



Juho Lehto

90-luvun moottorin johtosarjan modernisointi

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Ajoneuvotekniikka

Insinöörityö

20.4.2025

Tiivistelmä

Tekijä: Juho Lehto
Otsikko: 90-luvun moottorin johtosarjan modernisointi
Sivumäärä: 51 sivua + 3 liitettä
Aika: 20.4.2025

Tutkinto: Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma: Ajoneuvotekniikka
Ammatillinen pääaine: Autosähkötekniikka
Ohjaaja: Lehtori Pasi Kovanen

Tässä opinnäytetyössä tutkittiin henkilöauton moottorin johtosarjan suunnittelua ja valmistusprosessia Ford Zetec -moottorille, joka on asennettu vanhempaan ajoneuvoon. Työn tavoitteena oli suunnitella ja valmistaa moderni johtosarja, joka täyttää nykyaikaiset vaatimukset. Projektissa keskityttiin erityisesti johtosarjan suunnitteluvaiheeseen, jossa analysoitiin Fordin alkuperäisten johtosarjojen ominaisuuksia ja määriteltiin uuden järjestelmän tekniset vaatimukset.

Johtosarja suunniteltiin Zuken E³ – ohjelmistolla, ja valmistuksessa sovellettiin moderneja johdinmateriaaleja, liittimiä ja suojausratkaisuja. Valmistuksen jälkeen johtosarjan toimivuutta testattiin sähköisillä ja mekaanisilla mittauksilla.

Työn tulokset luovat kattavan pohjan vanhempien ajoneuvojen johtosarjojen modernisointiin suunnittelun ja valmistuksen osalta. Työn suunnittelun ja valmistuksen dokumentointi tarjoaa käytännönläheisiä ratkaisuja ajoneuvojen modernisointiin.

Avainsanat: Sähkösuunnittelu, johtosarjan suunnittelu, johtosarjan rakennus, moottorin johtosarja

Tämän opinnäytetyön alkuperä on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

Abstract

Author: Juho Lehto
Title: Modernization of a 1990s Engine Wiring Harness
Number of Pages: 51 pages + 3 appendices
Date: 20 April 2025

Degree: Bachelor of Engineering
Degree Programme: Automotive Engineering
Professional Major: Automotive Electronics Engineering
Supervisor: Pasi Kovanen, Senior Lecturer

This thesis focuses on the design and manufacturing process of a wiring harness for a 1990s passenger car, Ford Sierra, which has been retrofitted with a Ford Zetec engine. The objective was to design and produce a modern wiring harness that meets current automotive standards. The project focused particularly on the design phase, during which the properties of Ford's original wiring harnesses were analyzed, and the technical requirements for the new system were defined.

The wiring harness was designed using the Zuken E³ software. Modern conductor materials, connectors and protection solutions were applied during manufacturing. After the production, the functionality of the wiring harness was tested through electrical and mechanical tests.

The results of this thesis provide a comprehensive foundation for modernizing the wiring harnesses of older vehicles. The documentation of the design and manufacturing process in this work offer practical solutions for vehicle modernization.

Keywords: Electrical design, wiring harness design, wiring harness manufacturing, engine wiring harness

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Lähtötilanne ja alkuperäiset johtosarjat	2
2.1	Ford Sierran alkuperäinen johtosarja	2
2.2	Zetec-moottorin alkuperäinen johtosarja	3
2.3	Ford Fiesta ST:n johtosarjan analysointi	5
2.4	Suurimmat kehityskohteet	7
3	Uuden johtosarjan suunnittelu	8
3.1	Järjestelmän suunnittelu	9
3.1.1	Järjestelmän kokonaisuus	10
3.1.2	Kytkenäkaaviot ja dokumentaatio	12
3.1.3	Vaatimusten määrittely	13
3.2	Komponenttisuunnittelu	14
3.2.1	Johdinmateriaalit	14
3.2.2	Johtimien mitoitus	16
3.2.3	Liittimet	19
3.2.4	Anturointi ja muut komponentit	21
3.2.5	Johtosarjan mekaaninen suojaus	24
3.3	Johtosarjan integrointi ajoneuvoon	25
3.3.1	Reititys ja rakenteelliset rajoitteet	26
3.3.2	Häiriösuojaus	27
4	Uuden johtosarjan valmistus	28
4.1	Johtosarjan valmistus	30
4.1.1	Leikkaus ja kuorinta	30
4.1.2	Johtimien niputus	32
4.1.3	Johtosarjan suojaus	33
4.1.4	Puristusliitos eli krimppe	36
4.1.5	Liittimien kasaus	40
4.2	Valmistuksen tarkastuskohteet	41
5	Valmis johtosarja	42

5.1	Johtosarjan tarkastukset	43
5.2	Vertailu alkuperäisiin johtosarjoihin	44
5.3	Tulosten arviointi	44
6	Yhteenveto ja johtopäätökset	45
	Lähteet	48
	Liitteet	
	Liite 1: Kytkenäkaaviot	
	Liite 2: Spec-55 Johdin	
	Liite 3: Johtimien mitoitus taulukko	

Lyhenteet

DR-25: TE Connectivityn kutistesukkatyyppi

ECU: Moottorinohjainlaite

ETFE: Eteenitetrafluorieteeni

IACS: International Annealed Copper Standard

PVC: Polyvinyylikloridi

SCL: TE Connectivityn liimasukkatyyppi

Spec-55: TE Connectivityn johdintyyppi

TXL: Ohutseinämäinen XLPE-kuorimateriaalilla varustettu johdin

XLPE: Ristisilloitettu polyeteeni

1 Johdanto

Ajoneuvojen sähköjärjestelmien kehittyessä johdinsarjoista on tullut yksi ajoneuvon merkittävimmistä osakokonaisuuksista. Nykyiset tekniset sovellukset tarjoavat kattavan pohjan luoda uutta sekä kehittää vanhaa. 90-luvun johtosarjat eivät vastaa ominaisuuksiltaan, saati kunnoltaan nykyajan laatuvaatimuksia sekä standardeja.

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on selvittää yksityiskohtaisesti, miten yksittäisen ajoneuvon johtosarjan suunnittelu ja valmistusprosessi voidaan toteuttaa. Työssä keskitytään Ford Sierran johtosarjan modernisointiin, kun alkuperäinen kaasutintoiminen polttoaineensyöttö korvataan nykyaikaisemmalla elektronisella ohjauksella. Projektin moottorina käytetään Ford Zetec -moottoria, joka on peräisin ensimmäisen sukupolven Ford Mondeosta. Konstruktion toiminnan varmistamiseksi valmistetaan uusi moderni johtosarja, ja käyttöön otetaan Ecu-master Black -moottorinohjausyksikkö.

Työn tavoitteena on parantaa ajoneuvon toimintavarmuutta ja käyttöikää uuden moottorinjohtosarjan avulla. Projekti tarjoaa mahdollisuuden tutkia johtosarjan suunnitteluprosessia nykyaikaisilla työkaluilla ja materiaaleilla. Työssä analysoidaan alkuperäisen johtosarjan ominaisuuksia, dokumentoidaan sen puutteet ja määritellään modernisointivaatimukset uudelle johtosarjalle. Johtosarja tullaan työn aikana suunnittelemaan ja valmistamaan.

Moottorin alkuperäinen johtosarja on jo elinkaarensa lopussa, eikä sen uudelleenkäyttö olisi kannattava valinta toimintavarmuuden tai turvallisuuden näkökulmasta. Lisäksi johtosarjan uudelleen suunnittelu mahdollistaa uusien teknologioiden ja toimintatapojen hyödyntämisen. Johtosarjan suunnittelussa kiinnitetään huomiota useisiin vaikuttaviin ympäristötekijöihin, joista merkittävimpiä ovat lämpö, värinä sekä kosteus.

Työssä tullaan myös analysoimaan johtosarjojen kehitystä 1990-luvulta nykypäivään. Projektin yhtenä päätavoitteena on tuottaa kattava dokumentaatio modernin johtosarjan suunnittelusta, materiaalivalinnoista ja valmistusmenetelmistä. Valmiin johtosarjan toimivuutta varmistetaan työn loppuvaiheessa suoritettavilla mittauksilla sekä analyysillä. Näin työ tarjoaa kattavan pohjan myös muille, jotka suunnittelevat johtosarjan modernisointia.

2 Lähtötilanne ja alkuperäiset johtosarjat

Ajoneuvotekniikan kehityksen myötä johtosarjojen merkitys ajoneuvojen toiminnassa ja turvallisuudessa on kasvanut huomattavasti. Vanhemmissa ajoneuvoissa käytetyt johtosarjat eivät vastaa nykyaikaisten järjestelmien vaatimuksia, sillä niiden materiaalit, mitoitus ja liitinnratkaisut on suunniteltu huomattavasti yksinkertaisempia järjestelmiä varten.

Työssä keskitytään erityisesti johtosarjan modernisoinnin mahdollistamiin hyötyihin, kuten ajoneuvon toimintavarmuuden parantamiseen ja käyttöiän pidentämiseen. Modernisointi tarjoaa myös mahdollisuuden hyödyntää nykyaikaisia ratkaisuja etenkin johtimien ja liittimien toteutuksessa. Nykyaikaiset materiaalit kestävät paremmin johtosarjoihin kohdistuvia rasitteita, joista yleisimpiä ovat korkea lämpö, polttoaineet sekä öljyt. Lähtökohtaisesti työllä pyritään kartoittamaan yleishyödyllistä tietoa, jotta se soveltuisi mahdollisimman hyvin eri ajoneuvojen tarpeisiin.

2.1 Ford Sierran alkuperäinen johtosarja

Projektin ajoneuvon alkuperäinen johtosarja on suunniteltu 1990-luvun kaasutintoimiselle moottorille, eikä se teknillisiltä ominaisuuksiltaan sovellu käytettäväksi uuden moottorin tai moottorinohjainlaitteen kanssa. Tämä johtosarja on suunniteltu vanhojen standardien mukaisesti, ja niissä käytetyt liittimet, johdinmateriaalit ja suojaukset ovat puutteellisia nykytekniikkaan verrattuna. Esimerkiksi polttoainesyötön vaatima johdotus on kyseisessä johtosarjassa suppeaa ja

kapasiteetiltaan alimitoitettu nykyaikaisiin ruiskutustoimisiin polttoaineensyöttöjärjestelmiin.

Valmistusteknisesti johtosarja oli hyvin lähellä Mondeon johtosarjaa, jolle suoritettiin yksityiskohtaisempi analyysi.

2.2 Zetec-moottorin alkuperäinen johtosarja

Kuvassa näkyvä Mondeosta alun perin oleva Zetec-moottorin johtosarja tarjoaa esimerkin alkuperäisen johtosarjan rajoituksista ja modernisoinnin tarpeesta (kuva 1). Se ei tarjoa käyttökelpoista ratkaisua uudelleenkäyttöön ilman mittavia muutoksia. Johtosarjassa käytetyt liittimet ovat suurimmilta osin vanhentuneita ja osittain yhteensopivia vain Fordin alkuperäisten komponenttien kanssa. Lisäksi johtosarjan yleinen kunto on heikentynyt huomattavasti, mikä näkyy niin eristemateriaalin kulumisena kuin liittinten hapettumisena ja vaurioitumisena.



Kuva 1. Zetec-moottorin alkuperäinen johtosarja.

Mondeon alkuperäiselle johtosarjalle suoritettiin perusteellinen analyysi, jossa tarkasteltiin johtimien tyyppiä, suojauksia sekä liittimiä. Johtosarja sisältää 21 liittintä, yhden maadoituspisteen ja vain muutaman kiinnityspisteen. Tämä on nykyaikaisiin johtosarjoihin verrattuna varsin niukasti. Etenkin kiinnityspisteiden vähäinen määrä voi lisätä johtojen mekaanista rasitusta, kun ne altistuvat tärinälle ilman riittävää tuentaa.

Johtimien eristemateriaalina käytetty PVC-muovi on menettänyt joustavuutensa ja halkeillut ajan saatossa. Tätä on esiintynyt erityisesti moottoritilan korkeissa lämpötiloissa ja polttoainehöyryille altistuneissa kohdissa. Johtosarjan suojaus ja niputus on toteutettu käyttäen muoviputkea ja sähköteippiä. Tämä ei tarjoa optimaalista suojaa mekaaniselta tai kosteuden aiheuttamalta rasitukselta. Suojaputki on monin paikoin kovettunut ja menettänyt alkuperäisen muotonsa sekä sähköteippi on kovettunut ja lähtenyt irtoamaan. Joissakin kohdissa johtosarjaa on suojamateriaalina käytetty myös kangassukkaa, mutta hyvin rajallisesti.

Johtosarjassa käytetyt liittimet ovat pääosin AMP/Tyco Power Timer -sarjaa, mitkä on suunniteltu erityisesti Fordin käyttöön. Suurin osa liittimistä on tinapinnoitettuja. Moottoritilassa olevat liittimet ovat altistuneet pitkiä aikoja kosteudelle, lämmölle ja epäpuhtauksille, mikä on nopeuttanut liitinten kulumista. Pitkäaikaisessa käytössä tinapinnoitetut kontaktit hapettuvat, mikä voi aiheuttaa lisääntyntä resistanssia tai jännitehäviöitä [Connector Material Selection is Vital in Automotive Connectors 2023].

Yksittäisissä liittimissä havaittiin vakavaa hapettumista, joka heikentää sähköliitosten luotettavuutta. Erityisesti korkeaa virtaa kuljettavissa johdoissa hapettuma voi aiheuttaa liittimien sulamista tai paloturvallisuusriskejä.

Yli 30 vuoden ikä näkyy johtosarjan rakenteissa merkittävästi. Johtosarja on monien johtimien ja liitosten osalta huomattavan haurastunut. Suuttimien johtokokonaisuuden yhdistävän liittimen juuressa on havaittavissa merkittäviä vaurioita, jotka johtuvat todennäköisesti pitkästä altistumisesta polttoainehöyryille ja

lämmölle. Tämä on johtanut eristemateriaalin haurastumiseen, halkeiluun ja joidenkin johtimien säikeiden paljastumiseen (kuva 2).



Kuva 2. Alkuperäisen johtosarjan vaurioita.

Tämänkaltaiset vauriot voivat aiheuttaa vakavia ongelmia, kuten oikosulkuja ja vastusarvojen muutoksia, jotka heikentävät johtosarjan luotettavuutta. Jo näiden havaintojen perusteella johtosarjan uudelleensuunnittelu- ja valmistus on välttämätöntä, jotta ajoneuvon oikeanlainen toiminta voidaan taata.

Zetec-moottorissa käytetyt ratkaisut olivat aikakaudelleen tyypillisiä, mutta niiden uudelleenkäyttö ei ole kannattavaa ilman merkittäviä muutoksia.

2.3 Ford Fiesta ST:n johtosarjan analysointi

Ford Fiesta ST:n johtosarja edustaa nykyaikaisempaa suunnittelua, jossa on huomattavasti enemmän kiinnityspisteitä sekä huolellisempi niputus kuin Mondeon johtosarjassa. 2019 vuosimallin ajoneuvosta peräisin olevassa

johtosarjassa on hyödynnetty nykyaikaisia liittimiä, parannettua suojausta ja luotettavampaa rakennetta.

Fiestan johtosarja on huomattavasti modernimpi sekä rakenteellisesti että materiaalteknisesti. Johtimien eristemateriaali vaikuttaisi olevan alkuperäisen johtosarjan tavoin samantyyppistä muovia, mutta nämä ovat edelleen taipuisia, eikä niissä ole havaittavissa haurastumisen merkkejä.

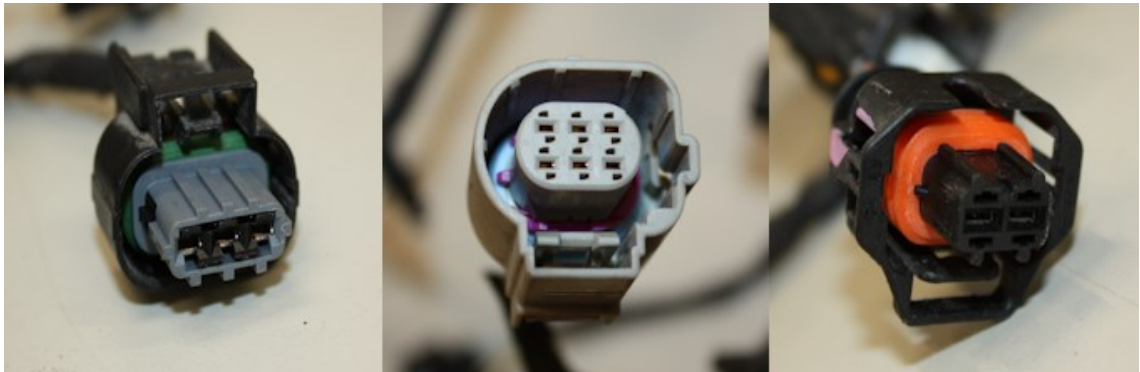


Kuva 3. Ford Fiesta ST:n moottorin johtosarja.

Suojauksessa on käytetty pääosin johtosarjateippiä, joka vastaa ominaisuuksiltaan Tesa 51006 -teippiä. Tämä teippi on laajalti autoteollisuudessa käytetty suojamateriaali, joka tarjoaa hyvän lämmönkeston ja mekaanisen suojan tärinää vastaan. Etenkin hankaamisesta aiheutuvan kuluman vaikutusta saadaan

minimoitua kyseisen suojausratkaisun avulla. Lisäksi osa johtimista on suojattu erillisellä kangaspäälysteellä.

