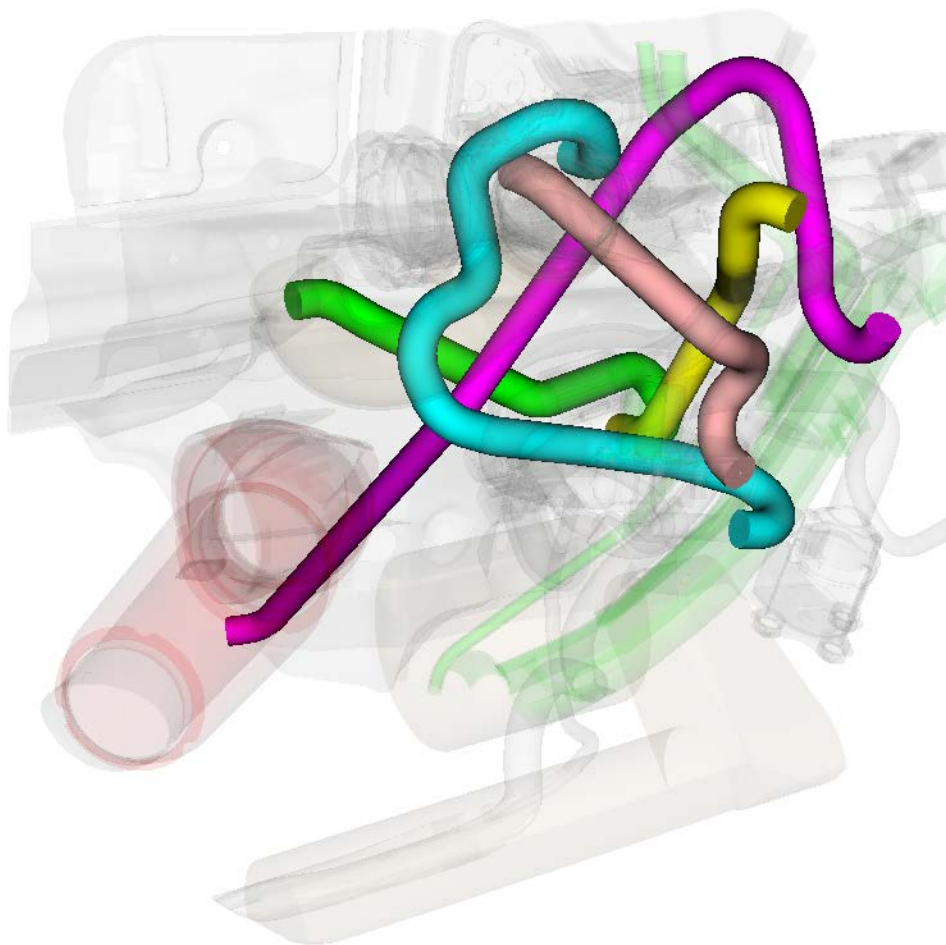


AutoPack

Automatisk packning av slang och rörinstallationer baserat på optimering och maskininlärning



Författare: Johan Ölvander mfl.
Datum: 2020-11-30
Projekt inom Maskininlärning för fordonsindustrin

Innehållsförteckning

1 Sammanfattning	3
2 Executive summary in English	3
3 Bakgrund	4
4 Syfte, forskningsfrågor och metod	5
5 Mål	6
6 Resultat och måluppfyllelse	6
6.1 AP1 Design automation	6
6.2 AP2 Optimering av slanginstallationer	8
6.3 AP3 Maskininlärning	12
6.4 AP4 Implementering och validering	14
7 Spridning och publicering	17
7.1 Kunskaps- och resultatspridning	17
7.2 Publikationer	18
8 Slutsatser och fortsatt forskning	19
8.1 Måluppfyllelse	19
8.2 Fortsatt arbete och framtida forskning	19
9 Deltagande parter och kontaktpersoner	20

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.

1 Sammanfattning

Digitaliseringen inom fordonsindustrin har kommit långt och digitala modeller används i stora delar av utvecklingsprocessen. Inom projektet AutoPack vill vi utnyttja de fördelar digitaliseringen ger och effektivisera utvecklingsprocessen ytterligare genom att knyta samman modeller från olika discipliner i digitala beräkningskedjor, och att automatisera ingenjörarbete genom att använda verktyg så som designautomation, multidisciplineroptimering och maskininlärning. Applikationen för projektet är slangdragning i motorutrymmen som är en tidsödande och arbetsintensiv process. Flera iterationer krävs för att komma fram till en slutgiltig lösning, där modeller skickas fram och tillbaka mellan olika avdelningar inom företaget och mellan olika programvaror för att analysera skilda aspekter, så som kostnad, funktionalitet och prestanda, materialåtgång etc. Förenklat kan man säga att slangdragning (routing) handlar om att hitta den kortaste kollisionsfria vägen mellan två anslutningspunkter. Problemet försvåras av att mängden slangar är stort, och när en slang dragits så är den i vägen för nästa slang osv. Dessutom är miljön inte statiskt, utan i verkligheten skakar motorn och slangarna, varför det alltid måste finnas en marginal till kringliggande geometri och andra slangar.

Projektet har resulterat i en mängd nya verktyg, så som *Universal Data Converter*, *Cable Optimizer*, *Preformation Editor* och *Preformed Hose Router* som underlättar routing av rör och slangar, och automatiserar ett annars manuellt och tidsödande arbete. Dessa olika verktyg har därefter integrerats i AutoPack ramverket där automatiseringsalgoritmer baserad på designautomation, multidisciplineroptimering och maskininlärning automatiskt kan skapa komplexa slanginstallationer baserat på subjektiva bedömningar om vad som kännetecknar en bra slanginstallation. Ramverket knyter samman ingenjörsvärktyg så som IPS Planer, CATIA, Excel, MATLAB och modeFRONTIER.

AutoPack ramverket har utvärderats genom att låta två grupper av ingenjörer på Volvo Cars lösa samma packningsproblem, den ena gruppen på det sätt som VCC arbetar idag, och den andra med hjälp av AutoPack ramverket. Resultatet av jämförelsen visar att AutoPack ramverket kan generera lösningar på bara en femtedel av tiden jämfört med dagens process. De automatgenererade lösningarna är i jämförbara med de manuellt genererade lösningarna i termer av kvalitet, och det visar att de utvecklade verktygen har stor potential i att nå de uppsatta målen att minska ingenjörstiden för packningsarbete med 50% och därmed också motsvarande kostnadsbesparing, samt att minska ledtiden med 25%.

För fortsatt arbete har identifierats att förbättra prestandan på AutoPack ramverket så att ännu bättre och mer verklighetstroga lösningar kan genereras. Dessutom kan användargränssnittet och hastigheten på optimeringen förbättras. Slutligen ser vi stor potential i att utöka funktionaliteten så att hänsyn kan tas till produktionsaspekter så som beredning och framförallt montering redan i utvecklingsstadiet.

2 Executive summary in English

Digitization has come a long way the automotive industry, and digital models are used to a large extent in many parts of the development process. Within the AutoPack project, we want to leverage on the benefits of digitization and further streamline the development process by linking models from different disciplines in digital computing chains. Thus automating manual engineering work using tools such as design automation, multidisciplinary optimization and machine learning, and hence both shorten lead-times and reduce the amount of engineering labour required. The application for the project is hose routing in engine compartments, which is a time-consuming and labour-intensive process, which requires several iterations before a optimal (or satisfying) solutions is obtained. In this iterative process, digital models are manually sent back and forth between different departments within the company and between different software to analyse aspects, such as cost, functionality and performance, material consumption, etc. Each of these model transfers typically also implies manual work on adapting the models to the different software. To simplify, the problem of hose routing is about finding the shortest collision-free path between two connection points. However, the problem is complicated by the fact that the number of hoses is large, and when one hose is routed, it is in the way of the next hose, and so on. In addition, the environment is not static, but in reality, the engine and the hoses shake, so there must always be a margin to the surrounding geometry and to the other hoses.

The project has resulted in a number of new tools, such as *Universal Data Converter*, *Cable Optimizer*, *Preformation Editor* and *Preformed Hose Router* that facilitate routing of pipes and hoses, and to automate an otherwise manual and time-consuming process. These various tools

have been integrated into the AutoPack framework, where automation algorithms based on design automation, multidisciplinary optimization and machine learning have been developed that automatically create complex hose installations based on subjective assessments of what characterizes a good hose installation. The framework connects engineering tools such as IPS Planer, CATIA, MS Excel, MATLAB and modeFRONTIER.

