

Olli Jokela

TOTEUTTAMISKELPOISUUSSELVITYS SÄHKÖISESTÄ OHJAUKSESTA ISOBUS TIM TOIMINNOLLA

Diplomityö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Maaliskuu 2026

TIIVISTELMÄ

Olli Jokela: Toteuttamiskelpoisuus selvitys sähköisestä ohjauksesta ISOBUS TIM-toiminnolla
Diplomityö
Tampereen yliopisto
Automaatiotekniikan maisteriohjelma
Maaliskuu 2026

Diplomityössä tutkittiin sähköisen ohjausjärjestelmän, eli steer-by-wire-järjestelmän, toteuttamiskelpoisuutta maa- ja metsätaloustraktoreissa ISOBUS-tiedonsiirtoväylän Tractor Implement Management (TIM)-toimintojen avulla. Diplomityössä selvitettiin mahdollisuutta ulkoisen ohjauksen ja ajonopeuden asetusarvojen muuttamiseen ISOBUS TIM-toiminnoilla, käyttäen ISOBUS AUX-N-ohjainlaitetta ohjausarvon tuottamiseksi.

Järjestelmän tavoitteena oli kehittää ergonominen ja kätevä ohjaustapa maa- ja metsätalouksikäytössä oleviin traktoreihin. Diplomityössä järjestelmän esimerkkikäyttökohteena toimi traktorin ja metsäperävaunun yhdistelmän ohjaaminen.

Diplomityössä tarkasteltiin pääosin Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiiviä 2006/42/EY sekä Agricultural Industry Electronics Foundation (AEF) guideline-dokumentteja. Näiden perusteella selvitettiin mahdollisia rajoitteita tällaiselle järjestelmälle sekä järjestelmän turvallisuus- ja vaatimustenmukaisuusvaatimuksia.

Diplomityön tuloksena todettiin järjestelmän olevan teknisesti mahdollinen. Vaatimustenmukaisuuden osoittamiseksi järjestelmästä kuitenkin tulisi tehdä riskien arviointi. AEF:n dokumentaatio määrittelee vähimmäisturvallisuusvaatimuksia TIM-toiminnoille. Konedirektiivin vaatimukset tulee osoittaa täytetyksi soveltuvin tavoin, esimerkiksi noudattamalla harmonisoituja standardeja. Työssä tehtiin myös proof-of-concept järjestelmästä, jolla pystyttiin varmistamaan tekniikan toimivuus. Jatkokehityksen kannalta järjestelmää tulisi kuitenkin testata oikeassa laitteistossa.

Avainsanat: ISOBUS, TIM, Steer-by-wire, Functional safety

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

ABSTRACT

Olli Jokela: Feasibility study of a steer-by-wire system using ISOBUS TIM functionality
Master's thesis
Tampere University
Master's Degree Programme in Automation Engineering
March 2026

The master's thesis investigated the feasibility of implementing an electronic steering system, i.e., a steer-by-wire system, for agricultural and forestry tractors, using the Tractor Implement Management (TIM) functions of the ISOBUS communication network. The thesis studied the possibility of modifying external guidance and vehicle speed setpoint values with ISOBUS TIM functions, using the ISOBUS AUX-N control device to generate the control values.

The potential limitations of such a system and the requirements related to the safety and compliance of the device were also investigated. The aim of the system was to develop an ergonomic and convenient steering method for tractors used in agricultural and forestry applications. An example use case was the steering of a tractor and a forestry trailer combination. The thesis mainly researched Directive 2006/42/EC of the European Parliament and of the Council, as well as the guideline documents of the Agricultural Industry Electronics Foundation (AEF). These were used to determine possible limitations to such a system, as well as what is required for the safety and conformity of such a device.

As a result of the thesis, the system was found to be technically feasible. However, to show compliance, a risk assessment of the system would be required. AEF documentation defines minimum safety requirements for TIM functions. The requirements of the Machinery Directive must be proven to be fulfilled through appropriate means, for example, by following harmonized standards. In the thesis, a proof-of-concept system was developed to verify the functionality of the system. For further development, the system should be tested in an actual machine environment.

Keywords: ISOBUS, TIM, Steer-by-wire, Functional safety

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin Originality Check service.

TEKOÄLYN KÄYTTÖ OPINNÄYTTEESSÄ

Opinnäytteessäni on käytetty tekoälysovelluksia:

- Ei
- Kyllä

Ilmoitukseni mukaan olen käyttänyt opinnäytteessäni tutkielmaprosessin aikana seuraavia tekoälysovelluksia:

Tekoälysovellusten nimet ja versiot: Microsoft Copilot, Grok 4

Käyttötarkoitus: Tekoälyä on käytetty käännöksiin, kieliasun tarkastamiseen, kirjoitusvirheiden etsimiseen, sekä malleille on esitetty tarkentavia kysymyksiä mahdollisista epäselvistä aiheista.

Osiot, joissa tekoälyä on käytetty: Kaikki

Olen tietoinen siitä, että olen täysin vastuussa koko opinnäytteeni sisällöstä, mukaan lukien osat, joissa on hyödynnetty tekoälyä, ja hyväksyn vastuun mahdollisista eettisten ohjeiden rikkomuksista.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö tehtiin Tampereen yliopiston automaatiotekniikan älykkäiden työkoneiden pääaineen lopputyönä. Diplomityö tehtiin Technion Oy:lle. Technion Oy on suomalainen liikkuviin työkoneisiin ohjausjärjestelmiä valmistava yritys, joka on osa saksalaista HYDAC-ryhmää.

Haluan kiittää Technionin puolelta työtä ohjannutta Tommi Sairoa, sekä koko yritystä diplomityön mahdollistamisesta itselle mielenkiintoisen aiheen ympäriltä. Koulun puolelta haluan kiittää työn tarkastajia Jouni Mattilaa sekä Pauli Mustalahtea.

Tampereella, 2.3.2026

Olli Jokela

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. TYÖKONEIDEN OHJAUSJÄRJESTELMÄT	3
2.1 Ohjaustyypit.....	3
2.2 Ohjauksen toteutus.....	4
2.3 Steer-by-Wire	5
3. TIETOLIIKENNEVÄYLÄT	8
3.1 CAN-Väylä.....	8
3.1.1 Viestien rakenne	9
3.1.2 Viestien käsittely	13
3.2 SAE J1939	15
4. ISOBUS	18
4.1 Toiminnot.....	18
4.2 TIM	20
4.2.1 Autentikointi	22
4.3 Agricultural Industry Electronics Foundation	26
4.3.1 Vaatimustenmukaisuustestaus.....	27
5. KÄYTÄNNÖN SOVELLUS JA VAATIMUKSET	30
5.1 Sovelluskonsepti.....	30
5.2 Käyttöympäristö.....	33
5.3 Konedirektiivin vaatimukset	33
5.4 Muut vaatimukset	38
5.4.1 Toiminnallinen turvallisuus	38
5.4.2 ISO-25119	44
5.4.3 Tietoturvallisuus	45
6. TESTIJÄRJESTELMÄ.....	47
7. JATKOKEHITYS	53
8. YHTEENVETO.....	55
LÄHTEET	57

LYHENTEET JA MERKINNÄT

AEF	Agricultural Industry Electronics Foundation
AOAS	Advanced Operator Assistance System
CA	Certificate Authority (Luotettu taho joka voi allekirjoittaa ja jakaa sertifikaatteja)
CAN	Controller Area Network
Client	ISOBUS järjestelmän työkoneen ohjausyksikkö
CT	Conformance Test (AEF:n vaatimustenmukaisuuden osoittamiseen laadittu automaatti testaus ISOBUS laitteille)
ECDH	Elliptic Curve Diffie-Hellman Key Exchange
FwA	Fullweight Authentication
GNSS	Global Navigation Satellite System
IBBC	Implement Bus Breakaway Connector
ISO	International Organization for Standardization
LwA	Lightweight Authentication
Operaattori	Työkoneen käyttäjä ja Traktorin kuljettaja
OPTO	Operator Presence Timeout
Palvelin	ISOBUS järjestelmän traktorin ohjausyksikkö
POC	Proof of Concept
RAM	Random Access Memory
ROM	Read Only Memory
SAE	Society of Automotive Engineers
SBW	Steer-By-Wire
TIM	Tractor Implement Management
OSI	Open Systems Interconnection
Ulkoinen ohjaus	External guidance, Traktorin kääntösäteen ohjaaminen jonkun muun laitteen, kuin traktorin ohjauspyörän toimesta

1. JOHDANTO

ISOBUS on yleistyvä tiedonsiirtoprotokolla maa- ja metsätaloustraktorien ja niihin kytkettävien työkoneiden välillä. ISOBUS mahdollistaa koneiden välisen standardoidun tiedonsiirron, joka mahdollistaa erilaiset valmistajariippumattomat koneyhdistelmät. ISOBUS mahdollistaa työkoneiden saumattoman vaihtamisen traktorien välillä, sillä mitä tahansa konetta on mahdollista käyttää traktorin käyttöliittymältä, poistaen tarpeen erillisten laitteiden purkamiseen ja uudelleen asentamiseen traktoreiden välillä.

Yksi ISOBUS:n mahdollistamista toiminnoista on TIM (engl. Tractor Implement Management). TIM on ISOBUS:n tukema kehittynyt operaattoria avustava automaatiotoiminto, jolla mahdollistetaan kahdensuuntainen tiedonsiirto työkoneen ja traktorin välille. TIM mahdollistaa esimerkiksi ajonopeuden, ulkoisen ohjauksen, tai voimanulosottoakselin ohjaamisen työkoneen puolelta, kun perinteisesti nämä asiat ovat traktorin hallitsemia.

Diplomityön aiheena on sähköinen ohjaus ISOBUS TIM -toiminnolla. Diplomityön idea on ohjata ISOBUS:n TIM-toiminnon nopeuden ja ulkoisen ohjauksen arvojen muutosta ISOBUS AUX-N-toiminnolla. Täten voisi asettaa haluttavat ohjattavat signaalit AUX-N-toiminnolla traktorin omaan joystick-ohjaimeen ja käyttää tätä steer-by-wire-järjestelmän ohjausarvon tuottamiseen. Nopeuden muutoksella on tarkoitus saada aikaan ajosuunnan vaihto, jotta suunnanvaihto voidaan tehdä käyttämättä suunnanvaihtokahvaa. Laitteella pyrittäisiin mahdollistamaan traktorin ergonominen ja käytännöllinen ohjaaminen metsäolosuhteissa. Diplomityö keskittyy joystick-ohjaukseen metsätraktorin ja metsäpevävaunun yhdistelmän kanssa, mutta se ei kuitenkaan rajoitu pelkästään metsäkäyttöön.

Diplomityön tarkoituksena on tehdä toteuttamiskelpoisuus selvitys tällaisesta laitteesta. Tarkoituksena on selvittää ISOBUS TIM -toiminnon mahdollistamat funktiot ja niiden mahdolliset rajoitteet. Diplomityössä myös selvitetään tuotteen vaatimuksia lainsäädännön ja muiden tahojen, kuten AEF:n osalta. AEF toimii valvovana organisaationa ISOBUS-kehityksessä ja sen toimintojen sääntelyssä. Kokonaisuutena siis selvitetään, onko tällainen tuote mahdollista toteuttaa, millä ehdoilla ja onko se järkevää.

Työhön sisältyy myös proof-of-concept laitteesta, jolla voidaan testata järjestelmän mahdollisuuksia käytännössä sekä havaita mahdollisia haasteita. Diplomityön selvitysten perusteella voidaan muodostaa lähtökohtainen arvio siitä, onko steer-by-wire-järjestelmä ISOBUS:n TIM-toimintoa käyttäen toteuttamiskelpoinen.

Työn sisällön rajaamiseksi soveltuvaan laajuuteen diplomityöksi, työssä ei käsitellä laitteen kaupallistamiseen liittyviä asioita tai järkevyyttä muutoin kuin mahdollisten teknisten käytettävyyden rajoitteiden mukaan. Työssä ei myöskään tehdä riskienarviointia laitteelle, eikä sen syvällisempää turvallisuusanalyysiä tai sovelluskohtaisia turvatoimintojen vaatimuksia. Työssä ainoastaan selvitetään mahdollisuuksia toteutukselle ja oleellisia vaatimuksia, jotka ovat välttämättömiä ehtoja TIM steer-by-wire -toteutukselle, riippumatta käyttökohteesta.

Työssä ensimmäisenä esitellään erilaisia koneissa käytettyjä ohjausjärjestelmiä sekä niiden toimintaa. Tämän jälkeen esitellään työkoneissa käytettyjen CAN- sekä J1939-tietoliikenneväylien toimintaa. Tietoliikenneväylien jälkeen käydään läpi ISOBUS:n toimintoja ja AEF:n toimintaa ja tehtäviä. Tämän jälkeen esitellään työn kohteena oleva käytännön sovellus sekä sille asetetut vaatimukset toiminnalliselle turvallisuudelle. Lopuksi vaatimustenmäärittelyn ja testijärjestelmän perusteiden saatujen tulosten pohjalta pohditaan jatkokehityksen kohteita sekä viimeisenä on yhteenveto diplomityöstä.

2. TYÖKONEIDEN OHJAUSJÄRJESTELMÄT

Luvussa esitellään yleisesti työkoneissa käytettäviä ohjausjärjestelmiä. Ensimmäisessä kappaleessa käydään läpi erityyppiset tavat ohjata ajoneuvoa, niiden toiminta sekä esimerkkejä niiden toteutuksista. Toisessa kappaleessa kerrotaan erilaisista ohjausjärjestelmän toteutustavoista ja viimeisessä kappaleessa esitellään sähköistä ohjausta ja sen eri toteutuksia.

2.1 Ohjaustyypit

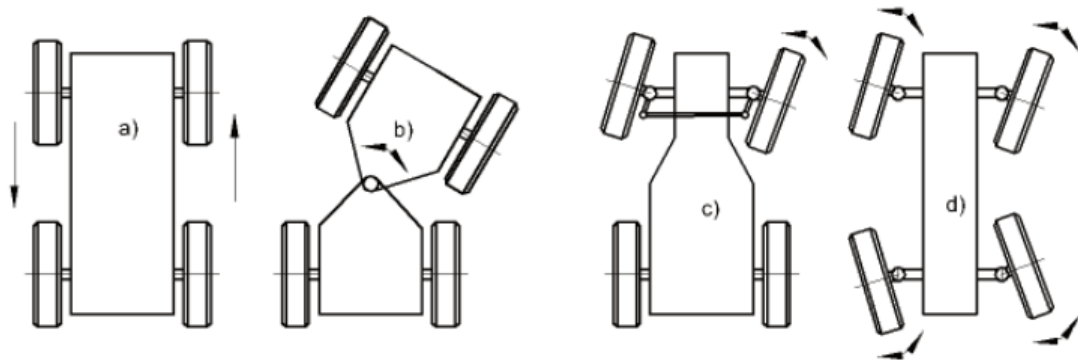
Tässä kappaleessa käsitellään useimmiten traktoreissa tavattavia ohjaustapoja. Ehdottomasti yleisin tapa ohjata traktoria on pyöräohjaus. Pyöräohjauksessa etuakselin, takaakselin tai molempien akselien pyörät kääntyvät. Pyörät kääntyvät traktorin runkoon nähden, jolloin traktori lähtee ohjautumaan pyörien osoittamaan suuntaan. Yleisin pyöräohjaustapa on etupyöräohjaus. Etupyöräohjauksen rakenteita voi olla monenlaisia, mutta useimmiten ohjaus on Ackermann-tyyppinen. Tällöin etupyöristä käännettyyn suuntaan nähden sisempi kääntyy suuremmassa kulmassa kuin ulompi rengas. Tämä johtuu siitä, että kääntyessä ulomman renkaan tekemä ympyrän halkaisija on suurempi, kuin sisemmän. Ackermann-tyyppisestä ohjauksesta poiketen ohjaustapa voi olla myös rinnakkainen ja käänteinen, joissa pyörät kääntyvät samassa kulmassa taikka ulompi kääntyy enemmän kuin sisempi [37]. Pyöräohjaustapoja on myös taka- ja nelipyöräohjaukset. Takapyöräohjaus on usein käytössä leikkuupuimureissa tai trukeissa ja nelipyöräohjausta näkee esimerkiksi kurottajissa [32].

Runko-ohjaus (engl. articulated steering) tarkoittaa ohjausmenetelmää, jossa renkaat eivät itsessään käännä. Koneen runko on jaettu kahteen osaan, jotka kääntyvät nivelen ympärillä. Runko-ohjauksessa renkaiden sijasta kone taittuu keskeltä, kääntäen etuakselia suhteessa taka-akseliin. Tällöin kone ohjautuu etuakseliin renkaiden osoittamaan suuntaan. Tämä on yleistä pyöräkuormaajissa, mutta joitakin traktoreitakin ohjataan runko-ohjauksella [32]. Runko-ohjaus on huomattavasti yleisempää suuremman kokoluokan traktoreissa, kuten yhdysvaltalaisen John Deere 9R- ja 9RX-sarjoissa tai Case Steiger-sarjassa. Suomalaisen traktorivalmistajan Valtran X-sarja on runko-ohjauksen ja etupyöräohjauksen yhdistelmä, eli siinä kääntyy pyörät sekä runko keskeltä nivelestä.

Liukuohjaus (engl. skid steering) tarkoittaa ohjaustapaa, missä mikään osa koneesta ei käännä minkään nivelen ympäri, vaan konetta käännetään sen eri puolien pyörien tai

telojen liikuttamisella eri nopeutta. Tämä on yleistä pienen kokoluokan pyöräkuormaajissa sekä kaivinkoneissa [32]. Muun muassa suomalainen konevalmistaja Avant Tecno on valmistanut liukuohjattuja pyöräkuormaajia 300-sarjassaan. Traktoreissa liukuohjausta näkee taas suuremman kokoluokan telavetoisissa koneissa.

Kuva 1 on esitetty erityyppisiä ohjaustapoja. Kuvassa kohta a esittää liukuohjausta, b runko-ohjausta, c etupyöraohjausta ja d nelipyöraohjausta.



Kuva 1. Ohjaustyyppejä kuvattuna [13].

2.2 Ohjauksen toteutus

Perinteisesti ajoneuvojen ohjaus on toteutettu siten, että ohjainlaitteella on mekaaninen tai hydraulinen yhteys ohjattavaan elementtiin. Autoissa ohjaus on yleensä mekaanisesti yhteydessä renkasiin. Renkaiden liikuttaminen käsivoimin, pelkällä ohjauspyörällä on kuitenkin raskasta, etenkin paikallaan ollessa, joten perinteisiä ohjausjärjestelmiä on yleensä tehostettu, ettei ohjaus olisi niin raskasta kuljettajalle. Tehostettuja järjestelmiä ovat esimerkiksi hydraulisesti, sähköhydraulisesti ja sähköisesti tehostetut ohjaukset. Näissä kaikissa kuitenkin kuljettajaa vain avustetaan kääntämään ohjaavia pyöriä, mutta ohjainlaite on kuitenkin kytköksissä ajoneuvoa ohjaaviin elementteihin [61].

Hydraulisesti tehostetussa järjestelmässä ajoneuvon voimanlähteellä pyöritetään hydraulipumppua, joka tuottaa painetta ohjaamista varten. Ajoneuvon rattia pyöritettäessä ohjausakseli pyörii ja siihen kiinnitetty ratas siirtää vastakappaleena olevaa hammastankoa sivuttain, joka kääntää renkaita. Mekanismeja on muitakin kuin hammastanko, mutta se on yleisesti käytetty tekniikka. Hammastangon liikuessa, avautuu venttiili, mikä ohjaa pumpulta tulevan nesteen ohjaussynterille. Sylinteri tuottaa voimaa avustaakseen hammastankoa sivusuuntaisessa liikkeessä. Sähköhydraulisessa ohjaustehostimessa hydraulipumppua pyöritetään sähkömoottorilla. Pumpun tuottoa voidaan säädellä ajoneuvon

nopeuden ja ratin pyörimisnopeuden mukaan. Järjestelmässä on oltava anturointi nopeudelle sekä ohjausakselin kulmalle ja näiden lisäksi ohjausyksikkö, joka pääättelee, miten pumppua ohjataan. Täysin sähköisesti tehostetussa ohjausjärjestelmässä suoraan ohjausakselia avustetaan pyörimään sähkömoottorilla. Moottorin ohjausta voidaan päätellä samoin kuin sähköhydraulisessa järjestelmässä [61].