Johtosarjassa käytetyt liittimet ovat pääosin TE Connectivityn valmistamia, ja ne sisältävät sisäisen kumieristyksen kosteutta ja likaa vastaan. Johtosarjassa on yhteensä 31 liittintä ja kaksi suurta moninapaliitintä ohjainlaitteille. Liittimien ja johtimien suojauksessa on nähtävissä suurta kehitystä, sillä lähes kaikki liittimet ovat suojattu joko kumitiivistein tai erillisillä koteloratkaisuilla (kuva 4).



Kuva 4. Fiestan johtosarjan liittimiä.

Johtosarja kiinnittyy ajoneuvoon monipuolisilla ratkaisuilla. Kiinnitykseen on käytetty reunakiinnikkeitä, muoviruuveja sekä pultattavia muoviosia. Kiinnityspisteitä on yhteensä 31 kappaletta, mikä takaa erinomaisen tuen ja estää johtosarjan tarpeettoman liikkumisen ajon aikana. Verrattuna alkuperäiseen johtosarjaan myös kiinnityspisteiden määrää on kasvatettu huomattavasti. Lähes jokaisella haaroituksella on jonkinlainen kiinnitys, mikä on huomattava parannus 90-luvun toteutukseen verrattuna.

2.4 Suurimmat kehityskohteet

Kahden johtosarjan analyysin perusteella voidaan tunnistaa useita keskeisiä kehityskohteita, jotka tulisi ottaa huomioon uuden johtosarjan suunnittelussa. Näiden havaintojen pohjalta voidaan minimoida alkuperäisessä johtosarjassa

havaitun kulumisen syntymistä, jotta uudesta johtosarjasta saadaan mahdollisimman pitkäikäinen.

Etenkin suojausmateriaalin suhteen Mondeon johtosarjassa käytetty muoviputki ja sähköteippi on kannattavaa korvata nykyaikaisemmalla vaihtoehdolla. Esimerkiksi uudemmassa johtosarjassa käytetty, moottoritilaan suunniteltu teippi tai kutistesukka olisi kestävämpi ratkaisu. Johtimien eristemateriaalin tulee olla moottoritilaan sopivaa, jotta johtosarjasta saadaan luotettavaa ja pitkäikäinen.

Alkuperäisen johtosarjan liittimissä oli havaittavissa runsasta hapettumista, joka johtuu pääosin heikosta eristyksestä. Tämä voidaan estää käyttämällä tiivistettyjä liittimiä, tai vähintään tiivistämällä liittimen ja johtimien yhdyskohta huolellisesti. Nykyajan liitinvalikoima on todella laaja tarjoten selkeän parannusmahdollisuuden liitinvalintojen avulla.

Mondeon johtosarjassa viimeinen keskeinen kehityskohde on sen kiinnitys. Kun uusi johtosarja saadaan kiinnitettyä tukevammin ajoneuvoon, vältytään ylimääräiseltä mekaaniselta rasitukselta. Ajoneuvon alkuperäiset kiinnityspisteet ovat hyvin suppeat, mikä tulee ottaa huomioon kiinnitysten suunnittelussa.

3 Uuden johtosarjan suunnittelu

Moottorin alkuperäisen johtosarjan todella huonon kunnan takia työssä tullaan valmistamaan koko johtosarja uudelleen. Vanhan johtosarjan kunnostus vaatisi mitä todennäköisemmin useiden johtimien uusintaa, ja saavuttaisi nopeasti työmäärässä uuden johtosarjan valmistuksen.

Uuden johtosarjan suunnittelun tukena käytetään Mondeon sekä Fiestan johtosarjojen analyysiä, mutta pääosin suunnittelussa hyödynnetään yleisesti nykyaikaisia suunnitteluperiaatteita ja standardeja. Näin lopputuotteeksi saadaan mahdollisimman kestävä ja luotettava johtosarja.

Johdinsarjan suunnittelussa tärkeimmät huomioon otettavat asiat ovat Autoteknillisen käsikirjan 10. painoksen mukaan seuraavat:

- Pölyn ja muiden aineiden kestävyys
- Sähkömagneettinen yhteensopivuus
- Käyttölämpötila
- Johdinten suojaus vaurioilta
- Johdinten reititys
- Johdinsarjan ilmanvaihto [Reif & Dietsche 2018: 1378].

Suunnitteluprosessi sisältää niin sähköisten kuin mekaanisten vaatimusten huomioimisen. Tämä tarkoittaa oikeanlaisten johtimien, liittimien ja suojausratkaisujen valintaa sekä johtosarjan optimoitua reititystä ja kiinnitystä ajoneuvoon.

Johtosarjan suunnittelun keskiössä on järjestelmän kokonaisuuden hahmottaminen, joka koostuu monista eri osa-alueista. Tavoitteena on kuvata johtosarjan suunnittelun vaiheet ja keskeiset ratkaisut, joiden pohjalta voidaan aloittaa johtosarjan valmistus.

3.1 Järjestelmän suunnittelu

Johtosarjan suunnitteluvaiheessa määritetään rakennettavan järjestelmän rakenne ja sen liittyminen muihin kokonaisuuksiin. Suunnittelun lähtökohtana on ECU:n, antureiden ja muiden komponenttien yhdistäminen yhdeksi kokonaisuudeksi.

System is a word used to describe a collection of related components, which interact as a whole [Denton 2018: 103].

Luotettavuuden ja toimintavarmuuden takaamiseksi suunnittelussa on huomioitu liittimien ja johtimien mitoitus, sulakkeiden ja releiden valinta sekä

suojauksen toteutus. Tämän lisäksi suunnittelussa pohdittiin johtosarjan reititystä sekä maadoitusratkaisuja.

3.1.1 Järjestelmän kokonaisuus

Johtosarjan tehtävänä on varmistaa, että kaikki ajoneuvon sähköjärjestelmän osat kommunikoivat luotettavasti. Johtosarja toimii linkkinä seuraavien osa-alueiden välillä:

- ECU
- Anturit
- Toimilaitteet
- Virtalähde ja maadoitus.

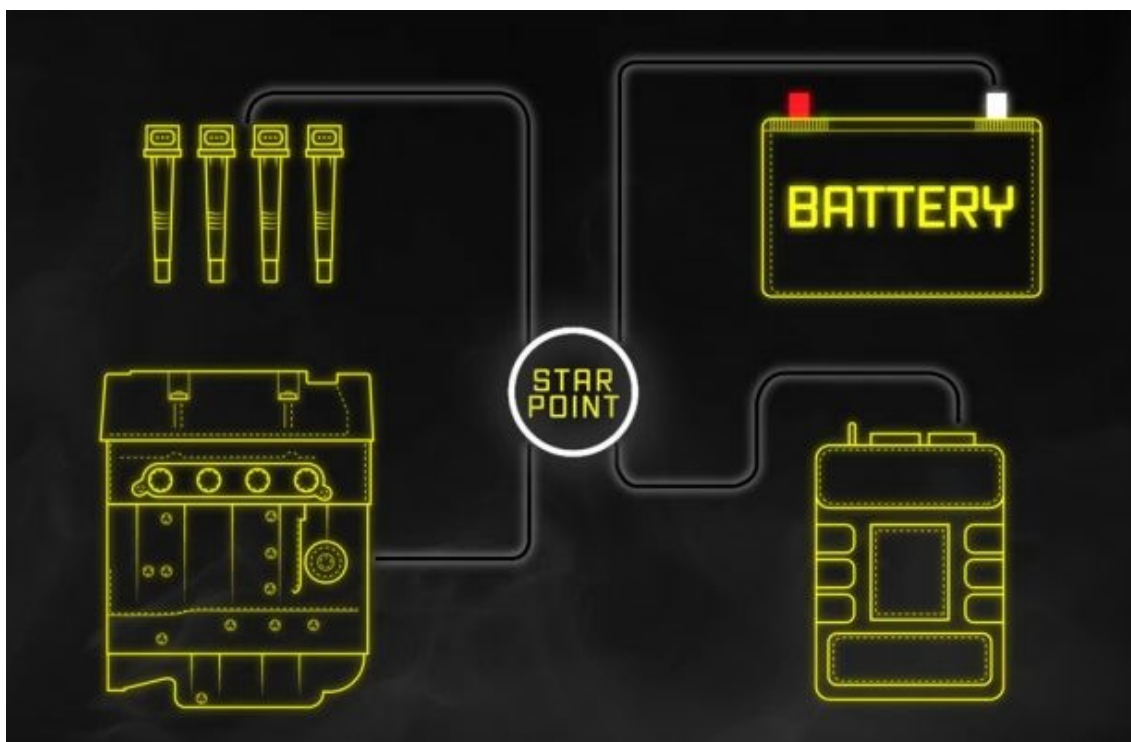
ECU toimii järjestelmän keskipisteenä, vastaanottaen ja käsitellen tietoa eri antureilta. Ohjainlaite prosessoi nämä tiedot ja lähettää ohjauksikäskyjä esimerkiksi polttoainesuuttimille ja sytytyspuolille. [Electronic engine control unit 2025.]

Järjestelmän virtalähde ja maadoitus varmistavat, että kaikki komponentit saavat tarvitsemansa virran. Virtalähde jakautuu useisiin erilaisiin virtapiireihin, joiden suojaus on toteutettu sulakkeiden ja releiden avulla. Sulakkeet estävät ylikuormitusta ja suojaavat järjestelmää oikosuluilta, kun releet ohjaavat eri järjestelmien virransyöttöä. [Denton 2018: 113–117.]

Maadoitusjärjestelmä tullaan toteuttamaan tähtimaadoituksella, jossa korirakenne ja moottorilohko toimivat erillisinä maadoituspisteinä. Tämä estää maadoitusjännite-erot, jotka voisivat vaikuttaa järjestelmän toimintaan. Eri komponenttien maadoitus on suunniteltava siten, että mikään komponentti ei ole maadoitettuna molempiin pisteisiin samanaikaisesti. [Simon 2025.]

Toimivassa tähtimaadoitusjärjestelmässä piiri toimii aina suljettuna silmukkana, jossa ovat mukana akun negatiivinen napa, moottori sekä ajoneuvon kori. Mikäli eri komponentit on maadoitettu useampaan pisteeseen samanaikaisesti, voi järjestelmään syntyä jännite-eroja. Tämän vuoksi jokainen komponentti tulisi maadoittaa vain yhteen maadoituspisteeseen, joko moottoriin tai ajoneuvon koriin. [ECU Grounding Tips 2017.]

Huolellinen maadoitus on erityisen tärkeää etenkin antureiden ja moottorinohjainlaitteen signaalien kannalta, sillä jännite-erot saattaisivat häiritä niiden eheyttä merkittävästi. Oikeanlaisessa tähtimaadoituksessa jokaisen laitteen maadoitus keskitetään siis kuvan mukaisesti yhteen pisteeseen (kuva 5). [ECU Grounding – the DOs and DONTs 2022.]

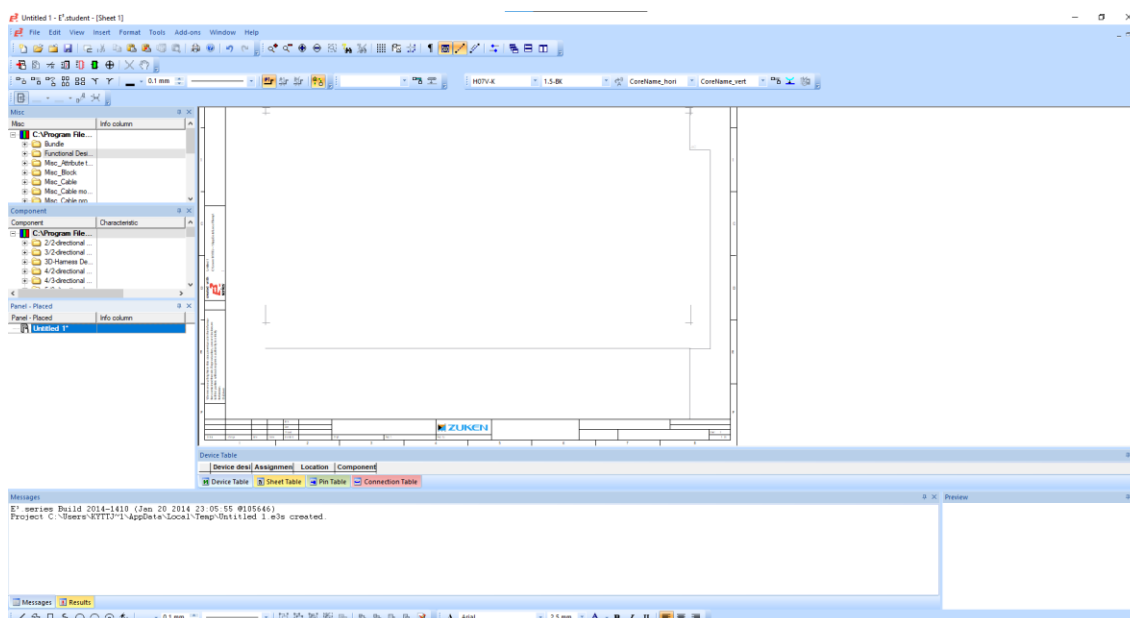


Kuva 5. Esimerkki tähtimaadoituksesta. [ECU Grounding – the DOs and DONTs 2022].

3.1.2 KytKentäkaaviot ja dokumentaatio

KytKentäkaaviot suunnitelmalle on toteutettu käyttäen Zuken E³ -ohjelmistoa, joka on tarkoitettu erityisesti sähkö- ja johdinsarja-suunnitteluun. Ohjelman avulla kytKentäkaaviot on mahdollista suunnitella järjestelmällisesti ja tarkasti.

Suunnittelun aikana tarkasteltiin Zetec-moottorin alkuperäistä kytKentäkaaviota sekä Fordin nykyaikaisia ratkaisuja. Näiden vertailujen sekä yleisten ohjeiden perusteella suunniteltiin toteutusta varten yksilöllinen kytKentäkaavio. KytKentäkaavion käyttö valmistuksen tukena on ensisijaisen tärkeää, jotta kaikki kytKentät saadaan toteutettua oikein. Alla olevassa kuvassa on nähtävillä ohjelmiston oletusnäky (kuva 6).



Kuva 6. Zuken E³ -ohjelmiston käyttöliittymä.

KytKentäkaavioiden lisäksi myös yleinen dokumentaatio suunnittelun aikana on tärkeää. Dokumentaation avulla varmistetaan, että toteutus voidaan suorittaa onnistuneesti, ja hyvin tehty dokumentaatio saattaa helpottaa esimerkiksi vianhakua tulevaisuudessa.

Yleinen dokumentaatio koostuu kahdesta osasta:

- Looginen kytkentäkaavio
- Johtosarjapiirros.

Loogisessa kytkentäkaaviossa määritellään tarkasti käytetyt liittimet, pinnit ja johtimet. Johdotusdokumentin on tarkoitus toimia tietopankkina kytkentäkaavioiden ohella.

Johtosarjapiirros auttaa taas hahmottamaan, miten suunniteltu toteutus toimii käytännössä. Vaikka kytkentäkaavio antaakin laajan kuvauksen johtosarjan rakenteesta, siinä ei määritellä tarkasti johdinten sijaintia tai pituuksia lopulliseen toteutukseen.

Johtosarjapiirros toimii valmistuksen tukena siten, että se kuvaa johdinten fyysisen sijoittelun, pituudet sekä reitityksen. Johtosarjapiirros antaa konkreettisen näkymän siitä, miten lopullinen johtosarja tulee rakentumaan, antaen kattavan ohjeistuksen valmistusvaiheeseen. Piirroksesta on myös mahdollista tarkastaa, että johtosarjan kaikki haaroituskohdat ovat suunnitelluissa kohdissa sekä tarkastaa haaroituskohtainen johdinmäärä.

KytKentäkaavion ja piirroksen ohella tässä työssä valmistettiin myös kolme Excel-taulukkoa, joissa määriteltiin moottorinohjaimen liittimiltä sekä releyksiköltä lähtevien johtimien poikkipinta-alat, pituudet, värit sekä loppupiste. Lopullinen kytkentäkaavio on nähtävillä liitteessä 1.

3.1.3 Vaatimusten määrittely

Johtosarjan kattava suunnittelu tulee toimimaan suurena apuna toiminnalle valmistusvaiheessa, minkä vuoksi on tärkeää miettiä järjestelmän vaatimukset tarkasti. Työn perimmäisenä tarkoituksena on parantaa järjestelmän toimintaa ja luetettavuutta johtosarjan osalta.

Tärkeimmät huomioon otettavat tekijät ovat:

- Johtimien mitoitus ja materiaalivalinnat
- Liittimien mitoitus ja ominaisuudet
- Sulakkeiden ja releiden valinta
- Järjestelmän suojaus ja reititys
- Kestävyys ja käyttöikä.

Kun nämä osa-alueet on otettu huomioon, päästään suunnittelussa etenemään seuraavaan vaiheeseen. Seuraavaksi käydään läpi yksittäisten osakokonaisuuksien valintaa sekä pohditaan mahdollisia vaihtoehtoja.

3.2 Komponenttisuunnittelu

Johtosarjan komponenttisuunnittelu on onnistuneen lopputuotteen kannalta jälleen yksi todella merkittävä vaihe. Komponenttivalinnoilla on merkittävä vaikutus kokonaisuuden toimintaan ja liitettävyyteen. Komponenttisuunnittelussa tärkeimpänä tekijänä on huomioida järjestelmän tekniset vaatimukset sekä rajoitteet.

Seuraavaksi tarkastellaan johtosarjan keskeisimpiä komponentteja ja niiden valintaan vaikuttavia tekijöitä. Komponenttivalinnat perustuvat sekä aiemmin analysoituihin johtosarjoihin että yleisesti käytettyihin ratkaisuihin. Komponenttisuunnittelussa tullaan myös huomioimaan valintojen kustannustehokkuus, joka saattaa aiheuttaa kompromisseja joidenkin ominaisuuksien suhteen.

