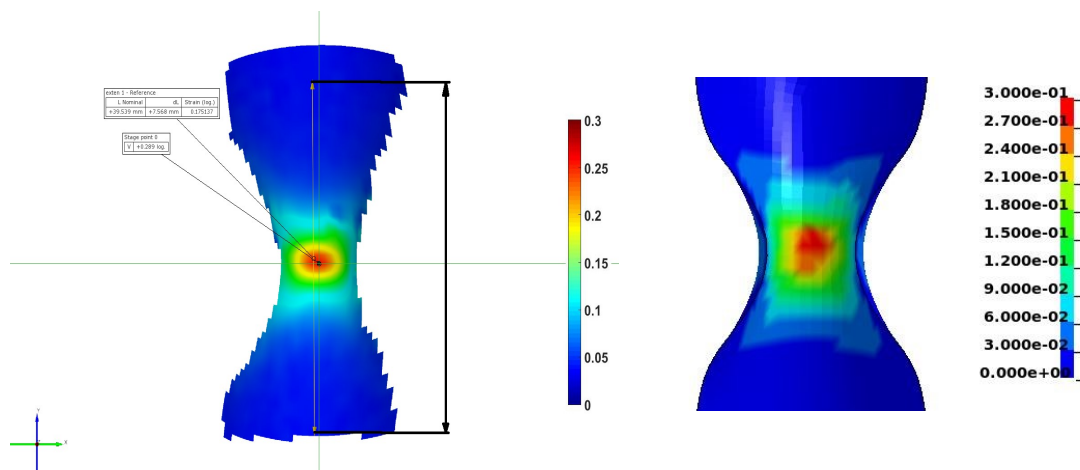
Figur 1. Modell av testkomponent.

**Två verktyg** har utvecklats för tillverkning av komponenter, ett för fullhärdning och ett för uppvärmning till ca 430 C för att skapa olika mikrostrukturer, se Figur 2. Komponenter har utvecklats och tillverkats med olika flänshöjd, fullhärdade och med olika typer av mikrostruktur. Olika typer av mikrostrukturer i testkomponenten har åstadkommits dels genom användning av kallt verktyg och använda olika tider för överföringen mellan ugn och verktyg. Olika transfertider ger olika kylförlopp innan formning i verktyget. Då kommer det att bildas olika mängd ferrit och bainit innan återstående austenit bildar martensit i det kalla verktyget. Andra mikrostruktur-sammansättningar har åstadkommits genom att använda varmt verktyg (430 C) som ger möjlighet att erhålla mestadels bainit i komponenten. Andra sammansättningar har tagits fram genom att använda olika transfertider mellan ugn och verktyg.



Figur 2. Verktyg för tillverkning av testkomponenter

De tillverkade komponenterna har **provats i laboratoriemiljö** in dragprovmaskin. Proven har utförts kvasi-statiskt, dvs i låg belastningshastighet. Vid provningen har dels uppmätts kraft som funktion av tid, dels töjningsfältet i brottzonen. Töjningsfältet har mätts med hjälp av Digital Image Correlation (DIC) i stereo, dvs två kameror har använts för att kunna mäta deformation ut ur planet, se Figur 3. Detta är nödvändigt då testkomponenten deformeras även i den riktningen i provet. Töjningsfälts-mätningen möjliggör utvärdering av brotttöjningarna lokalt i den punkt där brottet sker.



Figur 3. Effektiv töjning strax före brott, resultat från 3D DIC och från analys med OPTUS-modellen.

Rutiner för att anpassar material modeller för simulering av deformation och brott har utvecklats för att kunna ta material data direkt från dragprovningen. Rutinen baseras på fullfält-mätningar (DIC) på en rad dragprover med olika geometrier och använder sig av den så kallade Stepwise-Modelling-Method (SMM). Under projektens gång har ett flertal materialmodeller kalibrerats som t.ex. OPTUS modell, CrachFEM och GISSMO. I Figur 4 visas ett exempel av en OPTUS modell kalibrering, där (a) visar spännings-töjnings sambandet för olika mattlängder och (b) de tillhörande lokalisering värden för dessa mattlängder.