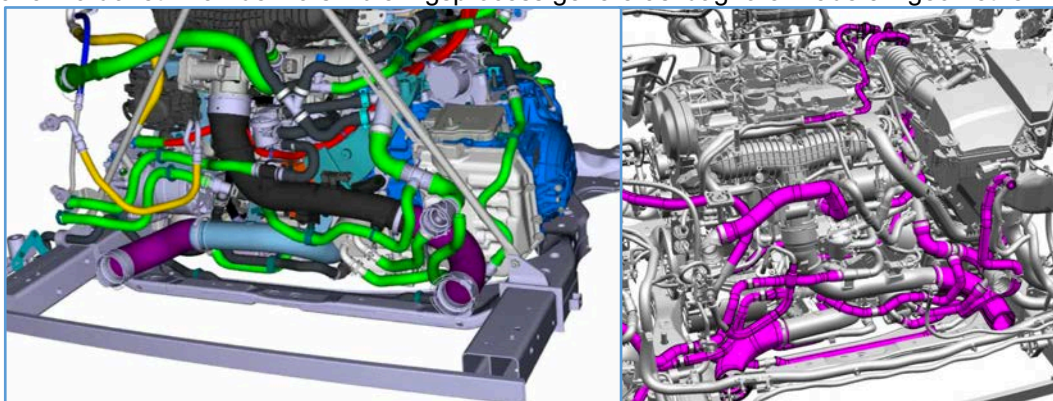
The AutoPack framework has been evaluated by two groups of engineers at Volvo Cars solving the same packing problem, one group using the manual VCC used today, and the other using the AutoPack framework. The time needed for each of the groups were recorded and later compared. The result of the comparison shows that the AutoPack framework can generate solutions in just one-fifth of the time compared to today's process. The automatically generated solutions are comparable to the manually generated solutions in terms of quality. Hence it has been shown that the developed tools and methods have great potential in achieving the goals that was set up for the project, i.e. to reduce the engineering time for packing work by 50% (and thus also the corresponding cost savings), and to reduce lead time in packaging by 25%.

For future work, it has been identified to improve the performance of the AutoPack framework so that even better and more realistic solutions can be generated. In addition, the user interface and the speed of optimization can be improved. Finally, we see great potential in expanding the functionality so that production aspects can be taken into account, such as production preparation and, above all, to consider assembly aspects already at the development stage.

3 Bakgrund

Digitaliseringen av industrin ger stora möjligheter till att effektivisera utvecklingsprocessen för komplexa och integrerade produkter så som moderna fordon som integrerar elektroniska system och sensorer med mekaniska komponenter och aktuatorer. Dessa system ger upphov till stora datamängder både när produkten används, men även under utvecklingsprocessen. Inom AutoPack utvecklas automatiska konstruktionsverktyg baserat på kunskap extraherad ur dessa datormängder med hjälp av metoder från maskininlärning (ML), design automation (DA) och multidisciplinär optimering (MDO). För att visa på potentialen av AutoPack appliceras det utvecklade ramverket på ett packningsproblem där arbetet med att skapa slanginstallationer i ett motorrum på en personbil automatiseras.

Rör och slanginstallationer är en tids- och resurskrävande aktivitet inom fordonsindustrin, och enbart inom motordelen på Volvo Cars investeras 10.000-tals ingenjörstimmar till en kostnad av 10:tals miljoner årligen. I nuvarande arbetsprocess så definierar ingenjörer slanginstallationer "manuellt" med hjälp CAD program som CATIA som sedan utvärderas med simuleringsprogram så som verktyget IPS Planner som utvecklas av Fraunhofer-Chalmers, se figur 1. Det finns en stor mängd krav som varje slanginstallation måste uppfylla så som krav på fria utrymmen till omgivande delar, så att när motorn skakar och vibrerar skall inga slangar och rör komma i kontakt med andra delar av fordonet. Från denna simuleringsprocess genereras idag förenklade 3D geometrier.



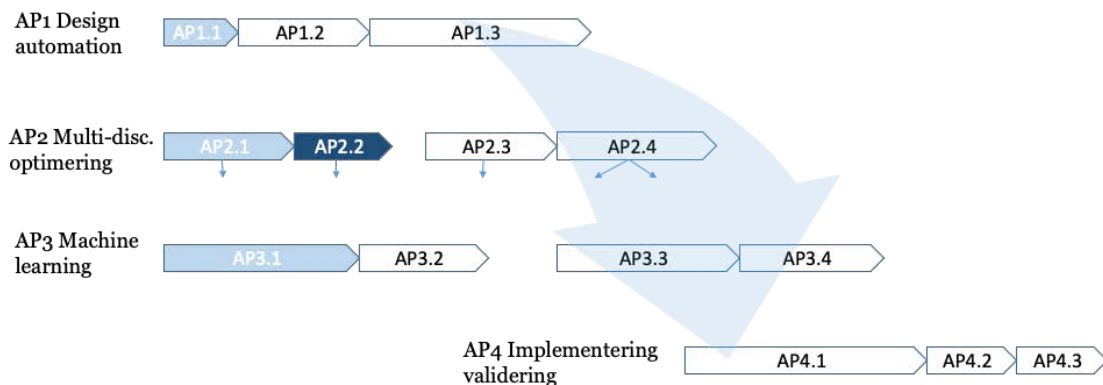
Figur 1. Förenklade 3D geometrier i IPS Planner till vänster och detaljerade geometrier i CAD till höger.

De förenklade 3D geometrierna överförs sedan till olika tekniska avdelningar inom företaget för att ta fram en detaljerad konstruktion av exakta 3D geometrier som på bästa sätt överensstämmer med de förenklade geometrierna, samtidigt som de också behöver ta hänsyn till en mängd ytterligare krav och begränsningar, så som tekniks prestanda, kostnadsaspekter osv.

I praktiken blir detta en iterativ process av att manuellt dra slangar, en efter en, för att sedan simulera och utvärdera den totala slanginstallationens egenskaper. Inom AutoPack önskar vi effektivisera och automatisera denna process med hjälp av ML, MDO och DA för att minska ledtider och kostnader samt att skapa en effektiv kunskapshantering och standardisering som underlättar ingenjörsarbetet. Dessutom vill vi öka kunskapsuppbyggande inom digitaliseringsområdet generellt, och mer specifikt hur optimering, designautomation och maskininlärning kan skapa förutsättningar för bättre beslutsstöd inom produktutveckling.

4 Syfte, forskningsfrågor och metod

Digitaliseringen inom fordonsindustrin har nått en hög nivå, men för att ta nästa steg i utvecklingen finns ett behov av att överbygga klyftan mellan olika discipliner och att utveckla verktyg för att skapa en mer sömlös integration och automatiserade processer. Syftet med AutoPack är att utreda hur packningsprocessen kan effektiviseras och automatiseras baserat på verktyg som DA, ML och MDO. För att nå projektet syfte delades projektet in i fyra olika arbetspaket, ett för varje område, dvs. designautomation, multidisciplinär optimering och maskininlärning, samt ett sista arbetspaket, implementering och validering, se Figur 2 nedan.



Figur 2. Arbetspaketsbeskrivning

Projektet har inte drivits av explicita forskningsfrågor, men respektive arbetspaket har likväl innehållit ett flertal olika frågeställningar som besvarats för att ta fram ett antal olika lösningar som tillsammans uppnår projektets mål. För respektive arbetspaket är dessa:

- AP1 Designautomation
 - 1.1: Vilka är de viktigaste parametrar ingenjören förfogar över vid slangdragning, och vilka är de viktigaste egenskaper som beskriver en bra slanginstallation.
 - 1.2: Hur kan man effektivisera kommunikationen mellan olika programvaror, ex. mellan IPS och CATIA för att utbyta geometridata på ett effektivt sätt?
 - 1.3: Hur kan man skapa en flexibel representation av slanginstallationer så att de blir enkelt att modifiera i designprocessen.
- AP2: Multidisciplinär optimering
 - 2.1: Hur kan man automatisera och optimera individuell dragning av slangar med olika egenskaper så som friformade slangar, slangar som beskrivs med via punkter, förformade slangar, och kabelhärvor?
 - 2.2 Hur kan man mha optimering automatisera processen att skapa en slanginstallation där flera slangar skall dras i samma utrymme? Hur bör problemet parameteriseras och vad kännetecknar en bra lösning?
 - 2.3 Hur kan man sätta samman ett integrerat ramverk för automatisering och optimering av slanginstallationer?
- AP3 Maskininlärning
 - 3.1: Hur kan man använda maskininlärning för att stödja arbetet att skapa slanginstallationer?
 - 3.2 Kan man skapa ML-modell som drar slangar baserat på existerande slangdragningar?
 - 3.3 Kan man använda ML-modeller för att modellera och fånga upp vad som kännetecknar en bra slangdragning?

- AP4 Implementering
 - Hur kan man implementera AutoPack ramverket i ett verkligt utvecklingsprojekt?
 - Vad blir effekten av AutoPack ramverket jämfört med dagens traditionella sätt att skapa slanginstallationer?

5 Mål

Det övergripande målet för AutoPack projektet är att stärka svensk fordonsindustris internationella konkurrenskraft genom en effektivare och mer datadriven produktutvecklingsprocess. Detta konkretiseras i punkterna nedan. AutoPack projektets mål är:

- Att utveckla metoder baserat på MDO, ML och DA som kommer att kunna leda till en 50%-ig reduktion av antalet ingenjörstimmar vid packningsarbete, och motsvarande kostnadsbesparing, och
- en 25%-ig reduktion av ledtiden i packningsarbete.
- Ytterligare ett mål är att verktygen MDO, ML och DA skall göras mer tillgängligt för svensk industri.
- Även om det övergripande målet med projektet är den stora besparingen i termer av ingenjörstimmar och kronor, så finns även andra positiva delmål som snabbare kunskapsuppbyggnad inom företaget, formalisering och lagring av kunskap i formella strukturer och databaser, och minskad risk för fel och därmed en effektivare utvecklingsprocess.

6 Resultat och måluppfyllelse

Det övergripande projektresultatet sammanfattas i det utvecklade AutoPack ramverket som innehåller en mängd nyutvecklade funktioner i IPS och som knyter samman IPS med CATIA samt ett Excel gränssnitt med ett optimeringsramverk i både modeFRONTIER och Matlab. Dessutom har mjukvaran UDC (Universal Data Converter) utvecklats som länkar samman IPS och CATIA. Nedan beskrivs först delresultaten i relation till arbetspaketet och frågeställningarna i kapitel 4 för att sedan summeras i ett slutresultat.

