

# Proaktiv monteringsergonomisk och geometrisk kvalitetssäkring för hållbar produktion



Nina Silow, Mikael Rosenqvist, Ann-Christine Falck  
2016-03-31  
Delprogram: Hållbar produktion

**FFI** Fordonsstrategisk  
Forskning och  
Innovation

VINNOVA

Energimyndigheten

TRAFIKVERKET

FKG

VOLVO

SCANIA

VOLVO

SCANIA

VOLVO

SCANIA

VOLVO

SCANIA

VOLVO

SCANIA

VOLVO

SCANIA

VOLVO

SCANIA

VOLVO

# Innehållsförteckning

<b>1 Sammanfattning .....</b>	<b>3</b>
<b>2 Executive summary.....</b>	<b>5</b>
<b>3 Bakgrund.....</b>	<b>7</b>
<b>4 Syfte, frågeställningar och metod.....</b>	<b>9</b>
4.1 Övergripande.....	9
4.2 DP1: Geometrisk kvalitet.....	9
4.3 DP2: Monteringsergonomisk kvalitetssäkring och monteringskomplexitet .....	9
4.4 DP3: Verktyg för proaktiv monteringsergonomisk och geometrisk kvalitetssäkring för hållbar produktion.....	10
<b>5 Mål .....</b>	<b>11</b>
5.1 Målbeskrivning från projektansökan .....	11
5.2 Förändringar i mål .....	12
<b>6 Resultat och måluppfyllelse .....</b>	<b>13</b>
6.1 DP1: Geometrisk kvalitet.....	13
6.2 DP2: Monteringsergonomisk kvalitetssäkring och monteringskomplexitet .....	13
6.3 DP3: Verktyg för proaktiv monteringsergonomisk och geometrisk kvalitetssäkring för hållbar produktion.....	17
6.4 Summering av resultat .....	23
<b>7 Spridning och publicering .....</b>	<b>24</b>
7.1 Kunskaps- och resultatspridning .....	24
7.2 Publikationer.....	24
<b>8 Slutsatser och fortsatt forskning .....</b>	<b>26</b>
<b>9 Deltagande parter och kontaktpersoner.....</b>	<b>28</b>
<b>10 Referenser.....</b>	<b>30</b>
<b>Appendix A.....</b>	<b>31</b>
Metod och process för geometrisk totalrobust kvalitetssäkring .....	31

# 1 Sammanfattning

I fordonsindustrin är människan en viktig del i produktionsledet. 80 % av alla uppgifter i slutmonteringen utförs av människor. Det ställs ofta höga kognitiva och fysiska belastningskrav på montören vilket i sin tur ökar risken för monteringsrelaterade fel och kvalitetsbrister. Kvalitetsbrister är mer tidskrävande och dyrare att reparera ju senare de upptäcks: upp till 10 gånger i fabrik och ytterligare 12 gånger på marknaden.

Om montören får dåliga ergonomiska förutsättningar leder det till 6-8 gånger fler monteringsrelaterade fel jämfört med goda förutsättningar. Hela 93 % av samtliga fel inträffar vid hög och medelhög fysisk belastningsnivå och 86 % av felen är geometrirelaterade. Projektet har bevisat att det finns ett tydligt matematiskt samband mellan geometrisk kvalitet och manuell monteringskomplexitet men att endast 12 % av den geometriska kvalitetssäkringen har processpåverkan idag.

Projektets mål var att skapa metoder och verktyg för proaktiv monteringsergonomisk och geometrisk kvalitetssäkring för hållbar produktion. Avsikten var att utveckla och validera verktygslösningar som skulle implementeras i två demonstratorer och tydligt visa att dåliga monteringsergonomiska förutsättningar och stor monteringskomplexitet ger hög risk för dåligt geometriskt kvalitetsutfall, med hög miljöbelastning och höga kostnader som följd.

Både monteringsergonomiska förutsättningar och monteringskomplexitet påverkar felutfallet. Ju sämre de monteringsergonomiska förutsättningarna är, desto fler fel uppstår. Dessutom ökar kostnaderna för felåtgärder och kassation av material.

De 16 kriterierna för bedömning av hög och låg manuell monteringskomplexitet har kunnat verifieras. Kriterierna omfattar monteringsergonomiska, fysiska och kognitiva bedömningskriterier. Det är visat att flera komplexitetskriterier tillsammans påverkar felutfallet och åtgärdskostnaderna. Vilka komplexitetskriterier som har störst påverkan på felutfall och kostnader har däremot inte med säkerhet kunnat fastställas och därför ska alla 16 kriterier alltid skall beaktas.

En **verifierad kalkylmodell** för prediktiv bedömning av monteringsergonomiska förutsättningar med koppling till kvalitet har utvecklats. Denna kalkylmodell kan utgöra ett beslutsstöd vid val av monteringslösningar och tillverkningskoncept ur ett ergonomi-kvalitets-ekonomi perspektiv.

## ***Demonstrator för proaktiv geometrisk kvalitetssäkring i CAT-verktyg***

Vid konstruktion antas att alla referenspunkter för montering är i korrekt fysiskt kontakt och att frihetsgrader är låsta. En operatör lyckas dock inte alltid med detta, vilket skapar en skillnad mellan virtuellt och verkligt resultat. Därför har projektet introducerat ett nytt robusthetstal som inkluderar både känslighet för variation och monteringskomplexitet. Detta är implementerat som en analysfunktion i CAT-verktyget RD&T, där såväl stabilitetsanalys (robusthet) som variationsanalys (kravuppfyllnad) tar hänsyn till monteringskomplexitet.

Industriella tester på Volvo GTT och Scania CV har verifierat behovet av ett proaktivt geometriskt kvalitets-säkringsarbete som tar hänsyn till både monteringsprocessen och operatörspåverkan samt verifierat verktygets noggrannhet. I båda testerna är den manuella monteringskomplexiteten hög. Om metoden och verktygen som utvecklats i PEGASUS använts i tidiga faser för dessa system, hade detta upptäckts tidigt i produktutvecklingen istället för i produktionen.

En **ny geometrisäkringsprocess** har tagits fram som inkluderar en metod och processbeskrivning över hur CAT-verktyget bör användas. Om ett företag väljer den nyutvecklade geometrisäkringsprocessen, och samtidigt använda CAT-verktyget, kommer 100 % av simuleringarna att inkludera processpåverkan.

## ***Demonstrator för bedömning av manuell monteringskomplexitet i Excel***

En ytterligare demonstrator möjliggör beräkningar och analyser av manuell monteringskomplexitet på en enkel plattform, Excel. Ursprungligen var målgruppen små/medelstora företag men även hos storföretagen

finns ett intresse. I det fallet kan kunskap och medvetenhet om manuell monteringskomplexitet spridas till avdelningar som vanligtvis inte arbetar med den inriktningen.

Resultaten i projektet har överträffat målen. Vi har tagit fram industriellt verifierade demonstratorer med mer funktionalitet än intentionen i projektet. Det finns också tydliga metodbeskrivningar för hur dessa skall användas.

Genom förbättrade möjligheter att redan under tidig produktutvecklingsfas kunna identifiera potentiella kvalitets- och ergonomirisker förväntas följande resultat och effekter som bidrar till ökad hållbarhet:

- en tidig medvetenhet om processpåverkan,
- färre fel i produktion,
- mindre kassation,
- förbättrad noggrannhet i virtuella simuleringar,
- ökad effektivitet,
- ökad kvalitet,
- reducerade kostnader,
- förbättrad arbetsmiljö,
- ökad lönsamhet,
- förbättrad konkurrensförmåga,
- förkortad ledtid från utveckling till löpande produktion,
- ökad flexibilitet då tidiga medvetna val frigör tid och resurser

## 2 Executive summary

In the automotive industry, humans are an important part of the production. 80% of all the activities in the final assembly are carried out by humans. There are often high cognitive and physical load demands on the operator, which in turn increases the risk of assembly-related errors and quality deficiencies. Quality deficiencies are more time consuming and costly to repair the later they are discovered: up to 10 times more if discovered in the factory and another 12 times more if discovered on the market.

If the operator gets poor ergonomic conditions it leads to 6-8 times more assembly related errors compared to good conditions. A full 93% of all errors occur at high and medium level of physical load and as many as 86% of the errors are geometry related. The project has been able to prove that there is a clear mathematical relationship between the geometric quality and manual assembly complexity, but that only 12% of the geometric quality assurance process include process impact today.

The project goal was to create methods and tools for proactive assembly ergonomic and geometric quality assurance for sustainable production. The intention was to develop and validate tools that would be implemented in two demonstrators and clearly show that poor assembly ergonomics and high assembly complexity gives high risk for poor geometric quality, high environmental impact and high costs.

Both assembly ergonomics and assembly complexity affect how many errors that occur. The worse the assembly ergonomic conditions are, the more errors occur and the costs for fault repairs and disposal of materials increase.

The 16 criteria for assessment of high or low manual assembly complexity have been verified. The criteria include ergonomics assembly, with both physical and cognitive load taken into consideration. The project has proven that several complex criteria together affect the failure rate and the costs for fault repairs. However, it has not been possible to determine which of the complexity criteria that have the greatest impact on the failure rate and costs. The consequence is that all 16 criteria should always be considered.

In the project, a **verified calculation model** for predictive assessment of the assembly ergonomic conditions related to quality has been developed. This calculation model can serve as a decision support when selecting assembly solutions and manufacturing concepts from an ergonomics-quality-economy perspective. The relationships between assembly ergonomics and quality outcome can hereby be proven in economic terms.

### ***CAT tool demonstrator for proactive geometric quality assurance***

In the design of a product it is assumed that all the reference points for assembly are in proper physical contact and that the degrees of freedom are locked. However, an operator does not always succeed in this and the article gets a different position, creating a difference between virtual and real results. Therefore, the project has introduced a new measure of robustness which includes both sensitivity to variation and assembly complexity. This is implemented as an analysis function in the CAT tool RD&T, where as well the stability analysis function (robustness) as the variation analysis function (fulfilment of requirements) take assembly complexity into account.

Two industrial tests have been performed, one at Volvo GTT and one at Scania CV. From each company one product concept was chosen. Both concepts had quality issues in running production and the level of assembly complexity was noted to be high. In the tests using the demonstrator, the need for a proactive geometric quality assurance work that takes both the assembly process and operator impact into account was verified. The tests also verified the accuracy of the demonstrator. If the methods and tools developed in the PEGASUS project had been used in early phases for these product concepts, the high level of assembly complexity had been detected early in product development, rather than in production.

In addition, a **new process for geometry assurance** has been developed. It includes a method and process description of how the CAT tool should be used. If a company chooses to follow the newly

developed geometry assurance process, while using the CAT tool, 100% of the simulations will include the impact of the process instead of the current 12%.

### ***Excel demonstrator for assessment of manual assembly complexity***

Another demonstrator enables assessment and analysis of manual assembly complexity on a simple platform, Excel. Originally, the target group for this demonstrator was small / medium enterprises, but also among large companies there is an interest for this tool. In the latter instance, knowledge and awareness of manual assembly complexity can be spread to departments that usually do not work with this focus.

The results in the project has exceeded the expected targets. We have developed two industrially verified demonstrators with more functionality than was the intention of the project description. There are also clear method descriptions of how these should be used.