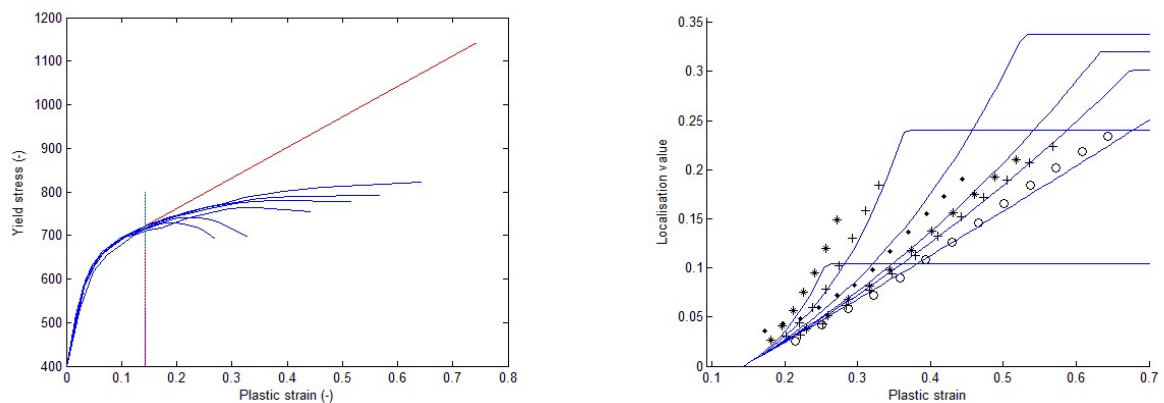
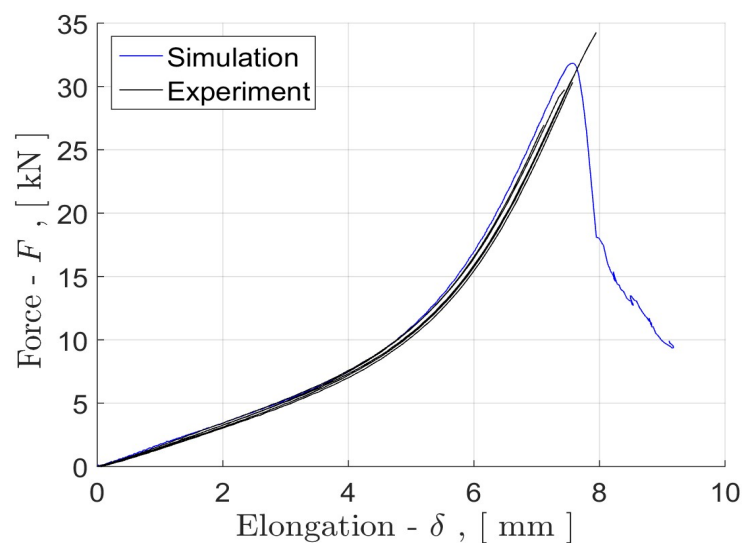


Figure 4. OPTUS model calibration example (left) flow curves for different evaluation sizes (right) size dependent localization value.

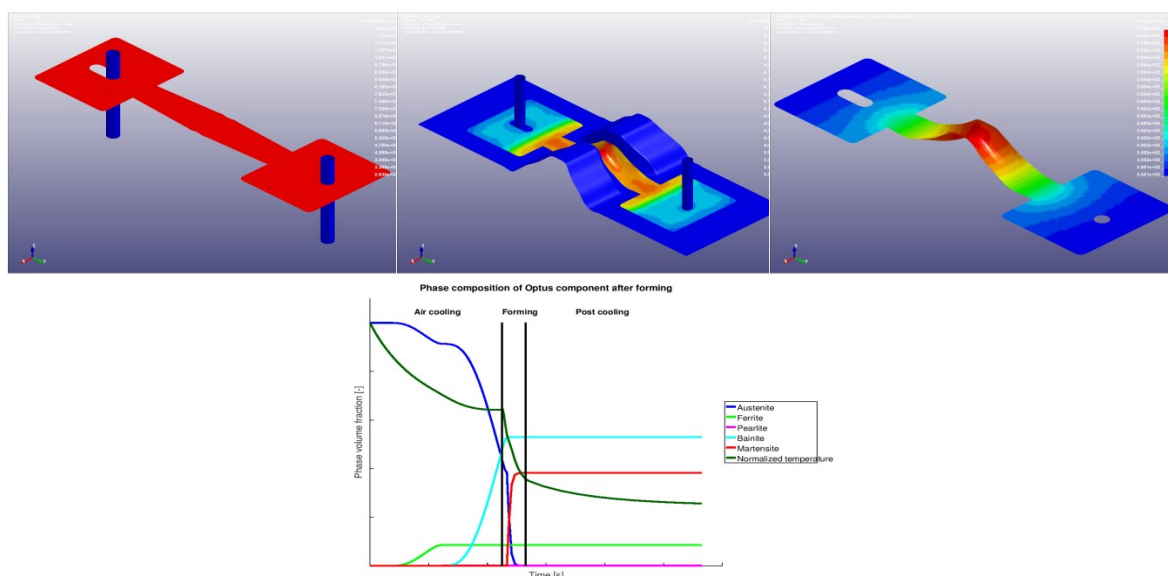
Vid **utvärdering av brottmodellerna** jämförs deformation, kraft och töjningstillståndet vid brott. Figur 5 visar OPTUS-modellens kraft-förskjutningskurva och resultat från motsvarande laboratorieprov. Resultaten visade att OPTUS-modellen gav mycket bra resultat för de fullhårdade proven medan de modeller som används industriellt, Johnson-Cook och Crack-FEM gav mer konservativa resultat.