3.2.1 Johdinmateriaalit

Johdinmateriaalien valinta on yksi johtosarjan tärkeimmistä suunnitteluvaiheista, sillä sen tehtävänä on varmistaa komponenttien luotettava yhteys ja signaalin

kulku. Ajoneuvokäytössä, erityisesti moottoritilan olosuhteissa, johdinten tulee kestää korkeita lämpötiloja, kemikaaleja sekä mekaanista rasitusta.

Ajoneuvojen johtosarjoissa yleisesti käytetyin materiaali on kupari, koska sen johtokyky on matalan resistanssin ansiosta merkittävästi parempi alumiiniin verrattuna. Johtavuutta voidaan arvioida esimerkiksi International Annealed Copper Standardin avulla. IACS-standardissa kuparin johtavuudeksi määritellään 100 %, ja alumiinin määritelty johtavuus on noin 61 %:a kuparin johtavuudesta. Alumiinijohtimen tulisi siis olla 61 %:a kuparijohdinta suurempi saman virran kuljettamista varten. [Understanding the Electrical Conductivity of Aluminum 2023.]

Lisäksi kupari kestää paremmin tärinää ja taivutusta korkean vetolujuuden ansiosta. CW004A-kuparin vetolujuus oli lähteen testin aikana 350 MPa ja EN AW-1370-alumiinin 180 MPa. Vetolujuusarvot voivat kuitenkin vaihdella seoksen sekä lämpökäsittelyn mukaan. [Smyrak ym. 2021.]

Säikeinen kuparijohdin on käytännössä ainoa vaihtoehto ajoneuvototeutuksissa, koska se on joustavampi ja kestävämpi kuin yksisäikeinen johdin. Johdinten paksuus mitataan IEC 60228 -standardin mukaisesti millimetreinä, mutta Yhdysvalloissa käytetty AWG-mittayksikkö saattaa myös olla ajoittain käytössä. Johdinten poikkipinta-alan valinta vaikuttaa merkittävästi johdinten virrankes-
toon ja jännitehäviöihin. Tämän vuoksi jokainen johdin on tarpeen mitoittaa oikein käyttötarkoituksen mukaisesti. [IEC 60228 2023.]

Johtimien eristemateriaalin valinta on yhtä tärkeää kuin itse johdinmateriaalin valinta. Moottoritilassa käytettävien johdinten eriste tulee valita siten, että tekniset ominaisuudet ovat tarpeeksi kattavat. PVC-eristetyt johtimet ovat edullisia ja yleinen ratkaisu matalan rasituksen kohteissa. Niiden käyttö olisi suotavaa esimerkiksi ajoneuvon sisätilassa, mutta moottoritilakäyttöön esimerkiksi lämmönkesto-ominaisuudet ovat riittämättömät. Moottoritilan rasittaviin olosuhteisiin soveltuvat parhaiten XLPE-eristeiset johtimet, joiden lämmön- ja rasituksenkesto ovat tyypillistä PVC-eristeisiä johtimia huomattavasti paremmat. [Which Cable Is Better PVC Or XLPE 2025.]

XLPE-johtimet on eristetty käyttäen ristosilloitettua polyeteeniä. Ristosilloittamisen avulla eristemateriaalin lämmönkestoa sekä kemiallista kestävyyttä voidaan kasvattaa huomattavasti. Ristosilloittaminen on toteutettu lisäämällä polyeteenin joukkoon valmistusvaiheessa silaania tai peroksidia. [Eccles 2023.] Tämä muuttaa muovin molekyyliarakennetta siten, että kestumuovista saadaan kertamuovia. Kertamuovi tarkoittaa muovia, jota ei voida ilman kemiallisen rakenteen hajoamista sulattaa ja muovata uudelleen. [Kertamuovi 2025.]

Yleisimmät XLPE-eristeet ovat ajoneuvovalmistajien usein suosima TXL ja moottoriurheilussa yleistynyt ETFE. Molemmat näistä kestävät -40°C - 125°C lämpötiloja vaurioitumatta. Liitteessä 2 esitellyt ETFE-päällysteiset Spec-55 johtimet, joihin viitataan myös usein Tefzel-eristeisinä johtoina voivat kestää jopa -65°C - 200°C lämpötiloja. Spec-55 johtimet ovat myös poikkipinta-alaltaan pienempiä sekä kevyempiä kuin TXL-johtimet. Tämän takia ne ovat kuitenkin huomattavasti kalliimpia kuin muut yleisesti käytetyt johtimet.

Johdinmateriaaliksi työn johdotuksia varten valikoitui säikeinen kuparijohdin, joka on kannattavin valinta kustannuksiltaan sekä ominaisuuksiltaan. Johtimen eristemateriaaliksi valikoitui ETFE, joka tarjoaa riittävän lämmön ja rasituksenkeston toteutukseen. Johtosarjan johdotuksissa tullaan käyttämään Spec-55-sarjan johtimia, jotka täyttävät kaikki järjestelmän vaatimukset luotettavasti. Mikäli saatavuudella ei olisi suunnittelun osalta merkitystä, olisi mahdollista käyttää myös TXL-eristemateriaalia, joka omaa miltei yhtä kattavat ominaisuudet.

3.2.2 Johtimien mitoitus

Jokainen johtosarjassa käytetty johdin tulee mitoittaa oikein, jotta sen toiminta on pitkäikäistä ja luotettavaa. Ajoneuvototeutuksissa käytettyjen johdinten johdinmateriaalin paksuus vaihtelee useimmiten välillä 0.35mm^2 – 6mm^2 . Ohuimmat johdot ovat käytössä matalavirtaisille signaalijohtimille ja paksummat johdot ovat käytössä suuria virtoja vaativille komponenteille, kuten polttoainepumpulle tai moottorin tuulettimelle. [DiBartolomeo 2017.]

Johtimen oikean mitoituksen lähtökohtana on komponentin virrankulutus, jonka perusteella vaadittu poikkipinta-ala määritetään. Tällä voidaan estää johdon ylikuumeneminen käytössä, mikä voisi johtaa moniin ongelmiin. Lämpenemisen hallinta on erityisen tärkeää kohdissa, joissa useita johtoja kulkee pienessä tilassa. Näissä tilanteissa yhdestä johtimesta aiheutunut lämpeneminen voi vaurioittaa koko johtosarjaa. [Bauer ym. 2003: 976–977.]

Mitoituksessa tulee kuorman lisäksi ottaa huomioon johtimen pituus. Mitä pidempi johdin on, sitä suurempi on myös vastus ja syntynyt jännitehäviö. Pitkien vetojen suunnittelussa johtimen poikkipinta-alaa saatetaan joutua suurentamaan. Johtimen sopivan paksuuden määrittämiseksi on useita tapoja. Liitteessä 3 on määritelty tietyille johdintyypille eri poikkipinta-alat virrankulutuksen mukaan. Tarvittava poikkipinta-ala on myös mahdollista päätellä monogrammien avulla tai laskea likiarvoyhtälön avulla. Autoteknillisen käsikirjan kuudennessa painoksessa käytetty likiarvoyhtälö on seuraavanlainen (kaava 1).

$$A = \frac{I \cdot \rho \cdot L}{U_{vl}} \quad (1)$$

A on johdon poikkipinta-ala (mm²)

I on virta (A)

ρ on kuparin ominaisvastus lähteen mukaan (Ω·mm²/m)

L on johdon pituus (m)

U_{vl} on sallittu jännitehäviö (V). [Bauer ym. 2003: 976–977.]

Esitetyn kaavan (1) avulla saadaan määriteltyä likiarvo tarvittavalle johdinkoolle, halutun mittaiselle vedolle. Kaikista komponenteista, kuten esimerkiksi antureista, ei ole aina saatavilla tarvittavia tietoja laskelmia varten. Näissä tilanteissa suositeltavaa olisi mitata anturin virrankulutus, jotta kulutuksesta voitaisiin täysin varmistua. Monien anturien toimintaperiaatteiden avulla voidaan kuitenkin todeta niiden virrankulutuksen olevan todella pientä.

Jokaiselle johdinvedolle, joiden virrankulutus oli tiedossa, laskettiin kaavan (1) avulla optimaalinen poikkipinta-ala. Jännitehäviöksi laskennoissa määriteltiin noin 2 %:a, joka on useassa toteutuksessa käytetty jännitehäviö. Tyypillisimmät sallitut jännitehäviöt asettuvat välille 2–5 %:a. [Diagnosing Voltage Drops Electrical Automotive Troubleshooting 2025.]

Joidenkin johtimien lopullinen koko on pyöristetty seuraavaan johdinkokoon, jotta kestävydestä voidaan varmistua. Tämä myös helpotti huomattavasti johdinten hankintaa, sillä nyt tarvetta esimerkiksi 0,35mm² johtimelle ei ollut, jolloin 0,5mm² johdinta oli mahdollista hankkia suurempi määrä. Taulukossa on havainnointu, mitä johtimien poikkipinta-alaa laskettaessa otettiin huomioon (taulukko 1).

Taulukko 1. Johtimien poikkipinta-alan laskentaa eri johtimille.

Laite	Jännite [V]	Maksimivirta [A]	Päällä olo %	Sallittu jännitehäviö [%]	Johtimen pituus [m]	Johdinkoko [mm ²]
Analogiset signaali-johtimet	5	<0,1	100	2	1, 1–1,9	0,5
Digitaaliset signaali-johtimet	5	<0,1	100	2	1,1–1,9	0,5
Moottorinohjainlaitteen virta	12	7.5	100	2	0,6	0,75
Suuttimien virta (HIGH Z)	12	6	100	2	1,15	0,5
5V jännite antureille	5	<0,1	100	2	1,1–1,9	0,5

Kun kaikki käytetyt johtimet oli mitoitettu, voitiin siirtyä johdinten värien määrittämiseen. Johdinvärien määrittelyyn on useita eri lähteitä eri toimijoilta, mutta kuitenkin yhtenäistä standardisointia ajoneuvokäytössä ei ole. Johtimien värit valittiin käyttäen yleisiä käytäntöjä sekä saatavilla olevia johdinvärejä. Käytetyt värit sekä niiden käyttötarkoitus on määritelty taulukoitu alla (taulukko 2).

Taulukko 2. Johdinvärit ja käyttötarkoitukset.

Käyttötarkoitus	Väri
Maadoitus	Musta
Virtajohtimet	Punainen
Signaali johtimet	Valkoinen
Suuttimet	Violetti
Herätteet	Sininen

Koska kyseessä oli kertaluontoinen projekti, johtimien väriyksien määrässä tekemään kompromisseja. Suositeltavaa olisi käyttää niin useaa eri väriä tai väriyhdistelmää kuin mahdollista, mikä helpottaisi johdinten tunnistamista myöhemmin.

3.2.3 Liittimet

Liittimien valinta on johdinten tavoin merkittävässä roolissa moottoritilan olosuhteiden takia. Erityisesti eristetyt liittimet soveltuvat hyvin moottoritilaan. Liittimien tiivisteet estävät kosteuden ja epäpuhtauden pääsemisen kontaktipinnoille, mikä kasvattaa järjestelmän käyttöikää huomattavasti. [Boesing 2017.]

Liittimien valinnassa tärkeimmät huomioitavat tekijät ovat pinnien lukumäärä, virrankesto sekä yhteensopivuus antureiden ja muiden komponenttien kanssa. Liittimille määritellään kokonaisvirrankestävyys koko liittimelle sekä jokaiselle yksittäiselle kontaktipinnille on oma virrankestoarvo. Liiallinen virta voi aiheuttaa ylikuumenemista ja kontaktipinnan vaurioitumista. Yleisin syy liitinten rikkoutumiselle onkin värinästä ja lämpötilojen vaihtelusta aiheutuva kontaktipinnan heikkeneminen. [Reif & Dietsche 2018: 1381.]

Tässä toteutuksessa liitinvalinnat olivat kohtuullisen rajattuja, sillä suurin osa käytettävistä komponenteista on suunniteltu tietyille liittimille.

Kokoonpanossa käytettävät liittimet ovat:

- FCI Automotive 39p
- FCI Automotive 24p
- BAK 6p
- Delphi GT150 3p
- TE/AMP JPT 2p
- TE/AMP JPT 3p
- VAG 4p.

Jokaisesta käytetystä liittimestä on useita variaatioita, mutta liittimet on valittu johdinten suunnittelun yhteydessä todettujen virtojen mukaisesti. Liittimien valinnassa yhteensopivuuden ohella tärkein kriteeri oli niiden eristys. Moottoritilan liittimien tulee kestää korkeita lämpötiloja ja mekaanista rasitusta, minkä vuoksi liittimien tulisi olla valmistettu korkealaatuisilla kontaktimateriaaleilla sekä silikonitiivisteillä. [Bosch automotive electrics... 2014: 396–398.]

Johtosarjassa käytetyt liittimet ovat pääosin vähänapaisia pistokeliittimiä, jotka ovat yleensä eristettyjä. Kaikissa käytetyissä liittimissä on kumitiivisteet, jotka estävät kosteuden pääsyn liittimen kontaktipinnoille kaikissa osissa johtosarjaa. Osa käytetyistä liittimistä on nähtävissä luvussa 5 (kuva 18).

3.2.4 Anturointi ja muut komponentit

Järjestelmän toiminnan kannalta antureiden, releiden ja sulakkeiden oikea valinta on suoritettava tarkasti. Yleisesti ajoneuvototeutuksissa käytetyt anturit voidaan jaotella kolmella eri tavalla. Anturit voidaan jakaa ryhmiin

- Tehtävän ja sovelluksen perusteella.
 - Toiminnalliset anturit
 - Turvallisuusanturit
 - Ajoneuvoa valvovat anturit.
- Ominaiskuvaajien käyrän perusteella
 - Jatkuva lineaarinen kuvaaja
 - Jatkuva epälineaarinen kuvaaja
 - Kaksiportainen kuvaaja.
- Lähtösignaalin tyyppin perusteella
 - Analogisignaalit
 - Digitaalisignaalit. [Autojen anturit 2009: 12–13.]

Tässäkin toteutuksessa tullaan käyttämään useita eri anturityyppejä. Kaikki toteutuksessa käytetyt anturit ovat on analogisia, mutta nokka- ja kampiakselin asentotunnistimet saattavat usein olla digitaalisia Hall-antureita. Hall- ja VR-anturien suurimmat erot ovat lähtösignaalissa ja johdotuksessa. Hall anturi tarvitsee toimiakseen myös jännitteen, jolloin anturit ovat tyypillisesti kolme pinnisiä. VR-anturi toimii induktiivisesti ja luo sinimuotoisen lähtöjännitteen magneettivuon vaihteluiden avulla. [Autojen anturit 2009: 114.]

Toteutuksessa käytetyt anturit ovat:

- Kampiakselin asentotunnistin (VR)
- Nokka-akselin asentotunnistin (VR)
- Imuilman lämpötila anturi
- MAP-anturi
- Jäähdytysnesteen lämpötila-anturi
- Öljynpaine anturi
- Polttainepaineanturi
- Laajakaista-Lambda (LSU 4.9).

Antureiden lisäksi järjestelmän sulakkeet ja releet on tärkeä mitoittaa muun järjestelmän kanssa yhteensopivaksi. Moottorinohjausjärjestelmän yhteyteen on suunniteltu 4 eri relettä. Käytetyt releet ovat normaaleja kytkinreleitä, jotka avaavat piirin ohjainlaitteen käskystä.

Käytettyjen releiden tehtävät ovat:

- Päävirran ohjaus moottorinohjaimelle
- Virran ohjaus suuttimille ja sytytyspuolille
- Virran ohjaus moottorin tuulettimelle
- Virran ohjaus polttoainepumpulle.

Releiden avulla mahdollistetaan suurien virtojen ohjaaminen pienillä virroilla. Tämä helpottaa huomattavasti esimerkiksi johdotusten suunnittelussa sekä pienentää johtosarjan painoa ja kokoa yleisesti. [Denton 2018: 117–119.]

Tässä toteutuksessa releet ja sulakkeet toteutettiin Eaton Bussmann 15300 RTMR -relekotelon avulla, koska se tarjoaa kompaktin ja hyvin suojatun ratkaisun ajoneuvokäyttöön (kuva 7).



Kuva 7. Eaton Bussman 15305-4 releboksi.

Tärkeimmät tekijät valinnan suhteen olivat:

- Kompakti ja modulaarinen rakenne
- Laadukas suojaus mekaanisesti

- Virrankesto.

Valittu relekotelo on suunniteltu kestävämmään vaativia olosuhteita, joihin IP66-luokitukseen pöly- ja vedenkesto on tarpeellista. Kotelon kuorimateriaali on UL 94 V-0 -luokiteltua termoplastista muovia, joka antaa sille todella hyvän rasituksen keston. Lisäksi kotelon modulaarinen rakenne mahdollistaa releiden ja sulakkeiden keskittämisen yhteen paikkaan helpottaen sen asennusta. [Series 15300 – RTMR 2025.] Ominaisuuksien puolesta relekotelo olisi täysin mahdollista sijoittaa myös moottoritilaan, mutta järjestelmän yksinkertaistamisen vuoksi tullaan sijoittamaan moottorinohjainlaitteen läheisyyteen matkustajan jalkatilaan.

Kotelo on myös virrankesto-ominaisuuksiltaan optimaalinen valinta, sillä sen syöttökapasiteetti on 80 A ja yksittäisen lähdön kapasiteetti on 30 A. Liitäntäpuoli on toteutettu AMP® 280-sarjan liittimillä, jotka tukevat 0.35 mm²-4.0 mm² johdinkokoja. [Series 15300 – RTMR 2025.]

