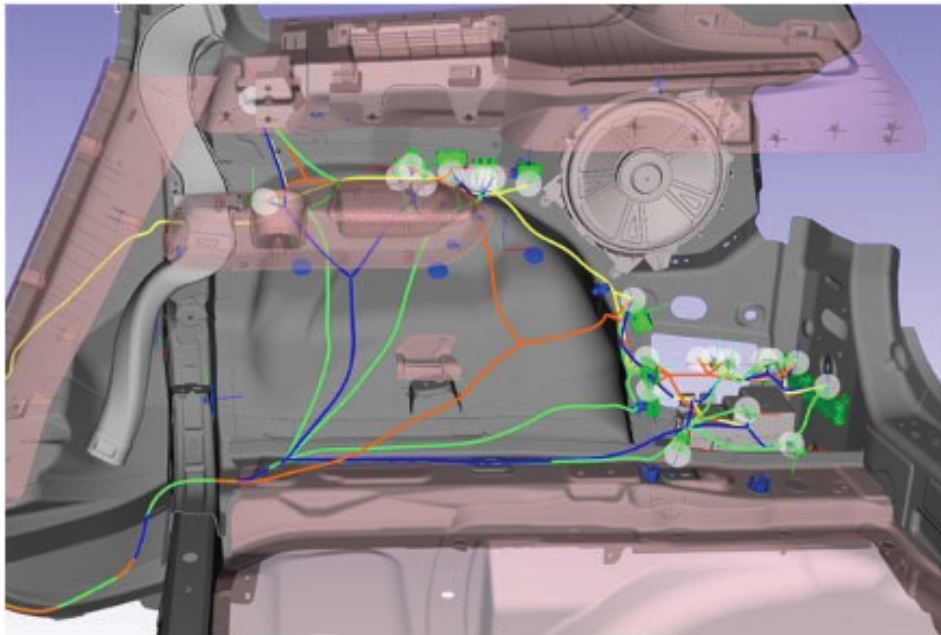


AutoPack 2.0

Publik rapport



Författare: Johan Ölvander mfl.
Datum: 2024-06-30
Projekt inom Hållbarproduktion

FFI Fordonsstrategisk
Forskning och
Innovation

VINNOVA

Energimyndigheten

TRAFIKVERKET

FKG

VOLVO

SCANIA

SCANIA

VOLVO

Innehållsförteckning

1 Sammanfattning	3
2 Executive summary in English	3
3 Bakgrund.....	4
4 Syfte, forskningsfrågor och metod.....	5
5 Mål	5
6 Resultat och måluppfyllelse.....	6
6.1 AP1 Definiera testfall	6
6.2 AP2 Beredningsramverk.....	8
6.3 AP3 Multidisciplinär optimering.....	10
6.4 AP4 Visualisering och beslutsstöd.....	11
6.5 AP5 Maskininlärning.....	11
6.6 AP6 Test och validering.....	12
7 Spridning och publicering.....	14
7.1 Kunskaps- och resultatspridning.....	14
7.2 Publikationer	15
8 Slutsatser och fortsatt forskning.....	15
9 Deltagande parter och kontaktpersoner	16

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.

Läs mer på www.vinnova.se/ffi.

1 Sammanfattning

Målet med AutoPack 2.0 är att öka graden av digitalisering och automation inom produkt- och produktionsutvecklingen och säkerställa att produktions och monteringsaspekter beaktas i tidiga faser av produktutvecklingsprocessen. Applikationen inom projektet är packning och montering av högvoltskablage och kabelhärvor, som är en tids och resurskrävande aktivitet inom hela fordonsindustrin. I och med elektrifieringen av fordonsflottan behöver den erfarenhet som byggts upp kring installation av slangar och kablar i motorutrymmen med förbränningsmotorer förnyas i och med de nya förutsättningar som elektrifieringen medför. Antalet kablar som måste samsas inom samma geometriska rymd kommer att öka avsevärt i framtida fordonskoncept, varför installationerna kommer att bli mer komplex och tidskrävande, både att konstruera och att montera. Vidare har högvoltskablage och kabelhärvor helt andra egenskaper än slangar, vilket påverkar både hur de kan konstrueras och monteras samt hur de beter sig under drift. För att säkerställa en effektiv utvecklingsprocess samt ergonomisk produktion och montering krävs nya metoder och verktyg för att beräkna och simulera hur kablage skall konstrueras och monteras på ett så effektivt och ergonomiskt sätt som möjligt. Projektet har levererat digitala modeller och verktyg för både produkten (hur kablage skall designas) och produktionssystemet (dvs. hur människan skall agera i monteringen). Projektet bidrar således till hållbar produktion ur både ett ekonomiskt och socialt (ergonomiskt) perspektiv. Vidare fokuserar projektet på att i tidiga utvecklingsfaser beakta produktions och monteringsaspekter och är därefter ett steg i att automatisera beredningen. Det får till följd att hela processen kan snabbas upp och att risken för sena förändringar minimeras, kvaliteten höjs och behovet av fysiska tester minskas.

Projektet har utvecklat nya metoder och verktyg som under utvecklingsarbetet applicerats på förenklade testfall, för att i projektets slutfas valideras på komplexa realistiska installationer. Valideringen visar att de utvecklade metoderna och verktygen har stor potential att effektivisera utvecklingsarbetet (med tidsbesparingar på upp till 60%), samtidigt som mer utvecklingsarbete behövs för att kunna adressera större och mer komplexa problem samt framförallt höja kvalitén på de genererade lösningarna. Den övergripande metodiken fungerar väl och skalar till större problem och den funktionalitet som har implementerats fungerar i praktiken. Det finns dock ett flertal aspekter av kabeldragning och montering som inte beaktas i verktyget idag, vilket gör att de lösningar som genereras kan bryta mot både konstruktions och monteringskrav och därmed inte går att realisera i praktiken. Således finns en förbättringspotential i att utveckla verktygen genom att utöka möjligheten till att analysera ytterligare avgörande konstruktions- och monteringsaspekter så att kvalitén på de genererade lösningarna höjs och kommer i paritet med dagens manuella lösningar.

2 Executive summary in English

The automotive industry faces significant challenges in delivering new vehicle solutions with minimal environmental impact while remaining competitive in a global market demanding short lead times, high quality, and low costs. The AutoPack 2.0 project addresses these issues alongside the new requirements brought about by the electrification of the vehicle fleet. The project specifically considers the effects of electrification on packing and installations, transitioning from combustion engines with fuel, air, and coolant hoses to electric propulsion with motors and batteries involving high-voltage cabling and harnesses. Future vehicle concepts will see a substantial increase in the number of cables occupying the same geometric space, making installations more complex and time-consuming to design and assemble. High-voltage cables and harnesses differ significantly from hoses in their construction, assembly, and operational behavior.

The project's objective is to increase the degree of digitalization and automation in product and production development, ensuring that production and assembly aspects are considered early in the product development process. This includes the packing and assembly of high-voltage cabling and harnesses, a time and resource-intensive activity within the automotive industry. The transition to electric vehicles necessitates a renewal of the experience built around installing hoses and cables in combustion engine compartments to accommodate new electrification conditions.