Improved ability to identify potential quality and ergonomics hazards already during the early product development phase is expected to yield the following results and effects for sustainable production:

- an early awareness of the impact of the process
- fewer errors in production
- less waste
- improved correlation between virtual simulations and real results
- increased efficiency
- increased quality
- reduced costs
- improved work environment
- increased profitability
- improved competitiveness
- shortened lead time from development to finished product and ongoing production
- increased flexibility when early, proactive and conscious choices free up time and resources to other activities

### 3 Bakgrund

Svensk fordonsindustri är kraftigt konkurrensutsatt och är idag en del i ett globalt samspel. För att Sverige ska fortsätta vara en attraktiv plats för utveckling och tillverkning av fordon, behöver fordonsindustrin hitta nya konkurrensvägar. Det ökade medvetandet om vikten av hållbarhet, och i det här fallet hållbar produktion, är en förutsättning för tillverkande företags överlevnadsmöjlighet – men också en stor möjlighet till unika konkurrensfördelar. Där andra marknader kan erbjuda låga tillverkningskostnader men en lägre mognad vad gäller kvalitet och mänskligt slitage, kan svenska tillverkare vinna terräng. Faktorer som minskad förbrukning av material och energi, lägre kostnader och ett ansvarsfullt utnyttjande av mänskliga resurser (utan att tumma på kvalitetsnivå och effektivitet) är alla bidrag till hållbar produktion och samtidigt områden där det är möjligt att stärka svensk fordonsindustri.

Virtuella verktyg i tidiga utvecklingsfaser har visat sig minska behovet av resursslukande prototyper och testserier. Tidigare har ett virtuellt beslutsstöd för geometrisk kvalitet utvecklats och framgångsrikt implementerats i industrin. Effekten har blivit sänkta kostnader, snabbare produktutvecklingsprojekt och inte minst, minskat slöseri av resurser. Hittills har det dock inte varit möjligt att ta hänsyn till alla faktorer som påverkar den geometriska kvaliteten.

I fordonsindustrin är människan en viktig del i produktionsledet. 80 % av alla uppgifter i slutmonteringen utförs av människor (Fasth, 2012). Människan är fortfarande överlägsen maskinen då det gäller flexibilitet och eftersom dagens kunder efterfrågar mer skraddarsydda produkter ökar kraven på flexibilitet i tillverkningen. Dessa ökade krav får dock inte gå ut över kvaliteten och effektiviteten. Hög monterings effektivitet blir därför en viktig faktor att säkerställa.

En montör ställs inför många val vid en monteringsoperation, en valprocess med många olika möjligheter (Zhu et al., 2008). Inför varje uppgift måste montören välja rätt artiklar och komponenter enligt en order och därefter rätt verktyg, rätt metod, rätt monteringsordning etc. Det ställs därför ofta höga kognitiva och fysiska belastningskrav på montören vilket i sin tur ökar risken för monteringsrelaterade fel och kvalitetsbrister. Bishu och Drury (1998) fann att ju mer montören behöver hålla reda på desto mer sannolikt är det att fel uppstår. Zhu et al. (2008) konstaterade att för att minska risken för detta måste systemlösningar, monteringslösningar, material, metoder och verktyg skapa förutsättningar för en så felfri montering med så högt kvalitetsutfall som möjligt.

Projektgruppen har tidigare genomfört en VINNOVA-finansierad studie inom programmet Hållbara produktionsstrategier: "Beslutsstöd för tidig estimering av kvalitetsbristkostnader", diarienummer 2009-03954 (i fortsättningen kallat referensprojektet). I det projektet visar en undersökning av 47 000 fordon att dåliga ergonomiska förutsättningar leder till 6-8 gånger fler monteringsrelaterade fel jämfört med goda förutsättningar, av dessa var 86 % geometrirelaterade (Falck et al., 2012b). Hela 93 % av samtliga fel inträffade vid hög och medelhög fysisk belastningsnivå. Studien visade också att en hög grad av monteringskomplexitet ger betydligt fler fel. Kvalitetsbrister är mer tidskrävande och dyrare att reparera ju senare de upptäcks: upp till 10 gånger i fabrik och ytterligare 12 gånger på marknaden (Falck och Rosenqvist 2012a).

Både estimeringar och undersökningar har gjort rådande forskning överens om att kostnaden för bristande kvalitet upptar mellan 10-40 % av ett företags totala omsättning (Harrington, 1987), (Bank, 1992) och (Booker, Raines & Swift, 2001). Dessa kan delas in i synliga och dolda kostnader där de synliga finns representerade i de flesta ekonomi- och uppföljningssystem, medan de dolda ofta jämsställs med verksamhetskostnader i stället för att kopplas till produkten (Sörqvist, 2001).

I referensprojektet gjordes en omfattande datainsamling som visade på ett samband mellan geometrisk kvalitet, operatörsberoende arbetssätt och monteringsproblem. De beslutsstöd som använts i tidiga faser har tidigare inte tagit hänsyn till dessa faktorer som förutsättningar för geometrisk kvalitet. Proaktiv riskidentifiering under tidiga produktutvecklingsfaser är fortfarande ovanligt när det gäller monteringsergonomi trots att det idag finns många vetenskapliga bevis för nyttan med detta ur både

mänskligt och ekonomiskt perspektiv (Dul och Neumann, 2009). Reaktiva lösningar för att justera kvaliteten är därför vanliga och utförs i så mycket som 90 % av fallen (Rosenqvist et al, 2013).

Tidigare forskning visar på ett tydligt behov av att ta med monteringsfaktorer i tidiga projektfaser. Vid bedömning av ett koncept är det lätt att fastna vid enskilda komponenters kostnad och kvalitetsnivå och missa konsekvenserna för systemuppbyggnaden och monteringsbarheten. I stället för att optimera tillverkningen ur ett helhetsperspektiv sker det ofördelaktiga suboptimeringar som i slutändan ger höga totalkostnader och låg kvalitet. Genom helhetsbedömningar uppstår en möjlighet – möjligheten att göra ett aktivt, medvetet och klokt val (Freiesleben, 2005).



## 4 Syfte, frågeställningar och metod

### 4.1 Övergripande

Syftet med projektet var följande: från att ha konstaterat *att* det finns ett samband mellan monteringsergonomi och geometrisk kvalitet avsåg detta projekt att utforska *på vilket sätt* de står i relation till varandra samt fortsätta med nästa steg och ta fram industriellt utvärderade demonstratorer.

Avsikten var därför att utföra fördjupade analyser av hur olika komplexitetskriterier påverkar kvalitetsutfallet vid manuell montering. Följande frågeställningar skulle analyseras: Hur såg de matematiska sambanden ut? Vilka kriterier har större påverkan än andra och hur kan dessa hanteras på bästa sätt?

Inriktningen var att ta fram ett validerat beslutsstöd för bättre uppskattning av de slutliga konsekvenserna av olika konceptval. Beslutsstödet skulle utgå från monteringsergonomiska konsekvenser, geometrisk kvalitet och potentiella kvalitetsbristkostnader och finnas i demonstratorform.

Metodmässigt har projektet byggt på fallstudier och utgått från verkliga kvalitetsproblem hos de medverkande fordonstillverkarna Volvo Car Group, Volvo GTT och Scania CV AB. Forskningen har baserats dels på tidigare kvalitetsdata från referensprojektet, dels på data från ett antal nya produktkoncept. Syftet var att få ett tillräckligt urval för att kunna generalisera resultaten. Två examensarbeten har genomförts, ett på Volvo Car Group och ett på Volvo GTT.

Projektet delades in i tre, till varandra relaterade, delprojekt (DP).

### 4.2 DP1: Geometrisk kvalitet

I referensprojektet identifierades några enkla matematiska samband mellan olika monteringsfaktorer och geometrisk kvalitet. I detta delprojekt planerades en djupare analys av dessa matematiska samband. Avsikten var att förstå mer om och klargöra mellan vilka faktorer det finns signifikanta samband. Fanns det fler samband än de grundläggande samband som hittades i referensprojektet? Var några faktorer mer betydelsefulla än andra? Industriella försök planerades för att validera upptäckta samband.

Målsättningen var att bevisa och validera **graden av samband** mellan **geometrisk kvalitet och monteringsfaktorer**.

### 4.3 DP2: Monteringsergonomisk kvalitetssäkring och monteringskomplexitet

I detta delprojekt planerades fördjupad forskning kring monteringskomplexitet. Ytterligare datainsamling gjordes för att möjliggöra fördjupade sambandsanalyser. Avsikten var att undersöka **individuella komplexitetsfaktors grad av påverkan** på monteringskvaliteten med avseende på risken för felutfall och åtgärdskostnader samt att se vilka faktorer som har störst betydelse.

Slutmålet var att utveckla en **validerad modell för prediktiv bedömning av monteringskomplexitet** med viktning av de faktorer som påverkar kvalitetsutfallet mest. I bedömningsmodellen för monteringskomplexitet skulle även monteringsergonomi ingå. Både fysiska och kognitiva ergonomifaktorer skulle bedömas samtidigt, vilket var nytt och innebär ett helhetsgrepp kring parametrarna komplexitet, ergonomi och kvalitet.

Det planerades även en intervjustudie av beslutsfattare i medverkande företag och bolag i referensgruppen. Denna studie ämnade ta reda på vilka förutsättningar som är avgörande för hur beslut fattas kring monteringsergonomi och geometrisk kvalitet. Syftet var att förstå **hur spridning och implementering av framkomna forskningsresultat skulle kunna underlättas och stödjas** på ett bättre sätt.

#### 4.4 DP3: Verktyg för proaktiv monteringsergonomisk och geometrisk kvalitetssäkring för hållbar produktion

I DP3 skulle resultaten från DP1 och DP2 vävas samman för att bli en bas i **framtagningen av validerade verktyg** i demonstratorform. Dessa verktyg syftade till att stödja proaktiva systemlösningsbeslut i tidig projektutvecklingsfas, med avseende på geometrisk kvalitet, monteringsergonomi, monteringskomplexitet och kvalitetsbristkostnader.

En del var att utveckla en **ny metod för geometrisk stabilitetsanalys** med hänsyn till komplexitet hos monteringskoncept och andra monteringsfaktorer. Målsättningen var att möjliggöra en mer komplett robusthetsanalys och utveckla en ny typ av "total-robusta" systemlösningar som var såväl ekologiskt och ekonomiskt som socialt hållbara. Denna metod skulle sedan implementeras i ett CAT-verktyg i form av en demonstrator. Industriella test planerades på Volvo Cars och Scania.

Då flera SMF tidigare visat ett stort intresse för att ta del av resultaten från referensprojektet, planerades även **ytterligare en demonstrator**. Denna skulle möjliggöra beräkning och analyser på en enkel plattform, t ex Excel. Avsikten var att personer utan djup expertkunskap skulle kunna använda verktyget. Utgångspunkten var att sammanföra de metoder som utvecklades i referensprojektet, dvs. bedömningen av komplexitet hos monteringskoncept och beräkningsmodellen för kvalitetsbristkostnader. Industriella test planerades på de SMF som anmält sig till referensgruppen.

## 5 Mål

### 5.1 Målbeskrivning från projektansökan

Projektets mål var att skapa metoder och verktyg för proaktiv monteringsergonomisk och geometrisk kvalitetssäkring för hållbar produktion.

Avsikten var att utveckla och validera verktygslösningar som skulle implementeras i två demonstratorer och tydligt visa att dåliga monteringsergonomiska förutsättningar och stor monteringskomplexitet ger hög risk för dåligt geometriskt kvalitetsutfall, med hög miljöbelastning och höga kostnader som följd.