3.2.5 Johtosarjan mekaaninen suojaus

Johtosarja vaatii ympärilleen suojan mekaanisilta ja kemikaalisilta rasitteilta. Etenkin moottoritilan olosuhteet rasittavat johtimia siten, että pelkkä johtimen oma eristemateriaali ei anna tarpeeksi riittävää suojaa. Suojauksen avulla johtosarja saadaan pidettyä kompaktina, koska kaikki johtimet saadaan kasattua samaan tilaan.

Alkuperäisten johtosarjojen analyysissä käsiteltiin yleisimpiä johtosarjojen suojaukseen käytettyjä materiaaleja. Näitä ovat kutistesukka, punottu suojasukka sekä erilaiset johdinteipit. Moottorin alkuperäisessä johtosarjassa oli myös käytetty muoviputkea, joka on nykypäivänä korvattu esimerkiksi Fiestan johtosarjassa käytetyllä teipillä. Kuluttajatasolla kuitenkin yleisimmät suojausmateriaalit ovat punottu sukka sekä kutistesukka.

Koska työn yhtenä tärkeimmistä tavoitteista on rakentaa luotettava ja toimintavarma johtosarja, suojamateriaaliksi valikoitui kutistesukka. Vaihtoehtojen

joukosta valikoitiin Raychem® DR-25 -kutistesukka, joka tarjoaa erinomaisen suojauksen johtosarjalle. DR-25 on suunniteltu kestämaan korkeita lämpötiloja, öljyjä sekä muita nesteitä. Tämän lisäksi kyseinen suojamateriaali tarjoaa hyvän suojauksen hankaumia ja muuta mekaanista rasitusta kohtaan. Kutistesukan suositeltu käyttölämpötila on -75 - + 150°C:tta ja kutistussuhde on 2:1. [RAYCHEM DR-25 -Heat-Shrinkable Tubing 2012.]

Kutistesukan lisäksi johtosarjan haaroituskohdat tullaan varmistamaan Raychem® SCL-liimakutisteella. SCL on kaksiseinämäinen kutistesukka, jossa on kutistaessa sulava liimakerros. Tämän avulla johtosarjan haaroituskohdat saadaan tiivistettyä niin, ettei kosteus pääse johtosarjan sisälle. Liimakutiste myös antaa tukea haaroituskohdalle, jotta kutistesukkaan ei kohdistu liikaa rasitusta. SCL:n käyttölämpötila on -55 - + 110°C:tta ja kutistussuhde 3:1. [RAYCHEM SCL -Tubing Products 2011.]

Näitä yhdistelemällä johtosarjalle saadaan todella luotettava suojaus mekaanisesti, sillä molemmat suojamateriaalit täyttävät osittain jopa sotilasstandardien vaatimuksia. Esimerkiksi DR-25 täyttää useita kansainvälisiä vaatimuksia, kuten MIL-DTL-25053/15 ja VG95343 Part 5, jotka määrittelevät materiaalien kestävyydelle vaatimuksia äärimmäisissä olosuhteissa. Tämän pohjalta voidaan todeta suojamateriaalien ominaisuuksien olevan varsin riittäviä Suomen tieliikennekäyttöön.

3.3 Johtosarjan integrointi ajoneuvoon

Kun kaikki käytetyt komponentit on valikoitu yksikkötasolla, voidaan siirtyä järjestelmätason suunnitteluun. Viimeistään tässä vaiheessa yksittäisten komponenttien yhteensopivuus on vielä hyvä varmistaa, jotta valmistusvaihe onnistuisi mahdollisimman hyvin.

Koska kaikki kokoonpanossa käytetyt liittimet on valikoitu anturikohtaisesti, on niiden yhteensopivuus varmistettu. Liittimien hankinnan yhteydessä on tärkeää myös huomioida liittimen johdinkoko. Esimerkiksi TE/AMP-valmistajan Junior

Power Timer -liittimiä on saatavilla useita eri malleja riippuen käytetystä johdinkoosta. [Timer Contact System 2011.]

Johtimien pituuksien mitoitus toteutettiin mittaamalla johtosarjan reitti alusta loppuun sekä mittaamalla kunkin haaroituskohtien mitat yksitellen. Tämän avulla johdinsarjasta saadaan mitoitettua oikean pituinen, jotta voidaan välttyä ylimääräiseltä rasitukselta. Johtimien mitattuun pituuteen on lisätty varmistukseksi noin 10 %:a, jolla pyritään ottamaan huomioon mahdolliset mitta- ja valmistusvirheet.

Koska moottorinohjainlaitteen sijainti ajoneuvossa ei ollut vielä tässä vaiheessa suunnittelua varmistunut, otettiin se huomioon mitoituksessa. Moottorinohjainlaite tullaan todennäköisesti sijoittamaan matkustajan jalkatilaan. Kuitenkin pituus läpiviennin sisäpuolelle mitoitettiin siten, että ohjainlaite on mahdollista sijoittaa melko vapaasti eikä sen tarvitse olla läpiviennin välittömässä läheisyydessä.

3.3.1 Reititys ja rakenteelliset rajoitteet

Moottorinohjainlaite tulee joka tapauksessa sijaitsemaan matkustajan jalkatilassa, mikä tarjoaa mahdollisuuden käyttää ajoneuvon alkuperäistä läpivientä. Tämän takia johdinsarjan uusinnan vuoksi ei tarvitse tehdä muutoksia ajoneuvon mekaaniseen rakenteeseen.

Läpivienti sijaitsee moottoritilasta katsottuna vasemmassa reunassa akun alapuolella. Johdinsarjalle on tarpeellista suunnitella pienehkö mutka ennen läpivientä, jotta voidaan minimoida kosteuden pääsy ajoneuvon sisätiloihin. Läpivienti tullaan eristämään käyttämällä ajoneuvon alkuperäistä läpivientikumia, joka tarjoaa riittävän eristyksen läpivientikohdalle.

Suurin osa johtosarjan kiinnityspisteistä tullaan toteuttamaan käyttämällä porattavia nippusidekiinnikkeitä. Nippusidekiinnikkeet tarjoavat luotettavan tuen johdinsarjalle rajoittamatta liikaa sen reititytystä. Nippusidekiinnikkeet ovat myös

yksinkertaisia purkaa, mikäli johdinsarjaa on tulevaisuudessa tarpeen huoltaa tai muokata.

Johtosarjan reitityksessä on tärkeää kiinnittää huomiota myös haaroituspisteiden sijainnin lisäksi johdinten suuntaan. Haaroituskohdissa on vältettävä johdinten menemistä ristiin sekä jyrkkiä mutkia. Mekaanisen rasituksen vähentämiseksi johdinten mutkat on suositeltavaa tehdä mahdollisimman loiviksi. [Wiring Tips & Tricks 2018.]

3.3.2 Häiriösuojaus

Johtosarjan suunnittelussa on tärkeä ottaa huomioon elektromagneettisten häiriöiden vaikutusta järjestelmään. EMI-häiriöt vaikuttavat erityisesti herkkiin signaaleihin, joita suunnitellussa järjestelmässä on useita. Häiriöt saattavat mahdollisesti vaikuttaa koko moottorin toimintaan häiritsemällä esimerkiksi moottorinnopeussignaaleja. [Where To Use Shielded Cable? | Shielded Wiring [HPA Q&A] 2020.]

Yleisesti EMI-häiriöt voidaan jakaa kahteen ryhmään niiden syntymisen perusteella. Nämä ryhmät ovat:

- Säteilyperäiset häiriöt
- Johtumisperäiset häiriöt

Säteilyperäiset häiriöt syntyvät johtimien tai komponenttien lähettämien sähkömagneettisen säteilyn myötä. Johtumishäiriöt taas vastaavasti syntyvät suoraan johtumalla. Molemmat häiriötyypit aiheuttavat järjestelmään jännite- ja virtahäiriöitä. [Russ 2016.]

Ajoneuvoympäristössä suurimmat häiriölähteet ovat sytytys- ja polttoainesyöttöjärjestelmissä. Esimerkiksi moderneissa ajoneuvoissa sytytyspuolien jännitteet voivat olla korkeimmillaan jopa 20 Kv [Back to basics: How an ignition coil works 2021].

Tärkeimpiä suojattavia signaaleja ovat moottorin moottorinohjaimelle kriittiset tulot, joita ovat moottorin pyörintänopeus ja sytytyspuolien ohjaussignaali. Näiden signaalien häiriöt saattavat aiheuttaa käyntihäiriöitä tai sytytyskatkoksia. [Where To Use Shielded Cable? | Shielded Wiring [HPA Q&A] 2020.]

Tärkeimmät signaalit tullaan suojaamaan käyttämällä erityyppistä johdinta kuin kaikissa muissa johtosarjan osissa. Johtimena tulee toimia metallipunoksella eristetty 2-napainen signaalijohdin. Tämän avulla tullaan toteuttamaan kampi- sekä nokka-akselin pyörintänopeustunnistimien johdotukset. Signaalijohtimen metallipunos tulee maadoittaa yhdessä muun järjestelmän kanssa, jolloin suurin osa häiriöistä voidaan vuotaa ajoneuvon maihin. Tällä saadaan minimoitua häiriöiden vaikutus signaaleihin. [Why Shielded Cables Are Used To Improve Cable Design 2016.]

4 Uuden johtosarjan valmistus

Ennen kuin johtosarjan lopullinen valmistus aloitetaan, on varmistettava, että kaikki työhön vaadittavat työkalut ja komponentit ovat saatavilla. Valmistusprosessi suoritettiin Metropolian ajoneuvolaboratoriossa, mikä mahdollisti myös useiden ammattitason työkalujen käytön.

Työkalut ovat kokoonpanoprosessin ajan todella merkittävässä roolissa. Oikeanlaisilla työkaluilla voidaan helpottaa työn kulkua sekä myös työn jälkeä. Osa työn aikana käytetyistä kuvista on nähtävillä kuvassa (kuva 8).



Kuva 8. Valmistuksessa käytettyjä työkaluja.

Tärkeimmät työkalut kokoonpanon aikana ovat:

- Johdinleikkurit
- Kuorintapihdit
- Yleismittari
- Puristuspihdit
- Kuumailmapuhallin.

Nämä ovat tärkeimpiä työkaluja itse johtosarjan kokoamisessa, joiden avulla suurin osa johtosarjan valmistuksesta saadaan toteutettua.

Näiden lisäksi kokoonpanossa käytettiin apuna tarratulostinta, jonka avulla yksittäiset johtimet merkittiin. Tämä helpotti johdinten seuraamista, ja auttoi varmistamaan, että kokoonpanoprosessin aikana kytkennät tehtiin onnistuneesti.

Kokoonpanoa varten kytkentäkaaviot tulostettiin paperille, jotta kytkentäkaaviota olisi mahdollisimman sujuvaa lukea työskentelyn aikana. Kytkentäkaaviosta on helposti nähtävissä johtimien värit sekä liitinkohtaiset kytkennät. Tämän lisäksi valmistusvaiheen apuna toimi luodut Excel-taulukot, joista oli nähtävissä kunkin johtimen pituus sekä muut tarpeelliset tiedot.

4.1 Johtosarjan valmistus

Johtimien valmistelu on yksi keskeisimmistä vaiheista kokoonpanoprosessin aikana. Hyvin valmistellut ja tarkasti mitoitettut johtimet helpottavat kokoonpanoa sekä parantavat lopullisen johtosarjan toimivuutta. Johtimien käsittelyssä kolme tärkeintä vaihetta ovat leikkaus, kuorinta ja puristaminen. Johtimet myös merkitään tarroin leikkausvaiheessa, jotta niputuksen ja liitinten kasaamisen aikana johtimet olisivat helposti tunnistettavissa.

Johtimien pituuden mitoitus pohjautui reitityssuunnitelmaan, joka oli suunniteltu kytkentäkaavioiden pohjalta. Mittaamisen yhteydessä pituuksiin lisättiin noin 10 %:a lisäpituutta, jotta johdinten pituus olisi varmasti riittävä. Johtimia on kuitenkin mahdollista vielä lyhentää ennen niiden pinnien puristamista. Liian lyhyt johto saattaisi aiheuttaa ylimääräistä mekaanista rasitusta, joka vaatisi korjaavien toimenpiteiden tekemistä.

Jokainen johdin valmisteltiin yksitellen, jonka jälkeen ne järjestettiin eri ryhmiin. Moottorinohjaimen harmaa sekä musta liitin järjestettiin omaan ryhmäänsä, sekä releiltä lähtevät johtimet olivat omassa ryhmässään.

4.1.1 Leikkaus ja kuorinta

Johdinten leikkaus suoritettiin mittaamalla ensin jokaisen johdon pituus. Johtimien leikkaamiseen käytettiin johdinten leikkaamiseen tarkoitettuja sivuleikkureita, joiden avulla pyrittiin minimoimaan johdinmateriaalin vaurioituminen. Tämän jälkeen johtimet kuorittiin käyttökohteen mukaan noin 3–6 mm pituudelta.

Johtojen yhtymäkohtia varten johtimia kuorittiin vielä hieman enemmän, jotta liitoksesta saataisiin mahdollisimman luotettava.

Autolaboratorion tiloissa oli saatavilla useita eri työkaluja johdinten kuorintaan, joista parhaaksi valikoitui Rennsteig 707 020 itsestään säätyvä työkalu. Kuorintatyökaluvaihtoehdot ovat nähtävillä kuvassa alla (kuva 9).



Kuva 9. Autolaboratorion kuorintatyökaluja.

Johtimien kuorinnan tarkoituksena on luoda luotettava kontaktipinta tulevaa liitosta varten. Kuorittu johdin liitetään myöhemmin liitinkohtaiseen pinniin tai yhtymäkohtaan. Johtimien kuorinta tulee suorittaa vasta johtimien leikkausten, niputuksen ja suojauksen jälkeen. Muutoin kuorittu johdinmateriaali voi taipua tai vaurioitua kokoonpanon aikana.

Kuorinnan aikana tuli kiinnittää erityistä huomiota siihen, että johdinmateriaalin säikeet eivät vaurioituneet kuorinnan aikana. Tämän vuoksi jokaisen johtimen kunto tarkastettiin vielä kuorinnan jälkeen. Mikäli säikeitä katkeaa, heikkenee johtimen virrankesto sekä mekaaninen rasituksenkesto.

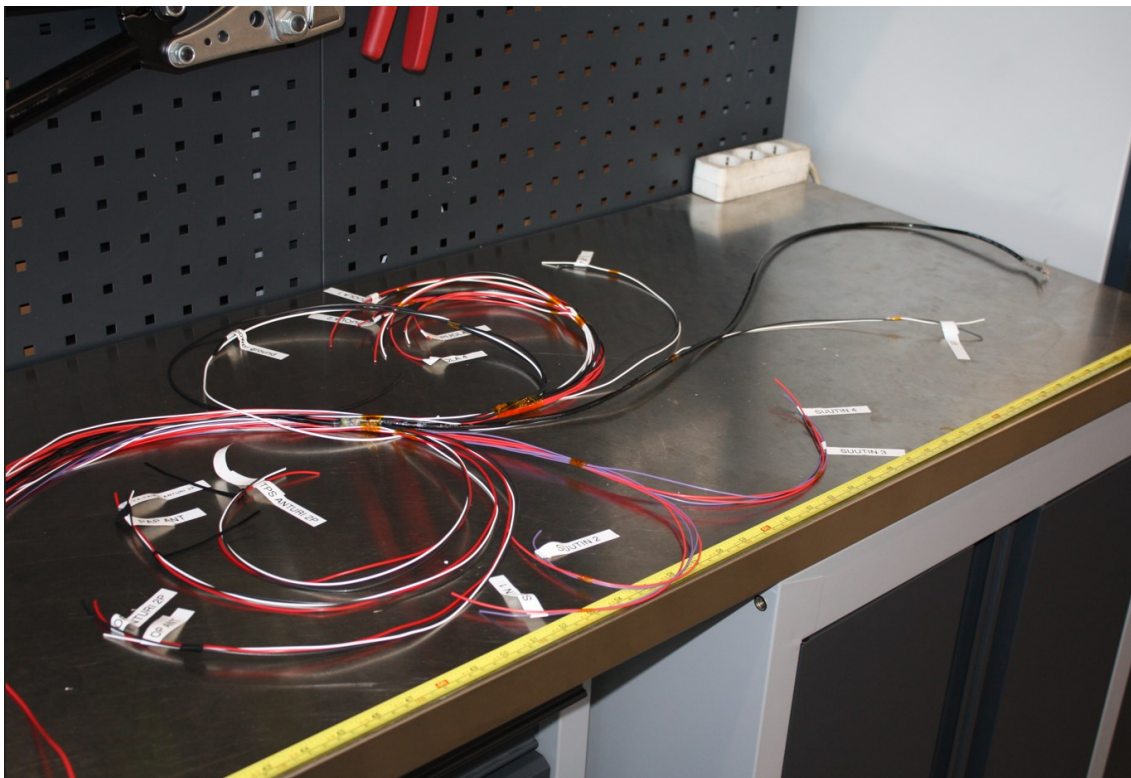
Kuorinnan jälkeen säikeet suoristettiin vielä sormin, jotta asettaminen pinniin puristusvaiheessa helpottuisi. Tämän jälkeen johdin merkattiin tarratulostimen

avulla ja prosessi toistettiin jokaisen johtimen kohdalla uudestaan. Säikeitä ei tulisi kuitenkaan kiertää tai taivuttaa, sillä tämä luo ylimääräistä raskautta johtimeen.