The AutoPack 2.0 project has delivered digital models and tools for both the product (cabling design) and the production system (manual human assembly). This contributes to sustainable production from both economic and social (ergonomic) perspectives. The project focuses on early-phase production and assembly considerations, aiming to automate preparation processes, speeding up the overall process, minimizing late changes, improving quality, and reducing the need for physical tests. New methods and tools developed in the project have been applied to simplified test cases and validated on complex, realistic installations. The validation demonstrates that the developed methods and tools have significant potential to streamline development work, although further development is needed to address larger and more complex problems. The overall methodology scales well to larger problems, and the implemented functionality works effectively. However, there is room for improvement by extending the tools to consider additional design and assembly aspects. The AutoPack framework developed in the project have shown the potential in reducing the engineering time with 60% and the lead time with 15% (which is in-line with the initial objectives of a reduction of 50% and 25% respectively). However, the developed framework does not consider all aspects needed from both design and assembly perspective, and hence the automatically generated solutions are not on the preferred quality level. Some aspects of assembly have not been considered yet, and hence the generated solutions might violate some design criteria and are therefore not suitable to manufacture and assemble. Therefore, there is a need for further development of the framework to assure that it considers all relevant aspects of cable routing and that it generates solutions that are possible to manufacture and assemble in real industrial practice.

3 Bakgrund

Fordonsindustrin står inför stora utmaningar i att leverera nya fordonslösningar med minimal miljöpåverkan, samtidigt som man måste vara konkurrenskraftig på en global marknad som ställer krav på korta ledtider, hög kvalitet och låga kostnader. Projektet AutoPack 2.0 adresserar dessa frågeställningar tillsammans med de nya krav som omställningen till elektrifiering av fordonsflottan innebär. Explicit beaktas de effekter som elektrifieringen får på packning och installationer när man går från förbränningsmotorer med slangar för bränsle, luft och kylmedier till eldrift med elmotorer och batterier med högvoltskablage och kabelhärvor. Antalet kablar som måste samsas inom samma geometriska rymd kommer att öka avsevärt i framtida fordonskoncept, varför installationerna kommer att bli mer komplex och tidskrävande, både att konstruera och att montera. Vidare har högvoltskablage och kabelhärvor helt andra egenskaper än slangar, vilket påverkar både hur de kan konstrueras och monteras samt hur de beter sig under drift.

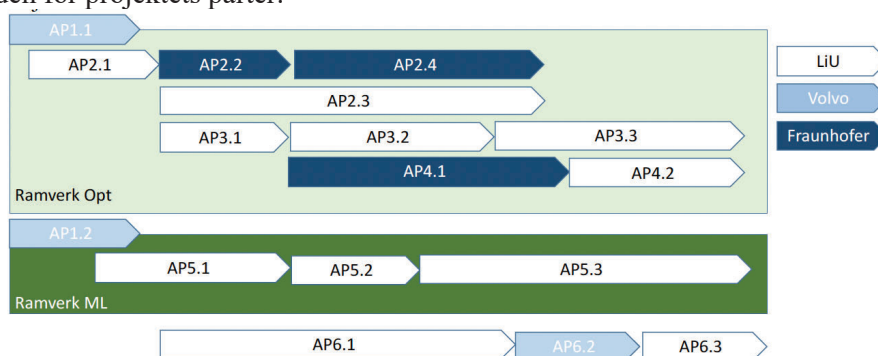
Vidare utgör efterfrågan på ökad teknisk funktionalitet i morgondagens mobilitetstjänster i flera fall behov av ökad mängd utrymmeskrävande produkter i redan befintligt geometriskt utrymme. För Volvo Cars är motorutrymmet ett sådant område där typiskt först större geometriska komponenter placeras ut och mindre komponenter som distributionssystem – kablage, slangar och rör, får nyttja det kvarvarande utrymmet vilket ofta är ett tidskrävande integrations- och konstruktionsarbete. Många gånger leder detta även till suboptimerade resultat, där aspekter som monteringsföljd och monteringsergonomi är svåra att utvärdera med hög precision. Denna utvärdering kan vara tidskrävande och skapar behov av fysisk verifiering på prototyp eller förseriebilar som därefter riskerar leda till sena och kostnadskrävande konstruktionsförändringar.

Att i tidiga konceptutvecklingsfaser kunna utforska en större lösningsrymd med högre utvärderingsprecision och egenskapsbalansering med hjälp av optimering och maskininlärning, på en avsevärd kortare tid – möjliggör för fordonsutvecklare som Volvo Cars att resurseffektivt introducera konkurrenskraftiga produkter på marknaden som når nya standarder av kvalitet och hållbarhet. För att säkerställa en effektiv utvecklingsprocess krävs därför nya metoder och verktyg för att beräkna och simulera hur kablage skall konstrueras och monteras på ett så effektivt och ergonomiskt sätt som möjligt, baserat på digitala modeller av både produkten och produktionssystemet (dvs. människan i monteringen).

Inom Autopack projektet adresseras utmaningarna ovan genom att utvecklingsprocessen automatiseras med hjälp av AutoPack ramverket, ett AI-verktyg innehållande bland annat designautomation, optimering och maskininläring som tillsammans med den avancerade simuleringsprogramvaran IPS (utvecklat av FCC) kan identifiera en stor mängd möjliga tekniska lösningar. Dessa lösningar utvärderas baserat på avancerade digitala modeller av dels installationens egenskaper (så som kablagentets längd, krökningsradier, fastsättningspunkter etc.) och dess ergonomiska monteringsaspekter. Slutligen krävs ett välutvecklat beslutstöd där egenskaper hos olika optimala lösningar kan visualiseras och vägas mot varandra.

4 Syfte, forskningsfrågor och metod

För att stärka svensk fordonsindustris konkurrenskraft tar projektet fasta på att digitalisera och automatisera delar av utvecklingsprocessen genom att integrera digitala verktyg från konstruktion via beredning till produktion och montering i ett övergripande ramverk, AutoPack-ramverket. Projektet består av sex arbetspaket (AP:n) som åskådliggörs i Figur 1 nedan tillsammans med ansvarsområden för projektets parter.



Figur 1. Översikt över projektplaneringen.

Projektet börjar med AP1 som definierar de testfall som kommer att stå i centrum för projektet och sätta kraven på den funktionalitet som skall utvecklas inom projektet. Därefter följer AP2 som innehåller vidareutveckling av det ramverk som utvecklats inom AutoPack1-projektet, med utökad detaljrikedom men framförallt med förmågan att beakta monteringsaspekter redan när installationer definieras. AP 3 fokuserar sedan på optimering och utvecklar multidisciplinära optimeringsalgoritmer som optimerar kablageinstallationer med avseende både på funktionalitet och monteringsaspekter. Inom AP4 utvecklas beslutstödsverktyg och visualiseringsmetoder för att stödja beslutsfattare att välja den slutgiltiga lösningen, och för att utvärdera olika monteringslösningar mha. ergonomisimulering. Därefter följer AP5 som utvecklar maskininlärningsalgoritmer för att automatisera beredningsarbete. Slutligen avslutas projektet genom att de utvecklade metoderna och verktygen testas och utvärderas i en relevant industriell miljö inom ramen för AP6.

Under projektets gång har den initiala projektplanen modifierats något och ungefär halvvägs in i projektet beslutades att minska ner resurserna till maskininläring och i stället fokusera på att utveckla det multidisciplinära ramverket baserat på mer traditionella optimeringsmetoder. På samma sätt har arbetet med VR blivit lite mindre omfattande och mer fokus har lagts på att utveckla effektiva routing algoritmer som kan beakta ergonomiaspekter i stället.