Työkoneissa ohjaaminen on suurien massojen vuoksi huomattavasti autoa raskaampaa ja useimmiten ohjauksessa ei ole mekaanista yhteyttä ohjattaviin elementteihin, vaan ohjaus on toteutettu usein täysin hydraulisesti. Niin kutsuttu hydrostaattinen ohjaus on yleensä toteutettu käyttäen orbitrol-ohjausventtiiliä. Tällöin ratti ja ohjausakseli ovat yhteydessä ohjausventtiin akseliin. Rattia käännettäessä ohjausventtiin akseli kääntyy, jolloin se ohjaa hydraulioöljyä venttiin sisäiselle hammasrengaspumpulle, jonka pyörimisellä säädellään virtauksen määrää renkaita tai niveltä kääntäville sylintereille. Vaikkei orbitrol-ohjauksessa ole mekaanista yhteyttä ohjattaviin elementteihin, on ohjausventtiin hammasrengaspumppua mahdollista pyörittää ilman avustavaa painetta, jolloin pumppu tuottama tilavuusvirtaus kääntää renkaita. Pyörittäminen on raskasta, mutta mahdollista ilman muuta koneen toimintaa, samoin kuin mekaanisesti hammastangon liikuttaminen on mahdollista ilman tehostavaa painetta tai sähkömoottoria [32].

2.3 Steer-by-Wire

Sähköinen ohjaus tai Steer-By-Wire (SBW)-tekniikka tarkoittaa ohjausmenetelmää, jossa ohjattavaan elementtiin ei ole ohjainlaitteelta lainkaan mekaanista tai hydraulista kytkentää. Ohjaus toteutetaan sähköisesti käyttäen anturointia ja ohjausyksiköitä. SBW-ohjauksella voidaan saavuttaa monia etuja mekaaniseen tai hydrauliseen ohjaukseen verrattuna. SBW-ohjaus mahdollistaa muun muassa erilaiset automaattiset toiminnot ohjaukselle ja se on kevyt ohjata. Järjestelmä ei myöskään vie kokonaisuutena niin paljon tilaa ja se mahdollistaa ohjausjärjestelmien osien sijoittamisen mihin tahansa konetta, ilman huomattavaa lisäkustannusta. SBW-ohjauksessa ohjainlaitteen asento tai asennon muutos välitetään ohjausyksikölle, joka ohjaa esimerkiksi venttiiliä tai pumppua käyttävää moottoria, renkaiden ohjauksen tuottamiseksi. By-wire-järjestelmiä on laajalti käytössä muualla kuin ohjauksessa, esimerkiksi drive-by-wire-järjestelmä, jossa kaasun tai ajopolkimen asento tunnustetaan anturilla ja sen perusteella ohjataan moottoria, perinteisen kaasuttimen läppien avaamisen vaijerilla sijasta. By-wire järjestelmiä on ollut jo pitkään käytössä, muun muassa fly-by-wire tekniikka on ollut jo vuosikymmeniä käytössä lentokoneissa, joissa ohjaus on toteutettu täysin sähköisesti, ilman mekaanista varajärjestelmää [35].

SBW-järjestelmien toteutuksia on pääasiassa kahdenlaisia. Hybridiohjaus ja täysin sähköinen ohjaus. Hybridiohjauksessa ohjaus on mahdollista tehdä pääasiassa perinteisellä ohjaustavalla, kuten orbitrol-järjestelmällä, ja siihen lisätään rinnakkain toimiva sähköinen ohjausventtiili. Traktoreissa käytetään usein hybridiohjausjärjestelmää. Ohjauksen voi toteuttaa myös täysin sähköisesti, ilman perinteistä ohjausta. Työkoneissa täysin sähköisesti ohjattuja järjestelmiä on toteutettu muun muassa metsäkoneissa, pyöräkuormaajissa, trukeissa ja leikkuupuimureissa. Näissä monesti ratti on korvattu muulla tavalla ohjata konetta. Näillä järjestelmillä tavoitellaan esimerkiksi ergonomisuutta, työn tehokkuuden parantamista ja parempaa näkyvyyttä ohjaamosta, poistamalla ratti näkökentästä. Tieliikennekäytössä olevia koneita on harvemmin toteutettu täysin SBW-järjestelminä raskaan lainsäädännön ja turvallisuuskysymysten takia. SBW-järjestelmiä on käytetty traktoreissa pääosin redundanttisina järjestelminä tai hybridiohjausjärjestelminä [31].

Olemassa olevia SBW-järjestelmiä on pääasiassa toteutettu traktoreihin automaattiohjausjärjestelmien ja sähköisten ohjauspyörien muodossa. Pääasiassa automaattiohjausjärjestelmätyyppejä on neljää erilaista. Joko traktorin olemassa olevaa ohjauspyörää pyöritetään GNSS-signaalin perusteella siihen kiinnitettävän erillisen sähkömoottorin avulla tai traktorin ohjauspyörä korvataan moottoroidulla ohjauspyörällä, jota voi käyttää joko perinteisesti tai ohjauspyörä voi pyöriä GNSS-signaalin perusteella. Nämä vaihtoehdot ovat soveltuvia kaikkiin koneisiin riippumatta muista tekijöistä, sillä ne käyttävät olemassa olevaa ohjausrakennetta ohjaamiseen ja vaativat ainoastaan lisäanturointia. Kolmas vaihtoehto on liittää työkoneen hydraulijärjestelmään erillinen venttiili, jota voidaan ohjata sähköisesti. Tämä toimii usein rinnakkain olemassa olevan järjestelmän kanssa. Näitä järjestelmiä on käytännössä tarjolla jokaisella hydraulikkakomponentti valmistajalla. Viimeinen vaihtoehto on käyttää olemassa olevaa sähköohjattua venttiiliä. Sähköohjattuja venttiilejä on uudemmissa traktoreissa usein, sillä valmistajat mahdollistavat tehdasasenteisia automaattiohjausjärjestelmiä sekä muita ohjausta avustavia järjestelmiä. Monesti traktorin voi hankkia valmiudella automaattiohjaukselle, jolloin ohjausventtiili on sähköisesti ohjattava, taikka järjestelmässä on erillinen sähköohjattu venttiili jo tehtaalta lähtiessä. Tähän venttiiliin liitytään traktorin omalta väylältä ja sille annetaan ohjausarvoa.

Sähköisen ohjauspyörän esimerkkinä Valtra tarjoaa lisävarusteena TwinTrack taakseajolaitteistoa, joka toimii rinnakkaisena ohjausjärjestelmänä todelliselle ohjauspyörälle. Vanhemmissa malleissa taakseajolaitteen ohjauspyörä ei ollut täysin sähköinen, mutta uudemmissa malleissa se on. Ohjausventtiilin kannalta ei ole merkitystä, mistä lähteestä ohjausarvo annetaan. Oli se sitten sähköinen ohjauspyörä, joystick tai GNSS-

signaali. Täten joystick-ohjausta voidaan ajatella kuten sähköistä ohjauspyörää. Joystick-ohjausta pääosin tarjotaan vain tehdasasenteisena tai erillisellä venttiilillä toteutettuna. Jälkiasennettavia joystick-ohjausjärjestelmiä, jotka eivät vaadi muutoksia traktorin hydraulikka järjestelmään, tarjoavat esimerkiksi Fendt ergosteer-ohjaimella ja Gritech omalla toteutuksellaan. Näissä Fendt on tehnyt oman valmistajakohtaisen ratkaisun, jolloin valmistajana se sallii joystick-ohjauksen ISOBUS-väylällä. Tosin ergosteer ei ole ISOBUS-laite, vaan se vain yhdistetään traktorin ISOBUS-liittimeen. Gritech:n järjestelmässä taas asennetaan moottori, joka kiinnitetään traktorin ohjauspyörään. Tätä moottoria ohjataan joystickillä, jolloin se kääntää ohjauspyörää, kääntäen traktorin renkaita. Gritech:n järjestelmä on täysin universaali, eikä se riipu valmistajasta mitenkään. Fendt ergosteer soveltuu ainoastaan ennalta määrättyihin Fendt traktoreihin. Tässä Fendt käyttää ohjausjärjestelmään integroitua sähköistä ohjausventtiiliä tai erillistä sähköohjattua ohjausventtiiliä ja Gritech taas automaattiohjauksen ratkaisuja muistuttavaa erillistä sähköistä ohjausmoottoria [10][14][57].

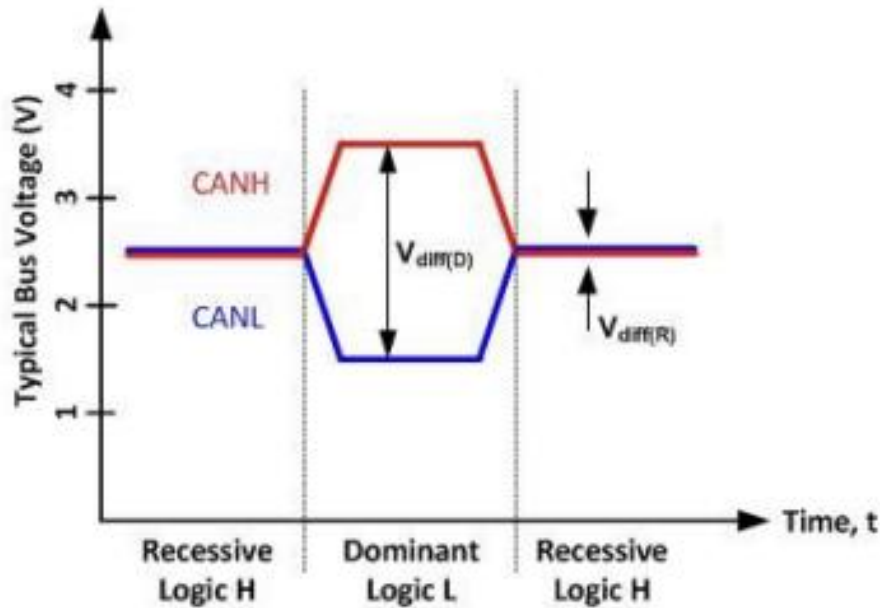
3. TIETOLIIKENNEVÄYLÄT

Tässä luvussa esitellään oleelliset väylät työkoneiden tietoliikenteen kannalta. Kappaleissa esitellään CAN-väylä, joka toimii pohjana muille standardisoiduille korkeamman tason väylille. CAN-väylästä käydään läpi sen teknistä toteutusta ja viestiliikenteen rakennetta, jonka jälkeen avataan CAN-väylään pohjautuvia ratkaisuja. Korkeamman tason väyliä, joita käydään läpi, on SAE J1939, joka toimii pohjana myöhemmin esiteltävälle standardoidulle ISOBUS-väylärakenteelle.

3.1 CAN-Väylä

CAN-väylästä on eri versioita. CAN 1.0, CAN 2.0, Flexible Data-Rate eli CAN FD ja CAN XL. CAN FD ja XL ovat uudempia versioita, joilla on pyritty saamaan suurempia datamääriä liikkumaan väylällä. CAN 1.0 on alkuperäinen CAN-protokolla ja CAN 2.0 on uudempi jatkettulla tunnisteella oleva protokolla. Tässä kappaleessa keskitytään CAN 2.0:n toteutukseen, sillä se on yleisesti käytössä oleva versio [15].

CAN-väylä määrittää OSI-mallin kaksi alinta kerrosta, fyysinen kerros ja siirtoyhteyseros. Fyysinen kerros on määritelty standardissa ISO 11898–2 ja siirtoyhteyseros standardissa 11898–1. Fyysisessä kerroksessa määritellään käytettävien laitteiden ominaisuuksia ja vaatimuksia, kuten kaapelien tyypit, signaalien ominaisuudet ja siirtonopeus (engl. baud rate). CAN-väylä koostuu parikierrretystä kaapelista, jossa on CAN high- ja CAN low-johtimet. CAN-väylän signaali toimii jännite-erolla, joka lasketaan high- ja low-johtimien jännitteistä. Väylän jännitteenä on noin 1,5–3,5 voltia. Signaali on mahdollista olla kahdessa eri tilassa, joita on hallitseva (engl. dominant) ja väistävä (engl. recessive). Molempien johtimien jännite on väistyvässä tilassa noin 2,5 V, jolloin jännite-ero johtimien välillä on pieni. Hallitsevassa tilassa CAN high on 3,5 V ja CAN low on 1,5 V, jolloin johtimien välinen jännite-ero on noin 2 V. Väylän tila tunnistetaan hallitsevaksi, jos johtimien välinen jännite-ero on suurempi kuin 0,9 V, ja väistyväksi, jos ero on pienempi kuin 0,5 V. Kuva 2 on esitelty signaalin muodot hallitsevassa ja väistyvässä tilassa [22].



Kuva 2. CAN-väylän signaalimuoto [22].

CAN-väylän siirtonopeus rajoittuu standardin mukaan 1 Mbit/s. Käytettävän kaapelin pituus on nopeudesta riippuvainen, sillä lähetetyn bitin on välityttävä kauimmaiselle solmulle ja takaisin, ennen kuin sitä luetaan. Tämä rajoittaa siirtonopeutta signaalin etenemisnopeuden mukaan johtimia pitkin. Esimerkiksi usein käytettyä 250 kbit/s siirtonopeutta on käytettävä maksimissaan 200 metriä pitkässä väylässä. CAN-väylä tulee päättää käyttäen päätevastuksia. Standardissa määritellään 120 ohmin vastukset, jotka kytketään CAN H- ja CAN L-johtimien välille. 120 ohmia on nimellinen kaapelin impedanssi, joka on määritelty standardissa. Kytkemällä 120 ohmin vastus johtimien välille, vältetään signaalien heijastumista väylän päissä, sekä varmistetaan oikeelliset jännitetasot [56][28].

Siirtoyhteyskerroksessa määritellään väylällä kulkevalle datalle raamit. Esimerkiksi kehyksien formaatit ja virheenkäsittely. CAN-väylän viestit lähetetään broadcast-tyyppisesti väylälle. Tämä tarkoittaa, että kaikki solmut (engl. node) kuulevat kaiken väylällä liikkuvan liikenteen, eikä väylällä voi lähettää viestiä vain yhdelle vastaanottajalle. CAN-väylällä ei siis ole mahdollista asettaa viesteille tiettyä osoitetta, mutta väylällä on kuitenkin mahdollista suodattaa viestejä siten, että solmut voivat reagoida vain oleellisiin viesteihin [56].

3.1.1 Viestien rakenne

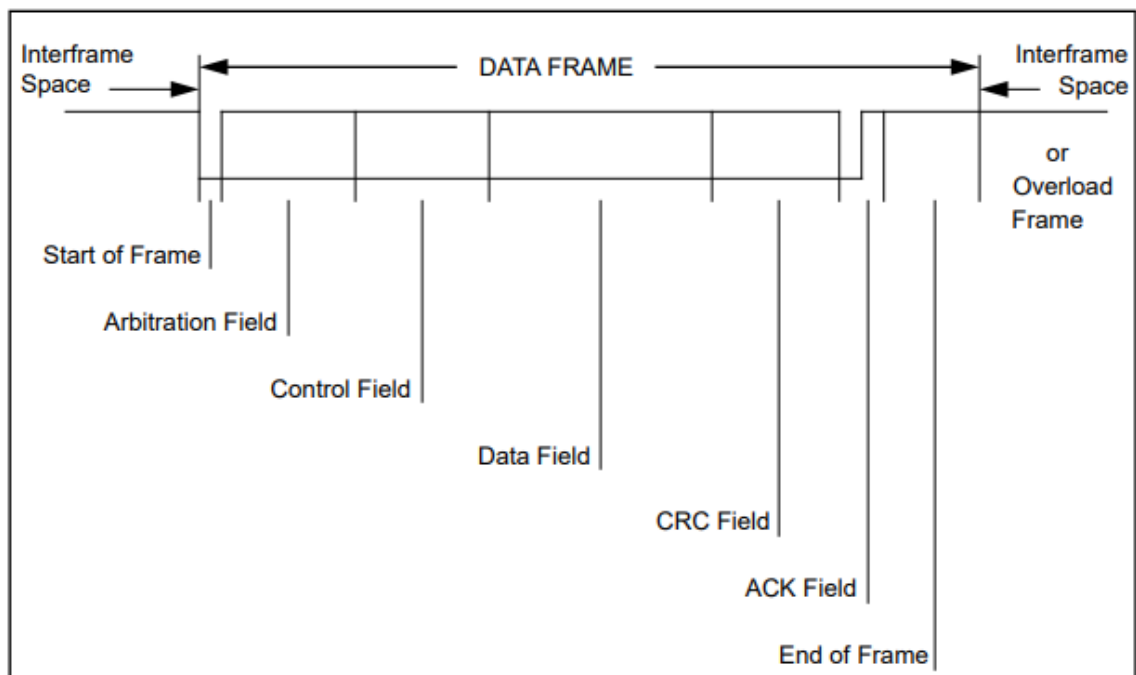
CAN-väylässä erityyppisiä viestikehyksiä on neljä, joita ovat

- Datakehys (engl. Data frame), jossa kuljetetaan dataa lähettäjiltä vastaanottajille.

- Viestikehys datapyyntöä varten (engl. Remote frame), jossa pyydetään lähettämään datakehys, jolla on sama tunniste.
- Virhekehys (engl. Error frame), joka lähetetään väylälle, jos virhe tunnistetaan.
- Ylikuormituskehys (engl. Overload frame), jolla aiheutetaan pidempi viive edeltävän ja seuraavan datakehysten tai datapyyntöä varten lähetetyn kehyksen välille.

CAN-väylässä on kahta eri muotoa tunnisteiden sisältäville viestikehyksille. Tunnisteet ovat datakehyksessä ja datapyyntökehyksessä. Eri muotoja ovat normaalikehys (engl. standard frame), jossa on 11 bittinen tunniste, ja jatkettu kehys (engl. extended frame), jossa on taas 29 bittinen tunniste.

CAN-datakehys koostuu seitsemästä eri kentästä. Näitä ovat kehyksen alku SOF (engl. Start Of Frame), arbitointikenttä (engl. Arbitration Field), kontrollikenttä (engl. Control Field), datakenttä (engl. Data Field), CRC-kenttä (engl. CRC Field), kuittauskenttä (engl. Ack Field) ja kehyksen loppu (engl. End Of Frame) [9]. Kuva 3 on esitetty datakehysten rakenne.

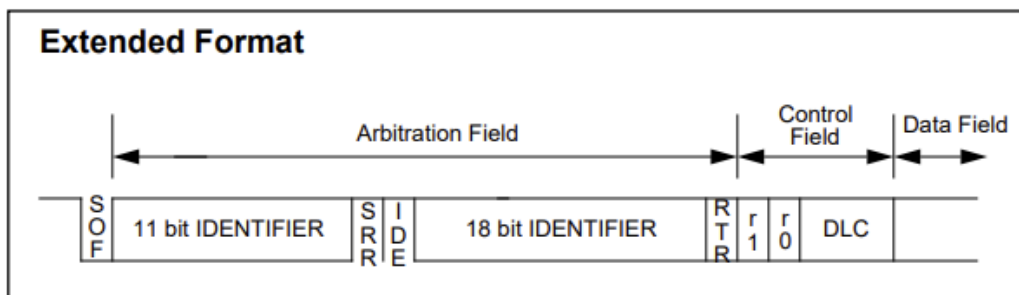
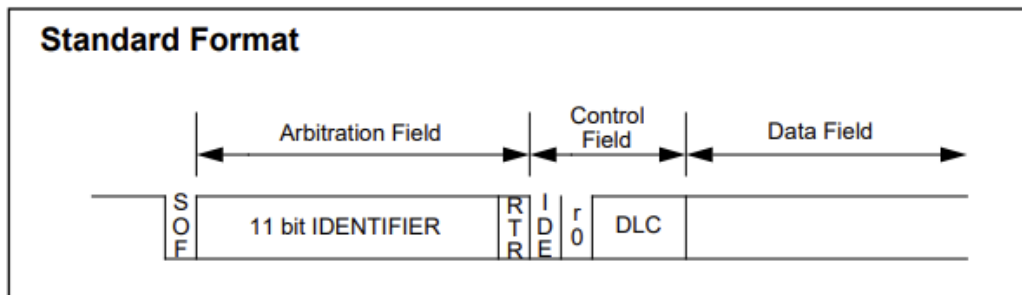


Kuva 3. Datakehysten rakenne [9].