4.1.2 Johtimien niputus

Kun johtosarjassa kaikki käytetyt johtimet oli leikattu valmiiksi haluttuun mittaan, voitiin aloittaa johtosarjan kokoonpano. Koska johtimet oli jaoteltu ryhmiin aloituspisteiden mukaan, tuli seuraavaksi suoristaa johtimet lopullista reittiä varten. Koska johtimet on varastoitu useimmiten keloissa, saattaa niiden suoristaminen olla hankalaa. Tämän vuoksi niputusvaiheessa käytettiin apuna nippusiteitä sekä polyamiditeippiä. Teipillä on korkea käyttölämpötila eikä se vie juurikaan tilaa johtosarjan sisällä. Tämän takia teipin jättäminen johtosarjan sisälle ei aiheuta ongelmia seuraavissa vaiheissa. Teippiä käytettiin etenkin haaroituskohdissa sekä johtimien päissä ennen liittimiä.

Koska johtimet oli nimetty jo niiden leikkausvaiheessa, oli tarroista mahdollista nähdä, minne kunkin johtimen kuuluisi mennä. Kun kaikki johtimet oli saatu järjesteltyä yhdeksi kokonaisuudeksi, oli niputusosuus valmis (kuva 10).



Kuva 10. Johtosarjan anturiosuus niputettuna.

Kun johtosarja oli saatu koottua lopulliseen muotoon, tarkastettiin niputuksen onnistuminen. Tämä toteutettiin tarkastamalla johtimiin tehdyt merkinnät, jonka avulla varmistuttiin, että jokainen johdin kulkee sille suunnitellun reitin.

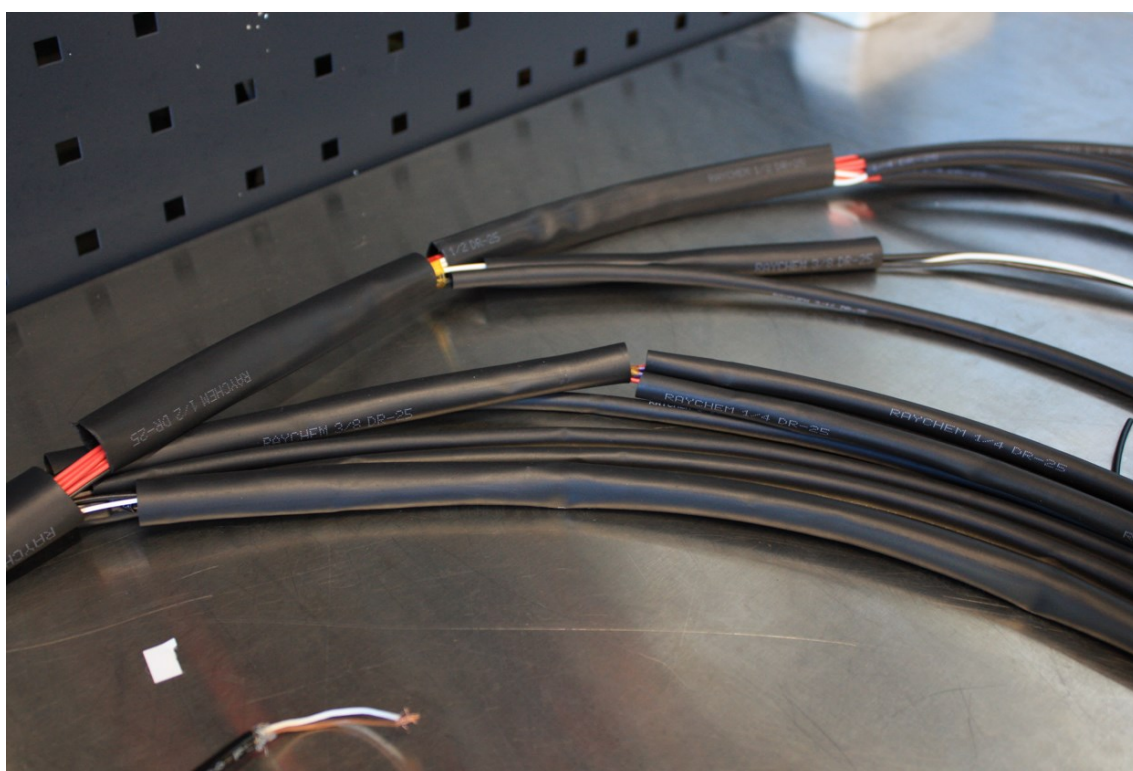
4.1.3 Johtosarjan suojaus

Kun johtimet oli saatu niputettu suunnitelmien mukaisiksi osuuksiksi, voitiin aloittaa suojamateriaalien valmistelu. Valitut suojamateriaalit tuli tässä vaiheessa mitoittaa oikean kokoisiksi sekä pituisiksi johtosarjan eri osuuksille.

DR-25:n kutistussuhteen ollessa 2:1 kutistuu sen halkaisija kuumentaessa puoleksi. Johtosarjan paksuimman kohdan halkaisija oli noin 14 mm, jolloin ideaalinen koko saisi olla maksimissaan 28 mm. Logistisista syistä suurin saatavilla oleva kutistesukka koko oli $\frac{3}{4}$ eli noin 20 mm. Tämän johdosta kutistesukka tulisi istumaan tämän osuuden päälle melko tiiviisti, mahdollisesti rajoittaen

liikkuvuutta. Tämä ei kuitenkaan ole suuri ongelma, sillä paksuimmat kohdat johtosarjasta on suunniteltu reitityksessä kohtuullisen suoriksi.

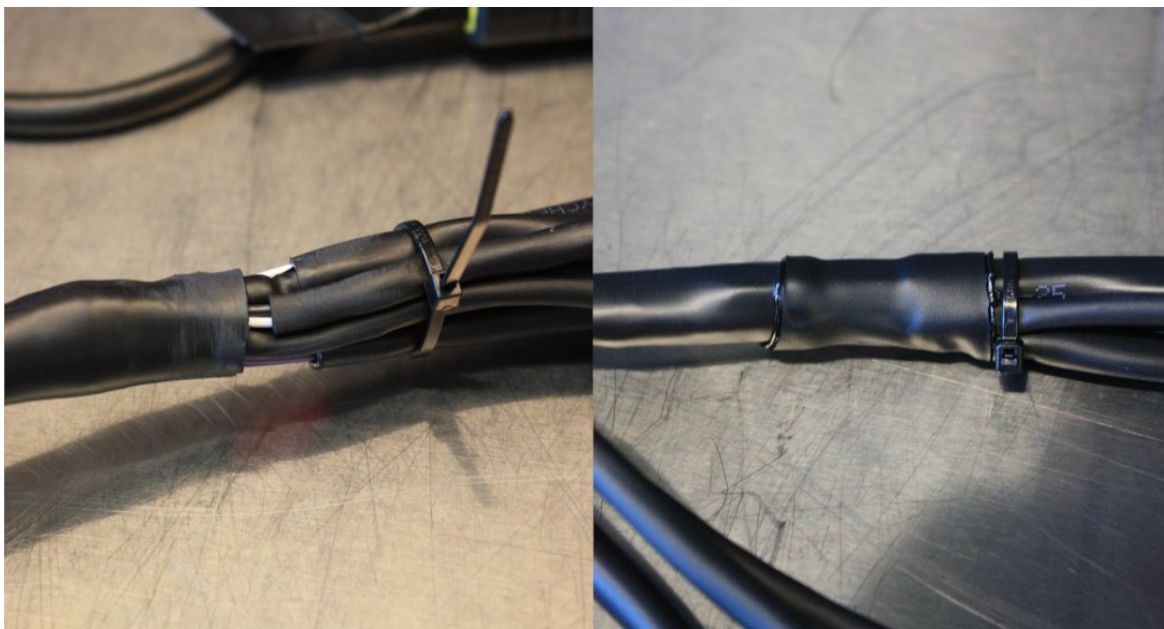
Sama laskukaava toistettiin jokaisen johdinosuuden kohdalla, kunnes johtosarjan jokaiselle osalle oli mitoitettu ja leikattu sopiva määrä kutistesukkaa. Leikatut kutistesukat asetettiin paikalleen leikkauksen jälkeen, jotta mitoitettut palat pysyivät järjestyksessä (kuva 11). Mitoituksen ja leikkauksen jälkeen suojamateriaalit kutistettiin kuumailmapuhaltimen avulla paikoilleen. Kun jokaisen johdinosuuden kutiste oli paikallaan, voitiin siirtyä mitoittamaan liimakutisteita.



Kuva 11. Kutistesukat asetettuna johtimien päälle.

Liimakutisteita mitoittaessa oli tärkeää ottaa huomioon erilainen kutistussuhde. SCL-liimasukan kutistussuhteen ollessa 3:1, olisi optimaalinen liimakutiste noin 3 kertaa suurempi kuin käytetty johdinnippu. Ennen kuin liimasukka asetetaan paikoilleen haarakohtaan, tulee pinta valmistella liimaa varten. Jotta liima kiinnittyisi mahdollisimman tehokkaasti kutistesukkaan, hiottiin sen pintaa varovasti. Hionnan jälkeen pinta puhdistettiin, ja liitos kutistettiin kuumailmapuhaltimen

avulla. Tämä toistettiin jokaisessa haaroituskohdassa sekä johtimien päissä. Liimakutiste antoi haaroituskohdille todella hyvän tuen sekä tiivisti johtimien välit. Haaroituskohdat tuettiin lisäksi nippusitein, millä pyritään vähentämään liimaan kohdistuvaa rasitusta (kuva 12).



Kuva 12. Valmisteltu ja kutistettu haaroituskohta.

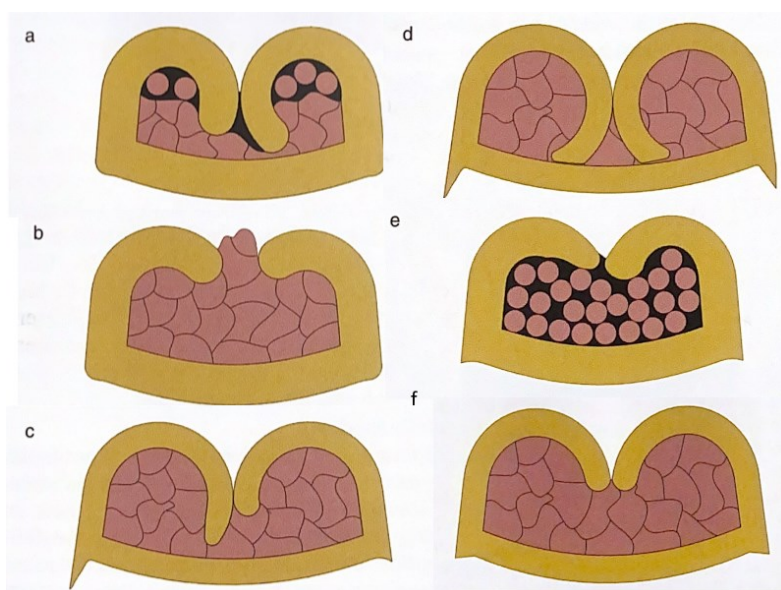
Ajoneuvon sisätiloihin tulevat haaroituskohdat moottorinohjainlaitteen liittimille sekä relekeskukselle suojattiin käyttämällä Tesa-51608-kangasteippiä. Teippi tarjoaa näille kohdille kutistesukkaa paremman liikkuvuuden, eikä sisätiloissa johtimien suojaus esimerkiksi kemikaaleilta ole yhtä merkittävässä asemassa. Fleece-teipin käyttö mahdollistaa myös kattavammat mahdollisuudet muutoksiin, mikäli moottorinohjainlaitteeseen haluttaisiin kytkeä tulevaisuudessa ylimääräisiä antureita tai toimilaitteita. [Tesa-51608 2025.]

Kun suojamateriaalit oli asennettu paikoilleen, asetettiin liitinkohtaiset suojat vielä johtosarjaan ennen pinnien puristamista.

4.1.4 Puristusliitos eli krimppe

Puristusliitoksella tarkoitetaan liitostekniikkaa, jossa sähköjohdin puristetaan mekaanisesti liittimeen käyttäen erikoistyökälyä. Tämän liitostekniikan tulok- sena on sekä mekaanisesti kestävä että hyvin johtava liitos ilman juottamista. Puristusliitos on etenkin autoteollisuudessa yleisesti käytetty menetelmä, sillä liitos on nopea, luotettava sekä helposti automatisoitavissa. [Guide to Crimp Quality in Wire Harnesses and Cable Assemblies 2022.] Puristusliitos koostuu rakenteellisesti kahdesta pääosasta, joita ovat johdinmateriaalin puristus ja eris- temateriaalin puristus. Ensimmäisessä osassa säikeet puristetaan etummaisena kynnen väliin, ja toisessa osassa taaemmat kynnet puristetaan johtimen eriste- materiaalin ympärille. [Glockseisen & Battenfel 2011: 20–24.]

Puristusliitoksen laadulla on suuri merkitys liitoksen onnistumiseen. Jos liitos on tehty oikein, se kestää todella hyvin mekaanista rasitusta. Laadukas liitos vas- tustaa myös tehokkaasti likaa ja sen aiheuttamaa korroosiota. Lisäksi oikein tehty liitos on myös kaasutiivis, mikä tekee liitoksesta pitkäikäisemmän. Mikäli tehty liitos ei ole tarpeeksi tiukka, saattaa se pettää ajan myötä. Kuvassa on nähtävillä epäonnistuneita puristusliitoksia a-e sekä onnistunut puristus f (kuva 13).



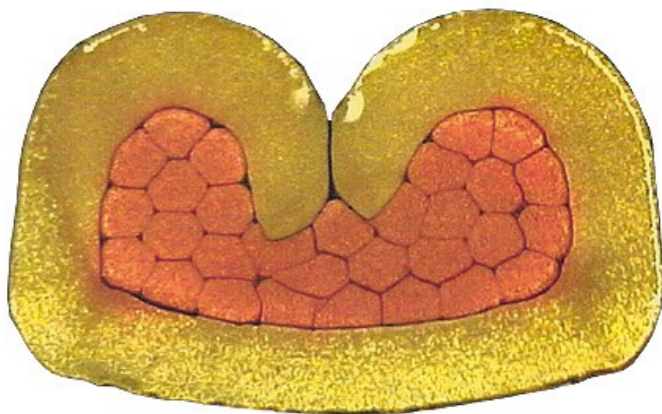
Kuva 13. Eri tasoisia puristusliitoksia. (Glockseisen & Battenfel 2011: 49, 51)

Puristusliitoksen laatua arvioidaan tyypillisesti vetolujuustestillä (kuva 14). Testissä mitataan, kuinka paljon voimaa liittimeen voidaan kohdistaa, ennen kuin johdin irtoaa liittimestä. IEC 603352-2 -standardissa on määritelty eri johtimille minimiarvot vetolujuuden suhteen. Esimerkiksi $0,75\text{mm}^2$ kuparijohtimen tulee kestää vähintään 85 N veto ilman liitoksen pettämistä. Testi tehdään tyypillisesti ennen kuin liittimen eristeosuus on puristettu, jotta voidaan mitata pelkästään johdinmateriaalin ja pinnan välinen liitos. Liitoksen laatua voidaan myös tarkastella poikkileikkausanalyysin avulla, jossa puristusliitos halkaistaan ja pintaa tarkastellaan mikroskoopin avulla. Tarkastelussa hyvän liitoksen tunnusmerkkejä ovat tiiveys, symmetrisyys sekä säikeiden kunto. [IEC 603352-2 2024.]



Kuva 14. Vetolujuustestilaitte puristusliitokselle. [Tensile testing of crimped wire terminals 2018.]

Yksi yleisimmistä käytetyistä liitostavoista on B/F-crimp, jossa pinnin kynnet taitutetaan johtimen ympärille B-kirjaimen muotoisesti (kuva 15). Tämä rakenne mahdollistaa hyvän mekaanisen kestävyuden sekä on mahdollista automatisoida tuotantolinjoja varten. [Glockseisen & Battenfield 2011: 49–53.]



Kuva 15. B/F-puristusliitos. [Forms of Crimping 2025.]

Puristusliitoksia varten jokaiselle pinnille on valmistajan toimesta oma työkalu, jolla liitos tulisi tehdä. Liitinkohtaiset työkalut ovat kuitenkin hyvin hintavia ja niiden toimintaskaala on todella rajattu. Tämän vuoksi yleismalliset puristuspihdit ovat käytännöllinen ratkaisu kuluttajalle, sillä suurin osa liitoksista on puristusrakenteeltaan samankaltaisia. Lähes kaikkien liittimien puristuksessa käytettiin tässä työssä Rennsteig 624 000 3 puristinta, joka oli varustettu 624 674 3 0 mallin puristinleuoilla (kuva 16).



Kuva 16. Puristusliitoksissa käytetyt työkalut.

Koska käytössä ei ollut liitinkohtainen työkalu, tuli puristamista harjoitella kunkin pinnin kohdalla, jotta puristus olisi mahdollisimman laadukas. Kun liitinkohtainen leuka ja pinnin asettelu oli varmistettu, voitiin pinnit puristaa eri johtimiin. Suurimmassa osassa pinneistä oli silikoninen muovitiiviste, joka asetettiin pinnin eristemateriaalipuristeen kohdalle (kuva 17). Tässä vaiheessa on myös suositeltavaa tarkastaa pinnin asettelu käytettävään liittimeen, jotta johtimia tarvitsisi taittaa mahdollisimman vähän liittimeen kytkettäessä.



Kuva 17. Sytytyspuolien johtimien pinnit puristettuina.

Kun pinni oli kiinnitetty johtosarjaan, puristuksen pitävyys tarkastettiin. Puristusliitosten testaamiseen ei Metropolian ajoneuvolaboratoriossa ollut saatavilla laitteistoa, minkä vuoksi liitokset tarkastettiin manuaalisesti. Liitokselle suoritettiin yksinkertainen testi vetämällä sitä voimakkaasti. Tämän jälkeen varmistettiin, ettei liitos ole löystynyt tai vaurioitunut.