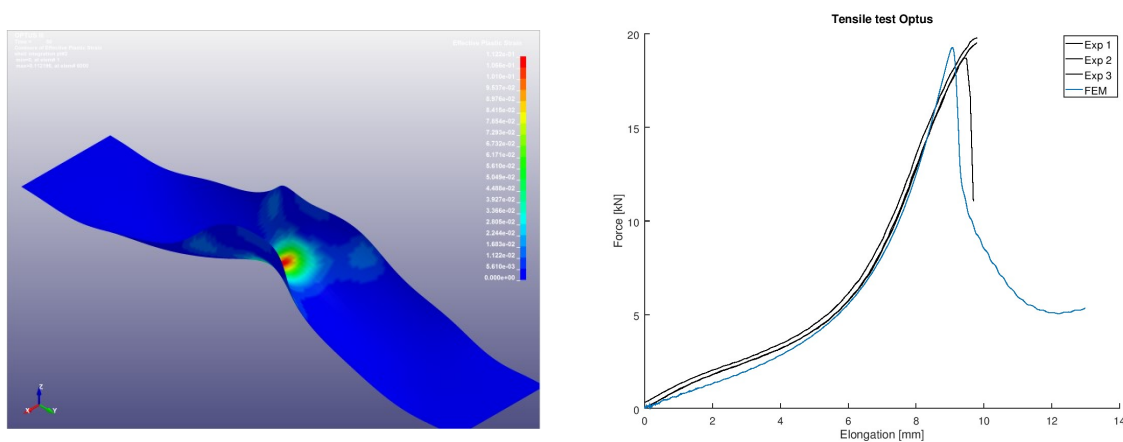
Figur 5. OPTUS-modellens resultat och resultat från provning.



**En strategi** har framtagits för att möjliggöra en direkt koppling mellan de processimuleringar som utförs vid utveckling av komponenter med skräddarsydda materialegenskaper och de krockberäkningar som utförs vid fordonsföretagen. Strategin bygger på att mikrostruktur-sammansättning från processimuleringen ligger till grund för en preprocessor som använder sig av en homogeniseringsalgoritm och ett instabilitetskriterium. De utvecklade metoderna beskrivs i detalj i den bifogade doktorsavhandlingen. Mekaniska data från rena faser, dvs ferrit, bainit och martensit, används för att ta fram de sammansatta egenskaperna som mappas till den modell som används för mekanisk analys, t.ex. krockanalyser. Ett exempel på en analys av en processkedja visas i Figur 6 och 7.



Figur 6. Exempel på analys av processkedja med kylning, formning och efterkylning. Diagrammet visar predikterad mikrostruktursammansättning genom processkedjan.



Figur 7. Brottanalys med OPTUS-modellen för generella fassammansättningar och jämförelse med mekanisk provning. Fassammansättning och materialdata från formningsanalys.

Metodiken används industriellt av Gestamp Hardtech och materialmodellen för analys av generella fassammansättningar har gjorts tillgängliga för företagen.



**En doktorsexamen** har slutförts inom projektet. Stefan Golling har slutfört sin doktorsexamen inom projektet med avhandlingen "A study on microstructure-dependent deformation and failure properties of boron alloyed steel".