Förväntade resultat var:

- Konkreta metoder och verktyg för beslutsstöd, verifierade och validerade hos deltagande företag. Projektet skulle utgå från kontexten fordonsindustri men resultatet borde vara applicerbart även i andra branscher med komplext uppbyggda produkter och manuell montering.
- Mängden fel i produktionen, som kan härledas till dåliga ergonomiska förutsättningar och orobusta geometrisystem, skulle minska med 50 %.
- Mängden kassationer och efterjusteringar skulle minska, vilket i sin tur skulle sänka kostnaderna för bristande kvalitet med 10 % samt sänka material- och energiförbrukning.
- Reducerade kostnader för ergonomirelaterade belastnings- och förslitningsskador med 30 %.
- En licentiatavhandling som en del i en doktorandutbildning.
- Vetenskapliga publikationer och medverkan i programkonferenser enligt tabell nedan.

<b>Akademisk publiceringsplan</b>		
<b>Titel</b>	<b>Tidskrift/konferens</b>	<b>Planerad</b>
Operator related reasons for insufficient correlation between CAT simulations and actual physical results	ASME IMECE	Q4, 2013
Geometrical stability analysis considering assembly complexity	CIRP CATS	Q2, 2014
Validation of assembly complexity in geometry assurance a case study	ASME IDETC	Q2, 2015
Influence of task complexity and ergonomics in manual assembly work	Industrial Ergonomics	Q3, 2013
A cost-beneficial assessment model for assembly ergonomics in early product development stages	Industrial Ergonomics	Q4, 2013
The influence of production ergonomics on product quality in truck assembly.	Human Factors and Ergonomics in Manufacturing and Services Industries	Q2, 2014
A decision support for predictive assessment of assembly complexity	Human Factors and Ergonomics in Manufacturing and Services Industries	Q4, 2014
A validated model for assessment of assembly complexity	Industrial Ergonomics	2015
Approaches and strategies for utilization and implementation of new knowledge in organizations.	Industrial Ergonomics	2015
<b>Konferensplanering</b>		
Nordisk ergonomikonferens (NES)		Q4, 2014
Nordisk ergonomikonferens (NES)		Q4, 2015
ASME IMECE		Q4, 2013
CIRP CATS		Q2, 2014
ASME IDETC		Q2, 2015

## 5.2 Förändringar i mål

### DP2:

Forskningsresultat som inte var publicerade då ansökan lämnades in, men har koppling till referensprojektet, tydliggjorde under projektets gång ett behov av en fördjupad kalkylmodell för prediktiv bedömning av monteringsergonomiska förutsättningar. Därför har en sådan kalkylmodell lagts till målen i projektet.

Vi såg också ett behov av att ge en utförlig bakgrund och beskrivning av begreppet grundkomplexitet. Detta har därför också lagts till målen.

### DP3:

I arbetet med att utveckla en ny metod för geometrisk stabilitetsanalys, som tog hänsyn till komplexitet hos monteringskoncept såväl som andra monteringsfaktorer identifierades behovet av att låta monteringskomplexitet påverka även variationsanalys för att stödja hela produktutvecklingsprocessen och inte bara systemutvecklingen. Det medförde att målet för demonstratorn i CAT utökades till att innefatta även detta.

## 6 Resultat och måluppfyllelse

### 6.1 DP1: Geometrisk kvalitet

Studier i delprojektet har visat att under den tidiga virtuella geometriska kvalitetssäkringen i dagens fordonsindustri är en stor majoritet av alla geometriska krav uppfyllda och inom gällande toleransgränser. Detta stämmer dåligt med verkligheten; i praktiken är utfallet att hela två tredjedelar av alla geometriska krav hamnar utanför toleransgränsen vid tillverkning. Detta medför att produkten har en lägre geometrisk kvalitet än vad som avsågs.

I delprojektet har vi visat att ett skäl till detta är att **endast cirka en tiondel av den virtuella geometrisäkringen innehåller någon form av processtoleranser**, d.v.s. mängden variation eller geometriska fel som en operatör (på grund av sin mänsklighet) bidrar till i monteringen. I stället antas det att operatören alltid genomför ett felritt och perfekt monteringsjobb. Huvudanledningarna till detta är att 1) det saknas enkla sätt att ta hänsyn till operatörspåverkan i de verktyg som används idag och 2) det finns en allmän okunskap om hur grundläggande förutsättningar påverkar kvalitetsutfallet vid manuell montering.

Vi har kunnat bevisa att **det finns ett tydligt matematiskt samband mellan geometrisk kvalitet och manuell monteringskomplexitet**. Däremot går det inte att utläsa att några komplexitetsfaktorer har större betydelse än andra. De olika faktorerna och deras samband samt signifikans har undersökts och redovisas i detalj i DP2. Flera industriella tester och studier har gjorts för att validera detta. Överensstämmelsen mellan simuleringar gjorda i CAT-verktyget utvecklat i PEGASUS och verkliga resultat är mycket god. Det är tydligt att de metoder som utvecklats inom projektet ger ett mervärde, detta beskrivs mera i DP2 och DP3.

### 6.2 DP2: Monteringsergonomisk kvalitetssäkring och monteringskomplexitet

Studier av grundläggande monteringskomplexitet (statisk komplexitet) har påvisat att det finns ett tydligt (linjärt) samband mellan manuell monteringskomplexitet och reaktiva kostnader för åtgärder av monteringsrelaterade fel och kassation av material: **ju högre komplexitetsnivån är vid manuell montering desto högre blir åtgärdskostnaderna**.

#### Åtgärdskostnaderna ökar med ökande komplexitetsnivå.

Complexity Level	Low	Rather low	Moderate	Rather high	High	All
Average errors/car x 1000	7.82	14.44	7.04	4.85	-	9.94
Average action cost/car x 1000 (SEK)	182.65	468.65	588.38	756.87	-	529.94

1 SEK= 0.11 EUR or 0.14 USD

Felutfallet var däremot inte tydligt relaterat till komplexitetsnivån. Sannolikt kan detta förklaras av att ett mindre antal feltyper var mycket kostsamma att åtgärda medan ett större antal andra feltyper var mindre kostsamma att åtgärda. Det var inte möjligt att med säkerhet påvisa vilken/vilka av de 16 ingående komplexitetskriterierna (se nästa sida) som var förknippade med högst åtgärdskostnader även om några kriterier föreföll ha större betydelse än andra. Studierna gjordes vid fordonstillverkning men vi anser att forskningsresultaten bör vara generellt applicerbara även vid annan manuell tillverkning.

Genom prediktiv bedömning av kriterier för monteringskomplexitet under tidig produktutvecklingsfas kan **ökad kvalitet, produktivitet och effektivitet uppnås under tillverkning genom minskat antal fel, minskade kostnader och förbättrad arbetsmiljö**. Dessutom **ökar resursutnyttjandet** genom minskat svinn och minskad omarbetning. Genom prediktiv bedömning av ergonomirisker uppskattades möjligheten att kunna reducera kostnader för ergonomirelaterade belastnings- och förslitningsskador med till 30 %. Att

kunna mäta de verkliga effekterna av förebyggande insatser under tidig produktutvecklingsfas kräver en före- och efter analys vilket inte varit möjligt att genomföra i detta projekt då tidsspannet mellan prediktiv bedömning och insats och verkligt utfall är flera år. Däremot har tidiga proaktiva ergonomiinsatser i bilindustrin visat att en kraftig kostnadsreduktion är fullt möjligt att uppnå.

### **6.2.1 Bedömningsmodell för komplexitetsbedömning i manuell montering**

På grundval av ovanstående resultat har de i studien ingående kriterierna för bedömning av manuell monteringskomplexitet kunnat verifieras. Kriterierna omfattar monteringsergonomiska, fysiska och kognitiva bedömningskriterier och har legat till grund för bedömning av varje enskilt arbets- eller monteringsmoment i studierna. Genom prediktiv komplexitetsbedömning är syftet att reducera antalet uppfyllda kriterier för hög monteringskomplexitet och istället möjliggöra val av lösningar som uppfyller kriterierna för låg monteringskomplexitet.

#### **16 kriterier för hög monteringskomplexitet**

- 1 Många olika sätt att utföra arbetsuppgiften på
- 2 Många olika detaljer och delmoment
- 3 Tidskrävande arbetsuppgift
- 4 Ingen tydlig monteringsposition för delar och komponenter
- 5 Dålig åtkomst
- 6 Dold/skyddad montering/operation
- 7 Dåliga ergonomiska förutsättningar med risk för skadlig inverkan på operatörerna
- 8 Montörs/operatörsberoende montering/arbetsuppgift som kräver expert kunskap för att bli rätt utförd.
- 9 Monteringen/arbetsuppgiften måste göras i en bestämd ordning eller sekvens.
- 10 Visuellt bedömning av passning och toleranser krävs, dvs. noggrann subjektiv bedömning av kvalitetsutfallet
- 11 Exakt och/eller precisionskrävande arbetsuppgift
- 12 Behov av justering
- 13 Stor variation av den geometriska omgivningen (toleransspridning), dvs. graden av passning och justering skiljer sig mellan produkterna.
- 14 Behov av detaljerade arbetsinstruktioner
- 15 Mjukt och böjligt material
- 16 Avsaknad av omedelbar kvittens på att arbetet är rätt utfört, ex. genom ex. ett tydligt klick ljud eller överensstämmelse med referenspunkter.

#### **16 kriterier för låg monteringskomplexitet**

- 1 Standardiserat eller godkänt sätt att utföra arbetsuppgiften på
- 2 Få delar/komponenter att montera/förmonterade komponenter/modullösningar (integrerad monteringslösning)
- 3 Lösning som är snabb och enkel att montera/utföra (ej tidskrävande)
- 4 Tydlig monteringsposition för delar och komponenter
- 5 God åtkomst
- 6 Synlig montering (ej skyddad)
- 7 Goda ergonomiska förutsättningar utan risk för skadlig inverkan på montören/operatören
- 8 Ej montörs/operatörs beroende arbetsuppgift som inte kräver mycket erfarenhet/träning för att bli rätt utförd
- 9 Arbetsuppgiften är ej beroende av monteringsordning
- 10 Noggrann subjektiv bedömning av passning eller toleranser krävs inte
- 11 Ej precisionskrävande arbetsuppgift; ingen noggrann passning krävs
- 12 Ingen justering krävs
- 13 Lätt inpassning; självpositionerande delar och komponenter. Montering som kan kontrolleras i tre dimensioner (X, Y, Z).
- 14 Självklara arbetsuppgifter/operationer som inte kräver utförligt beskrivna arbetsinstruktioner.
- 15 Formbeständigt material som inte ändrar form eller design vid montering.
- 16 Omedelbar kvittens på rätt utfört arbete genom ex. ett tydligt klickljud eller överensstämmelse med referenspunkter.

### **6.2.2 Jämförelse av två metoder för komplexitetsbedömning**

Under projektet upptäcktes att det fanns ytterligare en metod för komplexitetsbedömning på Chalmers som också syftar till att göra en helhetsbedömning av monteringskomplexitet. Projektet beslutade därför att göra en studie för att jämföra den metoden med den som utvecklats i PEGASUS. Den metod som kallas CXI (montörsupplevd komplexitet) bygger på hur montören upplever komplexitet i löpande produktion och har processen i fokus. Metoden CXB (grundläggande komplexitet) har utvecklats i PEGASUS och bygger på

bedömning av grundläggande monteringskomplexitet hos olika monteringskoncept. Här är produkten i fokus. Bägge syftar till förbättrade förutsättningar vid manuell montering, förbättrad ergonomi, ökad kvalitet och minskade kostnader. Resultaten från jämförelsestudien visade att metoderna till stor del bedömer olika tillverkningsförutsättningar men att de kan komplettera varandra.