6.1 AP1 Design automation

Arbetspaket 1 har belyst tre frågeställningar, vilka parametrar och krav är viktiga för att karaktärisera en bra slanginstallation, hur kan man förenkla kommunikationen mellan ingående programvaror, samt hur kan man hantera en parameteriserad slanggeometri på ett effektivt sätt.

6.1.1 Karaktärisering av slanginstallationer

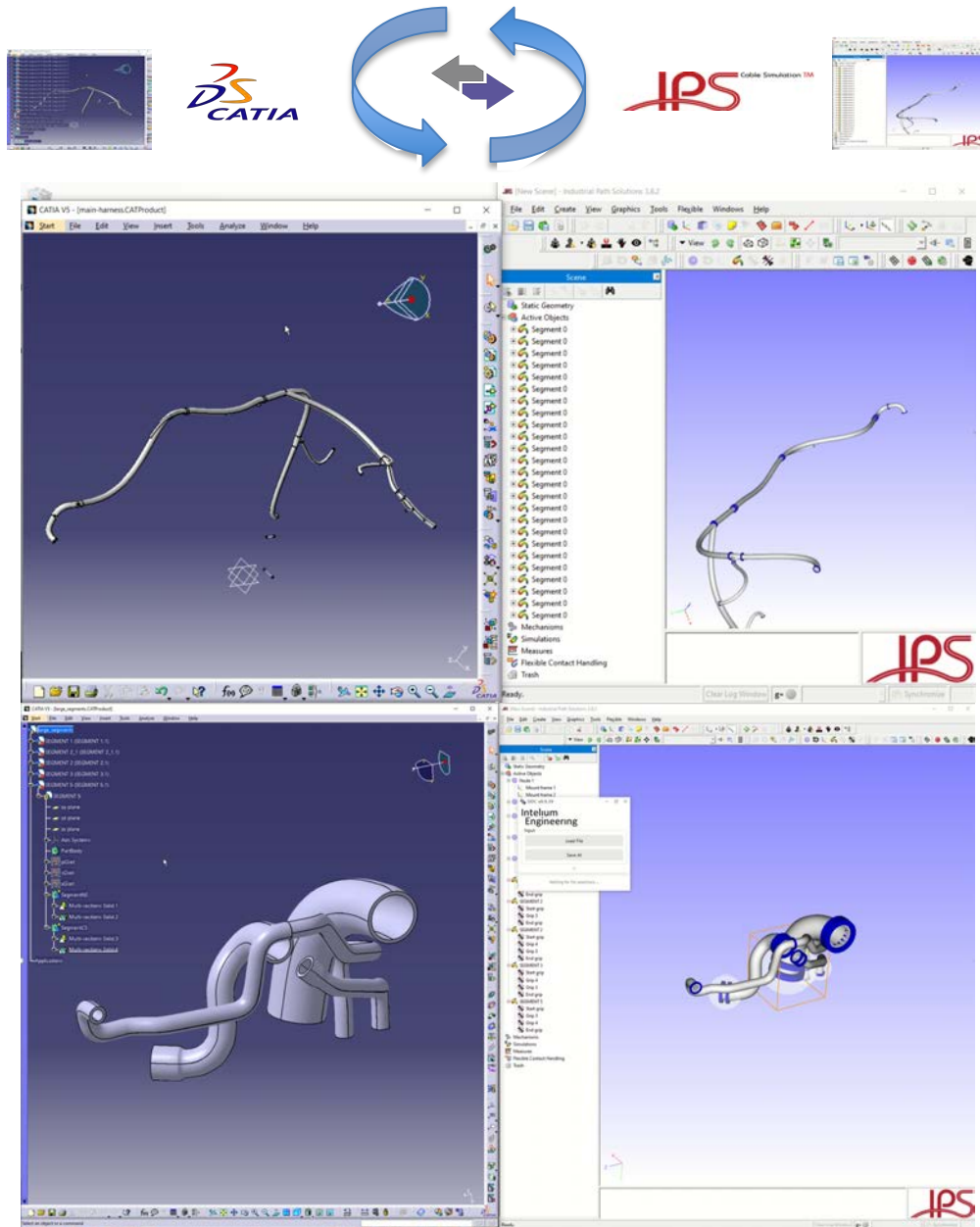
Projektets inledande delar bestod bland annat av att definiera ingående och utgående parametrar och egenskaper vid skapandet av slanginstallationer. Dessa kommer sedan att ligga till grunden för det automatiseringsramverk som skall utvecklas, dvs. vad kommer att vara de parametrar som optimeringen kan skruva på (inputparametrar) och vilka egenskaper kännetecknar en bra installation. Det kan vara egenskaper som man önskar, ex. kort slaglängd och låg kostnad, samt sådant man vill undvika, ex. kort avstånd till varma delar i motorn, eller hög belastning i slangarna. De viktigaste identifierade parametrarna återfinns i tabell 1 nedan.

Tabell 1. Exempel på identifierade egenskaper för slanginstallationer.

Ingenjör<input/> parametrar	Funktionsbestämmande egenskaper
Start och slutpunkter för varje slang	Slanglängd
Slang diameter	Avstånd till intilliggande geometri
Minsta krökningsradie	Spänning i slangen
Punkter som slangen skall dras via	Dynamisk frigång till omgivning, andra slangar och kritiska komponenter
Slang material	Kostnad för antal böjar
Ordning i vilken slangen skall routas	Uppfyllnadsgrad av konstruktionskriterier (från leverantör)
...	...

6.1.2 Kommunikation mellan CATIA och IPS

Intelium Engineering har implementerat en länk mellan IPS:s hmd format och CATIA:s api med namn Universal Data Converter (UDC). Utöver direktkonvertering av geometri har rotationsminimieranderamar implementerats för att tillåta komplex vridning och verifiering av svepgeometri. UDC är en brygga mellan CATIA och IPS som konvertera cad data till native format för att undvika att tappa viktiga information emellan två olika CAD system när data utbyts i båda riktningarna. Figur 3 nedan illustrerar arbetsflödet i UDC, och ger exempel på hur det ser ut.



Figur 3. Arbetsflöde och exempel på Universal Data Converter (UDC).

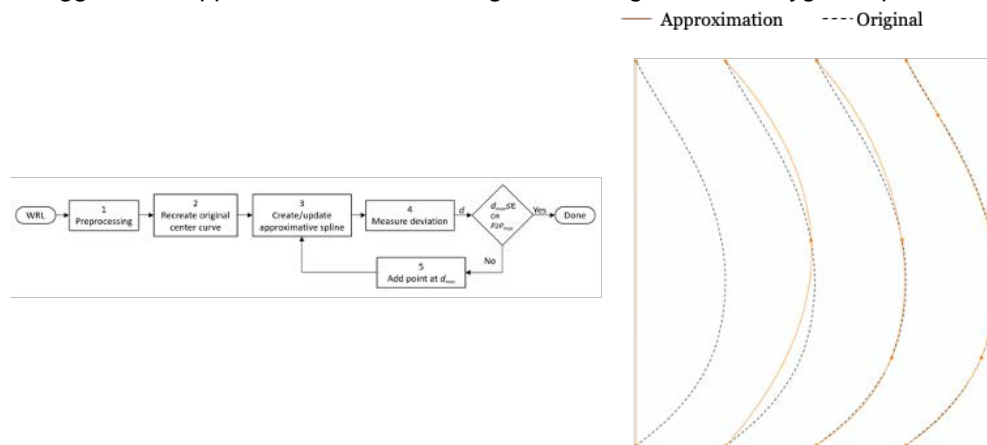
6.1.3 Designautomation för att förenklad hantering av slanggeometri

I det utvecklade AutoPack ramverket är en möjlighet att iterera mellan de olika simuleringsmodellerna för att succesivt förfinas en slanginstallation. En fördel är då att det går så enkelt som möjligt att modifiera en slanggeometri. Därför har ett designautomationsverktyg utvecklats som tar en slang (eller egentligen ett antal punkter på centerkurvan för slangen), och ersätter dem med ett minimalt antal kontrollpunkter som ändå kan representera slangen så bra som möjligt. Tanken är sedan att det är dessa kontrollpunkter som ingenjören kan modifiera istället för att arbeta med alla punkter på originalkurvan, se den förenklade illustrationen i Figur 4 nedan.



Figur 4. Illustration av förenkling av slanggeometri.

Det utvecklade DA-verktyget läser in centerkurvan från IPS som en WRL-fil och skapar sedan en originalkurva som en spline i CATIA, markerad som den svarta punktstreckade kurvan i Figur 5 nedan. Därefter skapas en ny förenklad (approximativ) kurva (en spline), representerad av det heldragna orange strecket. I det första steget består approximationen bara av start och slutpunkterna. Därefter läggs punkter till på splinen där skillnaden är som störst mellan approximationen och originalkurvan och en ny spline skapas. Denna process fortsätter sedan tills önskad noggrannhet uppnåtts. För en fullständig beskrivning av DA-verktyget se publikation [2].



Figur 5. Illustration av hur DA-algoritmen för generering av förenklade splinekurvor fungerar.