SOF kertoo datakehysten ja kehyksen viestipyntöä varten alun. SOF on yksi hallitseva bitti. Tämä tarkoittaa sitä, että jos väylällä on samanaikaisesti hallitseva ja väistynyt bitti, tilaksi tulee hallitseva [9].

Arbitointikenttään kuuluu tunniste ja RTR-bitti. Tunniste on normaali 11- tai jatkettu 29-bittinen riippuen käytetystä kehyksestä. Vanhemmissa CAN 1.2-1.0 -versioissa on mahdollisuus vain 11-bittiselle tunnisteelle. Tällöin bitit lähetetään järjestyksessä 10:stä nolnaan ja seitsemän merkitsevintä bittiä ei saa olla väistyviä. RTR-bitti eli (engl. remote transmission request bit) on oltava hallitseva, jos kyseessä on datakehys, ja väistyvä datapyyntöä varten olevassa kehyksessä. Jos käytössä on CAN 2.0A versio eli versio, joka tukee vain normaalikehyksiä, niin toiminto on sama, mutta bitit lähetetään tunnisteilla 28–18 eikä 10–0 [9].

Jos käytetään CAN 2.0B -versiota eli versiota, joka tukee sekä normaalia että jatkettua kehystä, ovat normaalikehyksen tunnistebitit numeroitu 28–18. Jatketussa kehyksessä bitit ovat numeroitu 28–0. Jotta voidaan erottaa normaalikehys ja jatkettu kehys, on CAN 1.0–1.2 -versioissa käytetty reservibitti otettu nyt käyttöön. Reservibitit r1 ja r0 ovat olleet osa kontrollikenttää versioissa 1.0–1.2. Näistä r1 on nyt varattu versioihin 2.0A ja 2.0B IDE-bitiksi. IDE-bitti kuuluu osaksi arbitointikenttää tai kontrollikenttää riippuen siitä, onko kyseessä normaali vai jatkettu kehys. IDE-bitti on normaalikehyksessä hallitseva ja jatketussa väistyvä. Jatketussa kehyksessä RTR-bitti on korvattu väistyvällä SRR-bitillä (engl. Substitute Remote Request bit). Jatketussa kehyksessä arbitointikentässä on 11-bittinen tunniste kuten normaalikehyksessäkin, jonka jälkeen on SRR ja IDE. Tässä huomataan, että on kyseessä jatkettu kehys. Näiden jälkeen on vielä jatketun kehyksen loppu tunniste, joka on 18 bittiä [9]. Kuva 4 on esitetty normaalin ja jatketun kehyksen rakenteet.



Kuva 4. Normaali ja jatkettu kehys [9].

Arbitrointikentän jälkeen kehyksessä on kontrollikenttä. Tässä kentässä kerrotaan datan pituus DLC (engl. Data Length Code) ja, riippuen kehyksestä, joko kaksi reservibittiä tai IDE-bitti ja reservibitti. Normaalikehyksessä on mukana IDE-bitti ja r0, kun taas jatkettussa kehyksessä on r1 ja r0. Reservibitit täytyy olla hallitsevia. Datan pituus indikoidaan neljällä bitillä DLC3 – DLC0. Datakentässä voi olla enintään 8 tavua dataa, joiden käyttö ilmaistaan DLC-bittien avulla [9]. Käytettyjen tavujen määrä on Taulukko 1 mukainen, jossa 0 on hallitseva ja 1 väistävä bitti.

Taulukko 1. Käytettyjen tavujen määrittely. Perustuu lähteeseen [9].

Tavujen määrä Datakentässä	Data Length Code			
	DLC3	DLC2	DLC1	DLC0
0	0	0	0	0
1	0	0	0	1
2	0	0	1	0
3	0	0	1	1
4	0	1	0	0
5	0	1	0	1
6	0	1	1	0
7	0	1	1	1
8	1	0	0	0

Kontrollikentän jälkeen seuraa DLC:n määrittelemän pituinen datakenttä, jossa on haluttu data ilmaistuna tavuina nolasta kahdeksaan. Tavujen merkitsevimmät bitit lähetetään ensimmäisinä. Datakentän jälkeen kehyksessä on CRC-kenttä, jota käytetään tarkistussummana. CRC-kenttään (engl. Cyclic Redundancy Check) kuuluu CRC-sekvenssi ja CRC-erotin. Sekvenssi on 15 bittiä pitkä tarkistussumma, jonka jälkeen tulee yksi erottimena toimiva väistävä bitti. Tarkistussumma lähetetään kehyksen mukana, jotta vastaanottava taho voi laskea saman tarkistussumman ja vertailla vastaanotettua ja laskettua summaa keskenään. Tarkistussumma lasketaan ottamalla bitit viestikehyksen alusta CRC-kenttään asti ja lisäämällä siitä saatuun jonoon 15 nollaa. Tämä jaetaan käyttäen XOR-operaatioita. Jako tapahtuu kaavassa 1 esitetyllä polynomilla [9][27].

$$X^{15} + X^{14} + X^{10} + X^8 + X^7 + X^4 + X^3 + 1 \quad (1)$$

Kun bittijono on jaettuna polynomilla, tästä saatava jakojäännös on CRC-kentän sekvenssi, eli tarkistussumma.

CRC-kentän jälkeen kehyksessä on kuittauskenttä, joka on kaksi bittiä pitkä. Kuittauskenttään kuuluu kuittausbitti ja erotinbitti. Lähettävä solmu asettaa molemmat bitit väistyviksi. Kun vastaanottava solmu on vastaanottanut viestin hyväksytysti, se asettaa kuit-

tausbitin hallitsevaksi. Täten lähetävä solmu tunnistaa, että viesti on vastaanotettu onnistuneesti. Tämä toiminta on sama normaaleilla ja jatketuilla kehyksillä [9]. Kuittauksen liittyvä epäkohta on kuitenkin se, että jos väylällä on useampia solmuja vastaanottamassa viestiä, ei voida tietää, ovatko kaikki vastaanottaneet sen onnistuneesti, sillä yhdenkin vastaanottajan kuittausbitin asettaminen hallitsevaksi ylittää muiden, mahdollisesti epäonnistuneesti viestin vastaanottaneiden solmujen asettamat väistyvät bitit [23]. Kuittauskentän jälkeen tulee kehyksen viimeinen kenttä, joka on seitsemän bittiä pitkä väistyvien bittien sarja [9].

Kehys datapyynnölle on rakenteeltaan vastaava kuin datakehys, mutta siinä ei ole lainkaan datakenttää. Kuten myös aiemmin mainittu, RTR-bitti on väistyvä, jos kyseessä on kehys datapyynnölle. Kehyksen DLC-kentässä on pyydettävän datakehysten pituus [9]. Kehyksen idea on pyytää väylältä jotain tuottamaan kyseinen data, jonka kehyksen lähettäjä tarvitsee [9].

Virhekehys koostuu kahdesta kentästä, joita ovat virhelippu (engl. error flag) ja virheerotin. Virhelippuja voi olla aktiivisia tai passiivisia. Aktiivinen virhelippu tarkoittaa kuutta hallitsevaa peräkkäistä bittiä ja passiivinen kuutta väistyvää bittiä. Virheerotin on kahdeksan väistyvää bittiä. Ylikuormituskehys on rakenteeltaan samanlainen kuin virhekehys, eli se koostuu ylikuormituslipusta ja ylikuormituserottimesta. Nämä ovat kuusi ja kahdeksan bittiä pitkiä. Erona on, ettei ylikuormituslippu voi koostua väistyvistä biteistä [9].

Viestikehykset ovat eroteltuina ennen seuraavaa viestikehystä kehysten välillä IFS-kentällä (engl. Interframe spacing). IFS koostuu kolmesta tai kahdesta kentästä. Jos solmu on error passive tilassa, IFS on kolmiosainen ja muille se on kaksiosainen. IFS:n ensimmäinen osa on väliaika (engl. Intermission), joka on kolme väistyvää bittiä pitkä. Tätä seuraa joko bus idle-tila tai suspend transmission. Jos solmu on error passive tilassa, se lähettää väliajan jälkeen kahdeksan väistyvää bittiä, jonka jälkeen se menee bus idle-tilaan. Muuten solmu menee bus idle-tilaan suoraan väliajan jälkeen. Bus idle-tila on määrittelemättömän pitkä aika, jolloin väylä on vapaa kenen tahansa aloittamalle liikenteelle [9].

3.1.2 Viestien käsittely

Kun viestejä liikkuu väylällä, tulee niitä tulkita jotenkin. Viestit voidaan validoida onnistuneiksi lähettäjän ja vastaanottajan toimesta. Lähetävä solmu toteaa viestin validiksi, jos virhettä ei ole ennen viestin loppua (EOF). Jos viesti on korruptoitunut, lähettäjä aloittaa uudelleenlähetyksen automaattisesti heti, kun väylä on bus idle-tilassa. Vastaanottava solmu toteaa viestin validiksi, jos ei virhettä ole ennen viestin lopun viimeistä bittiä. CAN-

väylällä liikenne on muotoiltu kahdella tavalla. Näitä ovat NRZ (engl. Non-Return_to_Zero) ja bit stuffing -menetelmät. NRZ tarkoittaa sitä, ettei kahden peräkkäisen samassa tilassa olevan bitin välissä vaihdeta tilaa. Eli jos väylällä on kaksi peräkkäistä hallitsevaa bittiä, on väylän tila hallitseva kahden bitin ajan. Bit stuffing-menetelmässä lähetettävä solmu lisää bittijonon perään eri tilassa olevan bitin, jos lähetettävässä viestissä on viisi peräkkäistä bittiä, jotka ovat samassa tilassa toistensa kanssa. Toisin sanoen, viiden hallitsevan bitin perään tulee yksi väistyvä ja viiden väistyvän bitin perään yksi hallitseva bitti. Vastaanottava solmu osaa poistaa automaattisesti ylimääräiset bitit viestin seasta, jolloin kehykset säilyvät standardin mukaisessa muodossa. Poikkeuksina ovat CRC-erotin, kuittauskenttä, EOF, virhekehys ja ylikuormituskehys [9].

CAN-väylällä voi olla viittä erilaista virhettä, joita ovat bittivirhe, Stuff-virhe, CRC-virhe, muotovirhe (engl. form error) ja kuittausvirhe. Bittivirhe tapahtuu, kun lähetettävä solmu valvoo väylälle lähettämäänsä viestiä. Jos solmu havaitsee, että väylällä oleva bitti on eri tilassa, kuin sen lähettämä bitti, havaitaan bittivirhe. Stuff-virhe tapahtuu, kun väylällä havaitaan kuusi peräkkäistä samassa tilassa olevaa bittiä. Esimerkkinä virhekehysten 6 peräkkäistä bittiä rikkoo bit stuffing-sääntöä, jolloin tämä aiheuttaa virheen väylälle. CRC-virhe aiheutuu, jos vastaanottava solmu laskee poikkeavan tuloksen CRC-sekvenssiksi, kuin minkä lähetettävä solmu on viestiin laskenut. Muotovirhe havaitaan, jos jokin kenttä sisältää yhden tai useamman bitin, jotka eivät voi olla kyseisessä kentässä. Kuittausvirhe havaitaan, jos lähetettävä solmu ei havaitse kuittauskentässä olevan hallitsevaa bittiä. Tämä tarkoittaa sitä, että yksikään vastaanottava solmu ei ole vastaanottanut viestiä onnistuneesti [9].

Solmu voi olla kolmessa tilassa, jotka ovat error active, error passive ja bus off -tilat. Solmut lähettävät virhelippuja havaitessaan virheitä. Virhelippu on joko aktiivinen tai passiivinen riippuen solmun tilasta. Jos solmu on error active -tilassa, on lippu aktiivinen ja jos solmu on error passive -tilassa, on lippu passiivinen. Solmut kasvattavat ja vähentävät sisäisiä virhelaskureitaan havaitessaan virheitä tai onnistuneita viestejä. Solmuilla on lähetettyjen viestien virhelaskuri (engl. Transmit Error Count) ja vastaanotettavien viestien virhelaskuri (engl. Receive Error Count). Solmujen tilat määritellään näiden laskurien perusteella. Jos solmun jokin virhelaskuri ylittää 127, menee solmu error passive -tilaan ja jos lähetettävien viestien virhelaskuri ylittää 256, menee solmu bus off -tilaan. Solmut kasvattavat laskureitaan, jos ne havaitsevat virheen. Jos havaittu virhe on lähetettävän solmun itse havaitsema, se kasvattaa lähetettyjen viestien virhelaskuria kahdeksalla, ja jos joku muu havaitsee lukiessaan viestiä virheen, se kasvattaa vastaanotettavien viestien virhelaskuria yhdellä. Tällöin virheitä lähettävä solmu menee error passive -tilaan muita solmuja aiemmin, joten se ei häiritse enää muuta väyläliikennettä, koska virheliput

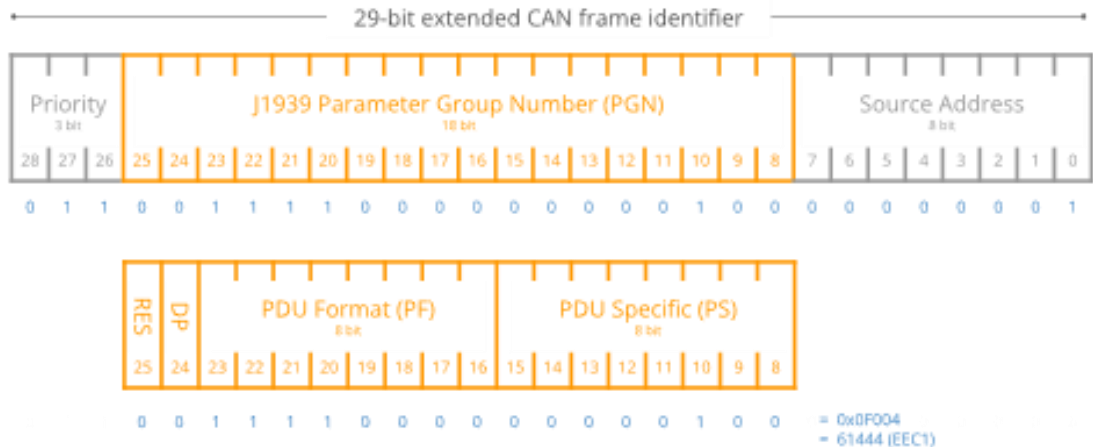
ovat passiivisia, eli ne koostuvat väistyvistä biteistä. Jos lähettävä solmu edelleen huomaa virheitä viesteissään, menee se aikanaan bus off -tilaan eikä tee väylällä enää mitään. Tällöin toimivat solmut laskevat laskureitaan, koska viestiliikenne on onnistunut [9][8].

3.2 SAE J1939

Raskaassa ajoneuvokalustossa laajalti käytössä oleva Society of Automotive Engineers, eli SAE:n laatima standardi SAE J1939 kuvaa ohjausyksiköiden tapaa viestiä keskenään CAN-väylällä. SAE J1939 on standardisoitu tiedonsiirtoprotokolla, josta on tullut ajoneuvoverkkojen perusta [58]

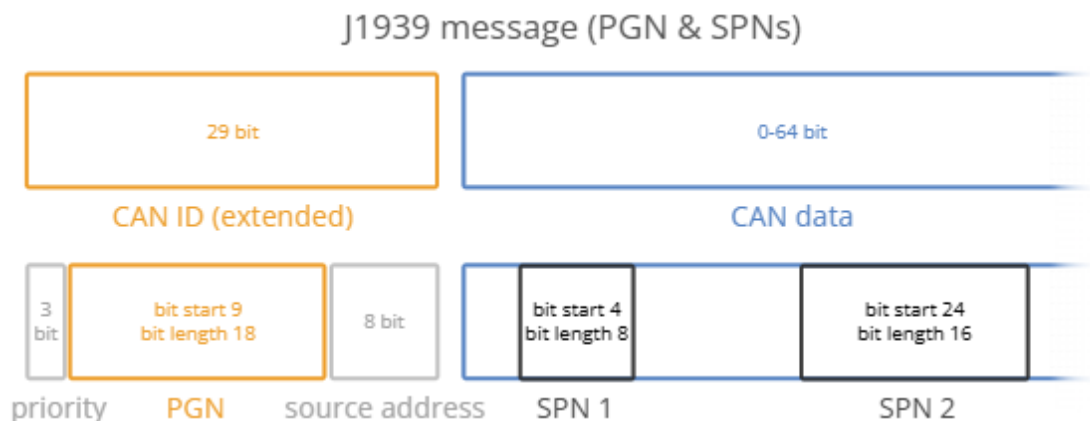
J1939 määrittää OSI-mallin neljä alinta kerrosta ja ylimmän kerroksen, eli fyysisen kerroksen, siirtoyhteyserroksen, verkkokerroksen, kuljetuserroksen ja sovelluserroksen. J1939:ssä on poikkeavat käytännöt standardin CAN-väylän viesteistä. J1939 määrittää osoitteet jokaiselle laitteelle. Täten voidaan lähettää viestejä vain tietyille vastaanottajille. J1939 myös mahdollistaa usean paketin datan lähettämisen jopa 1785 tavuun asti. J1939-viestit tunnustetaan PGN:n (engl. Parameter Group Number) avulla ja datan sisältö on jaettu SPN:iksi (engl. Suspect Parameter Numbers). PGN esiintyy CAN 2.0B 29-bittiseen arbitroitikentässä, jonka rakenne hieman muuttuu. Nyt kolme ensimmäistä bittiä arbitroitikentästä ovat prioriteettibittejä. Näillä määritellään viestin kiireys väylälle, jossa hallitsevat bitit ovat kiireisimpiä. Seuraavat 18 bittiä ovat PGN. Arbitroitikentän 8 viimeistä bittiä ovat lähettäjän osoite. PGN on oleellinen viestiliikenteen kannalta, sillä siinä kerrotaan mitä ollaan lähettämässä, kun taas SPN kertoo datan muodon ja mitä se sisältää [30][39].

Kuva 5 näkyy PGN:n rakenne. PGN on siis 18-bittinen sarja keskellä 29-bittistä arbitroitikenttää. PGN:n kaksi ensimmäistä bittiä ovat RES ja DP. RES (engl. reserved) on varattu tulevaisuuteen uusia käyttökohteita varten ja DP (engl. Data Page) ilmaisee käytettävän sivun PGN:lle. Toisin sanoen, tämän bitin avulla laajennetaan PGN-avaruutta. PF (engl. PDU Format) on 8 bittiä pitkä kenttä, jossa kerrotaan, onko lähetettävä viesti broadcast-tyyppinen vai peer-to-peer -tyyppinen. Jos PF on 0 ja 239 välillä, on viesti tarkoitettu jollekin siinä osoitteessa olevalle laitteelle. Jos PF on välillä 240 ja 255, on viesti broadcast-tyyppinen. PS (engl. PDU specific) -kohdassa kerrotaan vastaanottajan osoite, jos viesti on peer-to-peer -tyyppinen. Jos viesti on broadcast tyyppinen, PS-kohdassa on group extension, joka laajentaa PGN-avaruutta broadcast viesteille [30].



Kuva 5. J1939 PGN rakenne [30].

SPN on taas oikea väylällä liikkuva data. SPN-tiedot ovat määritetty kyseisen PGN:ssä, jossa SPN on. SPN ovat siis CAN-viestikehyksen datakentässä. SPN kuvaillaan PGN:ssä bitin alkuposition, pituuden, skaalan, offsetin ja yksikkötiedon mukaan. Täten SPN:stä saadaan fyysisiä arvoja, kuten esimerkiksi ajoneuvon nopeus tai moottorin kierroslukumäärä. Kuva 6 on näytetty J1939 PGN ja SPN, CAN-viestikehyksen yhteydessä.



Kuva 6. J1939 PGN ja SPN kuvattuna CAN viestikehyksessä [30].