Genom hela projektet har LiU och FCC stått för majoriteten av arbetet med att utveckla ny metodik och integrera den i olika simuleringsverktyg, medan VCC stått för kravställningen och test och validering av de utvecklade verktygen. Testerna har genomförts kontinuerligt under projektets gång vartefter nya versioner av verktygen blivit tillgängliga och ny funktionalitet implementerats.

5 Mål

Baserat på resultatet av det tidigare AutoPack projektet har Volvo potentialen att spara tusentals ingenjörstimmar för enklare slanginstallationer. För att definiera slang, rör och kablageinstallationer på Volvo budgeteras idag ca. 30 000 ingenjörstimmar till en kostnad av ca. 20 MSEK per år. För att

sedan skapa detaljerade CAD-modeller, budgeteras ytterligare lika stor tid. Med hjälp av att vidareutveckla Autopack-ramverket estimeras att AutoPack 2.0 kan leverera ytterligare följande fördelar:

- 10 MSEK/år i beräknade besparingar
- 50% ingenjörstimmar kan sparas när det gäller att ta fram installationer och gå till färdig beredning.
- 25% snabbare ledtid för berörda delar.
- Förbättrad produktionsoptimering samt monterbarhet.
- Minskad risk för sena förändringar, och produktions- och kvalitetsproblem
- Minskat antal fysiska monteringsprov
- Ökad förståelse kring integration av högvoltskablage
- Minskat antal fysiska tester av lösningar i bil.

Projektet adresserar delprogramområdet SMART beredning och bidrar till de specifika delmålen genom att:

- Öka industrins konkurrenskraft genom att utveckla ett ramverk som möjliggör att man snabbt kan komma från idé till marknad och tidigt i konstruktionsprocessen ta hänsyn till produktionsaspekter, främst ergonomi i samband med montering.
- Öka graden av digitalisering, automatisering och formell matematisk optimering av både produkt (installationen av kablage och kabelhärvar) och produktionsprocess (främst människan i monteringen).
- Digitalisera, effektivisera och <.
- Förenkla för beslutsfattare att ta välgrundade beslut baserat på optimerade produkter och processer och nyutvecklade verktyg för att visualisera olika tekniska lösningar och deras egenskaper.
- Projektet bidrar också till ökad samverkan mellan industri, akademi och forskningsinstitut, genom samverkansforskning såväl som genom på verkan på grundutbildningen genom exempelvis genomförda examensarbeten och nyutvecklade kurser som kommer framtidens ingenjörer till gagn.

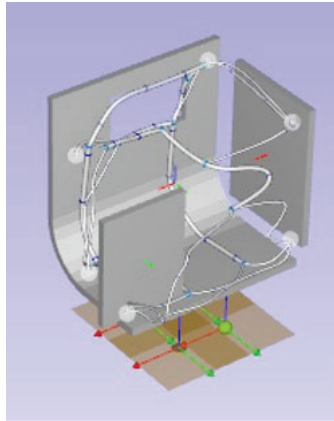
6 Resultat och måluppfyllelse

Arbetet har inkluderat ett antal olika delmoment uppdelade i arbetspaket med det övergripande målet att bidra till att utveckla lösningar för kabeldragning för att uppnå målen definierade ovan. Det övergripande projektresultatet sammanfattas i det vidareutvecklade AutoPack ramverket som inkluderar en mängd nyutvecklade funktioner i IPS för kabeldragning som kombineras med utvecklade metoder för automatisk monteringssimulering och ett ramverk för multidisciplinär flermålsoptimering för att skapa lösningar med olika egenskaper.

Nedan beskrivs först delresultaten i relation till de olika arbetspaketen i kapitel 4 för att sedan summeras i ett slutresultat.

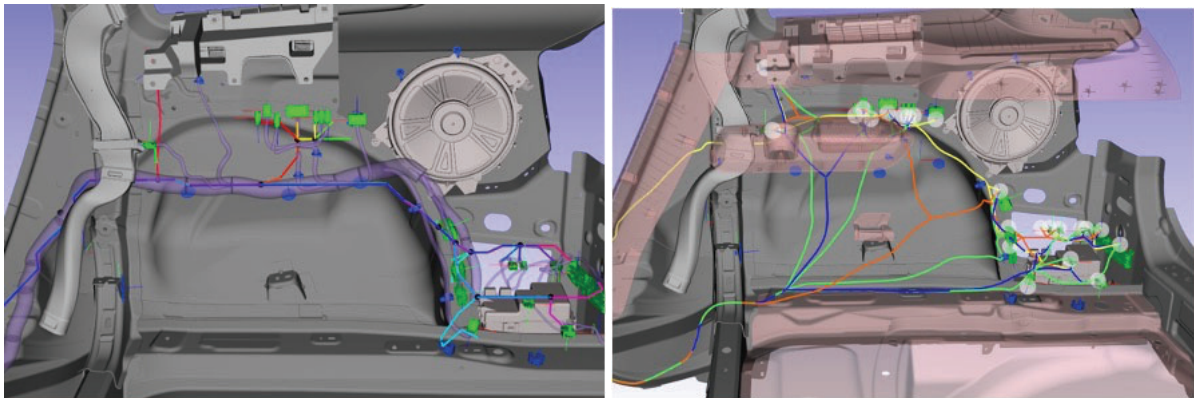
6.1 AP1 Definiera testfall

Arbetspaket 1 hade som mål att definiera de testfall som skulle användas inom ramen för projektet. Inom projektet har ett antal olika testfall använts för olika ändamål. För att metodutveckling avseende routing, ergonomi och det generella MDO-ramverket har förenklade och renodlade testfall använts, exempel på sådana testfall återges i Figur 2 nedan.



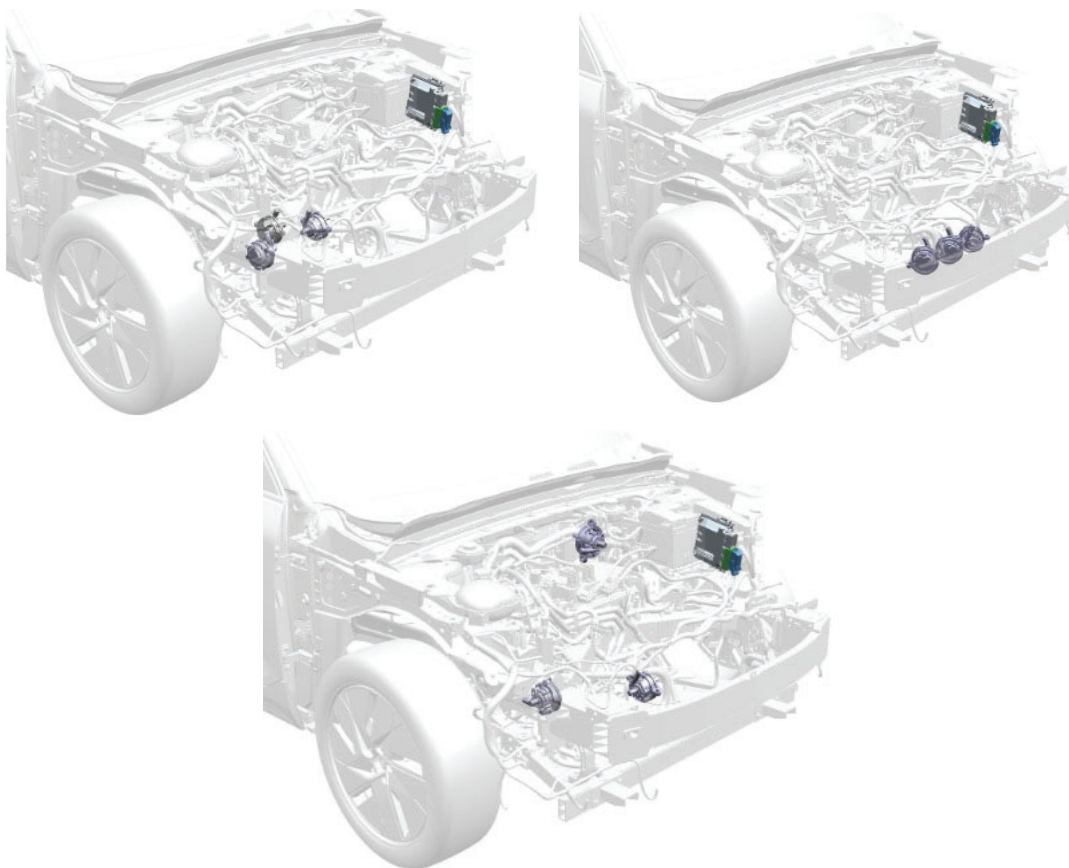
Figur 2. Förenklat testfall för kabeldragning anpassat för snabba iterationer under utvecklingen.