Kun kaikki pinnit oli puristettu onnistuneesti, tarkastettiin vielä silmämääräisesti kaikkien puristusten kunto. Tavoitteena oli tarkastaa, etteivät liitinrungot olleet taipuneet tai vaurioituneet puristuksen aikana.

4.1.5 Liittimien kasaus

Liittimien kokoonpanon aloituksen aikana on tärkeä tarkastaa, että liittimien mahdolliset suojat ovat asennettuna paikalleen ennen kasausta. Useimmiten suojat asettuvat hyvin tiivisti liitinrunгон perään, eivätkä tällöin ole asennettavissa liittimen ylitse. Kaikissa liittimissä ei kuitenkaan ollut liitinkohtaista eristettä, minkä vuoksi liittimen takaosa eristettiin kutistesukan avulla.

Tässä kohtaa valmistusprosessia kytkentäkaavioista tarkastettiin kunkin yksittäisen liittimen kytkentä. Kytkentäkaavioista oli nähtävillä käytettävä liitin sekä se, mihin terminaalien johtimet tuli kytkeä liittimessä. Käytetyiden liittinten runkoon oli yleensä merkitty missä järjestyksessä terminaalit ovat järjestelty. [Timer Contact system 2011].

Käytetyt liittimet koostuivat pääosin kolmesta osasta, jotka olivat:

- Liitinrunko
- Lukko
- Eriste.

Pinnien asettelu saattoi vaihdella liitinkohtaisesti, jolloin tuli tarkastaa, miten liittimien pinnien orientaatio on toteutettu. Mikäli liittimessä oli pinnejä varten lukko, tuli tämä irrottaa pinnien asettelun ajaksi.

Tyypillisesti pinnin asettuessa liittimeen kuului vaimea naksahdus, joka indikoi pinnin lukittumista liitinrunkoon. Lukitus tarkastettiin vielä varovasti vetämällä johdinta. Kun yksittäisen liittimen kaikki pinnit oli saatu kytkettyä, voitiin lukko sekä eriste asettaa paikalleen.

Kun kaikki liittimet oli saatu asetettua paikoilleen, tarkastettiin vielä pinnien asettuminen kertaalleen liitinkohtaisesti. Pinnien tulisi olla suorassa sekä tarpeeksi

syvällä, jotta ne ovat lukittuneet. Osa valmiista liittimistä nähtävissä kuvassa alla (kuva 18).



Kuva 18. Johtosarjan valmiita liittimiä.

Lopuksi liittimien onnistunut asennus varmistettiin silmämääräisellä tarkastuksella sekä kevyellä vetotestillä.

4.2 Valmistuksen tarkastuskohteet

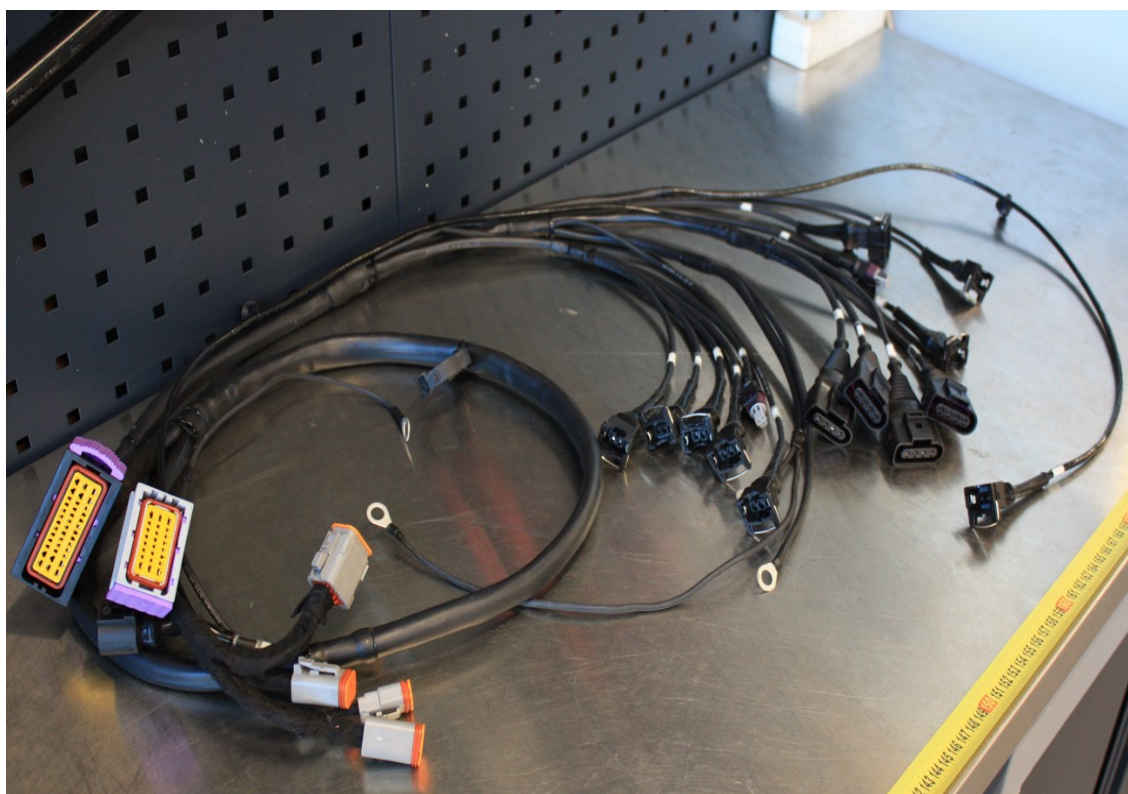
Kun kaikki liittimet sekä niiden eristeet oli saatu paikalleen, johtosarja saavutti viimein valmiin tuotteen ulkomuodon. Tässä kohtaa johtosarjassa käytettävät kiinnityspisteet asennettiin paikalleen. Viimeiseksi tarkastettiin vielä kokoonpano-osuuden vaiheet, jotta valmistustyö voitaisiin saattaa päätökseen.

Kytkentäkaavioiden avulla tarkastettiin, että jokainen liitin oli varmasti sille suunnitellussa sijainnissa sekä haaroittui oikeasta kohdasta. Dokumentoinnista varmistettiin myös, että kaikki johtimet oli nimetty oikein. Liitinkohtaisesti tarkastettiin pinnien asennot, lukitus ja eristys.

Johtosarjan suojamateriaalin kunto tarkastettiin vielä kertaalleen. Tällä varmistuttiin, ettei kokoonpanoprosessin aikana eristemateriaali ole päässyt repeytymään tai muutoin vaurioitumaan. Samalla tarkastettiin, että kutistuminen oli varmasti tapahtunut odotetusti kaikissa osissa johtosarjaa.

5 Valmis johtosarja

Kun kaikki kokoonpanon vaiheet on saatu suoritettua ja lopputulos on tarkastettu pääosin, lopputuotteena on asennusvalmis johtosarja (kuva 19). Valmiissa johtosarjassa on yhteensä 22 liittintä, jonka kaikki liittimet ovat eristettyjä. Moottorinohjainlaitteen liittimet on toteutettu käyttäen moninapaliittimiä. Virta- ja relepuolen liittimet on toteutettu käyttäen Deutsch DTM -tuoteperheen liittimiä.



Kuva 19. Liitännävalmis johtosarja.

Kiinnityspisteitä johtosarjaan suunniteltiin tässä vaiheessa 4, mutta käytettävän ajoneuvon valmistumisen edetessä tullaan kiinnityspisteitä lisäämään. Haaroituskohtia johtosarjassa on yhteensä yhdeksän. Haaroituskohdista kaksi sijoittuu ajoneuvon sisäpuolelle ja loput moottoritilaan.

Johtosarjassa on kolme maadoituspistettä, joista kaikki tullaan maadoittamaan samaan potentiaaliin ajoneuvon moottoriin. Virransyöttö moottorinohjaimelle

sekä releille tulee akulta, joka sijaitsee moottoritilassa. Virransyöttö sekä maadoituspisteet liitetään käyttäen 8 mm rengasliittimiä.

5.1 Johtosarjan tarkastukset

Johtosarjan tarkastus on yksi valmistuksen viimeisistä osa-alueista, jonka aikana todennetaan lopputuotteen laatu ja toimivuus. Laadunvalvonta on suuressa roolissa erityisesti monimutkaisissa ajoneuvosovelluksissa, joiden johtosarjat sisältävät runsaasti liittimiä sekä tiedonsiirtoon soveltuvia johtimia. Hyvin suunniteltu ja toteutettu testausprosessi vähentää valmistusvirheitä merkittävästi sekä ennaltaehkäisee niiden ilmenemistä myöhemmässä vaiheessa.

Ajoneuvoteollisuudessa on monia käytäntöjä johtosarjojen testaamiseen, joissa hyödynnetään usein automaattisia testilaitteita. Nämä laitteet voivat suorittaa johtosarjalle esimerkiksi jatkuvuusmittauksia, oikosulkutestejä sekä eristysvas-tusmittauksia. Tämänkaltaisten laitteiden avulla vikojen paikantaminen on huomattavasti yksinkertaisempaa kuin manuaalisilla testauksilla. Jotkin testauslaitteet kykenevät jopa havainnoimaan ongelmakohdan etäisyyden liittimestä, mikä helpottaa ongelman korjaamista huomattavasti. [Antilles 2022.]

Johtosarjojen testilaitteisto ei kuitenkaan ole kuluttajatasolla helposti saatavilla, minkä vuoksi johtosarjan testaus suoritettiin käyttäen yksinkertaisempia testejä. Suoritetut testit suoritettiin käyttäen apuna yleismittaria, sekä fyysiset ominaisuudet tarkastettiin käsin.

Johtosarjan sopivuus haluttuun ajoneuvoon tarkastettiin fyysisesti. Samalla varmistettiin, että kaikki anturit saadaan kytkettyä johtosarjaan ilman tiukkoja mutkia tai kiristymiä. Kun johtosarja oli asetettuna ajoneuvoon, tarkastettiin tulevat taitekohdat. Näitä taitekohtia taivuteltiin kevyehkösti, millä pyrittiin simuloimaan johtosarjan liikkumista sen ollessa asennettuna ajoneuvoon.

Tämän jälkeen johtosarjan kaikki liitokset tarkastettiin kytkentäkaavioita apuna käyttäen. Kullekin johtimelle suoritettiin jatkuvuusmittaus, jolla voitiin varmistua, ettei johtimia ole katkennut tai varioitunut fyysisten testien aikana.

5.2 Vertailu alkuperäisiin johtosarjoihin

Työn alussa esiteltiin kaksi johtosarjaa eri aikakausilta, ja valmiiksi lopputuotteeksi saatiin molemmista johtosarjoista selkeästi eroava tuote. Molempien johtosarjojen vaikutus on kuitenkin nähtävissä itse valmistetussa johtosarjassa.

Suojausmateriaalivalinta eroaa merkittävästi molemmista johtosarjoissa käytetyistä materiaaleista. Kutistesukkaa ei ollut alkuperäisissä johtosarjoissa käytetty lähes ollenkaan, mutta taas omassa kokoonpanossa sen avulla toteutettiin lähestulkoon koko johtosarjan suojaus. Erilaiset teippivaihtoehdot olivat Fordin valmistamissa johtosarjoissa käytössä laajalti, mutta omassa toteutuksessa teippiä käytettiin vain sisätilojen johtimien niputukseen.

Liitinvalinnoissa näkyvät vahvasti moottorin vanhalle johtosarjalle tyypilliset Junior Power Timer-liittimet. Näitä liittimiä käytettiin suuttimille sekä isolle osalle antureista. Fiestan johtosarjan kanssa yhteisiä liittimiä ei löytynyt kuin yksi, joka oli Lambda-happianturin BAK Micro Power Timer -liitin

Ulkonäöltään omavalmistejohtosarja eroaa kuitenkin molempiin Fordin valmistamiin johtosarjoihin merkittävästi. Suurimmat kosmeettiset erot muodostuvat haaroituskohtien myötä. Alkuperäisissä johtosarjoissa yksittäisen anturin haaroitukset on usein toteutettu niin, että se haarautuu tietyistä kohtaa johtosarjaa ilman muita haaroituksia. Omassa toteutuksessa haaroitukset toteutettiin ryhmissä, minkä myötä haaroituskohdat saatiin tiivistettyä varmemmin.

5.3 Tulosten arviointi

Valmista johtosarjaa voisi kuvailla onnistuneeksi toteutukseksi. Johtosarja täytti sille suunnitteluvaiheessa asetetut vaatimukset, joista lopputuotteessa

korostuvat etenkin luotettavuus sekä liitettävyyys ajoneuvoon. Koska erityisesti eristemateriaalivalintoihin sekä suojaukseen kiinnitettiin huomiota, voidaan omavalmiste johtosarjan oletettua käyttöikää arvioida jopa alkuperäistä pidemmäksi.

Toisaalta johtosarjan laadukas eristys vähentää sen modulaarisuutta sekä huoltomahdollisuuksia, mutta vähentää mahdollisia huoltotarpeita. Tulevaisuuden muutosten rajatut mahdollisuudet ovatkin johtosarjan suurin heikkous. Tämä on kuitenkin otettu huomioon käyttämällä normaalia vahvempaa ja kestäväää johdinmateriaalia, jolla pyritään minimoimaan tulevaisuuden ongelmia.

Liitettävyyys ajoneuvoon korostuu täysin liitinvalinnoissa. Koska liittimet on valikoitu halutulle ajoneuvolle sopiviksi, ei liittimiä ole tarpeen muuttaa tai muokata. Rajoittavina tekijöinä johtosarjassa on sen yksilöllisyys. Valmistettu johtosarja on sopiva vain tietylle moottorinohjaimelle sekä tietylle moottorille. Tämä rajoittaa valmistusprosessin dokumentoinnin hyötykäyttöä muihin toteutuksiin.

Tästä huolimatta moottorin johtosarjan valmistus muihinkin ajoneuvoihin myötäilee pitkälti samoja vaiheita. Suurimmat erot muihin toteutuksiin ovat pääosin toimilaitteiden liitinvalinnoissa sekä mitoituksessa. Johtosarjan selkein kehityskohde on kiinnityspisteissä, joita työn aikana suunniteltiin niukasti. Tähän vaikuttivat merkittävästi ajoneuvon alkuperäiset todella rajoitetut kiinnityspisteet.

6 Yhteenveto ja johtopäätökset

Opinnäytetyön tavoitteena oli suunnitella sekä dokumentoida johtosarjan modernisointioperaation vaiheet ja luoda yksityiskohtainen selostus prosessin eri vaiheista. Modernisoinnin pohjimmaisena tarkoituksena oli luoda luotettava ja toimintavarma ratkaisu alkuperäisen kuluneen johtosarjan tilalle hyödyntäen nykyaikaisia valmistusmateriaaleja sekä -tekniikoita.

Työn aikana tutustuttiin johtosarjasuunnittelun eri vaiheisiin, joista tärkeimmät olivat kytkentäkaavioiden suunnittelu, materiaalivalinnat sekä itse valmistus.

Näiden vaiheiden tarkka dokumentointi oli työn keskeinen osa, jotta ratkaisuja ja valintoja olisi mahdollista hyödyntää myös muissa toteutuksissa. Itse työ oli kokonaisuudessaan hyvin laaja sisältäen useita eri kokonaisuuksia. Laajuudesta huolimatta jokainen keskeinen osa-alue käsiteltiin sille tarpeellisella tarkkuudella. Työn laajuus toi mukanaan ajoittain haasteita asioiden priorisoinnissa sekä aikataulutuksessa opettaen näiden teemojen hallintaa projektinomaisessa työssä.

Opinnäytetyö opetti todella kattavasti johtosarjasuunnittelun eri vaiheista sekä vaatimuksista. Itselleni merkittävimmät oppimiskohteet olivat kytkentäkaavioiden suunnitteluun käytetyn ohjelmiston Zuken E³:n käyttö sekä käytännön valmistus. Ohjelmiston käyttö vaati alussa runsaasti perehtymistä, mutta ajan kanssa käytöstä muodostui jopa melko sujuvaa. Johtosarjan kokoonpanovaiheessa oli mielenkiintoista päästä muuttamaan itse suunniteltu kytkentäkaavio fyysiseksi johtosarjaksi oppien samalla kattavasti eri valmistustyyleistä.

Työn merkitys ja hyödynnettävyys on nähtävissä työn aikana tuotetussa dokumentaatioissa. Laaja dokumentaatio tarjoaa hyvän pohjan johtosarjan modernisoinnille ajoneuvosta riippumatta. Laaditut kytkentäkaaviot, komponenttilista sekä kuvaukset työn kulusta antavat arvokasta tietoa tulevaisuuden projekteihin.

Työ tarjoaa useita jatkokehitysmahdollisuuksia, joita olisi mahdollista tutkia tulevaisuudessa. Esimerkiksi johtosarjan modulaarisuuden kehittäminen suojauksesta tinkimättä voisi olla yksi mielenkiintoinen jatkotutkimusaihe. Tämä korostui etenkin valmiin johtosarjan rakenteessa. Toinen mielenkiintoinen aspekti voisi olla työssä toteutettujen valmistusvaiheiden automaatio tai koneellistaminen. Näiden lisäksi johtosarjan kiinnityspisteiden lisäämisessä voitaisiin hyödyntää esimerkiksi 3D-tulostamista, jonka avulla olisi mahdollista suunnitella Fordin alkuperäisille johtosarjoille tyypillisiä kiinnitys- ja tukipisteitä.