J1939-protokollassa jokaisella laitteella on nimi ja osoite. Laitteen nimi on 64-bittinen tunniste, jolla kuvaillaan laitteen toimintaa, ja laitteen osoite on 8-bittinen arvo, joka mahdollistaa viestien lähettämisen kyseiselle laitteelle. Nimi kuvailee laitteen toimintaa, esimerkiksi, että kyseinen ohjainyksikkö on moottorille tai vaihteistolle. Nimellä myös annetaan prioriteetti osoitteen valinnassa. Osoite on dynaaminen jokaisella laitteella, ja se voi vaihdella. Osoite valitaan dynaamisesti (engl. Address Claim) toiminnolla. Tällöin laite lähettää väylälle viestin, jossa yrittää valita itselleen jonkin osoitteen, johon muut laitteet vertaavat omaa osoitettaan. Jos jokin laite käyttää jo kyseistä osoitetta, ilmoittaa se väylälle, että osoite on käytössä. Tällöin matalamman prioriteetin omaava laite joutuu vaih-

tamaan osoitteensa. Jos väylään liittyy jälkikäteen jokin laite, se voi pyytää väylältä kaikkien laitteiden osoitteet (engl. request for Address Claim) viestillä. Tähän kaikki laitteet vastaavat omalla osoitteellaan, josta uusi laite päättelee vapaat osoitteet ja valitsee niistä itselleen osoitteen. Uusi laite ilmoittaa valitsemansa osoitteen väylälle. J1939-protokollan nimet ja osoitteet mahdollistavat suoraan laitteiden välisen viestinnän[59][39].

Yksi J1939:n merkittävistä ominaisuuksista on myös usean viestin mittaiset datanlähetykset. Useaa pakettia lähettäessä J1939-väylällä, viestin lähettäminen tapahtuu kuljetuskerroksen määrittelyjen mukaisesti. Väylällä on CM (engl. Connection Management) - ja DT (engl. Data Transfer) -viestejä. CM-viesteissä huolehditaan viestiliikenteestä ja DT-viesteissä lähetetään datapaketteja. J1939-protokolla mahdollistaa kättelymekanismin peer-to-peer -viestinnässä. Usean paketin viestijono voidaan myös lähettää broadcast-tyyppisenä [24][30][39].

Peer-to-peer -viestintää aloitettaessa lähetetään väylälle CM-viesti, jossa pyydetään lupaa lähettää dataa RTS-viestillä (engl. Request to Send). RTS-viestissä on lähetettävien datapakettien lukumäärä. Tähän vastaanottaja lähettää CTS-viestin (engl. Clear to Send), jossa vastaanottaja hyväksyy kyseisen datan lähettämisen. CTS-viestissä vastaanottaja ilmaisee, kuinka monta pakettia se on valmis vastaanottamaan. Esimerkiksi jos lähettäjä pyytää lupaa lähettää neljä pakettia ja vastaanottaja voi vastaanottaa kaksi, lähettäjä lähettää vain kaksi ja odottaa, kunnes vastaanottaja ilmoittaa CTS-viestillä olevansa valmis vastaanottamaan loput kaksi pakettia. CTS-viestin jälkeen lähettäjä lähettää vastaanottajan hyväksymän määrän DT-viestejä väylälle, jossa on kyseinen data. Kun kaikki paketit ovat vastaanotettu, vastaanottaja lähettää CM-viestin EoMA (engl. End of Message Acknowledge), jolla kuittaa viestin vastaanotetuksi. RTS-viestissä ilmaistaan lähetettävien pakettien määrä, ja jokaisen DT-viestin datakentän 8 ensimmäistä bittiä on pakettien numeron indikaattorina. Koska 8 bitillä voidaan ilmaista 255 numeroa, voidaan siis lähettää 255 eri numeroilla tunnistettavaa pakettia. Täten 255 paketilla, joissa jokaisessa on 7 tavua datan ilmaisemiseen, voidaan yhteensä lähettää jopa 1785 tavua[30][24].

Broadcast-tyyppisessä lähetyksessä lähettäjä lähettää RTS-viestin sijaan BAM (engl. Broadcast Announce Message) -viestin. BAM-viesti lähetetään varoituksena useasta peräkkäisestä viestistä väylälle. BAM-viestissä kerrotaan lähetettävien pakettien määrä. BAM viestin jälkeen lähettäjä lähettää väylälle ilmaisemansa määrän viestejä, jotka kaikki muut laitteet vastaanottavat[30][24].

4. ISOBUS

Luvussa esitellään ISOBUS-väylä sekä sen toiminnallisuutta ja sen takana toimiva organisaatio eli AEF. Kappaleissa käydään läpi ISOBUS:n toiminnot ja erityisesti TIM, sekä esitellään AEF-organisaation toiminta ja conformance testaus eli vaatimustenmukaisuustestaus.

ISOBUS on AEF:n tuotemerkki, jolla tarkoitetaan maataloustyökoneisiin suunniteltua ISO 11783-standardisarjan mukaista väylätoteutusta. International Organization for Standardization eli ISO aloitti ISO 11783-standardien kehityksen 90-luvulla. Tällöin CAN-väylällä toimiva J1939 oli jo kehitteillä. ISOBUS on rakennettu J1939-standardin pohjalle, mutta standardia on jalostettu soveltuvammaksi maatalouskoneisiin. ISOBUS:n tavoitteena oli konevalmistajasta riippumaton yhteensopivuus traktorien ja työkoneiden välillä. ISOBUS tuo liitettävyyttä työkoneiden ja traktoreiden välille, kun taas J1939 on tarkoitettu suljetuille järjestelmille, joihin ei lisätä tai vaihdeta osia. ISOBUS:n avulla mikä tahansa standardia noudattavan työkoneen ja traktorin yhdistelmän on mahdollinen. ISOBUS määrittelee toimintoja, joita laitteet eli työkoneet ja traktorit voivat tukea. Jos työkone ja traktori tukevat samaa toimintoa, voi yhdistelmä käyttää tätä ominaisuutta, riippumatta traktorin tai työkoneen valmistajasta.

ISOBUS-standardisarja on 14 osainen ja se määrittelee OSI-mallin kaikki seitsemän kerrosta, joita ovat fyysinen kerros, siirtoyhteyserros, verkkokerros, kuljetuserros, istuntoerros, esitystapakerros ja sovelluserros. Kappaleissa käydään läpi ISOBUS-toiminnot, jonka jälkeen tarkemmin esitellään TIM-toiminto ja autentikointiprosessi.

4.1 Toiminnot

Tällä hetkellä käytössä olevia AEF:n listaamia ISOBUS-toimintoja ovat. Käyttöliittymä UT / VT, lisäohjaon toiminto AUX-N / AUX-O, tehtäväohjaintoiminnot TC-BAS, TC-GEO ja TC-SC, traktorin ohjainyksikkö TECU, tiedostopalvelin FS, ISOBUS Shortcut Button ISB ja kahdensuuntainen tiedonsiirto toiminto TIM.

UT (engl. Universal Terminal) tai VT (engl. Virtual Terminal) tarkoittaa ISOBUS-väylällä toimivaa käyttöliittymää. VT:n ajatus on ehkäistä traktorin hyttiin usean eri työkoneen ohjaustermiinalin kertymistä, sillä VT:llä voi esittää minkä tahansa ISOBUS-työkoneen käyttöliittymää samalla näytöllä. Yleensä käyttöliittymä on traktorin oma kosketusnäyttö, mutta se voi olla myös erillinen näyttö. Käyttöliittymältä voidaan ohjata työkoneen toimintoja, kuten perinteiseltäkin ohjaustermiinalilta, mutta ohjaus tapahtuu kosketusnäytöltä

ja ISOBUS-väylän standardiviestien mukaisesti. Käyttöliittymä koostuu piirretyistä objekteista, jotka määritellään IOP (engl. ISOBUS Object Pool) -tiedostossa. Tässä tiedostossa on määritelty kaikkien näytöllä näkyvien asioiden, esimerkiksi nappien, tekstien, numeroiden ja värien ominaisuudet. ISOBUS-väylään kytkettävä työkone lähettää IOP-tiedoston VT:lle eli traktorin käyttöliittymälle, johon IOP:n mukainen käyttöliittymä siten piirtyy [29].

AUX-toiminnolla tarkoitetaan lisäohjainlaitetta, jota voidaan käyttää työkoneen ohjauksen helpottamiseksi. Monesti ohjaaminen kosketusnäytöltä nappeja painamalla ei ole ergonomista, vaan halutaan käyttää helppokäyttöisempiä ja nopeampia ohjainlaitteita. Tähän voidaan käyttää traktorin omia joystick-ohjaimia, vipuja ja painikkeita. AUX-toimintoja voi ohjelmoida jo olemassa oleviin painikkeisiin tai järjestelmään voi erikseen hankkia erillisen ohjaimen, minkä painikkeisiin ohjelmoidaan työkoneen toimintoja. AUX-N (engl. Auxiliary control "new") on uudempi toiminto kuin AUX-O (engl. Auxiliary control "old"). AUX-O on alkuperäinen 2002 määritelty toiminto, jonka jälkeen todettiin sen olevan riittämätön turvallisuuden kannalta, joten AUX-N tuli standardin uudeksi AUX-toiminnoksi. AUX-O toimintoja hyödyntäviä koneita ja laitteita ehdittiin kuitenkin jo valmistaa, joten se on nykyäänkin osana ISOBUS väylää [29] [54].

TC (engl. Task Controller) eli tehtävöohjain on toiminto, jolla mahdollistetaan niin sanottu täsmäviljely. TC:ssä on kolme eri muotoa. TC-BAS (engl. basic) eli perusmuoto, TC-SEC (engl. Section) eli lohkomuoto ja TC-GEO eli GNSS-signaalia hyödyntävä muoto. Perustoiminnolla pystytään mittaamaan työn suureita. Esimerkiksi paljonko lannoitetta on levitetty ajatulle alueelle tai kuinka monta hehtaaria on käsitelty. Toiminto helpottaa työn dokumentointia. Nämä tiedot voidaan viedä työkoneesta suoraan kirjanpitoon standardimuotoisena tiedostona. Lohko-ohjaus taas mahdollistaa työkoneen pilkkomisen lohkoihin. Esimerkiksi kasvinsuojeluruiskun suuttimet voivat olla mahdollista avata yksitellen. Jos ruiskussa on 16 suutinta, olisi tällöin 16 erikseen ohjattavaa lohkoa. Täten voidaan sulkea automaattisesti suuttimia, jo ruiskutetun alueen päältä ajettaessa GNSS-signaalin perusteella. Tällöin vältetään päällekkäiseltä ruiskutukselta. TC GEO mahdollistaa paikakohtaisen määräsäädön. Voidaan tulkita GNSS signaalista missä kohtaa peltoa ollaan, ja säätää esimerkiksi kylvettävien siementen määrä sopivaksi juuri kyseiselle kohdalle peltoa [20][29].

TECU (engl. Tractor Electronic Control Unit) toimii rajapintana traktorin J1939-väylän ja ISOBUS-väylän välillä. TECU lukee traktorin tietoja ja välittää niitä ISOBUS-väylään työkoneiden käytettäväksi. TECU voi välittää esimerkiksi nopeuden, voiman ulosottoakselin pyörimisnopeuden tai nostolaitteen korkeuden. TECU-luokkia on 3, joista 1 ja 2 mahdollistavat tiedonsiirron traktorin väylältä ulospäin ja luokka 3 mahdollistaa myös käskyjen

välittämisen traktorin väylälle. Luokan 3 TECU oli jo määritelty alkuperäiseen vuoden 2002 ISOBUS-standardiin 11783-7, mutta se ei yleistynyt, sillä epävarmuus turvallisuudesta hidasti ominaisuuden käyttöä [20][54][29].

FS (engl. File Server) eli tiedostopalvelin on toiminto, jolla voidaan siirtää ISOBUS-työkoneelta tiedostoja esimerkiksi USB-tikulle tai pilvipalveluun. Tiedostopalvelin toimii yleensä traktorin terminaalissa, sillä niissä on usein olemassa oleva valmius USB-laitteille. Esimerkki toimintoja tiedostopalvelimen hyödyntämiseen ovat suoritetun työn datan kerääminen, työkoneen asetusten varmuuskopiointi tai työkoneen ohjelmistopäivitys [12].

ISB (engl. ISOBUS Shortcut Button) on painike, jolla saadaan nopeasti pysäytettyä kaikki ISOBUS-työkoneen valitut toiminnot. Työkone asettuu valmistajan määrittelemään turvalliseen tilaan painiketta painamalla riippumatta siitä mitä käyttöliittymällä tai terminaalilla tehdään sillä hetkellä [29][33]. ISB-painike ei kuitenkaan ole hätä-seis-painike.

4.2 TIM

TIM (engl. Tractor Implement Management) on toiminto, jolla mahdollistetaan käytännössä tapa käyttää luokan 3 TECU:n ominaisuuksia kahdensuuntaisen tiedonsiirron avulla. Ensimmäiset kahdensuuntaiset tiedonsiirron sallivat järjestelmät tulivat markkinoille vuonna 2009, mutta nämä eivät olleet täysin luokan 3 TECU-koneita, vaan valmistajat edellyttivät samaa merkkiä työkoneelta ja traktorilta. Tämä ei ole ISOBUS:n perusidea, vaan pohjimmiltaan ajatus on minkä tahansa valmistajien koneyhdistelmä. Luokan 3 TECU-laitteissa ongelmana olivat vastuukysymykset ja turvallisuus. TIM-toiminnolla ratkaistiin ongelma työkoneiden yhteensopivuudesta. TIM on niin sanotusti ohjaajaa avustava järjestelmä, jolla mahdollistetaan TIM-clientin ohjaavan traktorin tiettyjä toimintoja TIM-palvelimen kautta. TIM mahdollistaa kaksisuuntaisen tiedonsiirron työkoneen ja traktorin välillä, kuten luokan 3 TECU, mutta TIM vaatii osapuolten välistä standardoitua validointia. Autentikoinnin ja laitteiden hyväksyntätietien avulla voidaan varmistua kaikkien osapuolten noudattavan samoja sääntöjä. Täten eri valmistajien koneita voidaan yhdistää ilman erilaisia tulkintoja asioiden ratkaisujen osalta. Tällä rajoitetaan toimintoja ja sitä, miten niitä voidaan toteuttaa tai suorittaa. TIM-työkone ja traktori vaihtavat digitaaliset sertifikaatit keskenään, joiden perusteella kommunikaation edellytykset selvitetään. TIM-salaus tehdään erillisen ohjelmistokirjaston avulla. Monimutkaisten salaustointojen määrittelemisen standardiin on haastavaa salausta paljastamatta. Autentikointiin käytettävä sovellus on hankittu kolmannelta osapuolelta, jota AEF välittää sertifioituille valmistajille. Täten varmistutaan siitä, että kaikki käyttävät samaa tekniikkaa kommunikaation salaamiseksi [17][54].

TIM-versioita on julkaistu kaksi, TIM generation 1 ja 2. Ensimmäisessä versiossa tuettuja TIM-toimintoja olivat ajonopeuden ohjaus, ulkoinen ohjauksen säätö, etu- ja takavoimanulosottoakselin ohjaus, etu- ja takanostolaitteiden ohjaus sekä lisähydrauliikkalohkojen ohjaus. Toisessa versiossa muokattiin hieman joidenkin viestien rakennetta, toteutettiin lisäselvennystä toimintojen mahdollisuuksista, esimerkiksi ajoneuvon nopeuden toiminnosta ei voitu tietää, millainen vaihteisto kyseisessä traktorissa on, mikä on oleellinen osa toiminnon käyttämistä varten. Ainoa uusi toiminto, joka lisättiin toiseen versioon, on etu- ja takatyöntövarren ohjaaminen. Täten kolmipistekiinnityksellisten työkoneiden aseman säätö helpottuu. Työntövarren ohjaaminen on mahdollista ensimmäisellä TIM versiollakin, jos työntövarsi on hydraulisesti kytketty johonkin hydrauliikkalohkoon, jota ohjataan TIM:n avulla [1].

TIM-toiminnallisuudet toimivat käyttäen eri automaation tiloja. Tällaisia tiloja on käytössä 10 kappaletta. Tilat ovat:

- Automaatio ei saatavilla (engl. Automation unavailable)
- Automaatio ei valmis (engl. Automation not ready)
- Automaatio valmis käyttöön otettavaksi (engl. Automation ready to enable)
- Automaatio käytössä (engl. Automation enabled)
- Automaatio odottaa (engl. Automation pending)
- Automaatio vika (engl. Automation fault)
- Error
- Automaatio aktiivinen (engl. Automation active).

Automaatio voi olla aktiivinen kolmessa eri tilassa. Kolme aktiivista tilaa ovat rajoittamaton, rajoitettu ylärajalle ja rajoitettu alarajalle. Rajoitetulla tilalla tarkoitetaan tilannetta, missä TIM clientin pyytämä asetusarvo on kyseiselle toiminnolle yli tai alle asetetun raja-arvon. Toisin sanoen, jos virtauksen raja on asetettu 50 % ja työkone pyytää 70 % virtausta, on toiminnon tila aktiivinen, mutta rajoitettu ylärajalle. Nämä tilat lähetetään clientin, palvelimen ja jokaisen funktion statusviestissä. Tiloja indikoidaan 0 ja 7 välillä. 0 on alin tila, eli automaatio ei saatavilla ja 5–7 ovat automaatio aktiivisena tilat. Vika ilmaistaan arvolla D ja error arvolla E. Tilojen välillä liikkuminen tapahtuu sekvenssissä. Alustavasti laitteisto lähtee tilasta 0 ja siitä edetään tiloja ylöspäin. Tilojen eteneminen ylöspäin on mahdollista vain askel kerrallaan, mutta alaspäin voidaan hypätä tilojen yli. Jokainen ehto askeleelle ylempään tilaan muodostaa loogisesti konjunktion (AND) ja jokainen ehto alempaan tilaan disjunktion (OR). Tämä tarkoittaa sitä, että jotta voidaan edetä

tiloja ylöspäin, on kaikkien siihen tilaan edellyttävien ehtojen täytyttävä, kun taas alaspäin siirrytään heti yhdenkin ehdon täytyttyä. Vaikka tilat ylöspäin etenevät järjestyksessä, voidaan tilan ehdot täyttää riippumatta nykyisestä tilasta. Tällöin voidaan hypätä tilan yli, jos sen ja sitä ylemmän tilan ehdot ovat täytettynä [1]. Tämä kuitenkin on vastaava tilanne kuin se, että käytäisiin tilat yksitellen läpi. Ylimääräinen askel jätetään vain välistä pois. Palvelimelle, clientille ja funktioille on asetettu guideline-dokumentin mukaan kymmeniä ehtoja, joilla tilojen välillä voidaan askeltaa. Tässä ei käydä yksitellen kaikkia ehtoja läpi, mutta esimerkkejä ehdoista automaatio aktiivinen tilasta palvelimen siirtymiselle automaatio ei valmis tilaan ovat validin autentikoinnin kadottaminen clientin kanssa, toisen johtavan TIM-palvelimen havaitsemien väylällä tai jos palvelin ei pysty suorittamaan operaatiota, esimerkiksi avaimen ollessa off-asennossa [1].

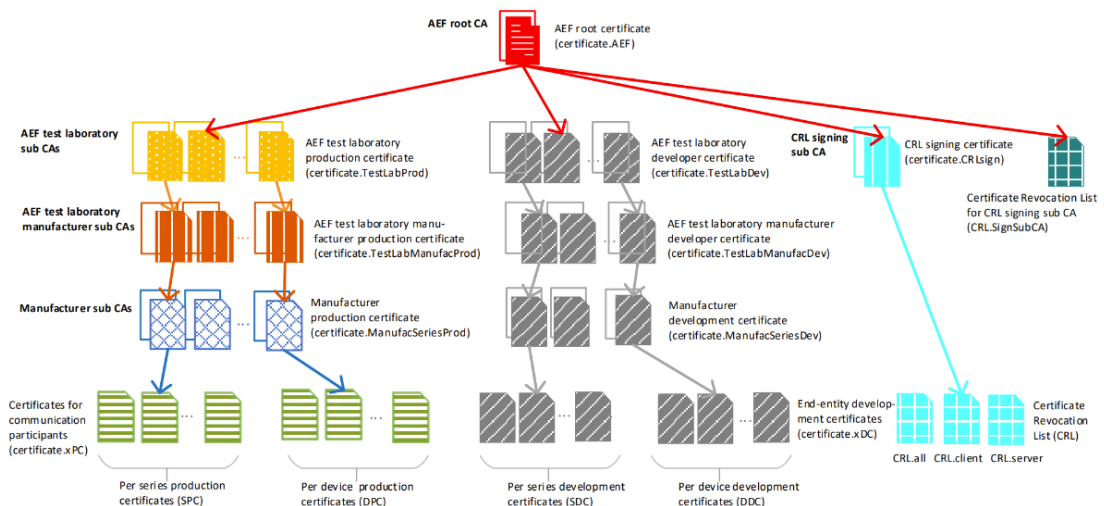
TIM-funktion ohjaus kulkee seuraavan prosessin läpi. Ensin TIM-palvelin ja client initialisoivat tarvittavat asiat. Osapuolet tunnistautuvat toisilleen ja päättävät korkeimman TIM-version, jota molemmat osapuolet tukevat. Client selvittää, onko sen tarvitsemat funktiot palvelimen tukemia. Jos alustuksessa kaikki on ok, jatketaan autentikointiin. Tässä suoritetaan niin sanottu FwA (Full weight Authentication), jos client ja palvelin suorittavat autentikoinnin ensimmäistä kertaa, ja LwA (Light weight Authentication), jos autentikointi on suoritettu jo aiemmin. Autentikoinnin jälkeen käyttäjän tulee ottaa TIM client käyttöön. Tämän jälkeen käyttäjä voi määrittellä käytettävät TIM-funktiot. Kun käytettävät funktiot ovat määriteltty, käyttäjä voi aktivoida automaation. Näin määritellyt funktiot voivat ohjata traktoria halutulla tavalla.