Genom **bedömning av både grundläggande monteringskomplexitet och montörsupplevd komplexitet** vid tillverkning kan en större förståelse erhållas för hur olika förutsättningar under både konstruktion och tillverkning kan påverka kvalitetsutfall, produktivitet och arbetsmiljö.

### 6.2.3 Kalkylmodell för prediktiv bedömning av monteringsergonomiska förutsättningar

En verifierad kalkylmodell för prediktiv bedömning av monteringsergonomiska förutsättningar med koppling till kvalitet har utvecklats som kan utgöra ett beslutsstöd vid val av monteringslösningar och tillverkningskoncept ur ett ergonomi-kvalitets-ekonomi perspektiv. **Samband mellan monteringsergonomiska förutsättningar och kvalitetutfall kan härigenom styrkas i ekonomiska termer**, något som ofta efterfrågats men som tidigare saknats. Kalkylmodellen bedöms vara generellt applicerbar vid all slags tillverkning i både större och mindre företag. Tilltänkta användare är projektingenjörer, beredningsingenjörer och ergonomer.

$$C = W(N_{on} \times Ta_{on} + N_{off} \times Ta_{off} + N_a \times Ta_{off} + N_{yard} \times T_t + C_{effort} \times N_{effort}) + N_{scrap} \times C_{scrap} + C_{fb} \times N_{fb} + WRSL + C_{fcomp} + C_{rec} + C_{bw} (?)$$

#### Costs:

**C** = total cost for all manual assembly related errors

**W** = labor cost/time unit

**C<sub>scrap</sub>** = average scrap cost/item

**WRSL** = cost for work related sick leave and rehabilitation

**C<sub>fb</sub>** = cost for errors of factory blocked cars (TRACY)

**C<sub>fcomp</sub>** = cost for errors of factory complete cars (VRT)

**C<sub>rec</sub>** = cost for recall/repair of cars distributed to the final customers (FARG)

**C<sub>effort</sub>** = cost of staff/time unit in additional efforts e.g. meetings, controls, expanded staffing etc.

**C<sub>bw</sub>** = cost for lost brand image and customer's dissatisfaction (badwill)

#### Number of errors:

**N<sub>on</sub>** = number of quality errors online

**N<sub>off</sub>** = number of quality errors offline

**N<sub>a</sub>** = number of audit quality remarks

**N<sub>scrap</sub>** = number of scrapped items

**N<sub>yard</sub>** = number of cars with errors, in the yard

**N<sub>fb</sub>** = number of factory blocked cars

#### Action time (minutes):

**T<sub>aon</sub>** = action time online

**T<sub>aoff</sub>** = action time offline

**T<sub>t</sub>** = transfer time of cars in the yard

#### Number of extra staff:

**N<sub>effort</sub>** = number of people involved in additional efforts

#### Monteringsrelaterade kostnader i fabrik vid manuell montering:

- för fel åtgärdade online x genomsnittlig åtgärdstid/feltyp
- för fel åtgärdade off-line x genomsnittlig åtgärdstid/feltyp
- för antalet kasserade artiklar och komponenter
- för antal bilar körda och uppställda (transporttid) på uteplats i väntan på åtgärd
- för antal fel upptäckta vid återkommande revision varje vecka av färdiga bilar
- för antal spärrade bilar med fel som måste åtgärdas
- för extra tid och resurser, ex. extra personal, möten, uppföljning etc.
- för arbetsrelaterad sjukfrånvaro och behandling (genom s.k. hälsokalkyler)

#### Monteringsrelaterade kostnader på marknaden:

- för åtgärder av fel (reklamationer) på verkstäder i Sverige och utomlands
- för åtgärder av allvarliga fel (återkallande av bilar) i Sverige och utomlands
- för förlorad förtroendet för varumärket och dåligt rykte

Metoden har potential att **kraftigt reducera både risken för ohälsa, kvalitetsbristkostnader och miljöpåverkan** (genom mindre kassationer, omarbetning mm.) samt bidra till **ökad leveransprecision**.

Ovanstående metoder bidrar till FFIs mål både på övergripande program- och delprogramnivå genom att kunna vara effektiva och användarvänliga verktyg vid ergonomiutvärdering och arbetsplatsutformning. Genom tidig riskidentifiering bidrar dessa till ökad kvalitet och produktivitet och effektivitet genom minskat antal fel, minskade kostnader och förbättrad arbetsmiljö och miljö genom minskat svinn och omarbetning. Ett ökat ekonomiskt, ekologiskt och socialt hållbarhetsperspektiv möjliggörs härigenom vid framtida produkt- och produktionsutveckling.

#### **6.2.4 Intervjustudie av beslutsfattare**

Intervjustudien av beslutsfattare på hög chefsnivå i nio svenska tillverkningsföretag hade frågeställningen "På vilket sätt tar svenska företag till sig och tillämpar ny kunskap med tonvikt på ergonomi och geometri? Vilka möjligheter till förbättring finns?"

Resultaten visar att många företag har svårt att ta till sig forskningsresultat av flera skäl. Det upplevs svårt att hitta artiklar och rapporter av intresse för den egna verksamheten. Dessa är dessutom inte lättlästa för personer utan vetenskaplig skolning. Endast 4 av 9 företag läste forskningsartiklar. Assimilering och implementering av vetenskapligt verifierade metoder och arbetssätt inom de här områdena kan innebära stora (för stora) krav på tid och resurser, något som mindre företag ofta inte har. Lönsamhetskrav utgör ett hinder för ergonomiåtgärder. Ägandeskapet av förändringen måste vara kristallklart från början. Organisationen behöver också hjälp från ledningen med prioritering av övriga arbetsuppgifter under pågående implementering. Hårt styrda underleverantörskontrakt är också ett hinder för förändring. Baserat på dessa resultat lämnar projektet följande rekommendationer:

- 1) För ledningens stöd och hjälp med att förändra organisationen föreslår projektet en ny geometriseringsprocess som inkluderar monteringskomplexitet.
- 2) Inför lämpliga verktyg som stöd. För storföretag kan metoderna utvecklas färdigt och bli tillgängliga i mjukvaran RD&T. För små/medelstora företag finns verktyget i Excel redan nu tillgängligt för spridning.
- 3) Utbilda en kritisk massa av personer i rätt kompetens.



## 6.3 DP3: Verktyg för proaktiv monteringsergonomisk och geometrisk kvalitetssäkring för hållbar produktion

I delprojekt 3 har verktyg i demonstratorform utvecklats.

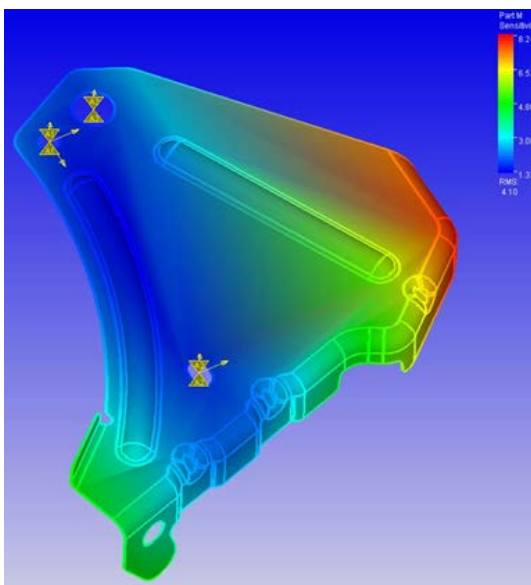
### 6.3.1 Proaktiv geometrisk kvalitetssäkring i CAT-verktyg

Det första verktyget är avsett för proaktiv geometrisk kvalitetssäkring i tidiga faser på större företag som använder sig av verktyg för CAT (Computer Aided Tolerancing). En demonstrator är framtagen i den existerande, kommersiella mjukvaran RD&T.

Att simulera känslighet för variation, eller geometrisk robusthet, för komponenter som monteras ihop manuellt är svårt. I den virtuella världen är det oftast antaget att alla referenspunkter (infästningar) för montering är i korrekt fysiskt kontakt och att frihetsgrader är låsta enligt ett visst system. En operatör lyckas dock inte alltid med detta utan artikeln får en annan position än den som är konstruerad av ingenjören, vilket skapar en skillnad mellan virtuellt och verkligt resultat. Därför har vi introducerat ett **nytt robusthetstal som inkluderar både känslighet för variation och monteringskomplexitet**, implementerat som en analysfunktion i CAT-verktyget RD&T. Syftet med detta är att stödja det allra första, tidiga, systemutvecklingsarbetet där konceptet tas fram samt att skapa en medvetenhet om eventuella kommande problem tidigt. Projektets mål att minska mängden fel med 50% i produktion som härrör från denna typ av problem anser vi vara uppfyllt med råge. Detta med hänsyn till att vi visat i DP1 att **endast 12 % av det geometriska kvalitetssäkringsarbetet har processpåverkan idag**. Om ett företag väljer att följa den i projektet nyutvecklade geometrisäkringsprocessen och samtidigt använda CAT-verktyget som också utvecklats i projektet, **kommer 100 % av simuleringarna att inkludera processens påverkan på slutresultatet**. Minskningen av fel borde då bli avsevärt mer än 50 %, likaså borde det vara enkelt att uppnå en minskad mängd justering och kassation pga. detta.

Verktyget för proaktiv geometrisk kvalitetssäkring är enkelt att använda, nedan en kort summering av hur det fungerar:

**Steg 1:** En vanlig geometrisk stabilitetsanalys färgkodar känsligheten för variation. Funktionen ingår i det normala geometriska kvalitetssäkringsarbetet i tidiga faser idag. Med hjälp av denna analys optimeras systemlösningen för artikeln. (RD&T)



**Steg 2:** (Nytt) Ingenjören bedömer de 16 komplexitetskriterierna för den aktuella artikeln med stöd av expertis från beredning och produktion. (RD&T)

Criteria	YES	NO
1. Many different ways of doing the task	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>
2. Many individual details and part operations	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
3. Time demanding operations	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>
4. No clear mounting position of parts and components	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>
5. Poor accessibility	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
6. Hidden operations	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>
7. Poor ergonomics conditions implying risk of harmful impact on operators	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>
8. Operator dependent operations requiring experience/knowledge to be properly done	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
9. Operations must be done in a certain order	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
10. Visual inspection of fitting and tolerances, i.e. subjective assessment of the quality results	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
11. Accuracy/precision demanding	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
12. Need of adjustment	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>
13. Geometric environment has a lot of variation (tolerances), i.e. level of fitting and adjustment vary between the products	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>
14. Need of clear work instructions	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
15. Soft and flexible material	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
16. Lack of (immediate) feedback of properly done work, e.g. a click sound and/or compliance with reference points	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>

Stability	0.09
Complexity	0.44
SUM (RMS)	0.22

**Steg 3:** (Nytt) Stabilitet och komplexitet summeras till ett totalt robusthetstal som kan användas för att bedöma och jämföra olika systemlösningar och välja den som ger högst kvalitet. Dessa tre komponenter färgkodas också. På detta sätt är det enkelt att i tidiga faser välja de systemlösningar som har bäst kombination av geometrisk kvalitet (stabilitet) och låg manuell monteringskomplexitet. (RD&T)

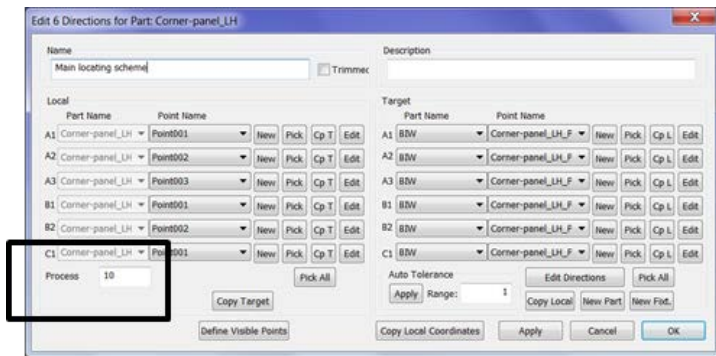
Stability	0.09
Complexity	0.44
SUM (RMS)	0.22

Tidigare i projektet identifierades ett behov att kunna ta hänsyn till manuell monteringskomplexitet även i den detaljerade konstruktionsfasen. Detta har medfört att demonstratorn i CAT har utökats och fem publikationer har skrivits rörande geometrisäkring – i stället för planerade tre. Dock har detta gjort att den planerade licentiavhandlingen kommer att publiceras senare under 2016.