Lopuksi voidaan todeta opinnäytetyön olleen erittäin opettavainen prosessi, joka antoi realistisen kuvan siitä, miten paljon ajoneuvon sähköjärjestelmän

yksittäinen osuus voi pitää sisällään suunnittelua ja erilaisia vaihtoehtoja. Työ vahvisti omaa osaamistani sekä suunnittelussa että käytännön taidoissa, ja antoi hyvät valmiudet tuleviin haasteisiin autosähkötekniikan parissa.

Lähteet

Antilles, Sally 2022. What is wire harness testing? Verkkoaineisto. <<https://mktest.com/what-is-wire-harness-testing/>>. Luettu 6.4.2025.

Autojen anturit. 2009. Robert Bosch GmbH. Suomi: Autoalan koulutuskeskus.

Back to basics: How an ignition coil works. 2021. Verkkoaineisto. Denso. <https://www.denso-am.eu/news/deneur21_04_ignition-coil-basic-principles>. Luettu 18.3.2025.

Bauer, Horst, Haapaniemi, Heikki & Boström, Björn 2003. Autoteknillinen taskukirja. Kuudes painos. Helsinki: Autoalan koulutuskeskus.

Boesing, Danny. 2017. What Plating Option Is Best For My Connector?. Verkkoaineisto. <<https://blog.samtec.com/post/what-plating-option-is-best-for-my-connector/>>. Luettu 13.1.2025.

Bosch automotive electrics and automotive electronics: systems and components, networking and hybrid drive. 2014. E-kirja. Robert Bosch GmbH. Wiesbaden: Springer Vieweg.

Connector Material Selection is Vital in Automotive Connectors. 2023. Verkkoaineisto. Connector Supplier. <<https://connectorsupplier.com/materials/>>. Luettu 11.3.2025.

Denton, Tom. 2018. Automobile electrical and electronic systems. London New York: Routledge, Taylor & Francis Group.

DiBartolomeo, John. 2017. The ABCs of Automotive Wiring and Wires. Verkkoaineisto. <<https://www.motortrend.com/how-to/1703-the-abcs-of-automotive-wiring-and-wires/>>. Luettu 16.1.2025.

Die wesentliche Rolle von Kabelbäumen im Auto: Anordnung und Funktion. 2024. Verkkoaineisto. GVEI. <<https://www.gvei.com/de/the-essential-role-of-automotive-wiring-harnesses-arrangement-and-function/>>. Luettu 28.3.2025.

Eccles, Alek. 2023. What is Cross Linked Polyethylene? Verkkoaineisto. <<https://www.ntotank.com/blog/what-is-cross-linked-polyethylene?srsId=AfmBOop6rcvL-VlwjSdwkMUOR5RR6xpWD9YW4630jCJn3a0gruw9jkRA>>. Luettu 13.2.2025.

ECU Grounding Tips. 2017. Verkkoaineisto. AdaptronicECU <<https://web.archive.org/web/20220327233552/https://adaptronicecu.com/blogs/modular-instructional-videos/ecu-grounding-tips>>. Luettu 12.2.2025.

ECU Grounding – the DOs and DONTs. 2022. Verkkoaineisto. Halltech. <<https://support.haltech.com/portal/en/kb/articles/ecu-grounding-the-dos-and-donts>>. Luettu 6.4.2025.

Electronic engine control unit. 2025. Verkkoaineisto. Robert Bosch GmbH. <<https://www.bosch-mobility.com/en/solutions/control-units/engine-control-unit/>>. Luettu 6.4.2025.

EMI INTERFERENCE & HOW TO REMEDY IT. 2025. Verkkoaineisto. New Vintage USA. <<https://newvintageusallc.mybigcommerce.com/emi-interference-how-to-remedy-it/>>. Luettu 7.2.2025.

Diagnosing Voltage Drops Electrical Automotive Troubleshooting. 2025. Verkkoaineisto. Fluke. <<https://www.fluke.com/en/learn/blog/automotive/electrical-automotive-troubleshooting>>. Luettu 13.2.2025.

Forms of Crimping. 2025. Verkkoaineisto. Rennsteig Tools. <<https://www.rennsteig.us/service/general-info/32-forms-of-crimping>>. Luettu 6.4.2025.

Glockseisen, Thomas & Battenfeld, Kurt. 2011. Crimptechnik: Herstellungprozesssicherer Verbindungen von elektrischen Leitern und Steckern. Landsberg/Lech: Verl. Moderne Industrie.

Guide to Crimp Quality in Wire Harnesses and Cable Assemblies. 2022. Verkkoaineisto. Conwire. <<https://www.conwire.com/blog/guide-to-crimp-quality-wire-harnesses-and-cable-assemblies/>>. Luettu 9.2.2025.

Hommer, Zhao. 2024. DIY Wire Harness: Step-by-Step Guide To Build A Wire Harness. Verkkoaineisto. <<https://www.wiringo.com/diy-wire-harness.html>>. Luettu 27.1.2025.

IEC 60228. 2023. Conductors of insulated cables.

IEC 603352-2. 2024. Solderless connections - Part 2: Crimped connections - General requirements, test methods and practical guidance.

Kertamuovi. 2025. Verkkoaineisto. Muoviteollisuus ry. <<https://plastics.fi/termi/kertamuovi/>>. Luettu 14.1.2025.

Leduc, Zoe. 2019. Tape for Wire Harnesses. Verkkoaineisto. <<https://www.assemblymag.com/articles/94713-tape-for-wire-harnesses>>. Luettu 12.3.2025.

RAYCHEM SCL -Tubing Products. 2011. Verkkoaineisto. TE Connectivity. https://www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDEController?Action=show-doc&DocId=Catalog+Section%7FSCL_9-1773447-9%7F0811%7Fpdf%7FEnglish%7FENG_CS_SCL_9-1773447-9_0811_SCL_9-1773447-9_0811.pdf%7F5501062005. Luettu 19.2.2025.

RAYCHEM DR-25 -Heat-Shrinkable Tubing. 2012. Verkkoaineisto. TE Connectivity. https://www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDEController?Action=srchrtv&DocNm=1654025_Sec3_DR-25&DocType=CS&DocLang=EN. Luettu 19.2.2025.

Reif, Konrad & Dietsche, Karl-Heinz. 2018. Automotive handbook. Karlsruhe: Robert Bosch GmbH.

Russ, Samuel H. 2016. Signal Integrity: Applied Electromagnetics and Professional Practice. Cham: Springer. DOI: [10.1007/978-3-319-29758-3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-29758-3).

Series 15300 – RTMR. 2025. Verkkoaineisto. Mouser. <https://www.mouser.fi/datasheet/2/87/eaton_bussmann_15300_RTMR-3554849.pdf>. Luettu 8.2.2025.

SAE J1128_202012. 2020. Low Voltage Primary Cable.

Simon, Andre. 2025. Star point earthing explained. Verkkoaineisto. <<https://www.hpacademy.com/previous-webinars/230-star-point-earthing-explained/>>. Luettu 7.2.2025.

Smyrak, B, Leszczynska Madej, B, Jałowy, P & Nowak, M. 2021. Comparative studies of the susceptibility of copper and aluminum to processing in wire drawing process. Verkkoaineisto. <https://www.researchgate.net/publication/354964778_COMPARATIVE_STUDIES_OF_THE_SUSCEPTIBILITY_OF_COPPER_AND_ALUMINUM_TO_PROCESSING_IN_WIRE_DRAWING_PROCESS>. Luettu 13.2.2025.

Tensile testing of crimped wire terminals. 2018. Verkkoaineisto. Electrical Engineering Magazine. <<https://electricalengineeringmagazine.co.uk/tensile-testing-of-crimped-wire-terminals/>> Luettu 20.3.2025.

Tesa-51608. 2025. Verkkoaineisto. Tesa. <https://www.tesa.com/fi-fi/teollisuus/tesa-51608.html>. Luettu 4.4.2025.

Timer Contact system. 2011. Verkkoaineisto. Corsa-technic. <https://www.corsa-technic.com/item_docs/JPT-CAT.pdf>. Luettu 28.2.2025.

Understanding the Electrical Conductivity of Aluminum. 2023. Verkkoaineisto. Wellste. <<https://www.wellste.com/electrical-conductivity-of-aluminum/>>. Luettu 12.2.2025.

Where To Use Shielded Cable? | Shielded Wiring [HPA Q&A]. 2020. Verkkoaineisto. High Performance Academy.. <https://www.youtube.com/watch?v=IVJIXo2wjYQ&ab_channel=HighPerformanceAcademy>. Katsottu 2.4.2025.

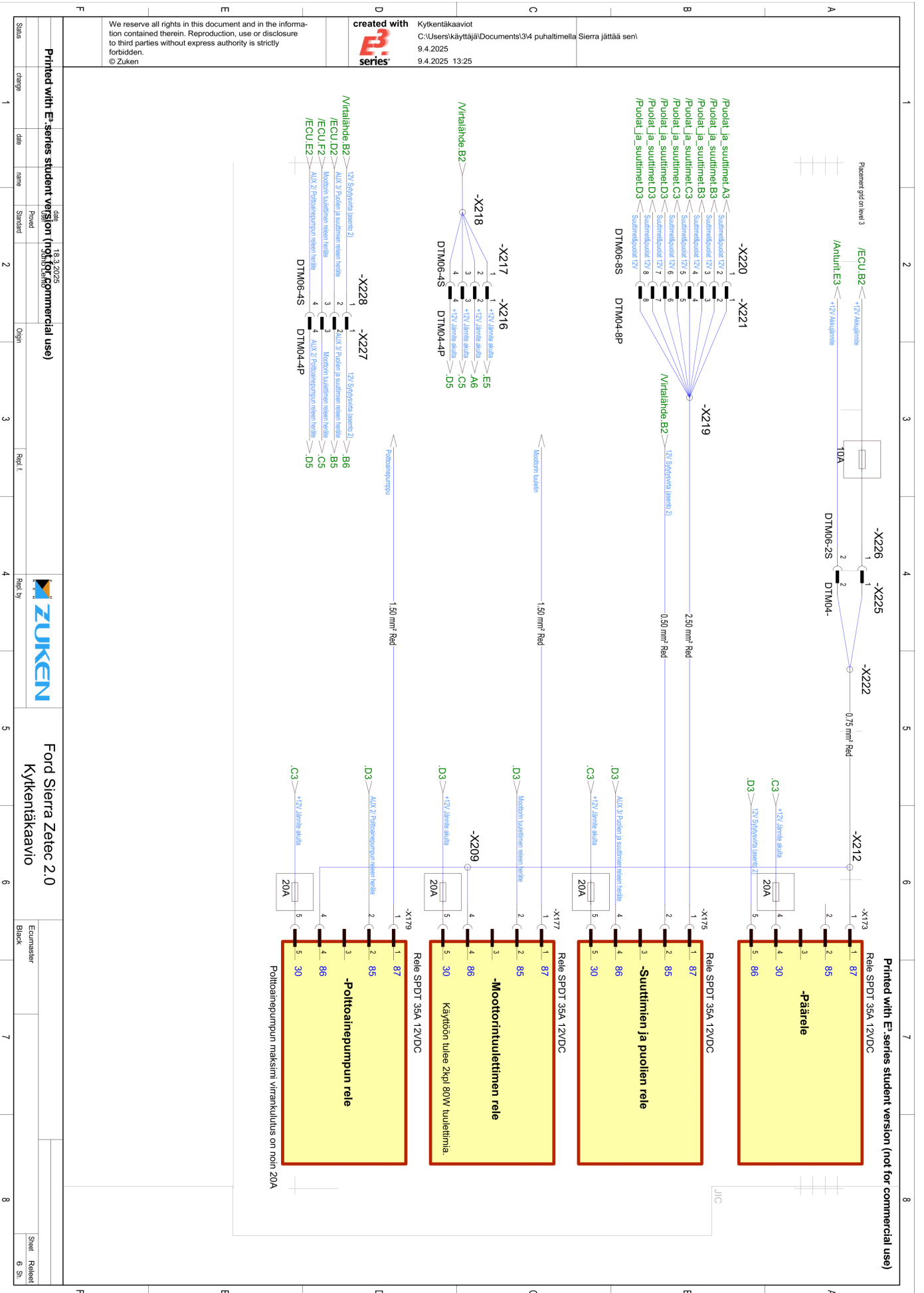
Which Cable Is Better PVC Or XLPE?. 2025. Verkkoaineisto. Dynamic Cables. <<https://www.dynamiccables.co.in/which-cable-is-better-PVC-or-XLPE.html>>. Luettu 22.3.2025.

Why Shielded Cables Are Used To Improve Cable Design. 2016. Verkkoaineisto. Epec Engineered Technologies. <<https://blog.epectec.com/why-shielded-cables-are-used-to-improve-cable-design>>. Luettu 14.2.2025.

Wire, cable and battery accessories product catalog. 2025. Verkkoaineisto. East Penn. <https://www.eastpenmanufacturing.com/wire-and-cable-catalog/Deka_2022-23/110/>. Luettu 29.2.2025.

Wiring Tips & Tricks. 2018. Verkkoaineisto. MotorTrend. <<https://www.motortrend.com/how-to/1812-wiring-tips-and-tricks/>>. Luettu 27.1.2025.

Zi, Richard 2023. Explore PVC insulated Cable: Safety and Longevity. Verkkoaineisto. <<https://www.centralwires.com/explore-pvc-insulated-cable/>>. Luettu 14.1.2025.



We reserve all rights in this document and in the information contained therein. Reproduction, use or disclosure to third parties without express authority is strictly forbidden.
© Zuken

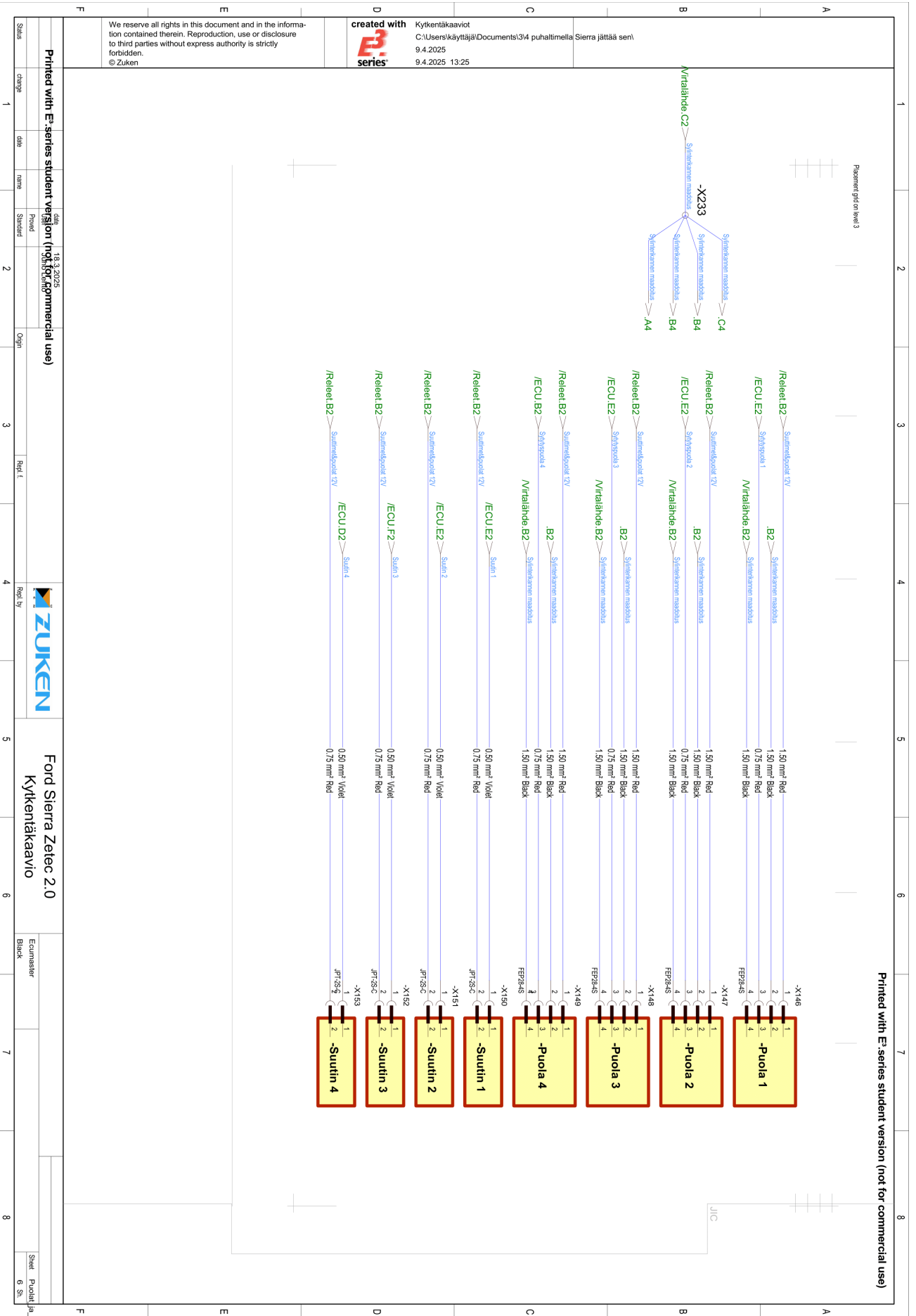
created with Kytkenätkävaio
C:\Users\käyttäjä\Documents\314 puhallimella Sierra jättää sen
9.4.2025
9.4.2025 13:25