4.2.1 Autentikointi

Autentikointi on iso osa TIM:n mahdollistamista. TIM-toimintojen käyttäminen edellyttää autentikointiprosessia osapuolien välillä. ISOBUS-työkoneella voi olla merkittäviä turvallisuusvaikutuksia traktorin ja työkoneen yhdistelmälle ja sen käyttäjälle. Siksi varsinkin, kun työkone hallitsee koko yhdistelmää, on varmistettava riittävä luottamus osapuolten välille. AEF:n määrittämiä keinoja tähän tällä hetkellä on conformance-testaus ja sertifikaattien vaihto käyttötilanteessa. TIM-työkoneiden autentikoinnin toimivuus ja conformance-testi ovat tiiviisti yhteydessä toisiinsa. TIM-kone ei voi saada autentikointiin vaadittavia sertifikaatteja, jos se ei läpäise conformance-testausta. Jokaisen autentikointiprosessin aikana osapuolilta varmistetaan läpäisty conformance-testien sertifikaatit. Autentikoinnin vaatimuksia on läpäisty CT, oikeellinen tunnistautuminen verkkoon liittymisen jälkeen ja toisen osapuolen identiteetin ja vaatimustenmukaisuuden validointi. Autentikointi suoritetaan aina kun client ja palvelin yhdistetään. Koneiden autentikointiprosessi voi kestää useita minuutteja. Jotta vältyttäisiin hitaalta ja raskaalta täydeltä auten-

tikoinnilta (FwA) jokaisella koneyhdistelmän käynnistyksellä, suoritetaan kevyempi autentikointiprosessi (LwA), jos koneyhdistelmä ei ole ensimmäistä kertaa yhdistettynä. Autentikointia varten tarvittavat sertifikaatit voi ainoastaan myöntää AEF. Tuotekehitysvaiheessa valmistajille myönnetään niin sanottuja kehityssertifikaatteja. Näillä valmistajat voivat testata tuotteidensa autentikointia ennen virallista vaatimustenmukaisuustestiä. Valmistajien vastuulla on huolehtia, ettei kehityssertifikaatteja käytetä muuhun kuin testaamiseen ja kehitykseen, että tuote täyttää minimivaatimukset annetuille funktioille, että tuotekehitys tapahtuu AEF 007 -guidelinen mukaisesti sekä valmistajan vastuulla on kehityksen aikana aiheutuvat riskit ja valmistajan tulee suorittaa testausta hallitussa ympäristössä [5].

Onnistuneeseen autentikointiin vaadittavat sertifikaatit noudattavat X.509-formaattia. X.509 on ITU:n (engl. International Telecommunication Union) standardoima digitaalinen sertifikaattipohjainen salausjärjestelmä. X.509 autentikointia käytetään muun muassa verkkopalvelimien ja sähköpostien tarvitsemaan autentikointiin [62]. Järjestelmä on hierarkkinen, jolloin ainoastaan tunnetut tahot, eli CA:t (engl. Certificate Authority) voivat myöntää ja allekirjoittaa sertifikaatteja. Järjestelmässä on yksi juuritaho, joka on AEF. Tämä juuri CA (engl. Root CA) voi allekirjoittaa oman sertifikaatin. Juuri CA:n alapuolella on ali CA (engl. Sub CA), jolla on sertifikaatti, jonka juuri CA on allekirjoittanut. Hierarkiassa voi olla useampi ali CA, jotka allekirjoittavat aina vain seuraavan alemman tason sertifikaatin. AEF:n CA ja sertifiointihierarkia on esitetty Kuva 7 [5].



Kuva 7. CA ja sertifikaatti hierarkia [5].

Kuvan 7 vasemmassa reunassa on esitettyä tuotantosertifikaattien polku, keskellä kehityssertifikaattien polku ja oikeassa reunassa CRL-polku (engl. Certificate Revocation List). Kehitys- ja tuotantosertifikaatit kulkevat vastaavat polut keskenään, poikkeuksena

on, että kehityssertifikaatteja käytetään vain kehitykseen eikä lopullisissa tuotteissa. Tuotanto- ja kehityssertifiointipolku etenee seuraavasti. AEF myöntää juuri CA:na itse allekirjoittamansa sertifikaatin vain virallisille testilaboratorioille. Nämä testilaboratoriot allekirjoittavat valmistajakohtaiset sertifikaatit, joilla allekirjoitetaan valmistajan tuotekohtaiset sertifikaatit. Testilaboratoriot toimivat ali CA:na omilla, valmistajakohtaisilla ja tuotekohtaisilla sertifikaateilla, joilla voidaan allekirjoittaa lopulliset sertifikaatit yksittäisiin tuotteisiin. Sertifikaatit voidaan tuottaa jokaiselle yksilölliselle koneelle erikseen tai sarjakohtaisesti, tarkoittaen sitä, että kaikki kyseisen sarjan koneet käyttävät samaa sertifikaattia keskenään [5].

CRL on lista, johon voidaan asettaa kiellettyjä sertifikaatteja. Näitä sertifikaatteja ei voi käyttää enää validiin autentikointiin listalle asettamisen jälkeen. Listalle voidaan haluta asettaa esimerkiksi sertifikaatteja, joiden yksityisiä avaimia tai muuta vastaavaa on saatu haltuun tietovuodossa. CRL-listalle on ainoastaan mahdollista lisätä sertifikaatteja. Sertifikaatteja ei voida poistaa sieltä enää jälkikäteen tämänhetkisen AEF:n määritelmiä mukaan. AEF on ainoa taho, joka voi lisätä sertifikaatteja CRL-listalle. Käytetty CRL allekirjoitetaan kuvan 7 oikeassa reunassa näkyvän CRL signing ali CA:n toimesta. CRL tulee olla jokaisessa koneessa mahdollisimman ajantasainen, joten uusimmatkin CRL-listalla olevat sertifikaatit ovat laitteiden tiedossa. CRL-listoja voi olla useita eri tarkoituksiin, mutta toistaiseksi listoja on vain yksi. AEF on myös myöntänyt yhden ali CA:n joka voi invalidoida CRL-listan, mikä näkyy kuvassa 7 oikealla reunimmaisena [5].

Sertifikaatin tulee olla maksimissaan 1778 tavua pitkä ja sen tulee sisältää kolme kenttää. TbsCertificate-kenttä sisältää tietoa sertifikaatin myöntäjästä, saajasta sekä julkisen avainparin avaimista. SignatureValue kentässä tulee olla digitaalinen allekirjoitus tbsCertificate kentälle käyttäen allekirjoitus algoritmia, mikä on määritelty signatureAlgorithm kentässä [5].

Autentikointiprosessi on nelivaiheinen. Autentikoinnin läpäisemiseksi palvelimella ja clientillä on oltava omat sertifikaatit, autentikointiprosessia varten tarvittavia salausfunktiot, satunnaislukugeneraattori ja paikallinen avainlista LwA autentikointia varten. Aluksi kun työkonepari luodaan, eli työkone kytketään traktoriin, client tarkastaa oman avainlistansa, josta se päättää, halutaanko suorittaa LwA vai FwA. Jos client löytää listalta kyseisen palvelimen, se pyytää palvelimelta LwA:n suorittamista ja jos laitteet ovat vieraita toisilleen, pyydetään suorittamaan FwA. Client lähettää palvelimelle statusviestin, jossa ilmaistaan, kumpi prosessi käydään läpi. Riippuen viestin sisällöstä palvelin tarkastaa oman avainlistansa tai tämä voidaan jättää väliin siinä tapauksessa, jos palvelinta

pyydetään suorittamaan FwA. Jos molemmat toteavat osapuolten löytyvän listalta, suoritetaan LwA. Jos client pyytää suoritettavaksi LwA:ta, mutta palvelin ei löydä clientiä listaltaan, suoritetaan FwA [5].

Ensimmäisessä vaiheessa molemmat osapuolet luovat autentikointiprosessin laajuuden valitsemisen lisäksi satunnaisen haasteen, jota käytetään myöhemmin autentikointiprosessissa. Satunnaishaasteen tulee pysyä samana koko autentikointiprosessin ajan, kunnes se on läpäisty tai siinä on epäonnistuttu. Toiseen vaiheeseen edetään vain, jos suoritetaan FwA [5].

Toisessa vaiheessa osapuolet vaihtavat sertifikaattinsa ja validoivat ne. Molemmat osapuolet pyytävät toistensa sertifikaatit, johon molemmat osapuolet vastaavat omilla sertifikaateillaan. Saatuaan sertifikaatit, niitä verrataan osapuolten paikallisiin CRL-listoihin. Jos sertifikaatteja ei löydy CRL-listoilta, osapuolet voivat varmistaa sertifikaattiketjun validiuden käyttäen RSASSA-PSS -verifiointialgoritmia. Sertifikaatteja verrataan myös laitteiden väittämiin tuettuihin TIM-omaisuuksiin. Jos osapuoli siis väittää tukevansa TIM-funktioita, mutta sen sertifikaatissa ei ole tietoa funktion tukemisesta hyväksytyllä conformance-testillä, niin autentikointiprosessi keskeytetään. Onnistuneen verifiointin jälkeen osapuolet vielä tarkistavat, että ISOBUS-väylältä saamansa tiedot laitteista vastaavat sertifikaattien tietoja. Tämän jälkeen osapuolet informoivat toisiaan onnistuneesta sertifikaattiketjun tarkastuksesta [5].

Kolmannessa vaiheessa osapuolet tarvitsevat yhteisen salaisuuden. Tämä saavutetaan käyttämällä elliptisen käyrän salausmenetelmää avainten vaihtoprotokollassa ECDH (engl. Elliptic curve Diffie-Hellman key exchange). ECDH perustuu elliptisten käyrien laskeutuksiin ja niiden käänteisoperaation vaikeuteen. Kun osapuolet ovat saaneet yhteisen salaisuuden muodostettua ECDH:n avulla, arvolle suoritetaan KDF (engl. Key Derivation Function), jolla arvosta saadaan kaksi erillistä 128-bittistä pitkää avainta. Toinen avain on clientiltä palvelimelle suunnattuun autentikointiin ja toinen palvelimelta clientille suunnattuun. Nämä avaimet säilötään LwA-avainlistassa tunnistettavissa ISOBUS NAME-kentällä. NAME-kentällä voidaan tunnistaa kyseinen laite ja suorittaa sen kanssa LwA jos avain löytyy avainlistalta [5].

Neljännessä vaiheessa varmistetaan, että molemmilla osapuolilla on avainparin oikea yksityinen avain, joka kuuluu vaihdettujen sertifikaattien julkiseen avaimeseen. Tämä varmistetaan käyttäen CMAC (engl. Cipher-based Message Authentication Code) -algoritmia. Tähän käytetään ensimmäisessä vaiheessa generoitua satunnaishaastetta. Osapuolet lähettävät satunnaisen luvun toiselle, jonka toinen laskee käyttämällä yhteistä sa-

laisuutta. Osapuolet palauttavat laskemansa tuloksen satunnaisesta luvusta, jonka jälkeen satunnaisluvun lähettäjä tarkastaa, saako itse saman tuloksen lähettämästään satunnaisluvusta käyttäen yhteistä salaisuutta. Jos tulokset vastaavat toisiaan, on autentikointi suoritettu onnistuneesti ja osapuolet viestivät tästä toisilleen. Nyt molempien osapuolten tila voidaan indikoida autentikoiduksi ja voidaan olla varmoja siitä, että molemmat osapuolet ovat hyväksyttävästi suorittamassa TIM-toimintoja [5].

4.3 Agricultural Industry Electronics Foundation

Agricultural Industry Electronics Foundation eli AEF on alun perin seitsemän maatalouskonevalmistajan ja kahden yhdistyksen vuonna 2008 perustama ISOBUS-organisaatio. Perustajina toimivat Agco, Claas, CNH, Grimme, John Deere, Kverneland Group ja Pöttinger, sekä järjestöt AEM (engl. Association of Equipment Manufacturers) ja VDMA (engl. German Engineering Federation). Näitä pidetään AEF:n ydinjäseninä. Ydinjäsenissä on tapahtunut muutoksia vuosien varrella, ja nykyään jäseniä ovat Agco, Claas, CNH, SDF, John Deere, Kuhn, Kubota, Pöttinger, VDMA, AEM ja FederUnacoma (engl. Italian Agricultural Machinery Manufacturers Federation). AEF:n tehtävä on määrittää ohjeita standardien noudattamiseen ISOBUS toteutuksille, koordinoita teknisiä parannuksia ISOBUS:iin, koordinoita kansainvälistä yhteistyötä maatalous elektroniikka teknologiassa, saavuttaa ja jatkaa elektroniikkateknologian kansainvälistä kehitystä ja laajentumista, luoda yhteistyötä maatalouskonevalmistajien välillä loppukäyttäjien hyväksi ja organisoida sertifiointi tukea, koulutusta, työpajoja, markkinointiaktiviteetteja ja antaa konsultaatiota standardeihin liittyen [34][55].

AEF koostuu ohjauskomiteasta, jossa on ydinjäsenet sekä projekti- ja asiantuntijaryhmiä. Ohjauskomitea huolehtii järjestön johtamisesta yleisesti ja on ylin toimiva elin järjestön sisällä. Projektiryhmät tekevät varsinaista ISOBUS-toimintojen kehitystyötä. Jokaisella projektiryhmällä on projektijohtaja, joka vastaa ohjauskomitealle projektien etenemisestä. Asiantuntijaryhmät tarjoavat asiantuntemusta projektiryhmille erilaisissa kategorioissa. Projektiryhmiä on tällä hetkellä 12 ja asiantuntijaryhmiä 6 [6].

AEF tarjoaa palveluita työkonevalmistajille sekä loppukäyttäjille. Loppukäyttäjille suunnattu työkalu on AEF ISOBUS Database. Tähän tietokantaan on sisällytetty kaikki virallisesti AEF:n hyväksymät ISOBUS-laitteet. Tietokannan avulla loppukäyttäjä voi vertailla laitteiden ominaisuuksia ja yhteensopivuutta, ennen koneyhdistelmän hankintaa. Tietokannasta voi esimerkiksi katsoa, mitkä hankinnan kohteena olevan työkoneen tukemat toiminnot toimivat juuri loppukäyttäjän jo omistamaan traktoriin yhdistettynä. Tietokanta on verkossa avoimena kaikille, sekä siitä on saatavilla mobiiliversio. ISOBUS Database:n yhteydessä toimiva AEF ISOBUS Check tool on työkalu huoltohenkilölle, joka voi

analysoida traktorin ja työkoneen yhdistelmän tilaa ISOBUS-väylän huoltoliittimestä. Check tool kerää dataa väylältä, jossa tunnistetaan kaikki väylällä toimivat laitteet ja niistä erinäisiä tunnistetietoja. Tiedot voidaan ladata suoraan ISOBUS-tietokantaan, jolloin saadaan selkeä kuva laitteiden yhteensopivuudesta [7].

AEF on luonut konevalmistajia varten guideline-dokumentteja, joilla ohjataan ISOBUS-tuotteiden kehitystä. Konevalmistajien on noudatettava guideline-dokumentteja, jotta ne voivat markkinoida omia tuotteitaan käyttäen ISOBUS-tuotemerkkiä. Mikään ei sinänsä estä valmistajia seuraamasta vain ISO 11783-standardia ja kehittää siten ISOBUS-tuote. Tällöin kuitenkin kaikkien toimintojen yhteensopivuutta ei voida taata kaikkien ISOBUS-laitteiden kanssa, eikä valmistaja saa käyttää AEF:n omistamaa ISOBUS-tuotemerkkiä. Konevalmistajille suunnattu plugfest on AEF:n järjestämä tapahtuma, johon kerääntyy konevalmistajia ympäri maailman. Tapahtuman tarkoituksena on päästä testaamaan uusien tuotteiden ja toiminnallisuuksien yhteensopivuutta käytännössä. Plugfest-tapahtumissa järjestetään myös koulutuksia ja tiedotustilaisuuksia ISOBUS-aiheeseen liittyen. Plugfest järjestetään kahdesti vuodessa, ja niihin pääsee osallistumaan kaikki halukkaat AEF-jäsenyritykset.

4.3.1 Vaatimustenmukaisuustestaus

Vaatimustenmukaisuustestaus tai conformance test on jokaiselle ISOBUS-laitteelle suoritettava testiohjelma, jolla varmistetaan laitteiden vaatimustenmukaisuus. Testillä varmistetaan ISO 11783-standardien ja AEF guideline-dokumenttien noudattaminen. Testiohjelma on luotu AEF:n projekti- ja asiantuntijaryhmien toimesta siten, että testit kattavat mahdollisimman paljon asioita ja täten voidaan taata yhteensopivuus laitteiden välillä. Testausta tehdään käytetylle laitteelle, sen fyysisten vaatimusten ja ominaisuuksien osalta sekä sovelluksen osalta. Käytännössä testi tapahtuu tietokoneella ja erillisellä ohjainlaitteistolla. Testauksen alainen laite kytketään ohjainlaitteistoon, jota ohjataan tietokoneella suoritettavan testiohjelman toimesta. Testattava laite kytketään ISO-standardin mukaisia liittimiä käyttäen, esimerkiksi in-cab- tai IBBC-liittimellä. Testi suoritetaan tietokoneella NI TestStand -alustalla, joka on automaattitestaukseen käytettävä ohjelmisto. TestStand-alustalla suoritetaan AEF:n julkaisema Conformance-test, jolla voidaan testata kaikkia laitteen ja sovelluksen vaatimuksia. Testaus edellyttää myös AEF:n SUT (engl. System Under Test) -editor-ohjelmaa, jolla luodaan kuvaustiedosto testiä varten. SUT editorilla konfiguroidaan testattavat asiat ja tiedot laitteesta [36].

Testin tekemiseen on useita eri vaihtoehtoja. Testiohjelman voi hankkia itselleen ja suorittaa testejä itsenäisesti, testin voi tehdä ulkopuolisella testiohjelman haltijalla tai testin

voi tehdä virallisessa AEF:n hyväksymässä testilaboratoriossa. Testiohjelman hankkiminen itselle on maksullista ja lisäksi joutuu hankkimaan soveltuvan laitteiston testaamista varten. Suomessa ulkopuolisia testausta tarjoaa esimerkiksi Luonnonvarakeskus. LUKE tarjoaa testauspalveluja Viikin ja Oulun toimipisteillään kaikille Suomen Maatalousautomaatio ry:n jäsenyrityksille [19]. Virallisia AEF:n hyväksymiä testilaboratorioita on viisi kappaletta. Näitä on Saksassa ISOBUS Test Center ja DLG (Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft), Ranskassa Kereval, Italiassa REI (Reggio Emilia Innovazione) ja Yhdysvalloissa Nebraska Tractor Test Laboratory. Tuotteen kehitysvaiheessa mitä tahansa menetelmää testaukseen käytettäessä, on kuitenkin virallinen CT suoritettava jossakin viidestä AEF:n hyväksymässä testilaboratoriossa [36]. Testauksessa suoritetaan automaattisesti eri testiskenaarioita. Testattavia asioita on satoja, jotka ovat tarkasti kuvattuina AEF:n dokumentaatiossa.