6.2 AP2 Optimering av slanginstallationer

Inom arbetspaket två har AutoPack utvecklat algoritmer för att automatiskt och på ett optimalt sätt dra (ruta) slangar i ett motorutrymme, där man säkerställer att slangarna inte kolliderar med sin omgivning. Resultatet presenteras först i termer av den funktionalitet som utvecklats för att automatiskt och optimalt dra enskilda slangar, för att sedan beskriva det optimeringsramverk som utvecklats för att göra komplexa slanginstallationer.

6.2.1 Optimering av enskilda slangar

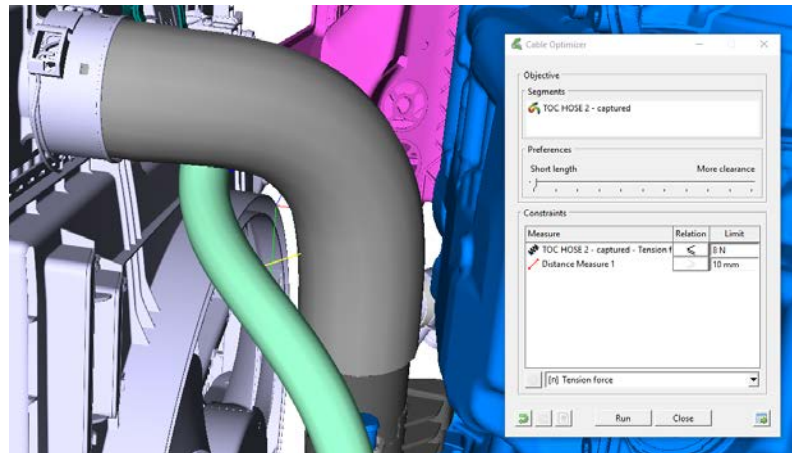
FCC har implementerat och anpassat en rad olika verktyg i mjukvaran IPS för att kunna stötta de olika aktiviteterna i projektet innefattande bland annat följande:

- Automatisk routing av kablar
- Manuell design av förformade slangar
- Automatisk routing av förformade slangar
- Kontinuerlig optimering av ett system av kablar eller slangar

I kombination med en IPS modell för simulering av kablar och slangar kan dessa verktyg användas för kollisionsfri design av kablar och slangar med avseende på fysikaliskt korrekta deformationer, dvs. hur tyngdkraften påverkar slangarna, eller vad som händer när motorn skakar och rör sig. I projektet har vi dock avgränsat oss från dynamiska simuleringar.

Cable optimizer

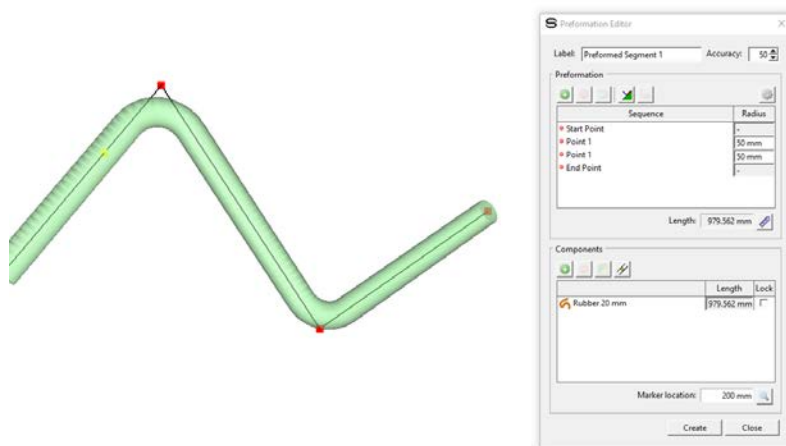
FCC har vidareutvecklat ett verktyg i IPS för optimering av kablar och slangar med avseende på olika designparametrar. Detta har resulterat att ett system av kablar/slangar i jämvikt nu kan optimeras med avseende på kabellängd eller frigång (avstånd till kringliggande geometri) och under villkor att en rad olika användardefinierade mått ej överstiger/understiger vissa gränser, baserat på egenskaperna definierade i *tabell 1*. Exempel på sådana mått är interna/externa krafter och moment och specifika avståndsmått till geometrier. Metoden använder paketet NOMAD för att lösa ett icke-linjärt optimeringsproblem och där simuleringsmodellen evalueras som en black-box. Ett screen shot från Cable optimizer visas i Figur 6 nedan.



Figur 6. Optimering av en slangdesign med Cable Optimizer.

Preformation Editor

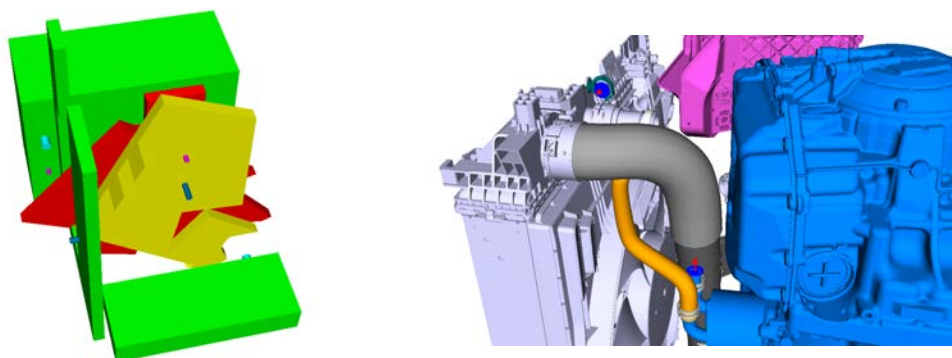
Baserat på önskemål från VCC har FCC har utvecklat en editor i IPS för design av förformade slangar, *Preformation Editor*. Med *Preformation Editor* är det möjligt att manuellt skapa en förformad design baserad på kurvor på formen PCC (piecewise-constant-curvature) genom att placera ut kontrollpunkter samt ange böjradier. När en design är klar kan en motsvarande förformad slangmodell skapas och användas i IPS. Figur 7 illustrerar det nyutvecklade verktyget.



Figur 7. Manuell design av förformade slangar med Preformation Editor

Preformed Hose Router

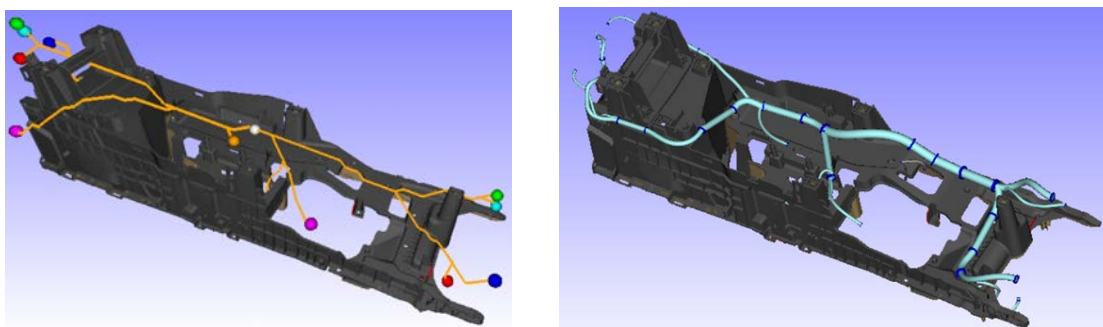
FCC har utvecklat ett Lua-baserat verktyg i IPS specifikt för routing av förformade slangar. Med *Preformed Hose Router* är det möjligt att automatiskt generera olika designförslag för hur en slang på PCC-form kan dras mellan två punkter och som uppfyller krav på en minsta tillåten böjradie samt minst tillåten rak längd. Designförslagen är kollisionsfria och topologiska olika, vilket betyder att de är dragna genom olika områden av omgivningen och är så korta som möjligt. Dessa designförslag utgör ett underlag för ett yttre MDO-ramverk, där de bästa designförslagen ska väljas i enlighet med subjektiva kriterier samt i vilken ordning routing av flera slangar bör utföras. Verktyget har testats och validerats med olika testgeometrier från VCC, och ett exempel återges i Figur 8 nedan.



Figur 8. Routing av förformade slangar med Preformed Hose Router.

Cable Harness Routing

FCC har handlett ett examensarbete som resulterat i en prototyp för routing av en sammanhängande kabelhärva. Målet är att dra kablar mellan ett antal start- och slutpunkter som undviker omgivningen samtidigt som det är önskvärt att både total kabellängd minimeras samt att kablarna löper tillsammans i så stor utsträckning som möjligt. Metoden bygger i grunden på en MILP-formulering som löses med hjälp av Lagrange-relaxering och subgradientmetoder.



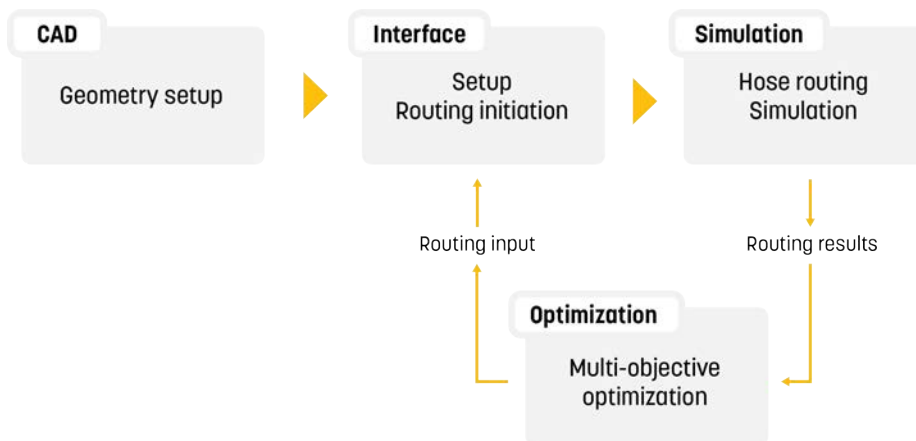
Figur 9. Automatisk routing vs manuell routing av en kabelhärva.