Fokus i den detaljerade konstruktionsfasen är balansering av geometriska toleranser och krav och denna kvalitetssäkring görs i huvudsak genom att göra 3D toleranskedjeberäkningar (variations- och bidragsanalys) i CAT. Därför har vi utökat demonstratorn i CAT med en funktion för att på ett enkelt sätt kunna hjälpa simuleringsingenjören att addera processvariation (från operatören) till sin variationssimulering på ett strukturerat sätt med hjälp av monteringskomplexitetsmetoden som utvecklats i PEGASUS.

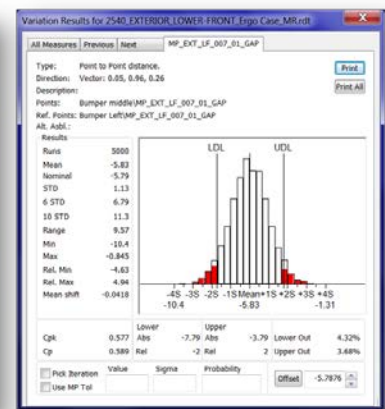
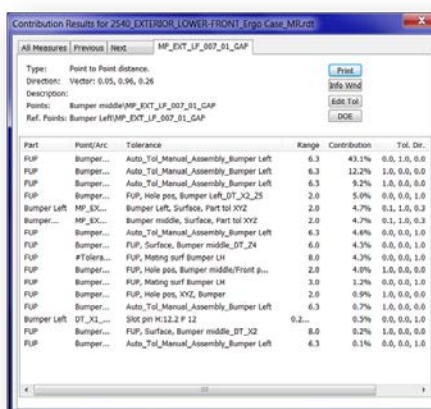
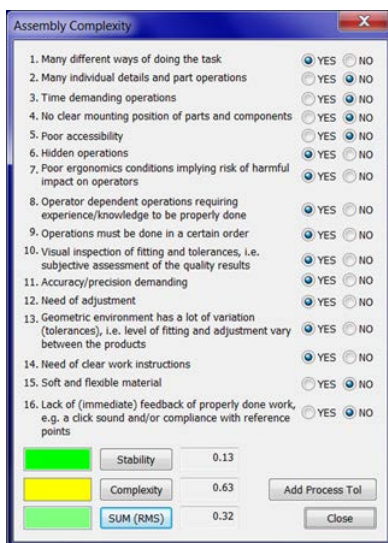
#### **Steg 4:**

Processtoleransen för den aktuella typen av artikel/monteringsstyp beräknas genom att efterbearbeta mätdata från löpande produktion för liknande scenarion. Detta görs med en tidigare utvecklad "root-cause"-metod (Wärmefjord, K., Söderberg, R. and Carlson, J. S.). Detta är ett grundarbete som behöver göras för olika typer av monteringar och artiklar innan man kan tillämpa metoden för variationssimulering inklusive processpåverkan och sparas lämpligen i en databas som simuleringsingenjörerna kan hämta information från. Processtoleransen läggs in i CAT-verktyget vid definitionen av positioneringssystemet. (RD&T)



### Step 5:

I nästa steg räknas en processtolerans ut som utifrån grundvärdet för typen av montering/artikel och monteringskomplexiteten adderas automatiskt till positioneringssystemet och påverkar sedan både variations- och bidragsanalysen, d.v.s. uppfyllnaden av de ställda kraven och den geometriska kvaliteten.

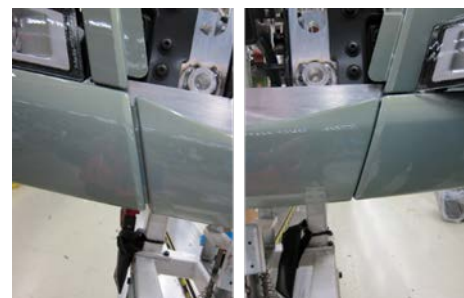


Detta medger förbättrad noggrannhet i simuleringsresultaten och markerar behovet av att ta hänsyn till manuell monteringskomplexitet i hela den virtuella produktutvecklingsfasen på ett proaktivt sätt.

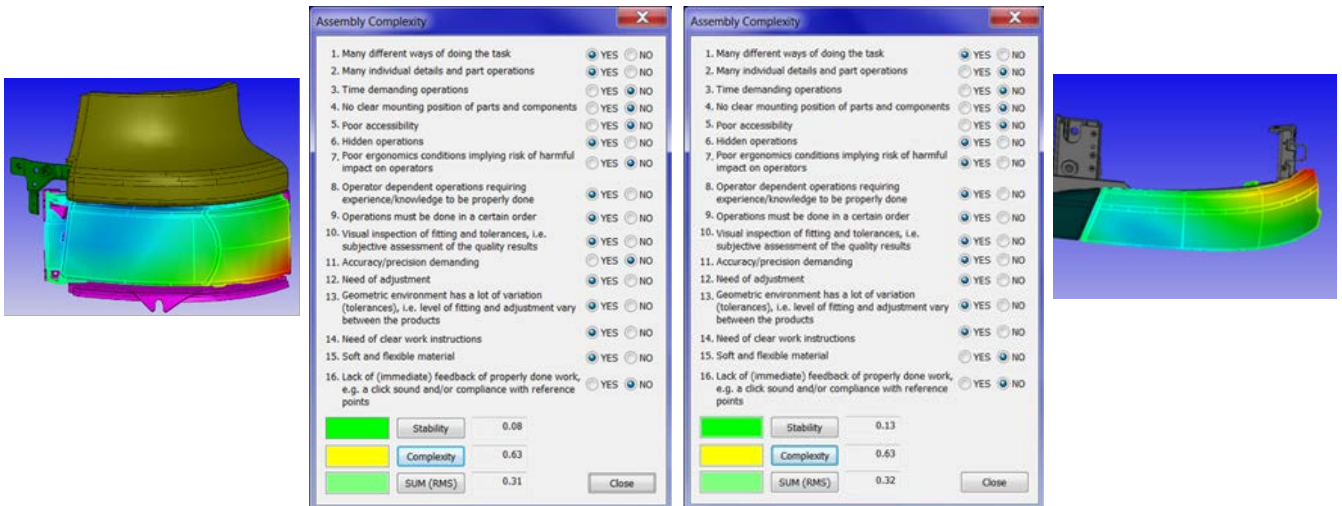
### 6.3.2 Verifiering av demonstratorn i CAT tillsammans med Volvo GTT och Scania CV

Två casestudier har genomförts i fordonsindustrin med syftet att testa och verifiera verktygen som utvecklats i PEGASUS. Dessa utfördes på Volvo GTT och Scania CV.

Båda studierna belyser ett vanligt problem; att skapa korrekta virtuella modeller av verkligheten är svårt. De två casen innefattar systemlösningar som utifrån traditionell geometrisk säkring är robusta men trots det inte robusta i verklig produktion. En traditionell 3D toleranskedjeberäkning i CAT ger svaret att båda systemen skall fungera men ändå gör de inte det.



Studierna visar att en anledning till detta är att i båda fallen är den manuella monteringskomplexiteten hög. Om metoden och verktygen som utvecklats i PEGASUS hade använts i tidiga faser för dessa system hade detta kunnat upptäckas tidigt i produktutvecklingen istället för i produktionen. Båda casen visar också att hög monteringskomplexitet ger fler fel och mer problem med geometrisk kvalitet. Studierna verifierar behovet av ett tidigt proaktivt geometrisäkringsarbete som inte bara inkluderar referenspunkter med krav- och toleranssättning utan också tar hänsyn till monteringsprocessen och operatörens påverkan. Båda casen visar god överensstämmelse mellan faktiska resultat i produktion och simulerat resultat med hjälp av CAT-verktyget utvecklat i PEGASUS.



### 6.3.3 Ny geometrisäkringsprocess

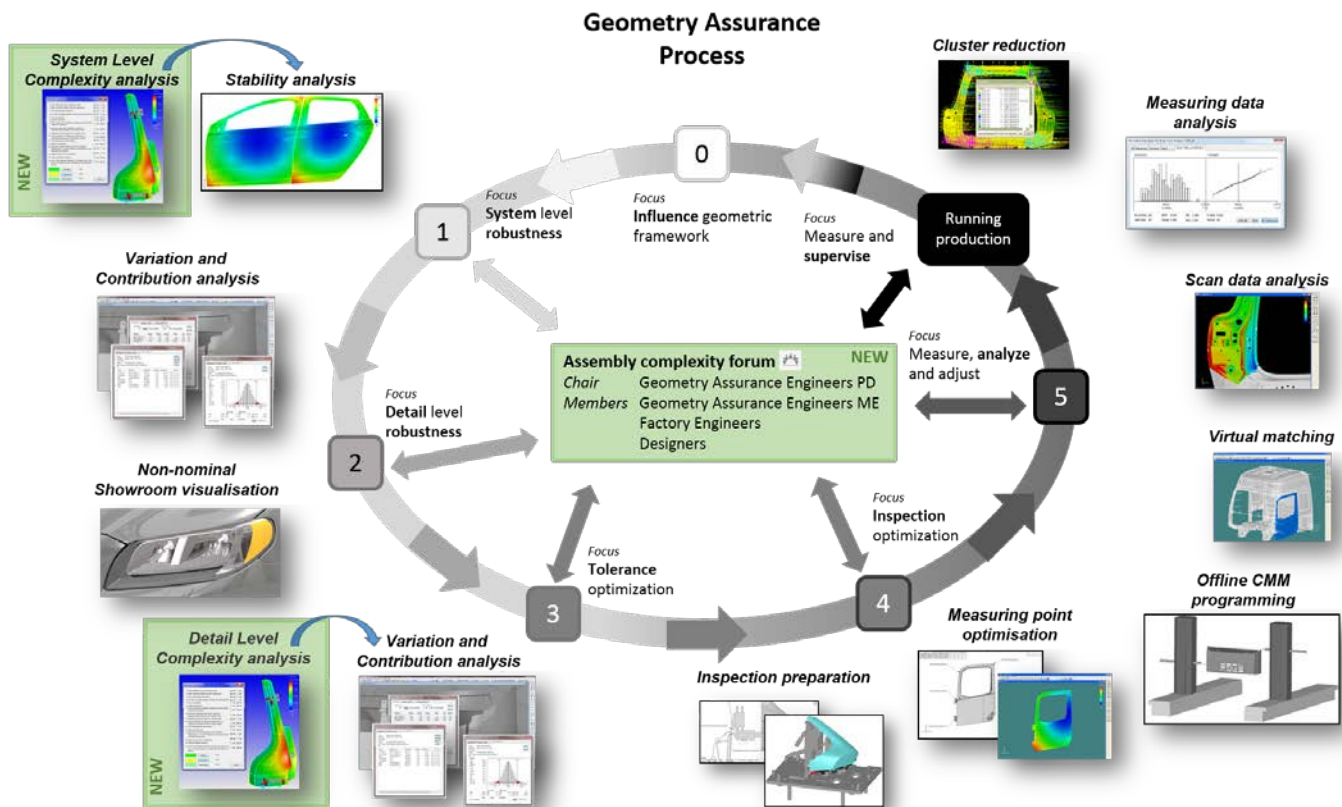
Genom sammanlänkning av en generisk produktutvecklingsprocess, tidigare forskning med avseende på geometriprocessen och resultaten från PEGASUS har en ny geometrisäkringsprocess tagits fram. Den inkluderar en metod och processbeskrivning över hur CAT-verktyget som utvecklats i PEGASUS bör användas.