Förenklat testfall innehållande många av de egenskaper som återfinns i det lite komplexare testfallet i Figur 3 nedan. Utöver ovanstående testfall har även ett antal mer detaljerade testfall studerats, så som illustreras i kabeldragningen nedan.



Figur 3. Referensfall för kablagedragning längs bakre hjulhus - ursprunglig lösning (till vänster) vs förslag från Autopack-verktyget (till höger). Fallet är fördelaktigt som referens eftersom beredningsaspekten kräver längre kablagerlösningar.

De testfall som använts i projektet har varit användbara och försökt balansera olika krav så som graden av komplexitet (storleken på problemet som studeras), detaljnivå (tidig konceptuell routing eller slutlig dragning), fokus på studien (ergonomi vid montering, kabeldragningens egenskaper, relation till omgivande geometri etc). En subjektiv bedömning av dessa krav har kontinuerligt gjorts inom projektet, och testfallen har valts för att samtidigt som de är representativa för problemställningen skall vara så pass förenklade så att beräkningstiderna blir hanterbara under utvecklingen. För validering har ett betydligt mer komplext och detaljerat testfall använts, se Figur 4 nedan. Valideringstestfallet innehåller en del egenskaper som inte förekommer i de inledande testfallen, vilket diskuteras under rubrik 6.5.

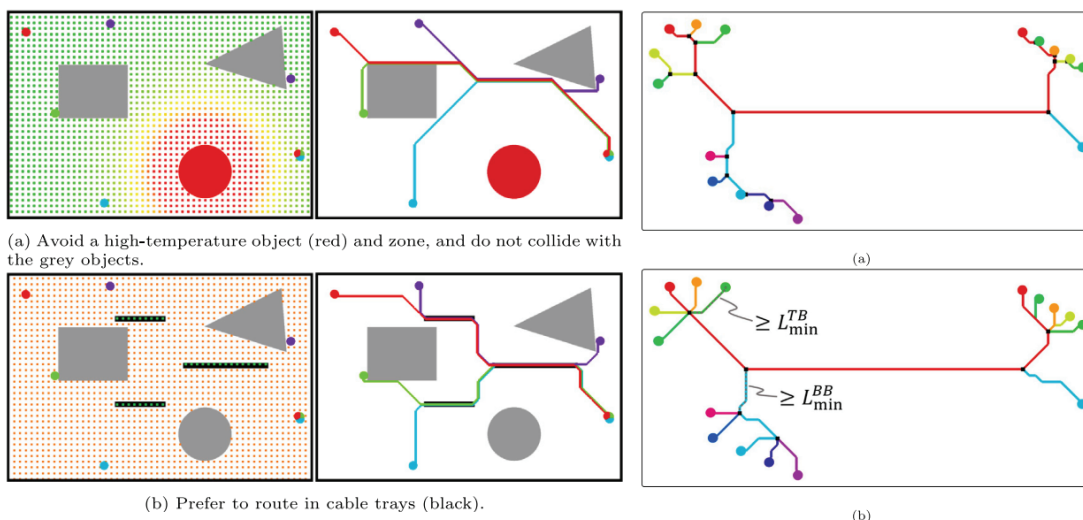


Figur 4. Valideringstestfall bestående av tre olika pumppositioner för vilka kabeldragning skall göras i ett realistiskt och komplext motorrum.

6.2 AP2 Beredningsramverk

Inom AP2 vidareutvecklas AutoPack ramverket till ett beredningsramverk, med utvecklad detaljrikedom och som inkluderar både möjlighet att simulera el kablar samt att ta hänsyn till ergonomiska monteringsaspekter.

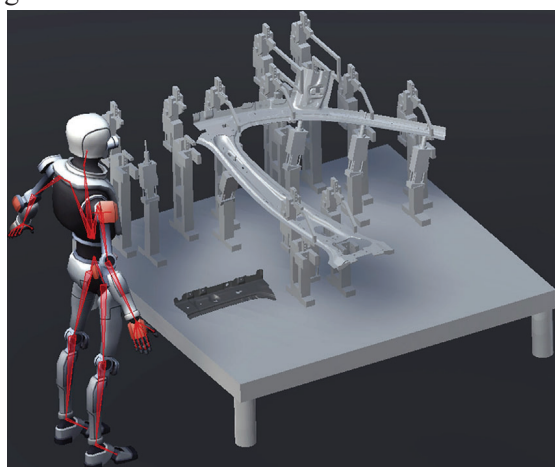
Arbetet med att utveckla en metodik för att dra el-kablar har krävt ett stort fokus från FCC. Här har metoder utvecklats för att dra kabelhärvar där flera design-aspekter tas hänsyn till. Design-aspekterna är: (1) minimera kabel-längder, (2) bunta ihop kablar, (3) minsta tillåtna längd från anslutningspunkter till förgreningspunkter, samt minsta tillåtna längd mellan förgreningspunkter, (4) minsta tillåtna böjradie, (5) kollisionsfritt och avstånd till kringliggande geometri, (6) clip-regler (inklusive att placera kabelhärvan mot klipp-bar geometri), (7) ”subjektiva” krav om routing-utrymmet som kan förprocesseras, så som var det är (o)önskat att installera kabelhärvan, se illustration nedan. Vidare har ett användargränssnitt för forskningssyfte implementerats i IPS.



Figur 5. Två fall där de optimerade lösningar önskas att (a) undvika ett särskilt område och (b) dras i kabelkanaler.

Figur 6. (a) lösning optimerad med hänsyn till kabel-längd och bundling. (b) lösning med tillagt krav på minsta tillåtna längd mellan anslutningspunkt och förgreningspunkt ($L_{\min}^{TB}$) och mellan förgreningspunkter ($L_{\min}^{BB}$).