Generellt kan sägas att metodiken för generella fassammansättningar har utprovats och visat sig fungera mycket bra i flera fall. Proven har dock visat att vissa fassammansättningar ger alltför konservativa resultat. Detta gäller främst vissa former av bainit. Slutsatsen är därför att mer forskning behöver utföras för att prediktera bainitens sammansättning och egenskaper. Detta genomförs i viss utsträckning i pågående projekt men bedömningen är att mycket mer resurser behövs för forskning inom detta område. Detta gäller generellt även för andra processer, andra material och tillämpningar där man behöver koppla samman processkedjor med komponenternas och strukturernas slutliga mekaniska egenskaper.

## 7 Spridning och publicering

### 7.1 Kunskaps- och resultatspridning

| Hur har/planeras projektresultatet att användas och spridas?         | Markera med X | Kommentar                                                       |
|----------------------------------------------------------------------|---------------|-----------------------------------------------------------------|
| Öka kunskapen inom området                                           | X             | Underlag för framtida forskningsprojekt                         |
| Föras vidare till andra avancerade tekniska utvecklingsprojekt       | X             | Planeras nya ansökningar främst inom FFI                        |
| Föras vidare till produktutvecklingsprojekt                          | X             | Gestamp Hardtech använder resultatet inom sin produktutveckling |
| Introduceras på marknaden                                            | X             | Introduceras på marknaden via koden LS-Dyna                     |
| Användas i utredningar/regelverk/tillståndsärenden/ politiska beslut |               |                                                                 |

### 7.2 Publikationer

Golling Stefan, "A study on microstructure-dependent deformation and failure properties of boron alloyed steel", PhD thesis, Luleå University of Technology (2016) ISBN 978-91-7583-728-4.

Golling, S., Östlund, R., Schill, M., Sjöblom, R., Mattiasson, K., Jergeus, J., & Oldenburg, M. (2017). A comparative study of different failure modeling strategies on a laboratory scale test component. In 6th International Conference Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel CHS2 : June 4-7 2017, Atlanta, Georgia, USA : proceedings (pp. 37–46). Warrendale, PA: Association for Iron & Steel Technology, AIST.

Marth, S., Golling, S., Östlund, R., & Oldenburg, M. (2018). From Blank to Fractured Component : Numerical and Experimental Results of a Laboratory Scale Component (Vol. 418). Presented at the International Deep Drawing Research Group 37th Annual Conference 3–7 June 2018, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada.

Marth, S., Golling, S., Östlund, R., Häggblad, H.-Å. & Oldenburg, M. (2019). Numerical and Experimental Results of a Press-Hardened Laboratory Scale Component with Multi-Phase. Submitted to: 7th International Conference Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel CHS2: June 2019, Luleå, Sweden.

## 8 Slutsatser och fortsatt forskning

Inom projektet har relevanta testkomponenter utvecklas samt utvecklade metoder och strategier för prediktering av materialbrott har jämförts med de metoder som används industriellt idag. De nyutvecklade modellerna visar hög noggrannhet i jämförelse med de industriellt använda metoderna.

För de full härdade komponenterna och vissa komponenter med blandade mikro strukturer kunde OPTUS modellen förutsäga brottet med en bra noggrannhet. Däremot visades att dagens implementering har svårigheter att förutse brotten för blandade mikro strukturer med huvudsakligen bainitiska blandningar, som presenterat i Figur 11. Här behövs ytterligare utveckling av OPTUS modellen där det tas hänsyn till olika typer av bainite. Utöver detta ger komponentens geometri svårigheter att validera simuleringar av punktsvetsar. Utfallet är huvudsakligen enligt planen och de övergripande målen är uppfyllda.

Den fortsatta forskningen planeras att fokusera på att utveckla en metod för snabb och automatiserad materialmodellkalibrering för deformation och brott under tredimensionellt spänningstillstånd. Genom en kombination av tredimensionell experimentell deformationsmätning och en numerisk analys som med dessa mätningar som indata utvärdera data för materialmodeller inklusive brottmodellering. Metoden är direkt användbara i produktutveckling och resulterar följaktligen i en radikalt minskad ledtid i produktionen för att införa nya material och nya kombinationer av mikrostrukturkompositioner.

## 9 Deltagande parter och kontaktpersoner

Luleå tekniska universitet, Mats Oldenburg  
Gestamp Hardtech, Rickard Östlund  
Volvo Car Corporation, Johan Jergeus  
Scania AB, Reimert Sjöblom  
DynaMore Nordic, Mikael Schill