6.2.2 Optimeringsramverk

För att kunna göra kompletta slanginstallationer måste ett flertal slangar dras inom samma geometriska rymd, och man måste kunna kommunicera effektivt mellan ett flertal olika program, så som CATIA (där den grundläggande geometriska rymden i motorrummet finns representerad), IPS (som kan dra enskilda slangar på ett optimalt sätt som beskrivits tidigare), MATLAB (eller modeFRONTIER) där olika optimeringsalgoritmer är implementerade, och MS Excel som används som ett grafiskt användargränssnitt och för att kommunicera med de olika mjukvarorna.

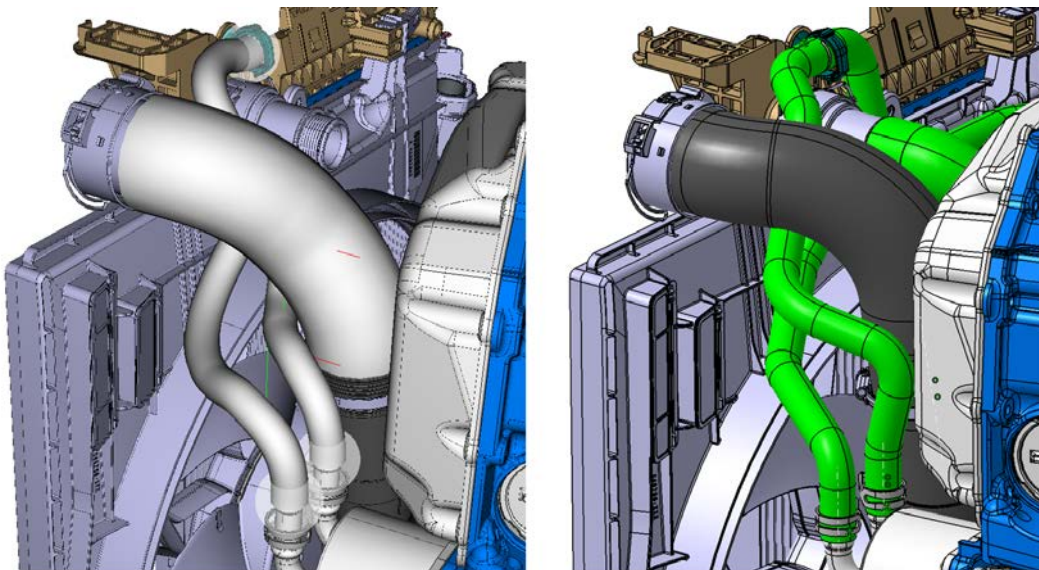
För att möjliggöra kommunikation mellan MS Excel och IPS, har FCC utvecklat en servermiljö i mjukvaran IPS i syfte att tillåta extern kommunikation genom Lua scripts som är kompatibla med IPS Lua-API. Därmed blir verktygen *Cable Optimizer*, *Advanced Cable Router* och *Preformed Hose Router* i IPS möjliga att komma åt ifrån det utvecklade AutoPack ramverket.

Inom projektet har ett MDO-baserat ramverk utvecklats av LiU och testats av VCC och utvecklats genom ett flertal iterationer. Nedan beskrivs det övergripande arbetsflödet i ramverket baserat på en tidig version av ramverket som presenterats i [5], och illustreras i Figur 10 nedan.

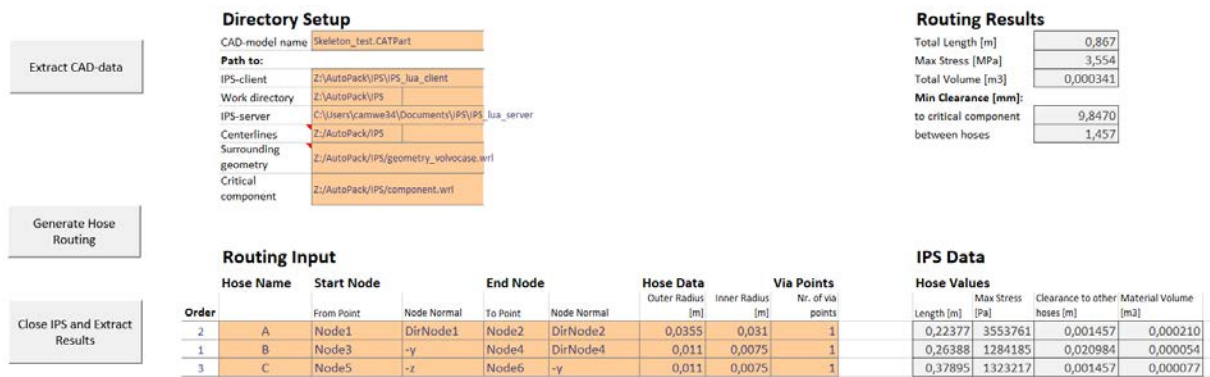


Figur 10. Byggstenar och optimeringsprocessen i AutoPack ramverket.

Processen startar med att den geometri där slangarna skall installeras läses in. Ett exempel på en sådan geometri återges i Figur 11 nedan. Nästa steg i processen är att definiera den routing som skall göras, dvs. beskriva start och slutpunkter för ett antal slangar, samt ange slangarnas egenskaper så som diameter, tjocklek, material etc. Optimeringsvariabler är sedan i vilken ordning som slangarna skall dras. Slutligen dras slangarna en och en av IPS i den givna ordningen, vilket innebär att när slang nummer 2 dras så är redan slang nummer 1 ytterligare ett hinder i rymden. Vid ett tidigt stadium i processen var Cable Optimizer routing motor, och i slutet Preformed Hose Router. Optimeringen styrs av ett antal målfunktioner som består av de egenskaper som listas i tebell 1, dvs. minimal sammanlagd slaglängd, låg spänning i slangarna, minsta avstånd till intilliggande geometri etc. Ett exempel på gränssnittet i Excel återges i Figur 12.



Figur 11. Exempel på slanginstallationer. Optimerad till höger och originalinstallation till vänster.



Figur 12. Exempel Excel interface i AutoPack ramverket.

6.3 AP3 Maskininlärning

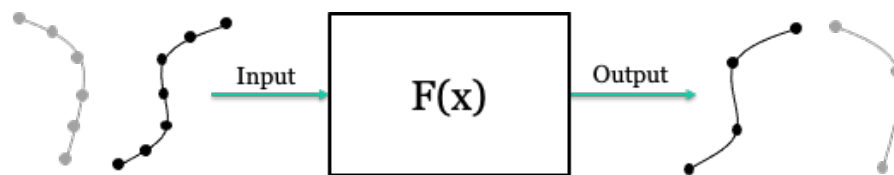
Det övergripande målet med arbetspaket 3 var att undersöka hur maskininlärning kan användas för att stödja processen att skapa slanginstallationer, vilket resulterat i tre olika studier; ML för att generera slangdragningar, ML för att parameterisera slangar, och ML för att modellera preferenser hos beslutsfattare.

ML för att generera slanggeometrier

Inom ramen för examensarbetet [1], utvärderades hur nya slangar kan dras baserat på existerande slangdragningar. En algoritm utvecklades baserat på "Conditional Generative Adversarial Networks (cGAN) där en neuronätsmodell tränades upp att hitta slangdragningar i en 2-dimensionel värld. Algoritmen fungera så att den tränas upp genom att öva på två typer av bilder, dels en labyrintliknande geometri med in- och utflöden markerat, och sedan en bild på en slang mellan dessa punkter (dvs. en bild på problemet och en bild på en lösning). Utifrån en stor mängd träningsdata lyckas algoritmen dra slangar för enkla 2D-geometrier. Dock insågs att detta inte var en framkomlig väg för att generera 3D-routning av slangar då det skulle gå åt en oerhört stor mängd träningsdata att öva på. För realistiska 3D problem finns den annoterade träningsdata data som skulle behövas tillgänglig (och det skulle inte heller går att skapa på ett effektivt sätt) och att det skulle ta väldigt lång tid att träna upp modellerna. För mer detaljer, se examensarbetet [1].

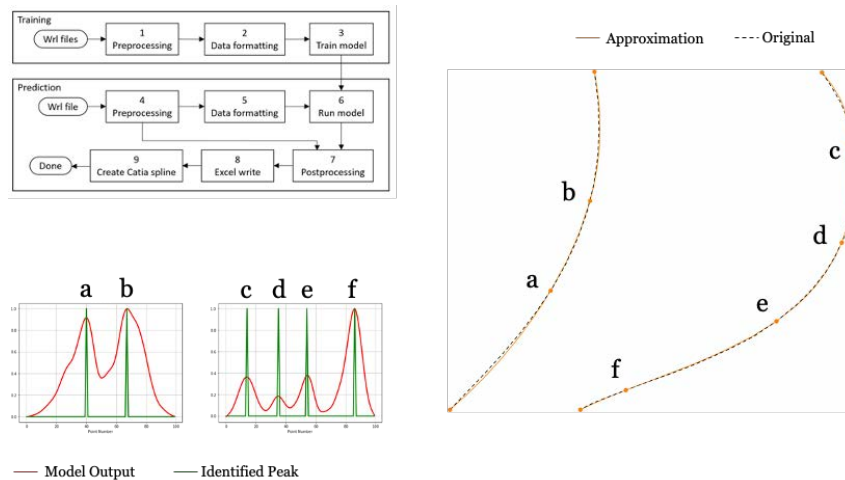
ML för att skapa lättmanipulerade slanggeometrier

Inom ramen för AP3 vidareutvecklades DA-verktyget från AP1 med en ML-modul, där de förenklade slanggeometrier inte skapas baserat på de heuristik som beskrivits i DA-verktyget, utan där istället en ML-modell tränades upp i att förenkla slanggeometrierna, detta arbetssätt beskrivs i Figur 13 nedan.