Inom arbetspaketet smart automatisk beredning var målet att skapa beräkningseffektiva modeller kompatibla med att inkludera i ett MDO ramverk för utvärdering av ergonomi. Här utvärderades två olika metoder, dels gjordes initiala studier på hur maskininlärning i form av reinforcement learning kan användas för att träna en manikin i en spelmotormiljö till att genomföra monteringsuppgifter. Denna metod visade initialt god potential för att i framtiden kunna användas för den här typen av simulering. Den andra metoden som utvärderades var att automatisera IPS verktyget IMMA med hjälp av LUA script för att automatiskt kunna hantera flexibla krav på geometri och monteringen. Denna metod valdes att arbeta vidare på då IMMA programmet redan erbjöd stöd för ergonomisk utvärdering. Utmaningen med IMMA jämfört med RL och spelmotorn är tidsaspekten där metoden med RL går flera tusen gånger snabbare jämfört med IMMA som kräver att en optimering genomförs för varje utvärderade monteringsmoment. Detta löstes genom att automatiskt sampla en del av lösningsrymden där en kabel kan monteras och baserat på detta använda maskininlärning i form av en surrogatmodell för att snabbt kunna utvärdera lösningarna. Denna modell inkluderades sedan i det globala MDO ramverket.



Figur 7. Utvärdering av monteringsaspekter i Unity med hjälp av Reinforcement Learning.

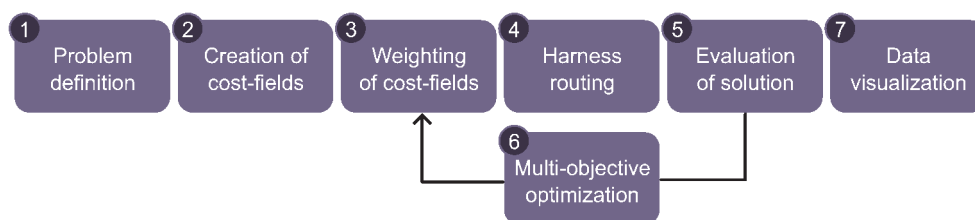


Figur 8. Utvärdering av monteringsaspekter i IMMA.

Det utvecklade ramverket täcker vissa monteringsegenskaper men en automatisk analys av att fullt kunna besvara frågan ”kommer kablaget gå att montera?” är en stor forskningsfråga och har inte varit rimligt tidsmässigt att undersöka inom projektet. Därför finns möjligheten att komplettera den automatiska analysen i IMMA med att också manuellt analysera monteringsmöjligheter genom en VR analys där en VR-scen med aktuell kabeldragning automatiskt sätts upp.

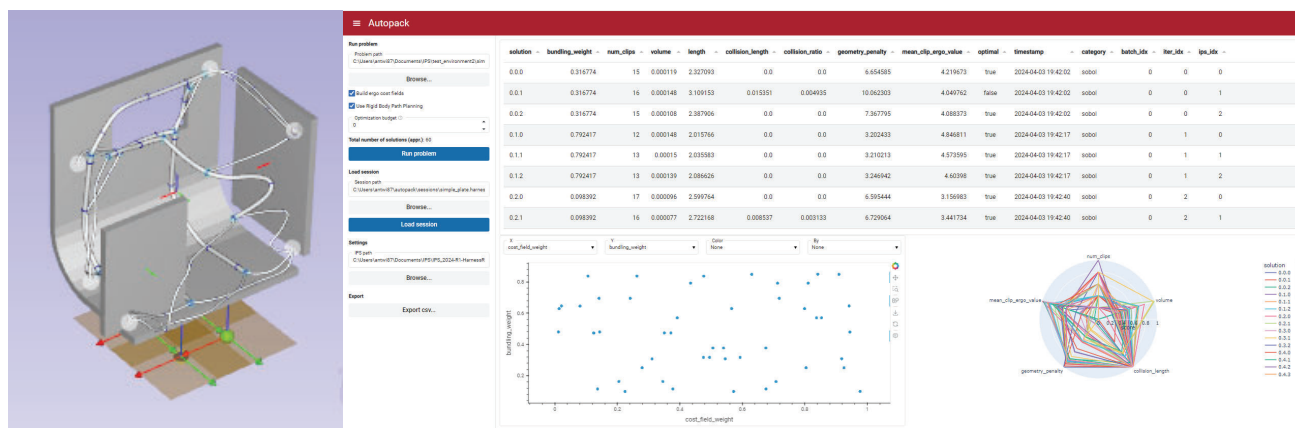
6.3 AP3 Multidisciplinär optimering

Genom att utveckla ett ramverk för multidisciplinär optimering kan metoderna för optimering av kabeldragning som utvecklades inom AP2.2 kombineras med multipla andra aspekter för att på så sätt skapa lösningar som tar hänsyn till olika aspekter. Ramverket innehåller 7 steg som presenterat i Figur 9 där en problemställning i form av start och slut noder för ett kablage definierats tillsammans med geometri och andra förutsättningar. Baserat på detta skapas kostnadsfält som motsvarar olika aspekter av kabeldragning (längd, montering, undvika förbjudna områden och föredra andra) vilka viktas och sedan används i metoden för kabeldragning utvecklade i AP2.2. Baserat på detta fås en kablagerösning som utvärderas mot olika aspekter så som kabellängd, kabelvikt, frispel och monteringsbarhet. Dessa parametrar optimeras sedan genom en flermålsoptimering för att hitta nya bättre alternativ.

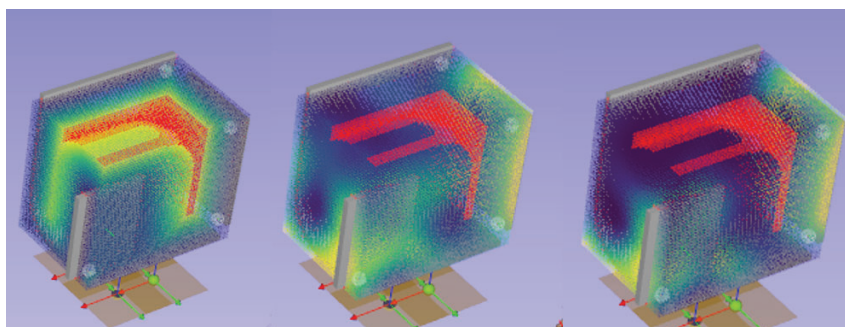


Figur 9. Översikt av det multidisciplinära Autopack ramverket.

Kostnadsfälten som skapas i ramverket representerar olika aspekter av kabeldragningen. Ett exempel syns i Figur 11 där de två högra kostnadsfälten representerar olika ergonomiska aspekter medan den vänstra representerar geometriska preferenser där vi föredrar att vara nära geometrierna. Det röda området i kostnadsfälten uppfyller inte grundläggande villkor och är därför förbjuden i samtliga fält. Baserat på olika viktning av kostnadsfälten tillsammans med ett antal andra variabler skapas olika lösningar med hjälp av IPS metoderna utvecklade i AP2.2. De olika lösningarna analyseras och egenskaper så som kabellängd, antal klipp, ergonomiskt betyg och frispel. Baserat på detta genomförs en multi objektiv optimering där samtliga dessa egenskaper optimeras. De geometriska resultaten från kabeloptimeringen sparas i IPS, samtidigt visualiseras resultatets egenskaper i ett utvecklat användargränssnitt. Tillsammans tillåter dessa användaren att visualisera olika egenskaper och jämföra de olika lösningarna, se figuren nedan.



Figur 10. Visualisering av resultaten i form av olika geometriska varianter till höger och de olika egenskaperna för alternativen visualiserat till vänster.



Figur 11. Exempel på kostnadsfält i Autopack ramverket där det vänstra är skapat baserat på geometriska faktorer medan de andra är baserat på olika ergonomiska aspekter.