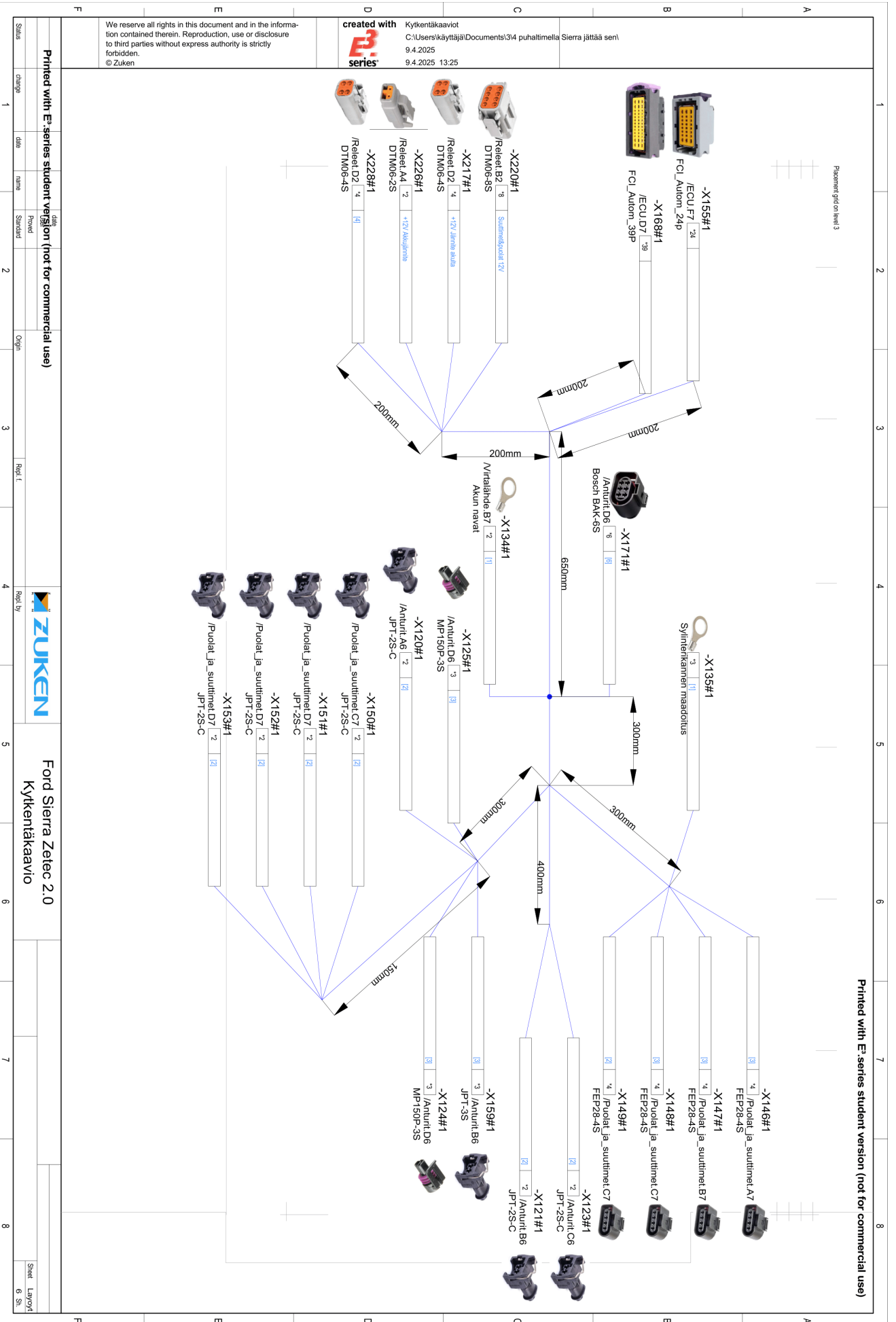
Printed with E-series student version (not for commercial use)	date	18.3.2025
version	18.3.2025	
name	Printed	
change	Standard	
date	18.3.2025	
name	Printed	
change	Standard	
date	18.3.2025	
name	Printed	
change	Standard	
date	18.3.2025	
name	Printed	
change	Standard	



Ford Sierra Zetec 2.0
Kytkenätkävaio

Ecumnaster	Black
Sheet	Reliabil
6 Sn.	





We reserve all rights in this document and in the information contained therein. Reproduction, use or disclosure to third parties without express authority is strictly forbidden.
© Zuken

created with
E-series

Kytkentäkaaviot
C:\Users\käyttäjä\Documents\3\4 puhallimella Sierra jättää sen
9.4.2025
9.4.2025 13:25

Printed with E-series student version (not for commercial use)

Status	change	1	idea	mm	Standard	Origin	Repl. L	Repl. by	5	6	7	8
ZUKEN										Ford Sierra Zetec 2.0		
										Kytkentäkaavio		
										Sheet Layout		
										6 Sn		

Spec-55 Johdin

Raychem

- Resistant to electrical arc tracking in wet or dry conditions
- Single or dual wall constructions
- Small size, ultra light weight
- Exceptional chemical resistance

Spec 55
Wire and cable

Spec 55 wire is insulated with modified radiation cross-linked ETFE polymer. It has a temperature rating of -65°C to 200°C continuous, and combines the easy handling of a flexible wire with excellent scrape abrasion and cut-through characteristics.

The dual wall airframe construction of Spec 55 wire is currently used on numerous aircraft programmes. It has

a 0.25 mm total wall thickness and a contrasting core colour to act as a damage indicator. Chosen for its balance of properties, Spec 55 wire has outstanding resistance to chemicals and solvents, excellent electrical arc track resistance, and is not susceptible to UV and moisture degradation. Single wall equipment wire constructions are available in 0.10 mm and 0.15 mm wall

thicknesses for use inside black boxes where flexibility and solder-iron resistance make it a wire which is very easy to reliably install.

Both single and dual wall insulated wires are available in twisted pairs, triples, etc., and as screened and jacketed cables.

Specifications/Approvals

MIL-W-22759/32-35 and /41 to /46 and MIL-C-27500 (Cables)

Def Stan. 61-12 Part 33

VG95218 Part 20, Type D; Part 21, Type A; Part 22, Type A; Part 23, Type A, Part 1001 and Part 1002

VDE 9426, 9427, 9428

British Standard G233

Civil Aviation Authority Accessory Approval E11749

Boeing BMS 13-48

Airbus ABS 0820 to 0826

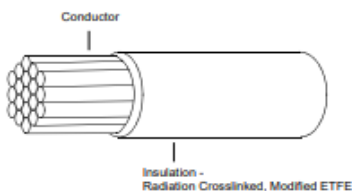
Underwriters Laboratory Style 3467

NASA preferred product list

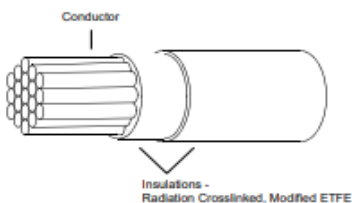
European Space Agency 3901/011 and 3901/012

Raychem Specification 55

Spec 55 Insulation system - Single wall



Spec 55 Insulation system - Dual wall



Spec 55

Physical characteristics

Size and weight

Spec 55 wire provides one of the most comprehensive wiring product ranges for aerospace users, with a wide choice of conductor sizes and insulation wall thicknesses. The dual wall airframe wire has an insulation wall thickness of 0.25 mm for robustness in unprotected harnesses and has excellent wire to wire abrasion properties. The equipment wire has a 0.15 mm wall

thickness for use inside equipment and protected harnesses. For high density interconnect wiring, the 450 volt 55M041X series of equipment wire has a nominal 0.1 mm wall and provides considerable weight and size savings over other comparable wires.

Handling

The excellent flexibility and low resilience makes Spec 55 the ideal wire

to install, both in new aircraft and equipment and for maintenance purposes. The wire is easily stripped with conventional tooling. The insulation is readily marked by hot stamp, ink jet or laser, and can be potted without pre-etching.

For full descriptions of the appropriate tools see separate wire handling guide.

Typical properties

Temperature rating (Tin plated conductor)	-65°C to +150°C
(Silver or nickel plated conductor)	-65°C to +200°C
Thermal endurance	200°C, 10000 h
Scrape abrasion (BSG 233)	>100 cycles at 150°C
Flexing endurance (Boeing BSS 7324)	>1000 cycles
Voltage rating	600 V
Tensile strength + core elongation	(Airframe wire only) 35 N/mm ² , 125%
Tensile strength + total elongation	(All primary wire) 35 N/mm ² , 75%
Notch propagation BSG 230 0.05 mm notch	Pass
Solder iron resistance (370°C, 1 minute)	Pass
Solderability - Tin plated copper conductor BSG 233 conditions	<0.8 secs to wet
Shrinkage	<1%
Long term water resistance	Will not hydrolyse
Permittivity 1 KHz (ASTM D150)	2.7
Dissipation factor (ASTM D150)	0.001

Environmental performance

Temperature rating

Spec 55 wire and cable is rated for continuous operation from -65°C to +200°C and for short periods at temperatures as high as 400°C.

Mechanical performance

Radiation crosslinking of the Spec 55 insulation significantly improves the following mechanical characteristics; scrape (sharp edges), cross wire abrasion, cut-through resistance and creep resistance.

Solder iron/Overload resistance

Radiation crosslinking ensures that the insulation does not melt at high temperature. As a result Spec 55 wire is resistant to hot solder irons and current overloads which would melt most thermoplastic insulations.

Chemical resistance

Spec 55 is unaffected by all commonly used chemicals, eg. fuels, hydraulic fluids, defluxing agents, cleaners, coolants and de-icers. It also shows excellent resistance to weathering (UV, ozone, pollutants, water).

Space wire

Spec 55 is available in special versions suitable for use in outer space meeting both ESA and NASA requirements for outgassing.

Flammability





Special additives increase the flame retardance of Spec 55 compared to unirradiated ETFE so that it meets the latest high performance tests, eg. BSG 230 vertical test FAR 25.

Electrical arc tracking resistance

Spec 55 insulation demonstrates a total resistance to arc tracking under both wet and dry conditions at aircraft system voltages.

Spec 55

Spec 55 wire & cable: Standard constructions, sizes, strandings, diameters and weights

Conductor	Primary wire	Twisted pair	Screened & jacketed	
			Single	Pair
				

55M - Metric conductor: Equipment/Interconnect wires & cables

Size	Stranding (mm)	55M011X		55M012X		55M111X		55M112X	
		OD (mm)	Weight (g/m)	OD (mm)	Weight (g/m)	OD (mm)	Weight (g/m)	OD (mm)	Weight (g/m)
26	19/0.10	0.81	2.10	1.62	4.32	1.52	6.84	2.46	11.34
24	19/0.12	0.94	2.97	1.87	6.11	1.65	7.84	2.72	13.82
22	19/0.15	1.09	4.20	2.18	8.64	1.78	10.33	3.02	17.70
20	19/0.20	1.29	6.50	2.59	13.38	1.93	13.40	3.43	23.81
18	19/0.25	1.55	9.78	3.09	20.20	2.32	17.86	3.94	32.63
16	19/0.30	1.75	13.67	3.50	28.20	2.43	21.73	4.30	39.72
14	37/0.25	2.18	19.60	4.36	40.50	2.83	29.86	5.21	56.00
12	37/0.32	2.64	30.03	5.28	61.77	3.48	42.42	6.13	80.91

55M - Metric conductor: Airframe wires & cables

Size	Stranding (mm)	55M081X		55M082X		55M111X		55M112X	
		OD (mm)	Weight (g/m)	OD (mm)	Weight (g/m)	OD (mm)	Weight (g/m)	OD (mm)	Weight (g/m)
26	19/0.10	-	-	1.99	5.29	1.52	6.84	2.46	11.34
24	19/0.12	-	-	2.28	6.30	1.65	7.84	2.72	13.82
22	19/0.15	1.29	4.77	2.59	10.08	1.78	10.33	3.02	17.80
20	19/0.20	1.50	6.99	3.00	14.40	1.93	13.40	3.43	23.81
18	19/0.25	1.78	10.73	3.55	22.76	2.32	17.86	3.94	32.63
16	19/0.30	2.02	15.26	3.96	31.44	2.43	21.73	4.30	39.72
14	37/0.25	2.33	21.00	4.83	43.22	2.83	30.46	5.21	56.90
12	37/0.32	2.84	30.50	5.69	61.24	3.48	42.42	6.13	80.91
10	37/0.40	3.45	47.06	6.80	96.94	-	-	-	-

55M - Metric conductor: Light weight equipment wires and cables

Size	Stranding (mm)	55M041X		55M042X		55M141X		55M142X	
		OD (mm)	Weight (g/m)	OD (mm)	Weight (g/m)	OD (mm)	Weight (g/m)	OD (mm)	Weight (g/m)
32	7/0.08	0.46	0.60	0.92	1.24	-	-	-	-
30	7/0.10	0.53	0.90	1.06	1.85	1.18	3.61	1.75	5.51
28	7/0.13	0.61	1.23	1.22	2.54	1.26	4.12	1.87	6.72
26	19/0.10	0.71	1.92	1.42	3.96	1.35	4.92	2.07	8.93
24	19/0.13	0.84	2.84	1.68	5.86	1.49	6.50	2.33	11.54

X = 1 - Tin plated copper.

4 - Silver plated high strength copper alloy.

Recommended for size 24 and smaller in airframe applications.

Extra light weight constructions

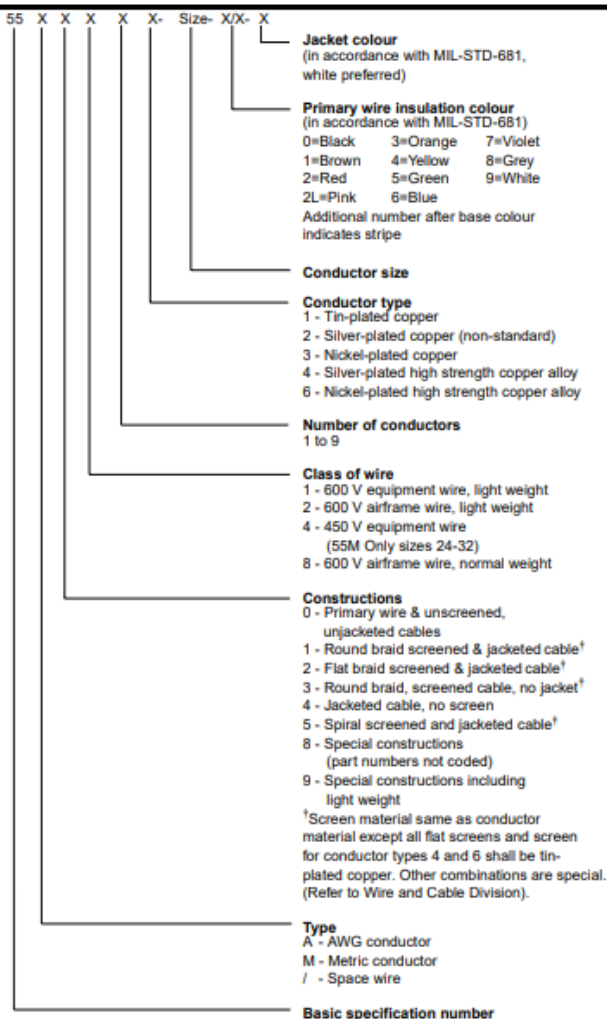
For applications where weight is critical, light weight tight tolerance conductors and insulations are available. These are manufactured using statistical process

control methods and achieve weights that are equal or lighter than the equivalent polyimide/PTFE constructions.

Contact Wire & Cable Division for further details.

Spec 55

Part numbering system



Typical ordering example

3 conductors, red, yellow, blue, 600 volt equipment wire with overall round braid, 20 AWG tinned conductor and white jacket: total part number is 55M1131-20-2/4/6-9.

Ordering information

The standard equipment wires (55M011X etc) are held as stock items between 26 and 20 gauge in a range of colours. Commonly used cables manufactured from these wires, such as screened twisted pairs and triples are also held in stock. The light weight equipment wire (55M041X etc) is also held in a range of colours. The dual-wall airframe wire is held as a stock item with white insulation in 24-16 gauge and 8-0 gauge for power wire. Other constructions and certain designed cables are available on request.

Raychem and Spec 55 are trademarks of Raychem Corporation.

All of the above information, including illustrations, is believed to be reliable. Users, however, should independently evaluate the suitability of each product for their application. Raychem makes no warranties as to the accuracy or completeness of the information and disclaims any liability regarding its use. Raychem's only obligations are those in the Standard Terms and Conditions of Sale for this product and in no case will Raychem be liable for any incidental, indirect or consequential damages arising from the sale, resale, use or misuse of the product. Raychem Specifications are subject to change without notice. In addition Raychem reserves the right to make changes in materials or processing, without notification to the Buyer, which do not affect compliance with any applicable specification.

Johtimien mitoitus taulukko

Wiring Fundamentals

Wire Gauge (AWG) vs Current Rating



Wire Specification

- M22759/16
- Insulation Material: Tefzel
- Conductor: Tin Plated Copper
- Voltage Rating: 600 V
- Maximum Temperature: 150 °C

Wire Gauge (AWG)	Current Rating at 80°C ambient [A]*	Current Rating at 100°C ambient [A]*	Resistance [ohm/m]	Resistance [ohm/1000 ft]
24#	4.5	4	0.071	22
22#	6	5	0.045	14
20#	8	6	0.028	8.5
18#	11	9	0.018	5.5
16#	15	12	0.014	4.3
14#	22	18	0.009	2.7
6#	90†	75†	0.0015	0.44
4#	120†	100†	0.0009	0.28
2#	150†	120†	0.0006	0.18

*The current ratings above are an indication only and will not apply in all circumstances. The actual maximum current rating is determined by the maximum allowed temperature for the wire (150 °C). The temperature of the wire is affected by many factors including the temperature of adjacent wires, how the wires are bundled and covered, the ambient temperature and the current.

†Current rating for a single wire in free air

Recommended Wire Gauge	Output
24# to 20#	8 Amp Outputs
20# to 16#	20 Amp Outputs
4# to 2#	Battery Positive