Den föreslagna geometrisäkringsprocessen är baserad på tidigare forskning, existerande processer i industrin och på vilken data som är tillgänglig i respektive steg i produktutvecklingen. Genom att **introducera tidig analys av manuell monteringskomplexitet i geometrisäkringsaktiviteterna** är det möjligt att skifta fokus från reaktiva, dyra brandsläckningsaktiviteter i sena faser till förhållandevis enkla design- och konstruktionsaktiviteter i tidiga faser.

En **viktig framgångsfaktor** för att lyckas med att implementera den proaktiva kvalitetssäkringsprocess som beskrivs nedan är att forumet där alla tre delarna av företaget är representerade (konstruktion, beredning och produktion) är bemannat med rätt kompetens och att det hålls aktivt genom hela projektet. Det krävs också utbildning av de som arbetar med geometrisäkring i tidiga faser då deras ansvar ökar.



Med den föreslagna processen påbörjas definitionen och specifikationen monteringsoperationen redan i konceptutvecklingen för att säkerställa ett minimum av ändringar då fabriken gradvis går från projektfas och höjer produktionstakten till löpande produktion. Detta resulterar i produkter som har hög geometrisk robusthet, låg monteringskomplexitet, högre kvalitet, mindre kvalitetsbristkostnader och mindre kassation. Beskrivningen av de olika faserna ligger i Appendix A.



### 6.3.4 Demonstrator för bedömning av manuell monteringskomplexitet i Excel

Utöver CAT-verktyget har ytterligare ett verktyg tagits fram som demonstrator. Detta skulle möjliggöra beräkningar och analyser av manuell monteringskomplexitet på en enkel plattform. Denna plattform blev Excel då det programmet anses vara vanligt i de flesta företag, stora som små. Ursprungligen var målgruppen små/medelstora företag men det visade sig under projektets gång finnas intresse för detta verktyg även hos storföretagen. Tanken är i det fallet att kunna sprida insikterna om vilken påverkan manuell monteringskomplexitet har för slutresultatet till avdelningar som vanligtvis inte arbetar med den inriktningen.

I denna demonstrator finns detaljerade instruktioner och exempel på hur man bedömer olika komplexitetskriterier för olika situationer. Demonstratorn bifogas som separat dokument till VINNOVA.

Checklista för bedömning av manuell monteringskomplexitet						
<i>Utfärdare: A.Falck, Produkt och Produktionsutveckling, Chalmers, Göteborg, Sverige</i>						
Kriterium	LK (OK)	HK (Ej OK)	Problem beskrivning	Åtgärd	Ansvarig	Kommentar
1	x					
2	x					
3		x				
4	x					
5		x				
6	x					
7	x					
8		x				
9		x				
10		x				
11	x					
12		x				
13	x					
14	x					
15		x				
16	x					
<b>Summa:</b>	<b>9</b>	<b>7</b>				
<b>Helhetsbedömning</b> (kryssa i lämplig ruta): (Vid behov, kontakta ergonom eller annan sakkunnig)				<input checked="" type="checkbox"/>	Ej OK	
				<input type="checkbox"/>	Ej klar	
				<input type="checkbox"/>	OK	

## 6.4 Summering av resultat

Resultaten i projektet har överträffat målen. Vi har tagit fram industriellt verifierade demonstratorer med mer funktionalitet än som var intentionen i projektbeskrivningen. Det finns också tydliga metodbeskrivningar för hur dessa skall användas.

Genom förbättrade möjligheter att redan under tidig produktutvecklingsfas kunna identifiera potentiella kvalitets- och ergonomirisker kan ökad effektivitet uppnås och kostnader reduceras. Vår bedömning är att detta kan förväntas resultera i förbättrad arbetsmiljö, ökad lönsamhet och förbättrad konkurrensförmåga. När det gäller "människan i fabriken" finns en stor potential att bidra till förbättrad arbetsmiljö ur både fysiskt och kognitivt perspektiv genom bättre samverkan mellan människa och maskin, minskad skaderisk och ökad säkerhet. Sist men inte minst bör förbättrade arbetsvillkor resultera i mer attraktiva arbetsplatser. Med projektet har vi bidragit till de allmänna och specifika målen i hållbar produktion. Detta stärker svensk industris internationella konkurrenskraft, vidare så bidrar det till följande specifika mål: Konkurrenskraft, 5.2.2 Kvalitet; 5.4.4 Ledtid 5.5.2; 5.5.4 och Flexibilitet 5.6.4.

## 7 Spridning och publicering

### 7.1 Kunskaps- och resultatsspridning

Hur har/planeras projektresultatet att användas och spridas?	Markera med X	Kommentar
Öka kunskapen inom området	x	Publiceringar, konferenser, utbildning, fortsatt forskning inom området
Föras vidare till andra avancerade tekniska utvecklingsprojekt	x	Kontakter och samarbete med andra forskare.
Föras vidare till produktutvecklingsprojekt	x	När industriella partners implementerat resultaten så kommer de att användas inom produktutveckling.
Introduceras på marknaden	x	VCG och AB Volvo utreder hur de kan implementera detta. Berörda SME kommer att få del av resultaten.
Användas i utredningar/regelverk/ tillståndsärenden/ politiska beslut		Inte vad som är känt i nuläget.
Resultatdag: presentation av forskningsresultat på Scania CV		Genomförd den 15 mars 2016.
Resultatdag: presentation av forskningsresultat på Volvo GTT.		Genomförd den 25 februari 2016. Önskemål på ytterligare ett möte.
Resultatdag: presentation av forskningsresultat på Volvo Car Group.		7 april 2016
Resultatdag: presentation av forskningsresultat för SME på Swerea IVF, Mölndal.		Maj 2016

Den monteringsergonomiska kalkylmodellen för beräkning av totala kostnader som är utvecklad i PEGASUS kommer att kunna tillämpas i FFI-projektet CROMM vid bedömning av belastnings- och monteringsergonomiska risker och förknippade åtgärds-kostnader.

### 7.2 Publikationer

- Kalkylmodell för beräkning av kostnader för dålig monteringsergonomi. Artikel: A model for calculation of the costs of poor assembly ergonomics. Falck, A. and Rosenqvist, M. Publicerad i Int.J. of Industrial Ergonomics 44 (2014) 140-147.
- Samband mellan monteringskomplexitet och monteringsergonomi. Artikel: Assembly failures and action cost in relation to complexity level and assembly ergonomics in manual assembly. Falck, A., Örtengren, R., Rosenqvist, M. Publicerad i Int. J. of Industrial Ergonomics 44 (2014) 455-459.
- Två stycken masteruppsatser, 2013:
  - Adjustment costs related to assembly complexity and ergonomics utförd på Volvo Lastvagnar.
  - Evaluating complexity in manual assembly – Identification of factors influencing quality deficiencies and related costs utförd på Volvo Car Corporation.
- Kriterier för monteringskomplexitet och deras påverkan på kvalitetsutfallet. Artikel: Complexity criteria and their impact on assembly quality in actual production. Falck, A., Örtengren, R., Rosenqvist, M., Söderberg, R. Inskickad till Int. J. of Industrial Ergonomics 14/9 2015. (skickas till Vinnova efter publikation)
- Intervjustudie av beslutsfattare på ledningsgruppsnivå i 9 svenska företag. Artikel: Assimilation and exploitation of new knowledge in Swedish companies with emphasis on production ergonomics and assembly-related errors. Falck, A., Wahlborg, P.-J., Rosenqvist, M., Söderberg, R. Inskickad till Int. J. of Production Research, april 2016. (skickas till Vinnova efter publikation)



- Jämförelse av två metoder för bedömning av monteringskomplexitet. Artikel: A comparison of two methods for assessment of assembly complexity. Falck, A., Mattsson, S., Andersson, L., Tarrar, M., Rosenqvist, M., Söderberg, R. Konferensartikel vid NES-konferens, 1-4 nov 2015, Lillehammer, Norge samt tidskriftsartikel insänd till Int. J. of Production Research, dec. 2015. (skickas till Vinnova efter publikation)
- Utförlig bakgrund och beskrivning av grundkomplexitet: Artikel: Proactive assessment of basic complexity in manual assembly. Development of a tool to predict and control operator induced errors. Falck, A., Örtengren, R., Rosenqvist, M., Söderberg, R. Artikeln submittas till Int. J. of Production Research, mars 2016. (skickas till Vinnova efter publikation)
- Konferensbidrag accepterat till CIRP CATS konferens i Göteborg, 16-18 maj, 2016: Falck, A., Örtengren, R., Rosenqvist, M., Söderberg, R. Titel: Criteria for assessment of manual assembly complexity. (skickas till Vinnova efter publikation)
- Konferensbidrag; publicerat ASME IMECE 2013 San Diego 15-21 november Rosenqvist, M., Falck, A., Wärmefjord, K. och Söderberg, R. (2013) "Operator related causes for low correlation between cat simulations and physical results"
- Konferensbidrag; publicerat CIRP CATS 2014 Dresden 12-14 november: Rosenqvist, M., Falck, A., Lindkvist, L. och Söderberg, R. (2014) "Geometrical robustness analysis considering manual assembly complexity"
- Konferensbidrag; publicerat ASME IMECE 2015 Houston 13-19 november Rosenqvist, M., Falck, A., och Söderberg, R. (2015) "Working procedure for early proactive geometry assurance considering manual assembly complexity"
- Konferensbidrag; accepterat CIRP CATS 2016 Göteborg 16-18 Maj: Rosenqvist, M., Falck, A., och Söderberg, R. (2016) "Including measures of assembly complexity in proactive geometry assurance, a case study" (skickas till Vinnova efter publikation)
- Konferensbidrag; accepterat CIRP CAT 2016 Göteborg 18-20 Maj: Rosenqvist, M., Falck, A., Lindkvist, L. och Söderberg, R. (2016) "Variation Analysis considering manual assembly complexity in a CAT tool" (skickas till Vinnova efter publikation)
- Licentiatavhandling planerad 2016, Q3 Göteborg, Chalmers "How can geometrical quality for manual assembly be improved?", Rosenqvist, M (skickas till Vinnova efter publikation)

#### **Följande två publikationer planerades men skrinlades:**

*"Influence of task complexity and ergonomics in manual assembly work."*

Denna artikel blev aldrig publicerad. Den skulle bygga på ett tidigare examensarbete på Volvo LV 2012 men vi tyckte inte den hade något nyhetsvärde som vetenskapligt publicerad artikel, vilket vi hoppats.