6.4 AP4 Visualisering och beslutsstöd

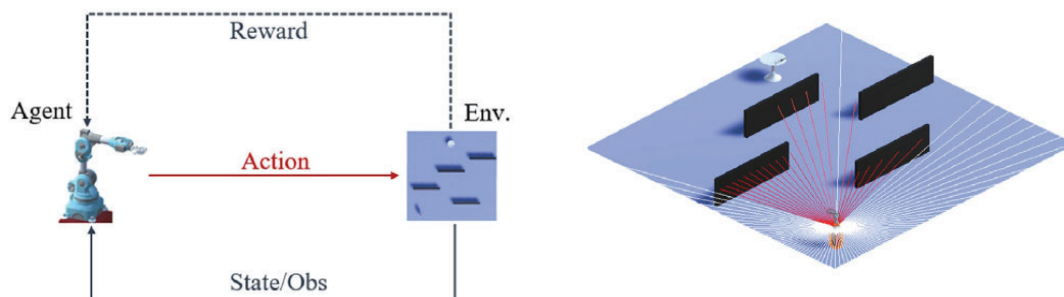
Inom projektet har två alternativ för att hjälpa användaren att välja mellan olika potentiella kabelhärvor undersökts och utvecklats. Det ena är funktionalitet i IPS som gör det enkelt att inspektera och utvärdera lösningarna i VR. Den funktionalitet som har utvecklats i projektet är att kunna inspektera olika routing alternativ genom att interaktivt flytta och testa att montera kablagen, den rörelse som då genomförs utvärderas från ett ergonomiskt perspektiv.

Det andra alternativet för beslutsstöd är kopplat till det multidisciplinära ramverket där det utvecklats verktyg för beslutsstöd (se Figur 10). I detta beslutsstöd så presenteras de olika egenskaper för en lösning i olika former vilket möjliggör att lösningarna jämförs och användaren kan interaktivt välja mellan olika plottar och vyer. Det finns också funktionalitet för att automatiskt kunna välja ett antal differentierade lösningar för att hjälpa användaren att plocka ut och jämföra lösningar som är olika varandra, exempelvis via VR.

6.5 AP5 Maskininlärning

Målet med AP5 var att utveckla metoder för Reinforcement learning (RL) för att stödja processen för kabeldragning. Inom projektet undersöktes två separata spår där det ena var att undersöka hur ruttplanering kan genomföras med hjälp av RL. Genom att använda en spelmotormiljö i form av Unity kan agenter ges som uppgift att röra sig från en startpunkt till en slutpunkt genom att ta beslut om de ska höger, vänster eller rakt fram. Kommer de närmare målet får de en reward och rör de sig i fel riktning bestraffas agenten med ett negativt värde. Genom detta tillvägagångssätt kan agenten tränas i miljoner iterationer i en varierad miljö för att lära sig hitta en bra väg från start till slutpunkt. Denna typ av ruttplaneringen var en början till att kunna använda samma metod för att dra kablage.

Det andra spåret som undersöktes i projektet var att använda en liknande metod för att lära en manikin att genomföra montering. Här hanterades manikinen som en agent där rörelserna kontrollerades i en



Figur 12. Exempel på reinforcement learning där en agent (i detta fall i form av något som röra sig från punkt A till B i en ostrukturerad miljö) tar beslut själv, baserat på beslutet uppdateras scenen och en belöning (reward) delas ut som kan vara positiv om tillståndet anses bättre, eller negativt om tillståndet anses sämre. Med detta som input tränas agent till att lära sig bättre strategier.

ostrukturerad monteringsmiljö och om monteringen lyckades blev agenten belönad. Detta syns i Figur 7. Figur 12 visar en illustration av hur ett RL ramverk fungerar där en agent tar ett beslut i en miljö, baserat på detta får den feedback både i form av en uppdatering hur miljön påverkades av beslutet och en belöning eller bestraffning baserat på om utfallet anses bra eller dåligt. Bägge dessa applikationer visade lovande tidiga resultat som har rapporterats i publikationerna [2]-[4]. Det beslutades dock att IPS och IMMA var ett lämpligare verktyg att integrera i beredningsramverket då det möjliggör mer detaljerade ergonomi studier. Därför avslutades arbetet med RL och fokus lades på att integrera IPS IMMA tillsammans med ML baserad optimeringen i beredningsramverket.

6.6 AP6 Test och validering

För att validera AutoPack ramverkets potential i dess befintliga form iscensattes ett simulerat testscenario hämtat från ett verkligt fall där ett motorrum genomgår en större uppdatering av ny teknik dvs. adderade funktioner i form av olika komponenter. Uppgiften, och testscenariot, bygger på att tre vattenpumpar skall placeras ut/positioneras i dess miljö på sådant sätt som driver minimala slang- och kabellängder, för minskad materialkostnad och materialåtgång (vikt), samt att dess positioner inklusive slangar och kablage är nåbara och hanterbara för en hållbar operatörsergonomi samt minimerar monteringsstid i fabrik.

För att skapa mätbara data relevant för AutoPack ramverkets funktionalitet avgränsades valideringsfallet till att jämföra utvecklingsprocessen inom ramen för konceptuell kabelkonstruktion dvs. i tidig utvecklingsfas. De mätparametrar som använts inom projektet finns presenterade i Tabell 1.

Tabell 1. Mätparametrar som använts.

Parameter	Unit	Explanation	Impact
Wire length	mm	total amount of material used	Cost / Sustainability
Direct time	h	time used to design and verify the solution	Labour cost
Lead time	h	total time from stated prerequisites to drawing	Time to market
Quality	-	judged level of design maturity, confidence and explored "solution space"	

Testscenariot var konstruerat så att 3 olika förslag på vattenpumppositioner (se Figur 4) presenterades för varje enskild testperson/ingenjör och att en komplett kabelkonstruktion, på konceptnivå, skulle skapas för respektive pumpposition. Detta för att simulera en normal utvecklingsprocess i tidiga konceptfaser där flera olika alternativ undersöks. Därmed testas ramverkets flexibilitet och hantering av olika miljöförändringar.

Valideringsprocessen delades upp i ett *referensfall* som genomfördes av konstruktörer på Volvo och *Autopackfall* som löstes med hjälp av AutoPack ramverket enligt förfarandet nedan:

Referensfall

Två seniora kabelkonstruktörer fick vardera en fördefinierad geometrisk miljö med tre vattenpumpar utplacerade. Varje enskild pump hade definierade kabelanslutningar och konstruktörerna instruerades med kabeldata, dvs. kabeldimensioner och egenskaper. Samtliga pumpar skulle elektriskt kopplas till en styrenhet placerad i motorrummet.

Konstruktörerna mätte tid från mottagande av instruktioner till att de var nöjda med sitt konceptuella konstruktionsförslag. Därefter iscensattes ett integrationsmöte med deltagare från Mekanisk integration, fabriksberedning och kabelkonstruktion för att granska kabelförslagen. Tid för mötet, förberedelser och analyser från mötesdeltagarna noterades. Därefter även tid mellan mötestillfällen, dvs ledtid.

Som steg två gavs kabelkonstruktörerna ett nytt förslag för pumppositioner som krävde ny kabeldesign. Detta för att simulera nya förutsättningar och utredning av alternativa geometriska positioner. Därefter samlades samtliga intressenter och analyserade resultaten. Vid steg tre tilldelades ett tredje förslag av pumppositioner som genomgick liknande process som tidigare. För samtliga steg mättes direkt tid och ledtid.