Figur 13. Arbetsgång för att träna ett neuralt nät, $F(x)$, baserat på olika input och output.

Den utvecklade ML-modellen, $F(x)$, i Figur 13 identifieras genom att träna upp ett neuralt nätverk enligt principen som återges överst i figur Figur 14 nedan, och som beskrivs i detalj i [2]. Algoritmerna bygger på ett Convolutional Neural Net, där utdata utgörs av sannolikheten att en viss punkt på centerkurvan också skall vara en kontrollpunkt för den spline som representerar kurvan. Exempel på den sannolikhetsfördelning som åstadkoms ses nederst i Figur 14 och motsvarande output till höger i figuren. För en mer detaljerad beskrivning se [2].



Figur 14. Process för att träna och utvärdera ML-modellen längst upp till höger, utdata i termer av sannolikhet att en given punkt skall vara en kontrollpunkt på kurvan (röda kurvor längst ner till vänster och identifierade punkter i grönt), och resulterande spline med tillhörande kontrollpunkter till höger.

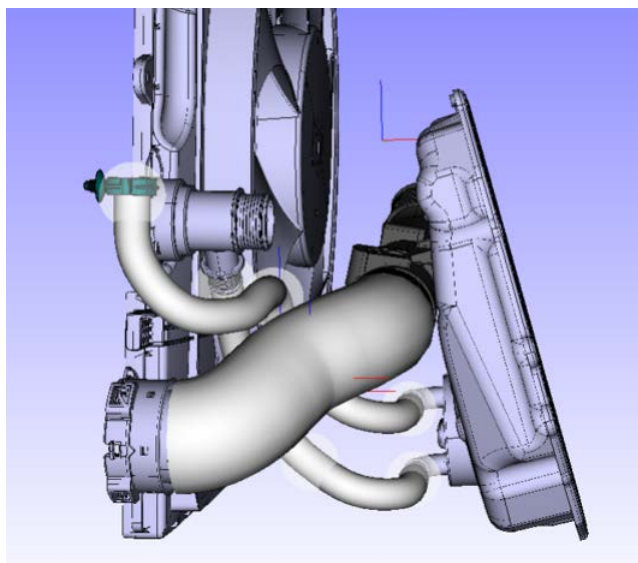
Den ML-utvecklade algoritmen som beskrivs ovan är cirka 10 gånger snabbare än den DA-algoritm som utvecklats tidigare, men den har något sämre kvalitet i resultatet jämfört med DA-algoritmen. Så om applikationen är beroende på hastigheten är ML-modellen att föredra, dock tar den en viss tid i anspråk att träna upp.

ML som ett sätt att modellera preferenser för slanginstallationer

Inom arbetspaket 3 utvärderas även hur en ML-modell kan användas för att återskapa vad som kännetecknar en bra slanginstallation. För att göra detta krävs en mängd data i termer av olika slanginstallationer som betygssätts av erfarna konstruktörer på VCC.

För att skapa denna datamängd tog VCC fram en testmiljö där fyra slangkonstruktörer gemensamt skapade en uppsättning på 32 olika slanginstallationer (se exempel i Figur 15) som dessa individer först individuellt och sedan tillsammans subjektivt rankade från 1-10, utifrån parametrarna i tabell 1, dvs.

- Dynamisk frigång till omgivning
- Dynamisk frigång till kritisk komponent
- Dynamisk frigång till närmaste slang
- Uppfylld av konstruktionsriktlinjer (tillverkningskrav från leverantör)
- Kostnad för antal böjar
- Slanglängd
- Lämplighet för omgivningen där omgivande komponenter inte behöver modifieras



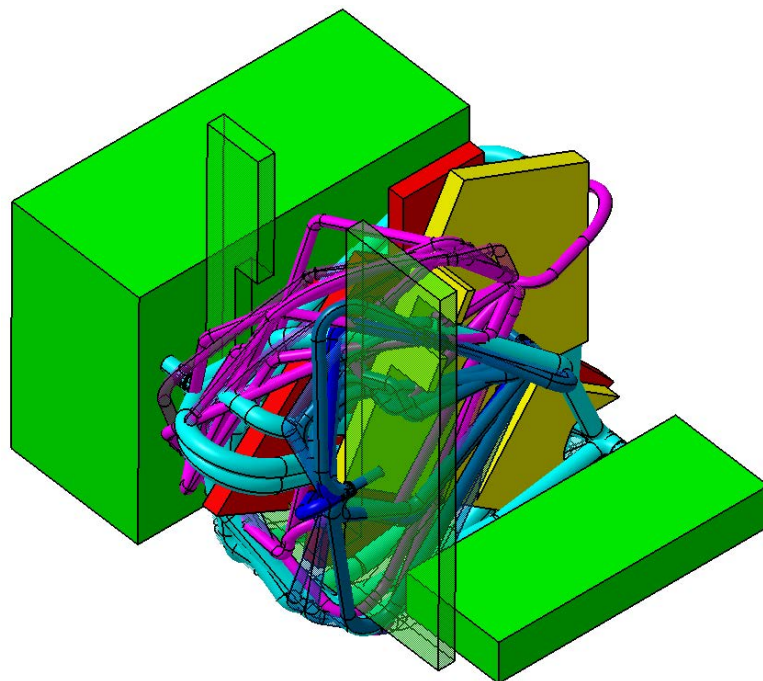
Figur 15. Exempel på slanginstallation som utvärderats subjektivt från första testscenariot.
FFI Fordonsstrategisk Forskning och Innovation | www.vinnova.se/ffi

Den subjektiva rankningen användes som första generation inputdata till ML-ramverket. Lärdomar från den första testmiljön belyste problemet att miljön var allt för känd av slangkonstruktörerna sedan tidigare, då testscenariot var hämtat från ett befintligt projekt vilket föranledde låg objektivitet i den subjektiva rankningen. Även önskemålet att inkludera slangar i dynamisk miljö avgränsades under projektiden, varför nästkommande scenarion begränsades till endast statisk miljö.

VCC skapade därefter en ny testmiljö med endast förenklade geometriska modeller för att skapa en objektiv miljö för samtliga konstruktörer att opartiskt ranka slanginstallationer, se Figur 16. Här tog VCC's konstruktörer fram 22 slanginstallationer, denna gång med förformade slangar genom att använda funktion Preformed Hose Router, som sedan rankades subjektivt enligt parametrarna nedan:

- Statisk frigång till omgivning inklusive slangar
- Uppfyllnad av konstruktionsriktlinjer (tillverkningskrav från leverantör)
- Kostnad för antal böjar
- Slanglängd
- Lämplighet för omgivningen där omgivande komponenter inte behöver modifieras

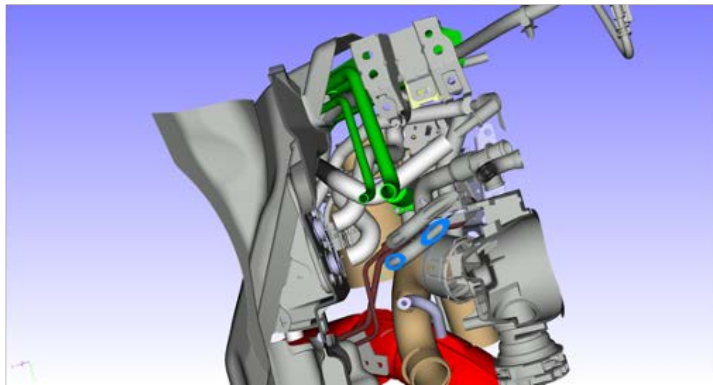
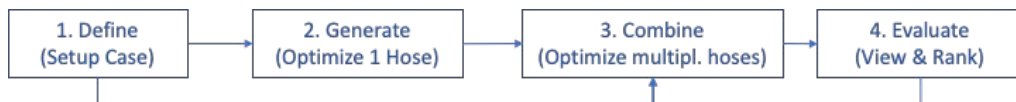
Den ranking som blev resultatet av denna utvärdering användes sedan för att träna den ML-modell som sedan fick styra den slutgiltiga optimeringen i sökandet efter optimala installationer.



Figur 16. Testmiljö nr.2 med flera uppsättningar förformade slanginstallationer.