*"The influence of production ergonomics on product quality in truck assembly."*

Det gick inte att göra en sådan fullständig utvärdering eftersom felutfallet inte kunde kopplas direkt till varje enskilt monteringsmoment. Däremot finns detta gjort i examensarbetet på Volvo Lastvagnar 2013.

#### **7.2.1 Slutresultat**

Före projektet planerades 9 publikationer till konferenser och journaler samt en licentiatavhandling och två mastersavhandlingar. Detta har utökats under projektets gång och kommer totalt att bli **15 publikationer**.

## 8 Slutsatser och fortsatt forskning

Både monteringsergonomiska förutsättningar och monteringskomplexitet påverkar felutfallet i och åtgärdskostnader hög grad vid manuell montering. Ju sämre de monteringsergonomiska förutsättningarna är desto fler monteringsrelaterade fel uppstår och ju högre blir de därmed förknippade åtgärdskostnaderna.

- Ju mer komplexa manuella monteringsuppgifter är desto högre blir de sena (reaktiva) åtgärdskostnaderna för fel och kassation av material.
- Flera komplexitetskriterier tillsammans påverkar felutfallet och åtgärdskostnaderna. Vilka komplexitetskriterier som har störst påverkan på felutfall och kostnader kunde inte med säkerhet fastställas. Av detta följer att alla (16) kriterier alltid skall beaktas.
- Det fanns signifikanta samband mellan monteringskomplexitet och monteringsstid. Monteringsstid och fysisk belastningsnivå uppvisade dock inga tydliga samband.

**Fortsatt forskning:** För att om möjligt ta reda på hur olika komplexitetskriterier samverkar och interagerar bör fler och mer ingående sambandsanalyser göras.

Kalkylmodellen för proaktiv bedömning av monteringsergonomiska förutsättningar med koppling till kvalitet möjliggör beräkning och jämförelse av eventuella kvalitetsbristkostnader ur ergonomi-kvalitets-ekonomi perspektiv.

Ju senare monteringsrelaterade fel upptäcks desto dyrare är de att åtgärda. Det är sålunda mest kostnadseffektivt (lönsamt) att förutse och förhindra att kvalitetsfel och ergonomiproblem uppstår genom riskidentifiering och val av mer hållbara och monterings effektiva lösningar under tidig produktutvecklingsfas. Både kvalitets- och ergonomiproblem kan förebyggas samtidigt. Ergonomiproblem på både hög och måttlig fysisk belastningsnivå måste åtgärdas då bägge leder till många fel. Arbetsmoment på hög fysisk belastningsnivå leder till många fel men även arbetsmoment på måttlig fysisk belastningsnivå bidrar i hög grad till monteringsfel.

Den jämförande studien av två metoder för bedömning av monteringskomplexitet visade att dessa huvudsakligen bedömde olika förutsättningar. Den ena metoden bedömde montörsupplevd (dynamisk) komplexitet i löpande produktion. Den andra metoden bedömde grundläggande (statisk) monteringskomplexitet vid design av monteringskoncept och produktlösningar under produktutvecklingsfasen. Resultaten visar att metoderna kan komplettera varandra och att bägge behövs för heltäckande riskbedömning.

**Fortsatt forskning:** Ytterligare studier behövs för att ta reda på om och hur dynamisk och statisk komplexitet samverkar eller motverkar varandra beträffande monterbarhet, kvalitet och produktivitet.

Intervjustudien av beslutsfattare på hög chefsnivå i nio svenska tillverkningsföretag visade att många företag har svårt att ta till sig ny forskning på grund av att publikationer som är intressanta för den egna verksamheten är svåra att hitta och ta till sig. Våra resultat överensstämmer med tidigare forskning av bland andra Debackere and Veugelers (2005) som påvisade att akademisk forskning har svårt att nå ut och tillämpas i företag och organisationer, särskilt SME. Genom anpassat stöd och effektivare metoder för ökad spridning och tillämpning kan innovationsförmåga och ökad lönsamhet i företagen befrämjas betydligt. Mot bakgrund att SME utgör 99 % av alla företag i Europa och att 10-40 % av ett genomsnittligt företags omsättning utgörs av kvalitetsbristkostnader så föreligger en mycket stor (dold) förbättringspotential. Genom tillämpning av vetenskapligt validerade risk bedömningsmetoder och verktyg under tidig produktutvecklingsfas kan stora besparingar göras och konkurrensförmågan avsevärt förbättras.

Vi har kunnat visa ett tydligt samband mellan geometrisk kvalitet och manuell monteringskomplexitet men i dagens virtuella geometriska kvalitetssäkring saknas både verktyg och kunskap för att inkludera operatörspåverkan. Det innebär att dagens virtuella simuleringar överensstämmer dåligt med det verkliga resultatet i produktionen.

Verktøget i CAT som utvecklats inom PEGASUS möjliggör att proaktivt kunna ta hänsyn till manuell monteringskomplexitet i de tidiga utvecklingsfaserna, både med avseende på stabilitetsanalys (robusthet) och variationsanalys (kravuppfyllnad). Detta ger en tidig medvetenhet om processpåverkan, mindre fel i produktion och mindre kassation samtidigt som korrelationen mellan virtuella simuleringar och verkliga resultat förbättras. Industriella tester har verifierat behovet av ett tidigt proaktivt geometriskt kvalitets-säkringsarbete som tar hänsyn till både monteringsprocessen och operatörspåverkan. Testerna har även verifierat verktygets noggrannhet.

Med hjälp av projektresultatet möjliggörs en minskning av mängden geometrirelaterade fel i produktion vilket gör att kvaliteten höjs SAMTIDIGT som arbetsmiljön förbättras. Eftersom mängden kassationer och omarbeten minskar, minskar även resursförbrukningen i fabriken.

#### **Fortsatt forskning:**

- Vidareutveckla demonstratorn i CAT:
  - Addera stöd för att underlätta bedömningen av monteringskomplexitet. Hur säkerställer man en korrekt och konsekvent bedömning?
  - I avancerade produkter, som exempelvis bilar, sker monteringen i många steg. Ett nästa steg är därför att kunna utföra en simulering där monteringen av flera artiklar ingår.
- Vad händer med kvaliteten om operatören inte lyckas sätta fast komponenten ordentligt? Om ett fästelement inte får kontakt alls kan övriga fästelement ta över dess funktion. Därför finns ett behov av att kunna prediktera hur mycket variation operatören adderar analytiskt – utan att behöva tillgång till mätdata från produktion.
- Hur kan det jobb som görs i tidiga produktutvecklingsfaser map manuell monteringskomplexitet användas för att skapa bättre stöd/instruktioner för operatören i produktionsfasen? Kan augmented reality vara en lösning?

## 9 Deltagande parter och kontaktpersoner

Följande företag har medverkat i projektet.



**Volvo Car Group** är den största biltillverkaren i Sverige. Företaget sysselsätter över 24 000 personer globalt och sålde 500 000 bilar år 2015. Komponenttillverkning sker i Skövde, Floby och Olofström och Zhangjiakou (Kina). Produktionsanläggningar för bilar finns i Göteborg, i Gent (Belgien) och i Chengdu och Daqing (Kina). Företaget har även monteringsfabriker i Malaysia.

Examensarbete, branschspecifik kunskap, problemställningar, case, utvärdering, teknikspridning	
Niklas Vemdal	Geometri & kvalitet
Carl Angervall	Geometri & kvalitet
Björn Mattsson	Leverantörskvalitet
Sari Rosenström	Produktionsergonomi
Alf Andersson	Geometri & kvalitet



Volvo Group Trucks Technology täcker hela värdekedjan från långsiktig forskning till slutlig leverans av kompletta fordon för produktion till Volvokoncernens lastbilsverksamhet. Företaget har 10 000 anställda som arbetar i globala team med fokus på att leverera tekniska produkter och tjänster i världsklass.

Examensarbete, branschspecifik kunskap, problemställningar, case, utvärdering, teknikspridning	
Johan Granath	Geometri & kvalitet
Lina Andersson	Produktionsergonomi



Scania är en ledande tillverkare av tunga lastbilar och bussar samt industri- och marinmotorer. Scania är verksam i 100 länder och har mer än 35 500 anställda. Omkring 12 300 personer arbetar på produktionsenheter i sju länder. Forsknings- och utvecklingsverksamheten är koncentrerad till Södertälje och sysselsätter cirka 2 900 personer.

Branschspecifik kunskap, problemställningar, case, utvärdering, teknikspridning	
Lars Hanson	Produktionsergonomi
Bertil Tamm	Geometri & kvalitet
Anne Clausen	Produktion och hälsa
Lena Nilsson	Produktion och hälsa

Swerea IVF erbjuder avancerade forsknings- och uppdragstjänster till den tillverkande och produktutvecklande industrin.

Problemställningar, intervjustudie, teknikspridning bland SME	
Per-Johan Wahlborg	Geometrisäkring

## 10 Referenser

- Bank, J. (1992). *The essence of total quality management*. Prentice Hall, New York. ISBN: 013284902x.
- Bishu and Drury, 1998 Bishu, R.R., Drury, C.G. (1988). Information Processing In Assembly Tasks: A Case Study. *Applied Ergonomics* 19(2), pp. 90-98.
- Booker, J.D., Raines, M. and Swift, K.G. (2001). *Designing Capable and Reliable Products*. Butterworth-Heinemann, Oxford, ISBN: 0 7506 5076 1.
- Debackere, K. and Veugelers, R. (2005). The role of academic technology transfer organizations in improving industry science links. *Research Policy* 34 (2005) 321-342.
- Dul, J., Neumann, P. (2009). Ergonomics Contributions to Company Strategies. *Applied Ergonomics* 40 (2009)745-752.
- Falck, A. and Rosenqvist, M. (2012). What are the obstacles and needs of proactive ergonomics measures at early product development stages? – An interview study in five Swedish companies. *International Journal of Industrial Ergonomics* 42 (2012) 406-415.
- Falck, A. and Rosenqvist, M. (2014). A model for calculation of the costs of poor assembly ergonomics. *International Journal of Industrial Ergonomics* 44 (2014) 140-147.
- Falck, A-C., Örtengren, R., Rosenqvist, M. (2014). Assembly failures and action costs in relation to complexity level and assembly ergonomics in manual assembly. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 44 (2014) 455-459.
- Falck, A., Örtengren, R., Rosenqvist, M. and Söderberg, R. (2016). Complexity criteria and their impact on assembly quality in actual production. To be published in *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2016.
- Fasth, Å. (2012). *Quantifying levels of automation – to enable competitive assembly systems*. Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden. ISBN: 978-91-7385-718-5.
- Freisleben, J. (2005). The opportunity costs of poor quality. *International Journal of Quality Assurance*, 2005, 9, 3-10; DOI: 10.1002/qaj.309.
- Harrington, H.J. (1987). *Poor-quality cost*, New York: Dekker, ISBN: 0-8247-7743-3.
- Rosenqvist, M., Falck, A., Lindqvist, L. and Söderberg, R. (2014). Geometrical robustness analysis considering manual assembly complexity. *CIRP CATS conference*, 12-14 Nov., 2014, Dresden, Germany.
- Sörqvist, L. (2001). *Kvalitetsbristkostnader, ett hjälpmedel för verksamhetsutveckling*. Andra upplagan, Studentlitteratur, Lund, Sverige.
- Wärmeffjord, K., Söderberg, R. and Carlson, J. S., 2010, "Including assembly fixture repeatability in rigid and non-rigid variation simulation" Proceedings of the ASME 2010 International Mechanical Engineering Congress & Exposition IMECE2010, Nov. 12-18, 2010, Vancouver, Canada
- Zhu, X., Hu, J., Koren, Y., Martin, S. (2008). Modeling of manufacturing complexity in mixed-model assembly lines. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 130, 051013–1 – 051013-10.