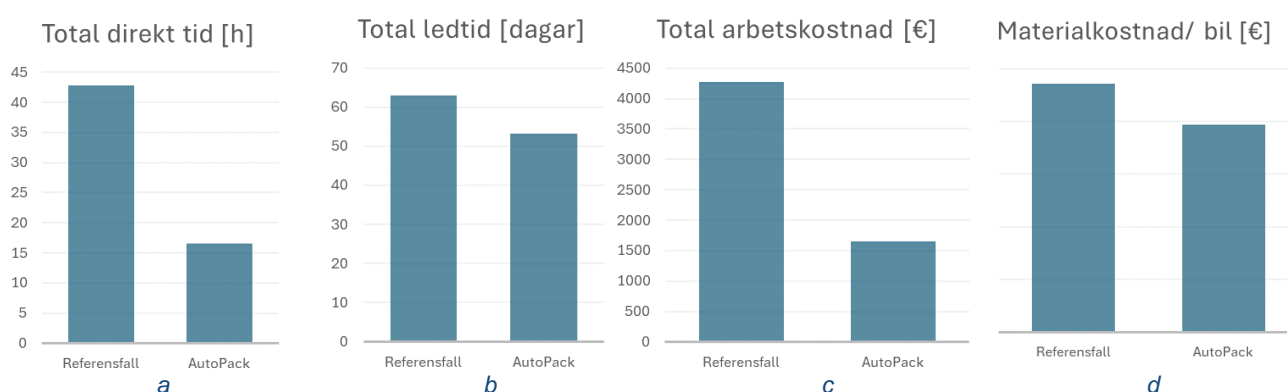
Autopackfall

Fyra AutoPack-användare med bakgrund inom Mekanisk integration och varierad erfarenhet av AutoPack ramverket fick vardera samma instruktion och pumppositioner som i referensfallet ovan. Liknande analysmöten genomfördes.

Slutsatsen från valideringen är baserad på ett specifikt testfall med en hög grad av komplexitet avseende integrationsmiljön, dvs. ett fall mer komplicerat än det som varit i fokus tidigare i projektet, och som representerar tidigare konceptfaser där krav på detaljerad kabelkonstruktion är lägre. Detta för att premiera snabbhet och flexibilitet att utforska flertalet olika konstruktionsförslag som underlag till ett databaserat beslut. Resultatet visar på en styrka i AutoPack ramverket, att snabbt utforska en komplex geometrisk miljö och potentiellt korta antalet konstruktionsloopar då ramverket kan utvärdera flera discipliner samtidigt dvs. både konstruktion och monteringsberedning. Från valideringstestet visar ramverket även på en betydande styrka att korta utvecklingstiden, både direkt tid och ledtid, ju mer komplicerad den geometriska miljön är. Detta påvisas mellan stegen för de olika pumppositionerna.

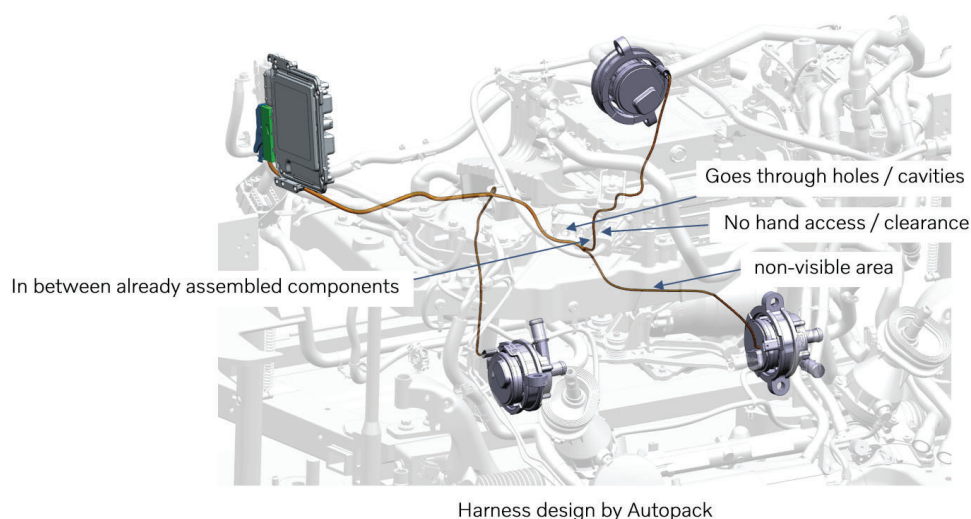
Total direkt tid Figur 13a och därmed total arbetskostnad Figur 13c är 2/5 delar jämfört med den nuvarande manuella konstruktionsprocessen på VCC. Det vill säga AutoPack ramverket har potentialen att minska ingenjörstiden och kostnaden med 60%, då ramverket utför kabelkonstruktionen betydligt snabbare. Att ledtiden Figur 13b endast är 15% lägre än referensfallet bygger på att antalet konstruktion- och analysloopar reducerades mindre än förväntat utfall för Autopackfallet då kvaliteten på resultaten inte var enligt önskad nivå. Det finns således ett behov av att utveckla kvaliteten på de lösningar som genereras av ramverket.

Materialkostnad per bil, dvs. mängden tillfört kablage och material, visar på en 15% besparingen, se Figur 13d. Dessa går dock inte att realisera i verkligheten då de härstammar från genvägar som ramverket tagit, men som inte är praktiskt möjliga på grund av olika begränsningar som inte implementerats i AutoPack ramverket ännu. Det innebär att de lösningar som genereras inte alltid motsvarar de krav och riktlinjer som krävs för att tillverka och montera kablaget, se Figur 14.



Figur 13. Mätvärden från utvärderingen med en jämförelse mellan referensfallet och resultaten när Autopack ramverket användes.

Tittar vi framåt så kommer FCC att jobba vidare med sin del av projektet genom att implementera routing- och smoothing-verktyg i framtida IPS-releaser. Viktiga förbättringspotentialer har identifierats av alla parter, där monteringsaspekter är av stor vikt, och vi ser stora möjligheter att kunna bidra inom olika forskningsfrågor som gör att vi kan skapa lösningar som tar hänsyn till fler aspekter som ännu inte beaktas och därmed ge ett utökat beslutsstöd.



Harness design by Autopack

Figur 14. Lösning genererad från Autopack ramverket där ramverket hittar genvägar som inte är tillåtna på vissa ställen.

7 Spridning och publicering

7.1 Kunskaps- och resultatspridning

Resultaten från projektet har spridits på flera olika sätt. Detta inkluderar både vetenskapliga sammanhang, industriellt inom företag och som fortsatt industriell utveckling. Tabell 2 visar en sammanfattning av de olika sätt som resultaten har spridits på.

Tabell 2. Planerad och genomförd spridning av resultat.

Hur har/planeras projektresultatet att användas och spridas?	Markera med X	Kommentar
Öka kunskapen inom området	X	Projektet har delvis haft syftet att öka kompetensen inom området generellt för mekanisk integration på VCC. Ett flertal personer har deltagit i arbetet och i samband med projektrapportering har vi även summerat internt på VCC vad som pågår inom projektet. Resultaten har även publicerats i vetenskapliga kanaler, och påverkat universitetets utbildningsutbud.
Föras vidare till andra avancerade tekniska utvecklingsprojekt	X	Kunskaperna genererade kopplat till maskininlärning har tagits vidare genom fortsatt arbete i andra forskningsprojekt. Resultatet har även publicerats under öppen källkod för att möjliggöra fortsatt arbete av andra. Det multidisciplinära ramverket har även det publicerats under öppen källkod för att möjliggöra fortsatt arbete i bredare kretsar. Har kan de olika delar av ramverket användas separat vilket till exempel inkluderar återanvändbara komponenter relaterat till optimeringen och beslutsstödet.
Föras vidare till produktutvecklingsprojekt	X	Ett projekt har initierats för att implementera verktyget <i>Harness Router</i> i IPS.