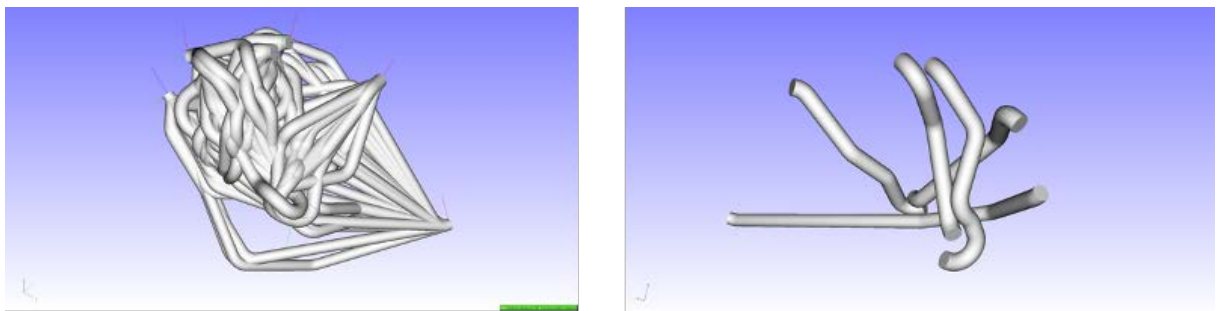
6.4 AP4 Implementering och validering

Det slutgiltiga resultatet av projektet har integrerats i AutoPack-ramverket som har implementerats och valideras av ingenjörer på VCC. I den slutgiltiga versionen av ramverket används funktionen Preform Hose Router (PHR) för att utvärdera en installation med fyra olika slangar i ett motorrum. PHR fungerar så att för en given geometrisk rymd och givna anslutningspunkter för en slang, så skapas ett antal kandidater för förformade slangar som hittar en kollisionsfri väg mellan anslutningspunkterna. Problemet försvåras sedan av att när man dragit första slang, så är den i vägen för slang nummer 2 som sedan potentiellt är i vägen när slang nummer 3 skall dras osv. Problemet har löst genom att skapa en stor databas av möjliga slangdragningar, genom att utvärdera en mängd olika permutationer, dvs. ordningar i vilket slangarna skall dras, och att sedan använda en optimeringsalgoritm för att finna den bästa lösningen. Den implementerade processen åskådliggörs i Figur 17 nedan, där processen illustreras i toppen i figuren, och ett testfall återges under.



Figur 17. Process för det slutgiltiga AutoPack ramverket överst, tillsammans med ett testfall inklusive optimerad slangdragnings nederst.

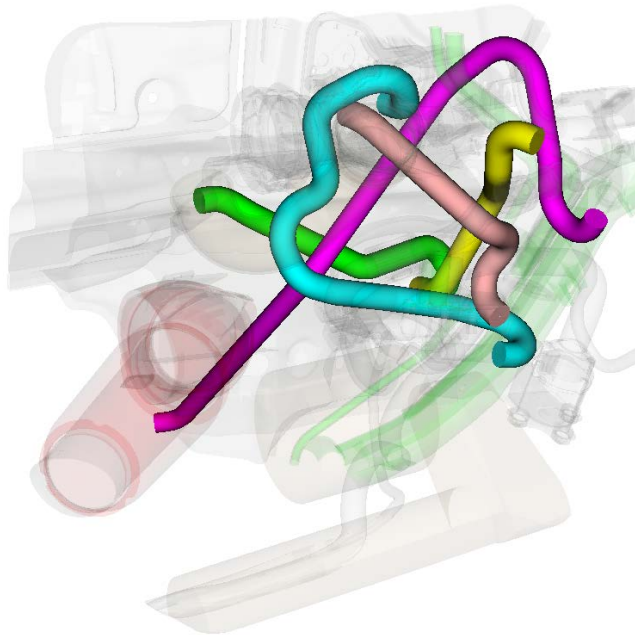
I motorrummet i Figur 17 skall 4 (grå)slangar dras, och i processen har en stor mängd möjliga slangar skapats och återges till vänster i Figur 18. Ur denna mängd lösningar har sedan AutoPack ramverket identifierat de fyra slangar som återges till höger i bilden som är de som bäst uppfyller beslutsfattarnas subjektiva bedömningar så som de har modellerats med ML-modellen. Notera att den högra bilden är en sett från andra hållet i relation till den vänstra.



Figur 18. Optimerade förformade slangdragnings. Till vänster återges en stor mängd potentiella slangdragnings, ur vilket en optimal uppsättning har identifierats mha. optimering som visas till höger. Notera att många av slangarna i bilden till vänster kolliderar, varför en stor mängd av lösningarna inte är möjliga. Notera även att bilden till vänster är roterad i relation till den högra.

Validering

För att validera AutoPack ramverket har VCC tagit fram en testmiljö hämtat från ett befintligt motorrum där fem förformade slangar skall installeras, se Figur 19. Antalet slangar och miljöns geometriska komplexitet ställer höga krav på såväl slangkonstruktörer som AutoPack-ramverket, dels i att leverera slanginstallationer som både klarar de installationskrav samt att ge en inblick i hur lång tid som krävs för att skapa dem.

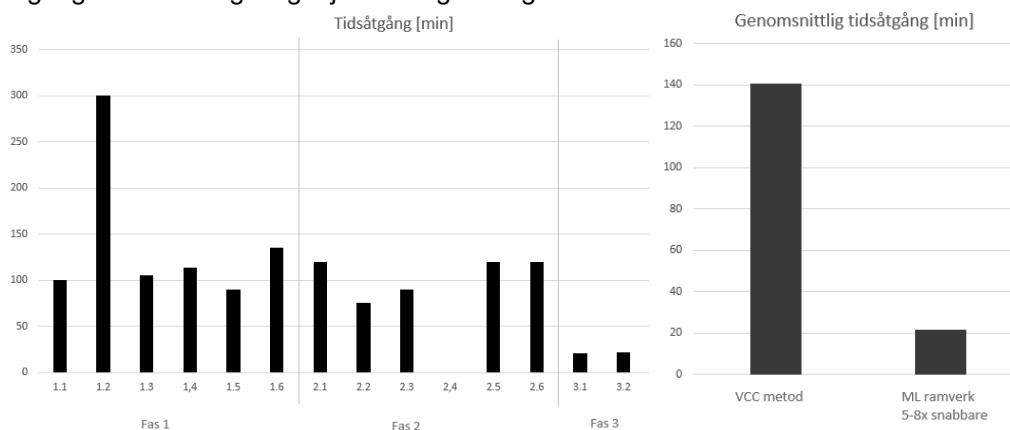


Figur 19. Testmiljö för validering med fem förformade kylslangar i ett motorrum.

Valideringen delades upp i tre moment enligt följande:

1. 6 slangkonstruktörer fick vardera en fördefinierad geometrisk miljö med angivna start och slut punkt- och riktningar för fem slangar. Dessa konstruktörer instruerades att individuellt skapa en fungerande slanginstallation i den givna miljön som möter en konstruktionskravställning. Tiden det tar för var och en av dessa ingenjörer att lösa uppgiften noterades.
2. Varje konstruktör tar sin slanginstallation från tidigare moment och skall denna gång under en given tid om 2 timmar, optimera sin slanginstallation med avseende på total slanglängd för att bedöma hur mycket bättre installationen kan bli med mer tid investerad.
3. Samma fördefinierad testmiljö testas med AutoPack-ramverkets där tiden för att bereda beräkningen klockas dvs. den tid det tar för konstruktören att starta beräkningsloopen i ramverket. Själva beräkningstiden exkluderades då konstruktören under denna tid kan arbeta med andra arbetsuppgifter. 2 konstruktörer använde oberoende av varandra AutoPack-ramverket för att generera lösningar.

Tidsåtgången för samtliga ingenjörer återges i Figur 20 nedan.



Figur 20. Tidsåtgång för att lösa slanginstallationen. Fas 1 och 2 återges för de 6 olika ingenjörerna som arbetade enligt dagens VCC process, medan fas 3 är för de två ingenjörer som använde AutoPack ramverket. Den vänstra figuren återger medeltiden för Volvos process och för AutoPack ramverket.

Slutsatsen är att AutoPack ramverket är betydligt snabbare än den manuella process som används inom Volvo idag. Den genomsnittliga tiden för att generera lösningarna till installationsproblemet för dagens VCC process var 140 minuter, medan det med AutoPack ramverket var ca. 20 minuter,

således en tidsbesparing på ca. 5-8 gånger. Kvaliteten på de genererade lösningarna är likvärdiga, men AutoPack ramverkets lösning hade något längre slanglängder.

7 Spridning och publicering

7.1 Kunskaps- och resultatspridning

Tabell 2. Kunskaps och resultatspridning inom VCC

Hur har/planeras projektresultatet användas och spridas?	Markera med X	Kommentar
Öka kunskapen inom området	X	AutoPack projektet har varit kunskapsbyggande, dels finns intentionen att sprida lärdomarna på VCC. FCC har också haft utbildning på VCC för öka kunskapen om IPS-funktionalitet.
Föras vidare till andra avancerade tekniska utvecklingsprojekt	X	Diskussion kring fortsättningsprojekt initierade
Föras vidare till produktutvecklingsprojekt	X	Intentionen är att använda utvecklade verktyg i utvecklingsprojekt
Introduceras på marknaden		
Användas i utredningar/regelverk/tillståndsärenden/ politiska beslut		

Tabell 3. Kunskaps och resultatspridning Intelium Engineering

Hur har/planeras projektresultatet användas och spridas?	Markera med X	Kommentar
Öka kunskapen inom området	X	Intelium Engineering har implementerat en länk mellan IPS hmd format och Catias api med namn Universad Data Converter (UDC). Utöver direktkonvertering av geometri har rotationsminimieranderamar implementerats för att tillåta komplex vridning och verifiering av svepgeometri.
Föras vidare till andra avancerade tekniska utvecklingsprojekt	X	UDC kommer att fortsättas utvecklas för att underlätta arbete med IPS och andra CAD-verktyg.
Föras vidare till produktutvecklingsprojekt	X	Intelium Engineering har ambitionen att implementera UDC i metodikflöden hos kunder som arbetar med IPS och Catia.
Introduceras på marknaden	X	UDC kommer att introduceras på marknaden som en mjukvara möjlig att köpas av aktörer som arbetar med IPS.
Användas i utredningar/regelverk/tillståndsärenden/ politiska beslut		

Tabell 4. Kunskaps och resultatspridning Linköpings universitet

Hur har/planeras projektresultatet användas och spridas?	Markera med X	Kommentar
Öka kunskapen inom området	X	AutoPack har ökat LiU:s kompetens inom det tekniska området routing så väll som områdena MDO och Maskininlärning, vidare har nya kontakter knutits med forskningspartnern FCC.
Föras vidare till andra avancerade tekniska utvecklingsprojekt	X	Planen är att ta nästa steg från AutoPack och utöka funktionaliteten och betrakta även produktionsaspekter tidigt i utvecklingsprocessen, samt vidareutveckla ML och MDO algoritmerna.