Conformance-testausta on suoritettava käytännössä aina, kun jokin asia tuotteesta muuttuu. Laitteistolle suoritetaan uudelleen testaus muutoksen yhteydessä, ellei kirjallisen teknisen riskiarvion perusteella laitevalmistaja toteaa muutoksen olleen irrelevantti AEF ISOBUS-sertifiointiin. Muutoksella tarkoitetaan minkä tahansa sähköisen komponentin muutosta. Laitteiston uudelleen testaus on kuitenkin suoritettava aina, jos prosessori, CAN-ohjain, CAN-lähetin/vastaanotin, virransyöttöpiiri, kello tai heräte/reset-piiri on muuttunut. Sovellukselle on käytännössä aina suoritettava uudelleen testaus, vaikkei laitteistolle sitä tarvitsisikaan tehdä. Sovelluksen testaus on tehtävä aina, jos sovellusta muutetaan. Tietyissä tilanteissa kuitenkin sovelluksen muutoksen uudelleen testauksen voi suorittaa itsenäisesti [21].

TIM-toiminto vaatii laajempaa conformance-testiprosessia kuin muut ISOBUS-toiminnot. TIM-laitteiden testaus tehdään kahdessa osassa. Ensiksi testi suoritetaan käyttäen kehityssertifikaatteja, jonka jälkeen tuotantosertifikaatit generoidaan laitteelle virallista testausta varten. Kehityssertifikaattien kanssa testaaminen on tehtävä AEF:n testilaboratoriossa, ja tuotantosertifikaattien kanssa testin voi suorittaa itsenäisesti testilaitteistolla tai samassa laboratoriossa, missä kehityssertifikaattien kanssa testaus on suoritettu. TIM-toiminnon conformance-testin tulee noudattaa tavallisen conformance-testin vaatimusten lisäksi seuraavia vaatimuksia. Laitteiston ja sovelluksen on oltava sertifioitu AEF:n testilaboratorion toimesta edellisessä conformance testissä, kehityssertifikaateilla tehtävästä conformance testistä kulunut aika ei ylitä kahta vuotta tuotanto sertifikaateilla tehtävään conformance testiin mennessä, itse sertifioidun sovelluksen toimintojen tulee olla samat kuin AEF:n testilaboratorion testaaman sovelluksen ja tuotanto sertifikaateilla suoritettava testi tulee tehdä samalla CT versiolla, kuin kehityssertifikaateilla suoritettu testi.

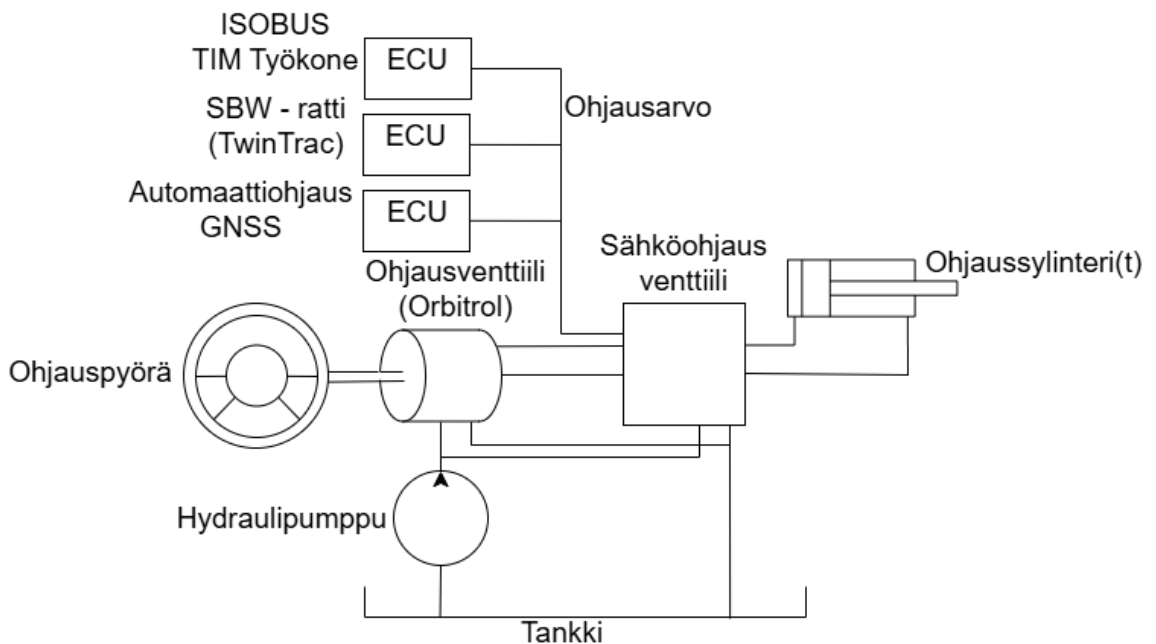
Conformance testistä julkaistaan joka vuosi uusi versio. Valmistajia ja AEF:n testilaboratorioita suositellaan aina käyttämään tuoreinta testiversiota. Uuden testiversion käyttöönottoon on virallinen siirtymäaika. Testin voi suorittaa vanhemmalla testiversiolla. Vanhin versio, jolla testin voi suorittaa, on edellisen kalenterivuoden ensimmäinen julkaistu testiversio [21].

5. KÄYTÄNNÖN SOVELLUS JA VAATIMUKSET

Luvussa esitellään diplomityössä käsiteltävä sähköinen ohjausjärjestelmäkonsepti. Kapaleissa esitellään tuote, sen käyttökohteet, siihen kohdistuvia vaatimuksia lainsäädännön ja AEF:n osalta.

5.1 Sovelluskonsepti

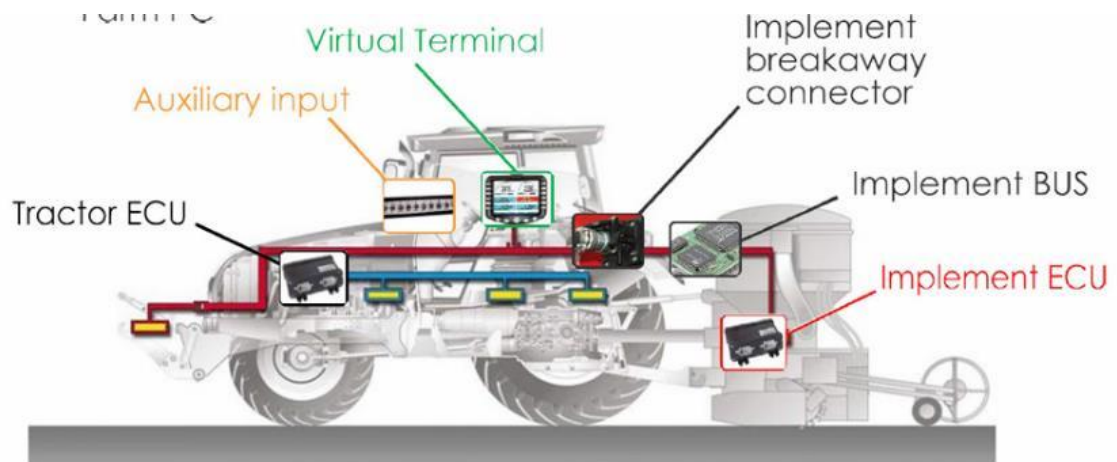
Diplomityön aiheena on ISOBUS TIM-toiminnon käyttäminen traktorin ohjaamiseen. Kuten aiemmin esiteltiin, traktorin ohjausjärjestelmä on usein toteutettu hydraulisesti ja se on niin sanottu hybridiohjausjärjestelmä. Kuva 8 on esitetty traktorin ohjausjärjestelmän rakenne hyvin yksinkertaistetusti.



Kuva 8. Yksinkertainen hahmotelma traktorin ohjausjärjestelmästä.

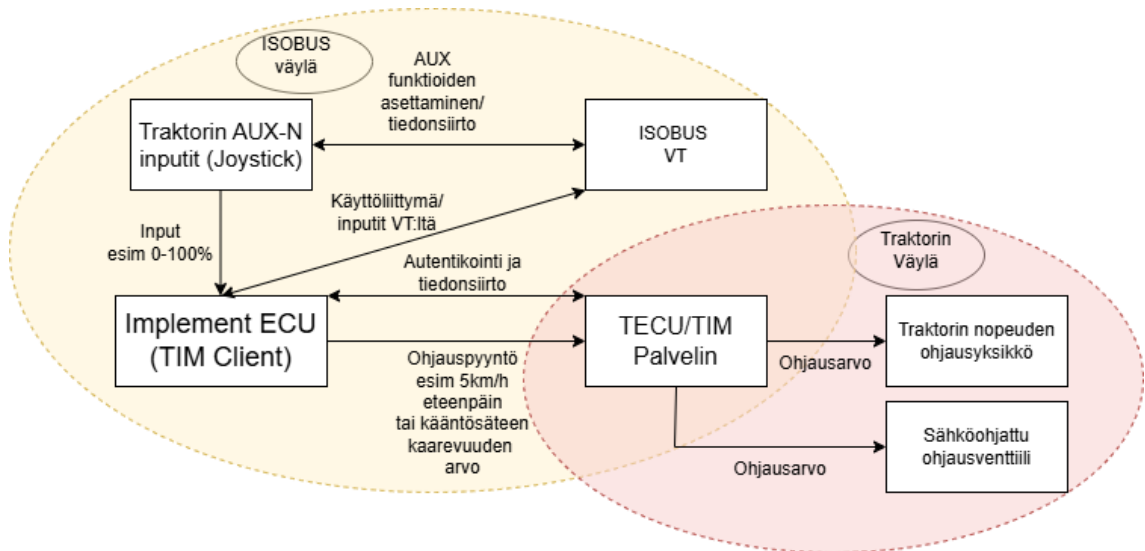
Ohjausventtiiliä ohjataan mekaanisesti ratilla ja sen kanssa toimii samalla sähköinen ohjausjärjestelmä. Rakenne ei ole kaikissa koneissa samanlainen, vaan traktorista riippuen järjestelmä saattaa olla hyvinkin erilainen. Sähköohjausventtiili voi olla sisäänrakennettu orbitrol-ohjausventtiiliin tai erillinen komponentti. Sähköisesti ohjattuja venttiilejä saattaa olla useampia eri toimintoja varten, tai sähköohjausventtiili voi olla erillinen muusta ohjausjärjestelmästä. Toimintaperiaate on kuitenkin sama, eli ohjausta voi tuottaa rattia

pyörittämällä tai antamalla ohjausarvoja suoraan sähköohjatulle ohjausventtiilille. Tavoitteena on siis tehdä ISOBUS TIM-laite, joka voi tuottaa ohjausarvoja sähköohjatulle venttiilille. Tavanomainen ISOBUS-traktorin ja työkoneen yhdistelmä on Kuva 9 mukainen.

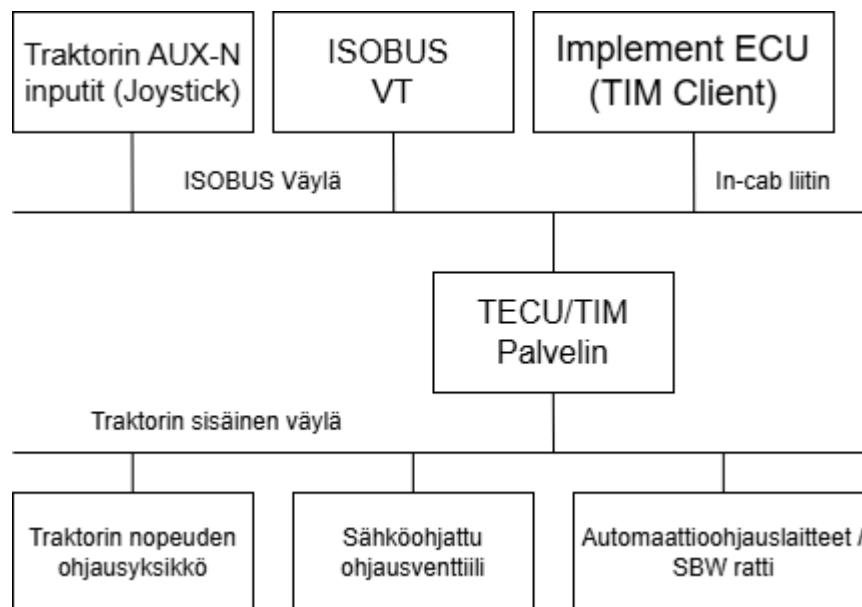


Kuva 9. ISOBUS järjestelmän rakenne [60].

Yleensä siis työkone liitetään traktorin perässä olevaan IBBC-liittimeen, mistä työkone saa tarvitseman sähkönsyötön ja liittyy ISOBUS väylään. Traktorin puolelta väylässä on kiinni esimerkiksi VT, AUX-laitteet ja TECU. Kuvasta voi huomata, että TECU on yhdistävä tekijä traktorin oman ja ISOBUS väylän välillä. TECU toimii siis yhdyskäytävänä väylien välillä. Diplomityön sovellus poikkeaa tavanomaisesta järjestelmästä siten, että sitä ei yhdistettäisi IBBC-liittimeen vaan traktorin hytissä sijaitsevaan in-cab-liittimeen. Tällöin koko järjestelmä pysyisi traktorin sisällä, eikä IBBC-liitintä varattaisi muilta ISOBUS työkoneilta. Laite yhdistetään siis fyysisesti traktorin in-cab-liittimeen, josta se saa yhteyden ISOBUS väylään. Sovelluksen on tarkoitus mahdollistaa TIM toimintojen kuten ulkoisen ohjauksen kaarevuuden ohjausarvon tai ajoneuvon nopeuden asettamisen AUX-N funktioiksi. Tällöin voidaan hyödyntää traktorin omia hallintalaitteita ohjaamiseen. AUX-N inputit tuottavat ohjausarvoja ohjainlaitteelle tai Implement ECU:lle, joka välittää niitä TIM toiminnallisuudella TECU:lle joka toimii rajapintana ohjausventtiilille traktorin sisäisessä väylässä. Kuva 10 ja Kuva 11 on esitelty sovelluksen väylärakennetta sekä komponenttien välistä signaalien sisältöä.



Kuva 10. Hahmotelma komponenttien välisestä viestinnästä.



Kuva 11. Traktorin väylärakenne ja komponenttien liitynnät.

Kuten rakenteesta voi päätellä, sovellus poikkeaa muista automaattiohjaus- tai SBW-järjestelmistä, sillä se ei suoraan pääse ohjaamaan ohjausventtiiliä tai nopeutta, vaan se välittää ne TECU:lle, joka toimii rajapintana traktorin väylälle.

Käytännössä laite koostuu yhdestä ohjainyksiköstä ja johtosarjasta. Kaikki muu toiminnallisuus tulee traktorin omista hallintalaitteista ja varustelusta. Täten tuote on mahdollisimman yksinkertainen ja komponenttimäärä on vähäinen.

5.2 Käyttöympäristö

Diplomityön sovelluksen suunniteltu pääkäyttökohde on metsäkäyttö. Metsässä traktorilla työskenneltäessä yleisesti traktoria käytetään yhdessä metsävaunun ja puutavara-kuormaimen kanssa. Kuormaimella voidaan esimerkiksi kerätä kaadettuja puita kärrylle. Kuormain on useimmiten kiinnitetty suoraan traktorin takanostolaitteisiin, erilliseen traktoriin kiinnitettyyn runkoon tai perävaunun aisan ja kuormatilan väliin. Kuormainta käytetään useimmiten penkki käännettynä taaksepäin. Jos konetta halutaan siirtää metsässä, tulee kuljettajan joko kääntää penkki ajoasentoon, siirtää kone ja kääntää penkki takaisin jatkaakseen työskentelyä. Vaihtoehtoisesti traktoreissa on saatavilla lisävarusteina taakseajolaitteita, joissa takaikkunalle kiinnitetään ohjauspyörä ja polkimet, joilla voidaan ajaa penkin ollessa käännettynä taaksepäin. Kuitenkin ohjainlaitteena toimii ohjauspyörä, joka olisi tarkoitus korvata joystickillä. Tällä pyritään vähentämään operaattorin tarvitsemia toimia koneen käyttämiseen ja jäljitellä metsäkoneiden ergonomisia ratkaisuja. Taaksepäin ajettaessa muussa kuin metsätyöskentelyssä saadaan etuja siten, että traktorin liitännät ovat oletuksena sen takaosassa. Traktorista tulee ajosuuntaan nähden takapyöräohjattu, minkä takia traktori saavuttaa pienemmän kääntösäteen. Traktori myös ajaa käsitellyllä alueella, eli jos esimerkiksi koneella lingotaan lunta, traktori työntäisi linkoa hankeen jo lumesta puhdistetulla alueella, eikä lumihangessa vetämällä. Traktorin hytistä näkyvyys on myös selkeästi parempi takatyökoneelle, kuin edessä olevalle koneelle konepellin ylitse.

Vaikka traktorin joystick SBW-ohjausta voidaan hyödyntää monessa eri käyttötilanteessa, on sen käyttöympäristöä rajoittava tekijä ajonopeus. Traktorin automaattiohjauslaitteet eivät toimi yli 25 km/h ajonopeudella. Automaattiohjauslaitteet eivät myöskään sovellu tieliikennekäyttöön, joten käyttöympäristöksi rajoittuu pääosin pihat, pellot, metsät ja muut suljetut työskentelyalueet. Joystick-ohjaaminen on ergonomisempi tapa ohjata traktoria perinteiseen ohjauspyörään verrattuna.

5.3 Konedirektiivin vaatimukset

Tuotteen vaatimustenmukaisuuden varmistaminen on suuri osa tuotteen kehitystä. Tuotteen on oltava lakien ja määräysten mukainen sekä turvallinen. Tällaisiin tuotteisiin ei ole yhtä selvää tapaa noudattaa ohjeita, jotta tuotteet tulisivat hyväksyttäviksi. Euroopan unionin alueella tulee noudattaa kansallisia sekä EU:n määrittämiä vaatimuksia. Diplomityössä käsiteltävään järjestelmään liittyviä määräyksiä tulee Euroopan parlamentin ja

neuvoston direktiivistä 2006/42/EY. Tunnetummin puhutaan konedirektiivistä. Konedirektiivi ollaan korvaamassa Euroopan parlamentin ja neuvoston asetuksella 2023/1230, mutta tämä astuu voimaan vuoden 2027 alusta, joten se ei ole vielä ajankohtainen diplomityön tekemisen aikana. Konedirektiivi on toimeenpantu Suomessa kansallisesti valtioneuvoston asetuksella 400/2008, joten sitä on Suomessa noudatettava [26].

Konedirektiivin 1 artiklan 1 kohdassa määritellään direktiivin soveltamisala. Tässä mainitaan, että direktiiviä sovelletaan koneisiin, vaihdettaviin laitteisiin, turvakomponentteihin, nostoapuvälineisiin, ketjuihin, köysiin ja vöihin, nivelakseleihin ja puolivalmisteisiin. Direktiivin 1 artiklan kohdassa 2 e mainitaan, ettei direktiiviä sovelleta maatalous- ja metsätraktoreihin, lukuun ottamatta näihin ajoneuvoihin kytkettyjä koneita. Huomioitavaa tässä on se, että vaikkei direktiiviä sovelleta maa- ja metsätaloustraktoreihin, sitä sovelletaan niihin kytkettyihin koneisiin. Direktiivin 2 artiklassa määritellään, että koneella tarkoitetaan 1 artiklan 1 kohdassa lueteltuja tuotteita. Täten edellä mainittuun kohtaan lukeutuva vaihdettava laite on direktiivin mukaan kone. Vaihdettava laite on määritelty direktiivissä 2 artiklan kohdassa b. Vaihdettavalla laitteella tarkoitetaan laitetta, jonka jo käyttöön otetun koneen tai traktorin käyttäjä itse kiinnittää kyseiseen koneeseen tai traktoriin sen toiminnan muuttamiseksi tai uuden toiminnon aikaansaamiseksi, sikäli kuin tämä laite ei ole työkalu [11]. Täten diplomityön aiheena oleva ohjausjärjestelmä on direktiivin määritelmän mukainen vaihdettava laite. Tulkinnanvarainen asia on, että luokitellaanko laite myös 2 artiklan kohdan g mukaiseksi puolivalmisteeksi, tai koneasetuksessa kutsutuksi osittain valmiiksi koneeksi. Direktiivin mukaan puolivalmisteella tarkoitetaan yhdistelmää, joka on melkein kuin kone, mutta joka ei sellaisenaan pysty suorittamaan erityistä toimintoa. Puolivalmiste on ainoastaan tarkoitettu liitettäväksi toisiin koneisiin tai muihin puolivalmisteisiin tai laitteisiin tai koottavaksi niiden kanssa siten, että muodostuu sellainen kone, johon sovelletaan tätä direktiiviä [11].