		VCC kommer försöka använda AutoPack ramverket inom ramen framtida utvecklingsprojekt, men den utvecklade prototypen behöver sannolikt utvecklas ytterligare innan den kan användas i skarpa utvecklingsprojekt.
Introduceras på marknaden	X	Det utvecklade routing- och smoothing-verktyget <i>Harness Router</i> planeras för att kommersiell introduktion i IPS vid årsskiftet 2024-2025.
Användas i utredningar/regelverk/ tillståndsärenden/ politiska beslut		

7.2 Publikationer

[1] T. Karlsson, E. Åblad, T. Hermansson, J.S. Carlson, G. Tenfält, Automatic Cable Harness Layout Routing in a Customizable 3D Environment, Computer-Aided Design, Volume 169, 2024, 103671, ISSN 0010-4485, <https://doi.org/10.1016/j.cad.2023.103671>.

[2] Åblad E. LocalPoly interpolation: Generalizing tricubic for C^n continuity in M-dimensional spaces. Engineering Reports. 2024;e12888. doi: [10.1002/eng2.12888](https://doi.org/10.1002/eng2.12888)

[3] Nambiar S., Adaptive Automation for Customized Products, Linköping University Electronic Press, 2024, DOI: 10.3384/9789180756785

[3] Nambiar S, Wiberg A, Tarkian M, Automation of unstructured production environment by applying reinforcement learning. Frontiers in Manufacturing Technology, Volume 3, 2023, doi: 10.3389/fmtec.2023.1154263

[4] Ravikumar, B. Optimization of harness routing in vehicles for ergonomic assembly. LIU-IEI-TEK-A--22/04371—SE, 2022

[5] Wiberg, A. Vidner, O., Persson J., Ölvander J., Multidisciplinary Harness routing considering assembly ergonomics, in manuscript

8 Slutsatser och fortsatt forskning

Det utvecklandet av verktyget *Harness Router* har varit lyckat och möjliggör automatisk routing av kabelhärvor. Harness Routern kan hitta lovande lösningar för ett flertal målfunktioner baserat på längd och geometriska design-krav av kablage. Verktöget har använts i det globala AutoPack-ramverket där multidisciplinära optimeringsmetoder kopplar ihop Harness router med ergonomisk utvärdering för att skapa en variation i lösningarna. Det utvecklade ramverket gör det enkelt för användaren att få flera olika designförslag som är bra från olika aspekter (längd, antal klipp, massa och ergonomisk montering). Det utvecklade ramverket kompletteras med ett gränssnitt för beslutsstöd där egenskaperna för de olika lösningarna kan visualiseras och jämföras, samtidigt som den geometriska designen kan visualiseras och arbetas vidare med i Harness Router verktyget.

Målet med projektet var att uppvisa en minskad ledtid med 25% och antalet ingenjörstimmar med 50%. Resultatet av valideringsstudien påvisar AutoPack-ramverkets potential i det att ingenjörstiden reducerades med 60% och leddiden minskades med 15%. Anledningen till att inte leddiden minskade mer är att kvalitén på de lösningar som genereras är lite för låg, så att det krävs mer manuellt efterarbete av de automatgenererade lösningarna.

De olika verktygen fungerar som önskat med att generera olika lösningar och möjliggöra en jämförelse mellan dessa. Det finns samtidigt stor potential att förbättra olika aspekter av de olika lösningarna, detta inkluderar främst:

- Föreslå mer varierande lösningar – Harness Routern kan ofta föreslå väldigt liknande lösningar för att alla har konvergerat till ett liknande (väldigt lovande) lokalt optimum. Olika tekniker för att skapa variationer av lösningar har implementerats i det multidisciplinära ramverket men det skulle gå att jobba vidare med detta för att skapa än större variation. Detta kan göras genom att dels söka efter mer spatialt varierande lösningar, och dels genom att söka efter mer varierande lösningar i målfunktions-rymden (t.ex. genom att vikta olika design-aspekter olika).
- Bättre ergonomisk utvärdering – Det utvecklade ramverket använder en kommersiell modell för att utvärdera de ergonomiska aspekterna. Det har dock visat sig att denna inte täcker alla de aspekter som behövs för att fullt kunna skapa lösningar som är bra från ett monteringsperspektiv. Här skulle tekniker som automatiskt analysera monteringsvägar för kabelhävror kunna användas för att förbättra lösningarna.
- Ökad kvalitet på de genererade lösningarna genom att ta hänsyn till ytterligare design aspekter under kabeldragningen. Exempel på sådana aspekter återfinns i figur 14, men det finns åtskilligt fler aspekter som bör beaktas i framtida versioner av AutoPack ramverket.

Arbetet med Reinforcement Learning i projektet har demonstrerat hur en spelmotormiljö möjliggör snabba iterationer där en agent kan testa miljontals olika alternativ på en relativt kort tidsperiod för att lära sig hur den ska agera. I projektet har två olika alternativ testats, ett som bygger på att lära en manikin montera saker och en som handlar om att finna bästa vägen på ett ruttnproblem. Bägge dessa applikationer visade potential att kunna lösa problem snabbare än dagens optimeringsdrivna metoder men mognadsgraden för industriell applikation av dessa metoder ligger än så länge efter de andra metoderna i projektet.

Projektet i stort har fungerat tillfredsställande och levererat på en bra nivå. Ramverket visar på potentialen att signifikant snabba upp konstruktions och beredningsprocessen, men inte fullt ut uppfyllt alla förväntningar som sattes upp i början. Resultatet är ett verktyg som kan generera bra lösningar under rätt förutsättningar. Tidigt beslutades att studera relativt förenklade geometrier, och när mer komplexa falls studerades under valideringsfasen identifierades områden för förbättringar. Den valda approachen bedöms som effektiv och innovativ och projektet har levererat ett prototypverktyg med både stor potential men som också har begränsningar. Med vidareutveckling har AutoPack-ramverket potential att bli ett väldigt användbart verktyg i det dagliga arbetet med kablagekonstruktion. Några aspekter att förbättra i framtida forskningsarbete är:

- Ökad användarflexibilitet för att styra lösningsrymden
- Ökad variation bland de identifierade lösningarna
- Förbättrat beslutsstöd för att möjliggöra ett än mer datadrivet arbetssätt
- Öka antalet parametrar för förbättrad kablagekonstruktion.
- Ökad kvalitet och detaljeringsgrad på genererade lösningar.
- Vidareutveckling av programvara i sig så den blir mer användarvänlig och stabil.

9 Deltagande parter och kontaktpersoner



Johan Ölvander
Johan.olvander@liu.se



FRAUNHOFER CHALMERS
RESEARCH CENTRE FOR INDUSTRIAL MATHEMATICS

Johan S. Carlson
johan.carlson@fcc.chalmers.se



Gustaf Tenfält
gustaf.tenfalt@volvocars.com