# Appendix A

## Metod och process för geometrisk totalrobust kvalitetssäkring

### 0. Planering (Planning):

Allmänt: Föregår Projektgodkännande och Produktutvecklingsprocessen. Möjligheter identifieras tillsammans med företagsstrategier och teknologitveckling. Leveranserna från denna fas är projektets uppdrag, dvs. mål, förutsättningar och begränsningar.

#### Geometrisäkring:

Geometry Assurance: Inga geometrisäkringsaktiviteter genomförs i denna fas. Däremot så bestäms ramverket för de kommande geometrisäkrings- och produktutvecklingsaktiviteterna här (tex vilken fabrik som skall användas, övrigripande nivå på geometriska krav etc.). Därför är det viktigt att representanter från geometrisäkringsorganisationen deltar i denna fas med teknisk indata.

### 1. Konceptutveckling (Concept Development):

Allmänt: Produktkoncept genereras och utvärderas. Ett eller flera koncept väljs ut för fortsatt arbete.

Geometrisäkring: Fokus i denna fas är robust konstruktion, dvs att använda stabilitetsanalysen i CAT för att optimera positioneringssystemen. Detta fastslår geometrisystem arkitekturen som beskriver hur de olika artiklarna i produkten är relaterade till varandra.

När detta utförs skall ett nytt forum skapas som består av geometrisäkringsingenjören från konstruktion (el motsvarande tex konstruktör), geometrisäkringsingenjören från beredning (eller motsvarande tex produktionsberedare) samt ansvariga från fabriken. I detta forum bedöms de 16 komplexitetskriterierna på systemnivå för varje koncept som genereras och positioneringssystemen optimeras både med avseende på geometrisk robusthet och manuell monteringskomplexitet. De olika geometriska kraven bestäms också denna fas av PQ geometriingenjören och utdata från forumet ovan blir indata för honom/henne för om de ställda geometriska kraven är realiserbara. Om det redan finns i forum i företaget där dessa roller träffas regelbundet så behövs inget nytt forum skapas utan existerande forum kan nyttjas och utökas med en punkt på agendan.

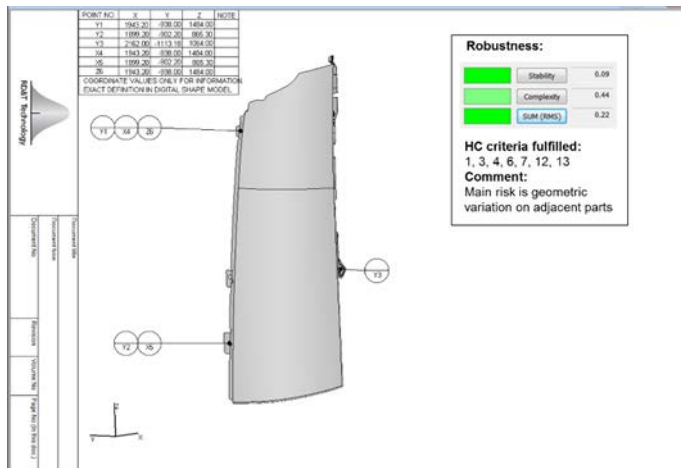
Detta nya forum kommer att ge uppmärksamhet och medvetenhet till manuell monteringskomplexitet in tidiga faser av projektet och möjliggör proaktivt arbete samt stöd för högre kvalitet och mindre problem i senare faser.

### 2. System konstruktion (System-level design):

Allmänt: Nedbrytning av produkten i delsystem och komponenter. Konstruktion av nyckelkomponenter och dess gränssnitt. Initial planering av produktionssystemet. Leveranserna från denna fas är geometriska layouter av produkten, tex styling-bilder, funktionella kravspecifikationer och preliminära processflöden för slutmonteringen av produkten.

Geometrisäkring: I denna fas utvärderas och förfinas koncepten från fas 1 och det bästa konceptet väljs för varje komponent. Fokus är fortfarande på robust konstruktion och att optimera positioneringssystemen men nu allokeras toleranser för nyckelelement och enkla ritningar skapas som beskriver geometrisystemlösningen.

Det nya robusthetstalet och bedömningen som inkluderar manuell monteringskomplexitet skall dokumenteras på dessa ritningar för framtida referens. Se figur nedan för ett förslag till dokumentation.



Vidare påbörjas att göra 3D toleranskedjeberäkningar i CAT för kritiska system. Forumet som skapades i förra fasen är fortfarande aktivt och alla ev. förändringar i en geometrissystemlösning kräver ett nytt möte där de 16 komplexitetskriterierna bedöms igen. Utdata från dessa möten är indata för den preliminära processen i slutmonteringen. I denna fas förfinas och revideras också de geometriska kraven baserat på feedback från geometrisäkringsingenjören konstruktion.

### 3. Detaljkonstruktion (Detail design):

**Allmänt:** Definiera geometrin (CAD), materialdata och toleranser för alla komponenter. Processplanen skapas och verktygskonstruktion påbörjas. Leveranserna är kontrollokumentation för produkten, dvs. ritningar, CAD Geometri, produktionssystemplaner etc.

**Geometrisäkring:** Designen och koncepten fryses och fokus skiftas från robustkonstruktion till att balansera toleranser och att allokeras dessa för alla element inom produkten. Detta görs genom 3D CAT toleranskedjeberäkningar (variations- och bidragsanalys). Målet är att alla geometriska krav skall beräknas inom specifikation när fasen är över och att alla toleranser och referenser är korrekt angivna på ritningar och dokumentation. Detta kallas ofta "Grön Produkt", vilket innebär att virtuellt sett så skall produkten inte ha några kvalitetsproblem relaterade till geometri när den börjar produceras.

För att bedömningen av de 16 komplexitetskriterierna skall kunna påverka även toleranskedjeberäkningarna så behöver den maximala processtoleransen för respektive typ av artikel/montering beräknas. Detta görs av geometrisäkringsingenjören konstruktion. Han/hon tar hjälp av geometrisäkringsingenjören beredning för att exportera mätdata från dagens produktion för lämplig artikel. Denna efterbearbetas sedan enligt tidigare utvecklad metod och bedöms även enligt de 16 komplexitetskriterierna i forumet för att kunna räkna ut den maximala processtoleransen (enligt metod utvecklad i PEGASUS). Efter detta har gjorts i ett eller två projekt så har man skapat en databas för maximala processtoleranser för alla typer av monteringar och dessa kan då användas direkt utan behov av extra beräkningar. Processtoleranser kommer då att påverka "Grön Produkt" och hela balanseringen av toleranser. Ju fler komplexitetskriterier som är uppfylla ju större blir processtoleranser och vice versa. Forumet är fortfarande aktivt och om man behöver ändra något geometrisystemkoncept så utvärderas och bedöms dessa ändringar i forumet, tex val av fästelement, fixturer, tredje handen lösningar mm.

Fokus på att skapa lösningar som är totalrobusta kvarstår under denna fas eftersom beräkningen av "Grön Produkt" påverkas av den manuella monteringskomplexiteten, detta säkerställer att inga ändringar eller tillägg i produkten påverkar avsikterna från tidigare faser. Detta möjliggör en färdig konstruktion av produkten som är robust både ur ett geometriskt och sammansättningsperspektiv.

### 4. Provning och förfining (Testing and refinement):

**Allmänt:** Sammansättning och utvärdering av olika versioner av produkten, vilket startar produktionen med artiklar som är motsvarande produktionsartiklar men inte tillverkade i produktionsprocesser. Dessa används för att testa om produkten fungerar som det är tänkt. Senare prototyper byggs med artiklar som är producerade i produktionsprocessen men vanligtvis inte sammansatta i slutmonteringsprocessen.



Eventuella konstruktionsförändringar implementeras. Leveranserna är från denna fas är svar på om produkten uppfyller den avsedda prestandan och tillförlitligheten samt att identifiera eventuella konstruktionsförändringar.

Geometrisäkring: Fokus i denna fas är att verifiera att alla geometriska krav är uppfyllda, inte bara virtuellt utan också fysiskt.

Ansvaret för geometrisäkringen transfereras vanligtvis från konstruktion till beredning i denna fas. Viktiga geometrisäkringsaktiviteter i denna fas är att definiera vad som skall mätas (mätberedning), utföra mätningarna och att tolka mätresultatet.

Baserat på analysen av mätresultatet kan eventuella processförändringar genomföras (sammansning och trimning) för att korrigera om de geometriska kraven inte är uppfyllda. Detta arbete utförs av geometrisäkringsingenjören beredning. Den som tagit fram den geometriska systemlösningen, geometrisäkringsingenjören konstruktion, är normalt sett inte involverad i denna fas. Om en ändring i processen och/eller konstruktionen beslutas i denna fas kan 2 olika scenarios inträffa:

1. Förändringen är liten på systemnivå. Geometrisäkringsingenjören beredning kan då bara uppdatera simuleringsmodellen från fas 1 och 2, alternativt göra en förenklad beräkning i Excel verktyget utvecklat i PEGASUS, med de nya indata och säkerställa att de inte påverkar robustheten. Om det behövs uppdaterar han/hon dokumentationen.
2. Förändringen är stor och/eller på detaljnivå: Forumet från fas 1-3 skall mötas igen och geometrisäkringsingenjören konstruktion skall stödja med nya simuleringar före att verifiera att förändringarna är ok. Dokumentationen skall uppdateras.

#### **5. Produktionsupprampning (Production ramp-up):**

Allmänt: Produkten tillverkas i det avsedda produktionssystemet. Syftet är att träna arbetskraften och att rätta till eventuella kvarstående fel. Gradvis övergång från produktionsupprampning till rullande produktion i full takt genomförs.

Geometrisäkring: Geometrisäkringsaktiviteterna i denna fas består i huvudsak av att övervaka de geometriska kraven med hjälp av att mäta dem och analysera mätdata. Problemen som uppstår i denna består oftast av att man gått över helt och hållet till den faktiska produktionsprocessen samtidigt som man ökar takten. Om det uppkommer geometriska problem här så är det väldigt troligt att de beror på monteringskomplexitet. Det är bara när produktionen körs i högt tempo som de operatörsrelaterade felen börjar uppkomma. Genom att bedöma och hantera monteringskomplexitet i tidiga faser är det väldigt osannolikt att problem uppstår men om det ändå gör det är samma procedur som för fas 4 tillämplig för fas 5. Samma procedur kan också tillämpas om man i efterhand vill analysera en befintlig produkt och process, då startar man från fas 4.

## Checklista för bedömning av manuell monte

Utfärdare: A.Falck, Produkt och Produktionsutveckling, Ch

Kriterium	LK (OK)	HK (Ej OK)	Problem beskrivning
1	x		
2	x		
3		x	
4	x		
5		x	
6	x		
7	x		
8		x	
9		x	
10		x	
11	x		
12		x	
13	x		
14	x		
15		x	
16	x		
<b>Summa:</b>	<b>9</b>	<b>7</b>	

x

**Helhetsbedömning** (kryssa i lämplig ruta):

(Vid behov, kontakta ergonom eller annan sakkunnig)