Diplomityössä käsiteltävä laite voi lukeutua sinänsä molempiin kategorioihin, koneeksi ja puolivalmisteeksi. Näitä kuitenkin koskevat eri vaatimukset valmistajan osalta, joten on lopputuloksen kannalta merkittävää, kumpaan kategoriaan laite lopulta luokitellaan.

Konedirektiivin 5 artikla on oleellinen koneen suunnittelussa. Artiklassa määritellään ehdot, joilla tuotteen voi saattaa markkinoille ja ottaa käyttöön. Artiklassa on 4 kohtaa, joista ensimmäisessä määritellään asiat, joita valmistajan on tehtävä ennen markkinoille saattamista tai käyttöönottoa [11]. Vaatimuksia ovat seuraavat

- Valmistajan on varmistettava, että kone täyttää direktiivin liitteessä I esitetyt sitä koskevat olennaiset turvallisuus- ja terveysvaatimukset

- Valmistajan on varmistettava, että liitteessä VII olevassa A osassa tarkoitettu tekninen rakennetiedosto on käytettävissä
- Valmistajan on huolehdittava erityisesti tarvittavan tiedon, kuten ohjeiden, saatavuudesta.
- Valmistajan on suoritettava asianmukainen vaatimustenmukaisuuden arviointimenettely 12 artiklan mukaisesti.
- Valmistajan on laadittava liitteessä II olevan 1 osan A-jakson mukainen EY-vaatimustenmukaisuusvakuutus ja varmistettava, että se on koneen mukana.
- Valmistajan on kiinnitettävä koneeseen CE-merkintä 16 artiklan mukaisesti.

[11].

Artiklan kohdassa 2 mainitaan puolivalmisteen markkinoille saattamisesta. Valmistajan on ennen puolivalmisteen markkinoille saattamista varmistettava, että 13 artiklassa tarkoitettu menettely on saatettu loppuun. Kohdassa 3 edellytetään, että valmistajalla on 12 artiklassa tarkoitettuja menettelyjä varten oltava käytettävissä tarvittavat keinot varmistaa, että kone on liitteen I mukaisten olennaisten turvallisuus- ja terveysvaatimusten mukainen. Kohdassa 4 mainitaan, että jos kone kuuluu myös jonkin toisen direktiivin soveltamisalaan, tulee niiden mukaisten sääntöjen noudattaminen myös osoittaa [11]. 5. artiklasta voidaan päätellä, että jos laite luokitellaan koneeksi, tulee ensimmäistä, kolmatta ja neljättä kohtaa noudattaa. Jos se taas luokitellaan puolivalmisteeksi, tulee toista ja neljättä kohtaa noudattaa.

Tilanteessa, missä laite luokitellaan koneeksi, noudatetaan 5 artiklan ensimmäistä kohtaa. Ensimmäisenä on osoitettava, että kone täyttää liitteen I vaatimukset. Tämä voidaan osoittaa noudattamalla 12 artiklan mukaista vaatimustenmukaisuuden osoittamisen menettelyä. 12 artiklan kohdassa 2 mainitaan, että jos konetta ei ole mainittu liitteessä IV, sen valmistajan on sovellettava liitteessä VIII säädettyä arviointimenettelyä. Koska diplomityön aiheena olevaa laitetta ei ole mainittu liitteessä IV, sovelletaan siten liitettä VIII. Liite VIII määrää valmistajan laatimaan liitteessä VII olevan A-osan mukaisen teknisen tiedoston ja toteuttamaan kaikki tarvittavat toimenpiteet sen varmistamiseksi, että valmistusmenetelmällä taataan koneiden olevan teknisen tiedoston ja direktiivin säännösten mukaisia. Artiklan 5 seuraava kohta edellyttää, että edellä mainittu tekninen tiedosto on käytettävissä ja että erityisesti tarvittavat tiedot, kuten ohjeet, ovat saatavilla. Seuraava kohta käskee noudattamaan artiklaa 12, jossa käskettiin arvioimaan vaatimuksenmukaisuutta. Valmistajan on myös laadittava EY-vaatimustenmukaisuusvakuutus, ja varmistettava, että se on kohteen mukana. Kun nämä kohdat ovat täytetty, on valmistajan kiinnitettävä koneeseen CE-merkintä 16 artiklan mukaisesti [11].

Valmistajan on siis varmistettava, että tuote on liitteen I vaatimusten mukainen. Tähän voidaan hyödyntää 7 artiklaa. 7 artiklassa sanotaan, että kaikkia CE-merkittyjä koneita, joita seuraa Liitteen II 1 osan A jakson mukainen EY-vaatimustenmukaisuusvakuutus, on pidettävä direktiivin säännösten mukaisena. Artiklan toisessa kohdassa sanotaan, että jos kone on valmistettu sellaisten yhdenmukaistettujen standardien mukaisesti, joiden viite tai viitetiedot on julkaistu Euroopan unionin virallisessa lehdessä, sen oletetaan täytettävän kyseisen yhdenmukaistetun standardin kattamat olennaiset terveys- ja turvallisuusvaatimukset [11]. Toisin sanoen, jos tuote suunnitellaan yhdenmukaistettujen standardien mukaan, voidaan olettaa tuotteen olevan vaatimustenmukainen.

Direktiivin liitteessä I esitetään olennaiset terveys- ja turvallisuusvaatimukset. Liite I on jaettu useihin lukuihin. Luvussa 1 esitetään vaatimukset, jotka koskevat kaikkia standardin mukaisia koneita. Luku 2 on tarkoitettu vain tietyille, luvussa eritellyille koneille. Koneisiin lukeutuu muun muassa kosmetiikka- ja lääketuotteiden valmistamiseen käytetyt koneet tai torjunta-aineiden levityskoneet. Luvussa 3 esitellään vaatimukset koneen liikkumisesta aiheutuvien erityisten vaarojen poistamista koskien. Luvussa 4 esitellään täydentävät vaatimukset nostamisesta aiheutuvien vaarojen poistamiseksi. Luvussa 5 esitellään maanalaiseen työhön tarkoitettuja koneita koskevat vaatimukset ja luvussa 6 henkilöiden nostamisesta aiheutuvia vaaroja koskevat vaatimukset [11].

Liitteen I etusivulla esitellään yleiset periaatteet. Yleiset periaatteet sanovat, että valmistajan on varmistettava, että suoritetaan riskin arviointi, jotta sovellettavat terveys- ja turvallisuusvaatimukset voidaan määrittää, ja että kone on riskin arvioinnin jälkeen suunniteltava ja rakennettava ottaen huomioon riskin arvioinnin tulokset. Liitteen asettamia velvoitteita tulee soveltaa ainoastaan, jos vastaava vaara on olemassa koneessa, valmistajan ennakoimissa olosuhteissa tai ennakoitavissa epätavallisissa tilanteissa. Joka tapauksessa on sovellettava kohtia 1.1.2, 1.7.3 ja 1.7.4. Näissä kerrotaan yleiset turvallistamisen periaatteet sekä ohjeita ja merkintöjä koskevat vaatimukset. Liitteen vaatimukset ovat pakottavia, mutta joissain tapauksissa voi olla, ettei tavoitteita voida saavuttaa. Tällöin tavoitteita tulee vastata mahdollisimman hyvin. Vaikka liite I on jaettu lukuihin, on olennaista, että liitettä tarkastellaan kokonaisuutena, jotta voidaan olla varmoja, että kaikki merkitykselliset vaatimukset täyttyvät [11].

Valmistajan on riskin arvioinnissa direktiivin mukaan, määriteltävä koneen raja-arvot, joihin sisältyvät tarkoitettu käyttö sekä kohtuudella ennakoitavissa oleva väärinkäyttö, tunnistettava koneen mahdollisesti aiheuttamat vaarat ja niihin liittyvät vaaratilanteet, arvioitava riskin suuruus ottaen huomioon mahdollinen vamman tai terveyshaitan vakavuus ja todennäköisyys, arvioitava riskin merkitys sen määrittämiseksi, onko riskiä tämän di-

rektiivin tavoitteen mukaisesti pienennettävä ja poistettava vaarat tai pienennettävä näihin vaaroihin liittyviä riskejä soveltamalla suojaustoimenpiteitä 1.1.2 kohdan b alakohdassa määrättyssä ensisijaisuusjärjestyksessä [11]. Aiemmin mainitusti direktiivin vaatimuksia voidaan osoittaa noudatetuiksi seuraamalla harmonisoituja standardeja. Riskin arvioimiseen soveltuva standardi on Euroopan unionin virallisessa lehdessä mainittu EN ISO 12100:2010. Riskianalyysiä ei ole pakko tehdä ISO 12100 mukaan, mutta sitä noudattamalla voidaan osoittaa, että riskianalyysi on tehty direktiivin mukaisella tavalla. SFS-ISO/TR 14121-2:2013 on tekninen raportti, jossa on ohjeita riskien arvioimiseksi ISO 12100:2010 mukaisesti. Valmistaja voi siis käyttää esimerkiksi näitä standardeja riskin arvioimiseen [38].

Muita harmonisoituja standardeja, jotka liittyvät aiheeseen, löytyi Euroopan unionin virallisesta lehdestä. Tällaisia standardeja ovat muun muassa EN ISO 25119-1:2023, 2, 3 ja 4, EN ISO 14982:2009, EN ISO 18497:2018, EN IEC 62061:2021, EN 894-1:1997+A1:2008 ja 2, EN 894-3:2000+A1:2008 ja EN 894-4:2010 sekä EN ISO 13849-1:2023 ja EN ISO 13849-2:2012. Laitteeseen voi kohdistua direktiivin turvallisuusvaatimuksia, myös sellaisista kohdista, mitä ei ole katettu näissä standardeissa, mutta nämä ovat harmonisoitujen standardien listalta poimittuja standardeja, jotka liittyvät asiaan [25]. Näistä IEC 62061, ISO 13849 ja ISO 251191 koskevat ohjausjärjestelmien turvatoimintoja[45][46][44]. Näistä ISO 25119 on erityisesti tarkoitettu traktoreiden ja maa- ja metsätalouskoneiden ohjausjärjestelmille. Täten ISO 25119 on oleellisin näistä standardeista [49][50][51][52]. ISO 14982 käsittelee elektromagneettista yhteensopivuutta, ja kattaa testimetodit ja hyväksyntäkriteerit. Nämä vaatimukset täytetään ohjainyksikön valmistajan toimesta, joten näitä ei tarvitse huomioida, jos ne ovat jo täytetyt [47]. ISO 18497 käsittelee osittain automatisoitujen, osittain autonomisten ja autonomisten koneiden turvallisuutta. Tämän standardin laajuus kattaa toiminnot peltoympäristöissä ja pelto-työskentelyssä, muttei metsäsovelluksissa. Standardia on noudatettava tuotteen käyttöympäristön rajauksesta riippuen [48]. EN 894 1-4 osat koskevat käyttöliittymien vaatimuksia. Näissä huomioidaan muun muassa hallintalaitteet ja näytöt, joten standardeja on huomioitava tehtäessä sovelluksen käyttöliittymää [40][41][42][43].

Konedirektiivin vaatimusten osalta oleellista on siis täyttää Liitteen I turvallisuus- ja terveysvaatimukset ja suorittaa riskien arviointi, jotta voidaan päätellä, mitkä näistä vaatimuksista tulee täyttää. Lähinnä nämä vaatimukset osoitetaan noudatetuiksi käyttämällä liitteen kohtiin soveltuvia harmonisoituja standardeja.

5.4 Muut vaatimukset

Lainsäädäntö asettaa pakottavat vaatimukset koneille, mutta koska AEF toimii valvovana ja hyväksyvänä osapuolena ISOBUS-tuotekehityksessä, on AEF:n asettamia vaatimuksia myös noudatettava. Pääsääntöisesti noudattamalla ISO 11783-standardisarjaa, voi olettaa tuotteen olevan ISOBUS:n mukainen. Koska standardeissa kuitenkin on tulkinnan varaisia asioita, joita valmistajat ovat toteuttaneet eri tavoin, on AEF laatinut guideline-dokumentteja, joissa asetetaan vaatimuksia ISOBUS-toiminnoille. Nämä vaatimukset ovat conformance-testeissä testattavia asioita ja ne ylittävät standardeissa asetetut vaatimukset. Eli jos guideline dokumentissa määritetään jotakin asiaa standardista poiketen, on noudatettava guideline dokumenttia, jotta CT voidaan läpäistä ja tuote hyväksytysti saattaa markkinoille ISOBUS tuotemerkillä [4].

5.4.1 Toiminnallinen turvallisuus

Toiminnallisen turvallisuuden vaatimuksia ISOBUS:n automaattisille toiminnoille, kuten TIM, TC ja SC, on kuvattu omassa guideline-dokumentissaan. Automaattisia toimintoja kuvataan AOAS (engl. Advanced Operator Assistance System) -järjestelminä. AOAS-järjestelmä tarkoittaa käytännössä sitä, että operaattorin vastuulla on tarkkailla ympäristöä ja valvoa järjestelmää sen käytön aikana. Operaattorin tulee olla mahdollista ohittaa järjestelmän toiminnot millä hetkellä tahansa. Guidelinen mukainen toiminnallinen turvallisuus AOAS-järjestelmään perustuu inherent safety -konseptiin, jolla pyritään minimoimaan riskit järjestelmässä. Guideline vaatii valmistajaa suorittamaan laitteelle riskien arvioinnin esimerkiksi ISO 12100 mukaisesti. AEF:n toiminnallisen turvallisuuden projektiyhmä on suorittanut yleisen AOAS-järjestelmien turvallisuusanalyysin. Tässä on muodostettu yleiset säännöt kaikille AOAS-toiminnoille ja jokaiselle TIM-funktiolle on myös funktiokohtaiset turvallisuustoiminnot. Yleisissä säännöissä on mainittu seuraavat [2].

- Automaation osapuolten on suoritettava määritellyt toimet, jos ISB aktivoidaan, riippumatta funktion tilasta.
- Palvelimen on määriteltävä operointitilat, kuten paikallaan olo, ja palvelimen tulee viestiä kyseistä tilaa tietyin väliajoin.
- Jos palvelin havaitsee vikatilaa, tulee sen lähettää operointitilana error.
- Jos client havaitsee vikatilaa, tulee sen asettaa vikaan relevanttien funktioiden pyyntöarvot soveltuviksi riskiarvion perusteella, esimerkiksi pysähtyä tai asettaa pyyntö invalidiksi.
- Palvelimen tulee suorittaa clientin pyyntö kyseisen funktion operaattorin tai palvelimen asettelemassa rajoissa.

- Osapuolten tulee varmistaa asianmukaiset varoitukset automaation aikana.

[2].

TIM-laitteille on asetettu omia vaatimuksia yleisten sääntöjen lisäksi. Näitä vaatimuksia ovat seuraavat.

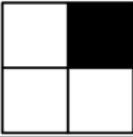
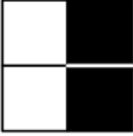
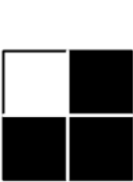
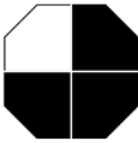


- ISOBUS-verkossa voi olla kerrallaan vain yksi TIM-palvelin, joka toimii johtavana TIM-palvelimena.
- Jos kyseessä on useamman palvelimen verkko, mikään palvelin ei voi mennä automaatio aktiiviseen tilaan, ennen kuin johtava TIM-palvelin on tunnistettu ja aktiivinen. Tällä hetkellä TIM-toteutus ei kuitenkaan mahdollista kuin yhden palvelimen kerrallaan, joten se toimii aina johtavan palvelimena.
- Jos TIM-funktio poistuu automaatio aktiivisesta tilasta, tulee operaattoria informoida asiasta clientin toimesta. Operaattoria tulee informoida palvelimen toimesta, jos TIM clientin ja palvelimen välinen viestintä pysähtyy ilman hallittua funktion vapautusprosessia tai jos client lähettää invalidin pyynnön palvelimelle.
- Palvelimen tulee informoida operaattoria, jos jossakin toiminnossa havaitaan vika.
- TIM-laitteiden tulee olla AEF guideline 023 ja 007 mukaisia, joka testataan kolmannen osapuolen toimesta. Kolmannen osapuolen on myös varmistettava, että valmistajalla on osoitus AEF 007 mukaisten toiminnallisen turvallisuuden funktioiden noudattamisesta. Valmistajan tulee osoittaa noudattaneensa TIM-laitteen toiminnallisen turvallisuuden vaatimukset, käyttäen esimerkiksi riskiarvointiin perustuvaa menetelmää, jossa on huomioitu AEF:n guideline-dokumentit.
- Jokaisen TIM-laitteen tulee tarkastaa toisen osapuolen autenttisuus käynnistyksessä, jotta TIM-automaatiota voidaan suorittaa.
- TIM-palvelinten tulee varmistaa, että jokaista funktiota voidaan ohjata vain yhden clientin toimesta samanaikaisesti.
- TIM-clientin tulee valvoa aktiivista funktiota. Jos funktio ei toimi oikein, tulee operaattoria informoida ja toteuttaa soveltuvat toimenpiteet riskiarvioon perustuen.
- TIM-osapuolten on CAN-viestiliikenteessä lähetettävä vähintään yksi viesti, jossa on sekvenssinumerointi, jotta vastaanottaja voi suorittaa watchdog-laskentaa. Osapuolten on tarkastettava toistensa TIM-viestit ja viestin tarkastuksen epäonnistuessa tulee vastaanottajan lopettaa kyseisen funktion automaatiotoiminnot.

- Jokaisen TIM-clientin tulee mahdollistaa hallittu TIM-funktioiden vapautustointo.
- Järjestelmän ollessa soveltumattomassa tilanteessa, tulee Clientin estää automaation aktivointi tai lopettaa automaation käyttäminen.
- Palvelimen tulee estää liikkeellelähtö ilman operaattorin kuittausta, jos sovellettu aikaikkuna on umpeutunut.
- Palvelimen tulee varmistaa operaattorin läsnäolo ja sallia automaatio ainoastaan, jos operaattori on läsnä.
- Palvelimen tulee varmistaa, että operaattori voi yliohtaa automaattiset funktiot millä hetkellä hyvänsä.

[2].

TIM-laitteiden käynnistymiseen on myös annettu vaatimuksia. TIM-palvelinten tulee käynnistyä automaatio ei aktiivinen tilassa. Täten funktiot eivät käynnisty arvaamattomasti. TIM-funktioiden aktivoiminen tulee olla kaksivaiheinen. Täten haluamattomia funktioita ei aktivoida vahingossa. Clientin tulee vaatia operaattoria käynnistämään automaatio, jonka jälkeen operaattorin tulee hyväksyä funktion siirtyminen automaatio aktiivinen tilaan TIM-palvelimen tarjoamalla tavalla. TIM-automaaatiota ei voida myöskään aktivoida, jos OPTO eli operaattorin läsnäolon tunnistuksen aikakatkaaisu on ilmennyt (engl. Operator Presence timeout). TIM-funktioiden poiskytkemiseen on myös ehtoja. Jos palvelin ei kykene suorittamaan TIM-funktion toimintaa tai OPTO on ilmennyt, tulee kaikki funktiot deaktivoida. Palvelimen tulee deaktivoida yksittäinen funktio, jos client vapauttaa funktion ohjauksen, tai jos funktiota hallinnee clientin ja palvelimen välinen yhteys katoaa. Joillekin funktioille määritellään tarkempia lisävaatimuksia [2].

TIM-järjestelmässä voi olla useita aktiivisia funktioita ja laitteita. Operaattori ei välttämättä pysty seuraamaan jokaista samaan aikaan. Jotta operaattori olisi tietoinen aktiivisesta toiminnosta, tulee johtavan TIM-palvelimen informoida operaattoria kokoaikaisesti aktiivisesta automaation tilasta käyttäen ennalta määrättyjä symboleita. Clientin tulee taas näyttää symboleja vähintään oman käyttöliittymän pääsivulla, mutta symboleiden näyttäminen myös muualla on suositeltavaa [2]. Jokaiselle automaation tilalle on kuvattu käytettävä symboli palvelimelle ja clientille. Käytettävät symbolit automaation eri tiloille on esitelty Kuva 12.