Föras vidare till produktutvecklingsprojekt	X	LiU har för avsikt att vidareutveckla de algoritmer som utvecklats så att de blir mer generella och går enklare att implementera i andra forskningsprojekt.
Introduceras på marknaden	X	LiU har för avsikt att använda resultaten från AutoPack i kurser på masterprogrammet i Maskinteknik.
Användas i utredningar/regelverk/tillståndsärenden/ politiska beslut		

Tabell 5. Kunskaps och resultatsspridning Fraunhofer-Chalmers Centre

Hur har/planeras projektresultatet användas och spridas?	Markera med X	Kommentar
Öka kunskapen inom området	X	AutoPack har medfört en större förståelse för industriell packning och möjligheterna att kombinera Maskininlärning med deterministiska algoritmer för slangdragning.
Föras vidare till andra avancerade tekniska utvecklingsprojekt	X	Vidareutveckling av en algoritm för routing av kabelhärvor med förgreningar med inriktning mot elektrifiering (<i>Cable Harness Routing</i>).
Föras vidare till produktutvecklingsprojekt	X	Ett produktutvecklingsprojekt kommer att initieras för att implementera slangdragningsverktyget <i>Preformed Hose Router</i> i IPS.
Introduceras på marknaden	X	Det utvecklade slangdragningsverktyget <i>Preformed Hose Router</i> är planerad för kommersiell introduktion i IPS i slutet av 2021.
Användas i utredningar/regelverk/tillståndsärenden/ politiska beslut		

7.2 Publikationer

Följande vetenskapliga publikationer har kommit ut som ett resultat av projektet.

- [1] E. Gustafsson, V. Eriksson, Using Machine Learning for pipe routing, Master thesis, department of management and engineering, Linköping University, 2018.
- [2] E. Gustafsson, J. Persson, J. Ölvander, Comparison of Design Automation and Machine Learning algorithms for creation of easily modifiable splines, Proceedings of the Design Society: NordDesign 2020.
- [3] T. Hermansson, E. Åblad, Automatic routing of preformed hoses, *Journal of Computer-Aided Design*, 2020, (under review).
- [4] T. Karlsson, Optimization of Cable Harness Routing, Examensarbete vid Chalmers Tekniska Högskola, 2020 (handledare E. Åblad, T. Hermansson)
- [5] C. Wehlin, J.A. Persson, J. Ölvander, Multi-Objective Optimization of Hose Assembly Routing for Vehicles, Proceedings of the Design Society: DESIGN Conference 2020.

Dessutom pågår arbetet med ytterligare två publikationer.

- [6] E. Gustafsson, J. Persson, J. Ölvander, M. Tarkian, Implementation and validation of a multi-objective optimization and machinelearning based framework for optimal hose routing, 2021. (Artikeln är tänkt att sammanfatta implementering och valideringen av AutoPack ramverket)
- [7] E. Gustafsson, L. Poot, M Tarkian, J. Ölvander, A review om Machine learning algorithms in CAD and Product development, 2021. (Artikeln är tänkt att sammanfatta de litteraturstudier som genomförts inom projektet).

8 Slutsatser och fortsatt forskning

Inom AutoPack har en stor uppsättning verktyg utvecklats som stödjer digitalisering och automatisering av slangdragning och packningsarbete. Exempel på verktyg är Universal Data Converter, Cable Optimizer, Preformation Editor och Preformed Hose Router. Dessa olika verktyg har sedan integrerats i AutoPack ramverket där automatiseringsalgoritmer baserad på designautomation, multidisciplineroptimering och maskininlärning automatiskt kan skapa komplexa slanginstallationer. Ramverket har utvärderats genom att låta två grupper av ingenjörer på VCC lösa samma packningsproblem, den ena gruppen på det sätt som VCC arbetar idag, och den andra med hjälp av AutoPack ramverket. Resultatet av jämförelsen visar att AutoPack ramverket kan generera lösningar på bara en femtedel av tiden jämfört med dagens process. Vid en subjektiv bedömning är dock kvaliteten på lösningarna något sämre från AutoPack-verktyget jämfört de manuellt skapade lösningarna. Dock bedöms skillnaden vara så pass liten (ca 5%), att den stora tidsbesparingen överväger, och att det med ganska små insatser skulle gå att förbättra ramverket ytterligare för att generera ännu bättre resultat.

8.1 Måluppfyllelse

Inom projektet har ett stort antal verktyg utvecklats och kopplats samman i AutoPack-ramverket. Ramverket har visat sig kunna reducera tiden det tar att skapa slanginstallationer med ca 80%, och därmed ser vi potentialen att uppfylla tidsbesparingsmålen att reducera antalet ingenjörstimmar med 50% och en ledtidsreduktion på 25%, (se kapitel 5). Vidare har projektet bidragit till att metoder som multidisciplineroptimering, maskininlärning och designautomation blivit mer tillgängliga i industrin. Slutligen så har de verktyg och metoder som utvecklats också givit en kunskapsuppbbyggnad inom både industri och akademi och också bidragit till effektivare utvecklingsprocesser.

Verktyget ger en uppsättning alternativa slanginstallationer med gott resultat som är nära i linje med ingenjörernas manuella resultat. Det utvecklade ramverket kan med fördel användas under tidiga konceptfaser för att snabbt generera en mängd optimala lösningar och därmed bidra till reducerade mantimmar och ledtider

8.2 Fortsatt arbete och framtida forskning

Även om det ramverk och de metoder som utvecklats fungerar och visar stor potential, så finns det fortfarande stora utrymmen för förbättringar. Exempel på förbättringsområden är:

- Resultatet av slanginstallationerna kan förbättras genom att ytterligare vässa optimeringsalgoritmerna och målfunktionerna (dvs, den subjektiva bedömningen av vad som kännetecknar en bra lösning), och att öka detaljeringsgraden.
- Ta hänsyn till fler aspekter vid optimeringen. Exempelvis görs nu bara en statisk simulering, medan det vore önskvärt att kunna optimera även baserat på dynamiska simuleringar.
- Användargränssnittet till verktygen kan förbättras så att det blir enklare att använda av ingenjörer på VCC.
- Integration av de utvecklade verktygen i VCC:s utvecklingsprocess, inklusive utveckling av utbildningsmaterial och utbildningsinsatser.
- Verktygen tar i dag bara hänsyn till konstruktions och funktionsaspekter av slanginstallationer, men inte några produktionsaspekter, så som beredning och montering. Att inkludera detta är en möjlig inriktning för fortsatt arbete.

Fortsatt forskning

Vi ser att det finns stor potential i att jobba vidare med flera av de punkterna som listats under fortsatt arbete inom ramen för framtida forskningsprojekt. Projektets partners har därför för avsikt att fortsätta forska tillsammans inom området, och vidareutveckla de metoder och verktyg som kommit ut ur projektet. Möjliga finansiärer för ett sådan fortsättningsprojekt är Vinnova programmen *FFI – hållbar produktion* och *Produktion 2030 - Integrerad produkt och produktionsutveckling*. Vi tänker oss då ett projekt där vi dels förbättrar den funktionalitet som utvecklats i AutoPack ramverket, fortsatt utveckling av automatisering baserat på optimerings och maskininlärningsalgoritmer, samt att utveckla funktionalitet så att man kan ta hänsyn till produktionsaspekter redan i konstruktionsfasen. Vi tänker då främst på att automatisera beredningsarbete och att beakta monteringsaspekter tidigt i utvecklingsprocessen. Applikationen

skulle vara elektrifierade fordon, där installation av el-kablage är ett nytt och utmanande område. Arbetet med att dra el-kablage påminner om slanginstallationer, men egenskaperna hos högvolts kablage och kabelhärvor är annorlunda, och de är betydligt svårare att hantera vid montering.

9 Deltagande parter och kontaktpersoner

AutoPack projektet har bestått av parterna Fraunhofer-Chalmers Centre, Intellium Engineering, Linköpings universitet och Volvo Car Corporation med kontaktpersonerna nedan.

Fraunhofer-Chalmers Centre

Tomas Hermansson
Tomas.hermansson@
fcc.se

Intellium Engineering

Joey Laguidao
joey.laguidao@
intellium.se

Linköpings universitet

Johan Ölvander
johan.olvander@liu.se

Volvo Car Corporation

Niclas Bäckström
Niklas.backstrom@
volvocars.com