State name	State description	Symbol for TIM client	Symbol for Lead TIM server
(0) Automation Unavailable	None of the required TIM functions available at TIM server and/or TIM client is configured to use TIM automation.	Square with pies not shown	Not required
(1) Automation not Ready	TIM client supports TIM automation and checked availability of required functions on associated TIM server		Not required
(2) Automation Ready to Enable	No condition on TIM client that would inhibit TIM automation (for example active fault) and TIM authentication established. The TIM client is ready for transition to Enabled at operator's request.		Not required
(3) Automation Enabled	Operator actively enabled TIM client to use TIM automation during this power cycle. In case TIM client get its minimum set of TIM functions assigned (see 6.5 - Assignment of TIM functions) the TIM client is ready for transition to "Automation Active (Armed and Ongoing)" at the operator's acknowledgement		(optional) 
(4) Automation Pending	Only used for generic TIM function	No symbol	No symbol
Automation Active (Armed and Ongoing)	Operator actively acknowledged activation of automation and all conditions for activation and operation of TIM function automation fulfilled. In particular during standstill it shall be obvious to the operator that some functions are still ongoing and actively controlled by a TIM client.		(required) 
(5) Active, not Limited			
(6) Active, Limited High	NOTE This may be additionally realized by animating the symbol overlaying the pie-chart.		
(7) Active, Limited Low			

Kuva 12. Käytettävät TIM-Symbolit [1].

Operaattorin hyväksyntä TIM-funktion ohjaamisen clientille myöntämiseen ei saa aiheuttaa arvaamatonta liikettä. Täten operaattorin hyväksynnän antamisen tulee noudattaa AEF guideline 006 dokumenttia [2]. Dokumentissa määritellään, että on valmistajan vastuulla huolehtia siitä, että funktiot ovat suojattuna arvaamatonta liikettä vastaan. Tapoja, joilla voidaan estää haluamatonta funktion aktivoitua, ovat esimerkiksi kaksivaiheinen toiminnon käyttäminen. Esimerkiksi usean napin sekvenssissä käyttäminen tai mekaaninen suojaus, esimerkiksi suojakannen laittaminen napin päälle, mikä estää tahattoman painamisen. Dokumentissa on myös mainittu, että ISO 11783-6 standardin mukaista AUX lisälaitetta voidaan käyttää turvallisuuteen liittyvään ohjaukseen käyttämällä critical control bittiiä [3].

TIM-automaatiotoiminnot vaativat pääsääntöisesti operaattorin hyväksynnän, silloin kun kone on paikallaan. Tähän on kehitetty vapaaehtoisesti noudatettava aikaikkuna-konsepti, jolla mahdollistetaan automaation aktivoimista ilman operaattorin hyväksyntää paikallaan ollessa. Peruseriaatteeltaan aikaikkuna mahdollistaa automaation aloittamisen ilman operaattorin hyväksyntää, jos se aloitetaan aikaikkunan sallimissa rajoissa. Tällä pyritään vähentämään operaattorilta tarvittavaa toimintaa järjestelmän käyttämiseen. Aikaikkunan sisällä toteutetusta liikkeestä varoitetaan operaattoria. Aikaikkunan valvonta on palvelimen tehtävä, ja sen maksimipituus on 60 sekuntia. Palvelimen ei ole välttämättöntä tarjota aikaikkunaa käyttöön TIM-funktioille. TIM-client voi asettaa kaikille tukemilensa funktioille erikseen halutun hyväksyttävän aikaikkunan 0–60 sekunnin väliltä. Esimerkiksi riskiarvion perusteella voi olla haluttua rajoittaa jonkin toiminnon aikaikkuna alle 60 sekuntiin tai olla käyttämättä sitä ollenkaan. Operaattorin tulee myös hyväksyä aikaikkuna toiminnon käyttäminen TIM funktioille [2].

Olenaisia TIM-toimintoja diplomityön laitteelle ovat ulkoinen ohjausarvon muuttaminen ja ajonopeuden arvon muuttaminen. Näiden toimintojen tulee noudattaa kaikkia yleisiä sääntöjä, mutta niille on asetettu myös funktiokohtaisia lisävaatimuksia. Ohjauksen kohdalla vaatimuksia ovat seuraavat. Palvelin ja client ovat molemmat suunniteltava ISO 10975 mukaisesti. Johtavan TIM-palvelimen tulee huolehtia ISO-standardin kohdista 4.3.2 b) ja 4.3.5. Palvelimen tulee myös vastata kohdista 4.3.6, 4.3.7 a) ja 4.3.7 d). AEF guideline-dokumentissa viitataan standardin ISO 10975:2009-versioon, joka on kumottu 2023-versiolla. Guidelinen viittaamat kohdat löytyvät uudemmasta standardista sellaiseenaan, mutta eri numeroilla. Kohdissa johtavalta palvelimelta vaaditaan, että operaattorille on tarjottava keinot vaihtaa järjestelmän tilaa enabled-tilasta aktiiviseksi katkaisjoilla, näyttöpainikkeilla tai muulla vastaavalla tavalla ja että järjestelmän tulee vaatia operaattorilta komentoa vaihtaa tilaa aktiiviseksi. Palvelimen täytyy myös varmistaa, ettei ohjausjärjestelmä kykene liikuttamaan ohjattavia elementtejä koneen ollessa paikallaan ja että aktiivisesta tilasta siirrytään pois, jos operaattori kääntää ohjauspyörää tai maksimissaan 10 sekunnin kuluttua operaattorin läsnäolon puutteen havaitsemisen jälkeen [2].

Clientin tulee vastata kohdista 4.3.2 a), 4.3.2 c), 4.3.3, 4.3.4, 4.3.7 b), 4.3.7 c), 5.2.2 ja 5.2.3. Näissä määritetään, että operaattorin tulee kyetä vaihtamaan ohjausjärjestelmän tilaa enabled ja disabled tilojen välillä sekä aktiivisesta disabled tilaan. Operaattorille tulee esittää visuaalinen indikaattori nykyisestä tilasta ja äänimerkki, kun siirrytään aktiiviseen tilaan tai pois siitä. 4.3.7 b ja c kohdat sisältävät ehdot aktiivisesta tilasta pois siirtymiseen, jos järjestelmä käyttää satelliitti-signaalia ohjaamiseen. Turvallisuushuomaukset järjestelmään liittyen voi olla liitetty laitteeseen näkyville fyysisesti tai ne voidaan

esittää sähköisesti. Ohjeistavat huomautukset tulee selvästi erota turvallisuushuomautuksista. Palvelimen ja clientin on molempien tarjottava käyttöohjeet automaattiohjausjärjestelmän käyttöön. Etenkin ohjeissa on ilmevä, miten ohjausjärjestelmän saa poiskytkettyä tiellä ajamisen ajaksi. Käynnistyessään palvelimen ja clientin on huolehdittava siitä, että ohjausjärjestelmä on poissa käytöstä, eli disabled-tilassa. Johtavan palvelimen on huolehdittava operaattorin läsnäolon varmentamisesta. Client saa myös asettaa lisätoimintoja läsnäolon tunnistamiselle, mutta niillä ei voi korvata palvelimen suorittamaa operaattorin läsnäolon valvontaa. Lisäksi ehtoina aktiiviseen tilaan siirtymiselle on se, ettei operaattori siirtymisen hetkellä käännä rattia. Käytön aikana TIM-palvelimen tulee tarjota rajoitukset ohjaukselle. Deaktivoimisen jälkeen ohjausjärjestelmän on annettava hallinta takaisin operaattorille [2].

Nopeusarvon muutokselle lisävaatimuksia on, että TIM-palvelimen tulee sallia nopeuden säätö ainoastaan, jos vaihteiston hallintalaitteet eivät ole vapaalla tai pysäköintivaihteella. Tarkoittaen, että vaihde on kytkettävä ennen nopeuden säädön sallimista. 0 km/h pyyntöarvolla TIM-palvelimen tulee pysäyttää ajoneuvo tai asettaa pienin mahdollinen ajonopeus, jos vaihteisto ei ole kykenevä automaattiseen pysäytykseen. Jos client pyytää ajonopeuden muutosta, on TIM-palvelimen tehtävä huolehtia siitä, että operaattorin on hyväksynyt kyseisen nopeuden muutoksen. Nopeuden ohjaaminen on sallittua eteen ja taaksepäin, mutta taaksepäin nopeusarvon ohjaaminen on valinnaista. Palvelimen tulee estää automaattinen suunnan vaihtaminen, mutta ajoneuvon pysäyttäminen ja sen jälkeinen vastakkaiseen suuntaan nopeusohjausarvon pyytäminen tulee olla sallittua. Lisäksi nopeuden ohjaaminen tulee poistaa käytöstä, jos operaattori asettaa vaihteen vapaalle tai parkille. Jos automaatio poistetaan käytöstä, kun ajoneuvo on pysähtyneenä, tulee sen pysyä pysähtyneenä ja jos kone on liikkeessä, palvelimen tulee mennä turvalliseen tilaan, jossa ajonopeutta voidaan hallita turvallisesti [2].

AEF guideline 007 liitteenä on annettu lista turvallisuustoiminnoista, jotka ovat pakollisia TIM-laitteille. Näitä toimintoja on 17 kappaletta. Osa toiminnoista toteutuu noudattamalla TIM-funktioita ja TIM:n yleisiä sääntöjä. Turvallisuustoiminnot ovat nimetty SF1.1 – SF17.1. SF x.1 toiminnot ovat nimenomaan TIM-toiminnoille ja SF x.2 tai x.3 ovat muille ISOBUS-automatiotoiminnoille, kuten TC:lle ja SC:lle tarkoitettuja turvatoimintoja. TIM-automatiolle tarkoitettuja turvatoimintoja ovat seuraavat.

- SF1.1 Palvelimen tulee deaktivoitua, jos operaattori ei ole läsnä.
- SF2.1 Palvelimen tulee tarjota operaattorille keino ottaa hallinta TIM toiminnoilta milloin tahansa

- SF3.1 Clientin tulee varmistaa, ettei automaatio aktivoidu tai deaktivoidu epäso-
pivissa tilanteissa.
- SF4.1 Palvelimen tulee tarjota lukitusmekanismi venttiileille tiellä kuljettamisen
ajaksi, lukiten myös automaation.
- SF5.1 Palvelimen tulee seurata clientin pyyntöä määritellyissä rajoissa.
- SF6.1 Palvelimen tulee taata, ettei ajoneuvon liikettä aiheudu, ilman operaattorin
hyväksyntää (vapaaehtoisen) aikaikkunan sulkeuduttua.
- SF7.1 Palvelimen tulee taata, ettei automaattista ohjausliikettä sallita paikallaan.
- SF8.1 Clientin tulee taata soveltuvat operaattorin varoitukset.
- SF9.1 Palvelimen tulee taata, ettei voiman ulosotto kytkeydy paikallaan ollessa,
ilman operaattorin hyväksyntää (vapaaehtoisen) aikaikkunan sulkeuduttua.
- SF10.1 Palvelimen tulee tarjota lukitusmekanismi nostolaitteelle tiellä kuljettami-
sen ajaksi, lukiten myös automaation.
- SF11.1 TIM osapuolten tulee vastaanottaa operaattorin hyväksyntä aktiivisessa
tilassa.
- SF12.1 Palvelimen tulee tarjota ohjaukselle rajoitukset ajonopeuden mukaisesti.
- SF13.1 Clientin tulee taata soveltuvat operaattorin ja sivullisten varoitukset, kun
automaatiota käytetään paikallaan.
- SF14.1 Clientin tulee tarjota tapa poiskytkä TIM.
- SF 15.1 Ohjauspalvelimen tulee taata soveltuvat operaattorin varoitukset.
- SF16.1 Palvelimen tulee taata, ettei nostolaitteen automaattista liikettä sallita pai-
kallaan ollessa, ilman operaattorin hyväksyntää (vapaaehtoisen) aikaikkunan sul-
keuduttua.
- SF17.1 Palvelimen tulee tarjota deaktivointi tai lukitusmekanismi automaattiselle
ohjaustoiminnolle tiellä kuljettamisen ajaksi.

[2].

5.4.2 ISO-25119

AEF guideline-dokumenttien lisäksi huomioitavaa on, että ISO 25119-2-standardissa on liite I, jossa annetaan 25119-standardin vaatimusten mukaisuudelle vaihtoehtoinen toteutustapa. Liitteessä I lukee, että toisiinsa liitetyt järjestelmät voivat noudattaa vaihtoehtoisesti Liitteen I menettelyä. Toisiinsa liitetyillä järjestelmillä tarkoitetaan järjestelmiä,

missä ensimmäinen järjestelmä on markkinoilla saatavilla oleva traktori tai työkone ja siihen liitetään toinen tai useampi erillinen järjestelmä. Tällaisia ovat esimerkiksi jälki-markkinoilta saatavat ohjausjärjestelmät tai pysäytyksessä avustavat lisälaitteet [50].

Tällainen toisiinsa liitetty järjestelmäkokonaisuus voidaan olettaa täyttävän ISO 25119:n vaatimukset, jos seuraavat ehdot täytetään. Molempien järjestelmien valmistajien tulee olla suorittanut ISO 12100:n mukainen vaarojen tunnistamisen analyysi yhdistetylle järjestelmälle. Mahdollisuuksien mukaan yhdistettyä järjestelmää tulee myös arvioida ISO 12100:n riskiarvion mukaan. Ensimmäisen järjestelmän viat voidaan olettaa huolehdituksi kyseisen järjestelmän valmistajan toimesta, joten liitettävän järjestelmän valmistajan ei tarvitse huolehtia ISO 25119:n mukaisuudesta ensimmäisen järjestelmän muuttomattomilta osin. Liitettävän järjestelmän ohjausvaikutukset järjestelmien välillä tulee noudattaa ISO 25119 kaikilta osilta, mutta ensimmäisen järjestelmän voidaan yleisesti olettaa toimivan ilman vikoja. Sähköinen kommunikaatio järjestelmien välillä tulee arvioida siihen liittyviltä osin ISO 25119 mukaisesti, ja siinä tulee huomioida mahdollisia vikoja ensimmäisestä järjestelmästä [50].

Toisiinsa liitettävät järjestelmät tulisi suunnitella ja arvioida valmistajan toimesta siten, että kokonaiskuvassa kone ei menetä sen ISO 4254 tai ISO 26322 -standardien mukaista vaatimustenmukaisuutta [50]. Näistä ISO 4254-sarjan standardit koskevat päältä ajettavia, kiinnitettäviä, osittain kiinnitettäviä ja vedettäviä koneita, joita käytetään maataloudessa. Standardisarja kuitenkin poissulkee maatalous- ja metsätraktorit sen sisällystä. ISO 26322 taas koskee nimenomaan maa- ja metsätalouskäyttöön tarkoitettuja traktoreita. Ensimmäinen osa koskee standardikokoisia traktoreja ja toinen osa kapeita ja pienikokoisia traktoreja. Täten on siis huolehdittava, ettei standardien ISO 26322-1 ja -2 vaatimuksia kumota järjestelmien yhdistämisellä [53][18].

5.4.3 Tietoturvallisuus

Toiminnallisen turvallisuuden vaatimusten lisäksi myös autentikointiprosessi vaati epäsuorasti muutamia asioita. Guideline AEF 040-dokumentin liitteessä F on mainittu joitakin asioita, jotka tulisi huomioida AEF:n turvallisuusperiaatteiden mukaisessa ISOBUS-järjestelmän suunnittelussa. Turvallisuudella tarkoitetaan tässä lähinnä tietoturvallisuutta. Liitteessä mainitaan, että sen vaatimukset ovat vain lähtökohta suunnittelulle, ja jotta tuote voisi olla turvallinen, tulee sitä analysoida hyvin tarkasti joka näkökulmasta [5].

Turvattomasti säilytetyt avaimet, joilla todetaan osapuolten autenttisuus, ovat selkeä haavoittuvaisuus laitteille. Jos avainta ei ole säilytetty turvallisesti ja sen saa haltuunsa ei haluttu taho, voi sillä väärentää laitteen identiteettiä ja osallistua automaatioprosessiin

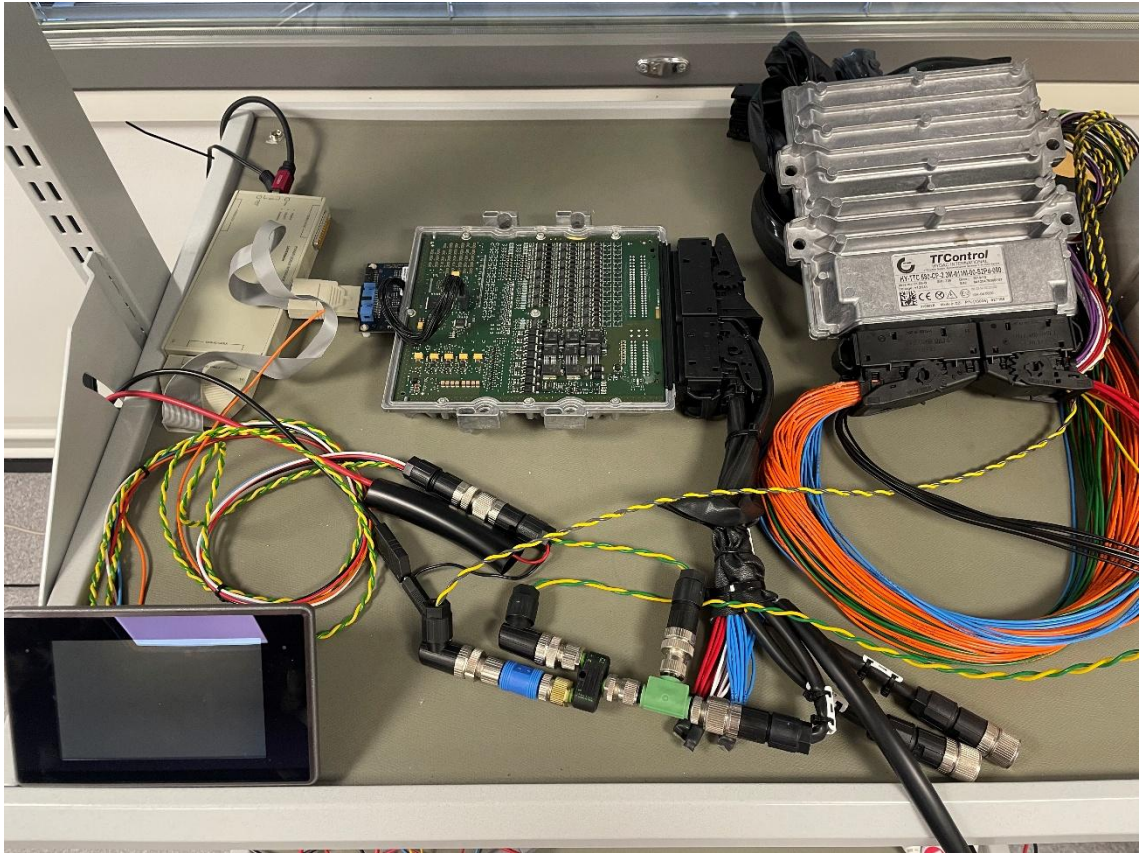
siihen hyväksymättömällä laitteella. Avainten säilytystapa riippuu käytetystä ohjainyksiköstä ja sen kyvykkyydestä. Yleisesti ottaen avainta ei tulisi säilyttää sovelluksen binääriässä missään muodossa. Ei siis ole suositeltavaa säilyttää avaimia, vaikka ne olisivat kryptattuja. Avainta ei tulisi myöskään kryptata käyttäen symmetristä algoritmia, jossa käytetään erillistä avainta, joka on säilötty RAM- tai ROM-muistissa. Salaukseen ei tulisi käyttää hämäys (engl. obfuscation) menetelmiä, jotka perustuvat siihen, että joitakin asioita piilotetaan koodiin. Tuotantoon päätyneessä laitteessa ei tulisi myöskään olla JTAG- tai debug-rajapintoja. Laitteet luovat autentikoinnin yhteydessä yhteisen salaisuuden (LwA), joka tulisi myös säilöä turvallisesti. Tämän salaisuuden vuotaminen mahdollistaa kyseisen työkoneyhdistelmän haavoittuvuuden, riippuen siitä, onko käytetty laitekohtaisia vai sarjakohtaisia sertifikaatteja. Oletettavasti yhteinen salaisuus tulisi säilöä samoin kuin avaimet [5].

Salauskirjastojen kryptografiset toiminnot riippuvat satunnaisluvuista. Useimmat salauskirjastot tarjoavat pseudosatunnaislukugeneraattoreita, jotka täyttävät oleelliset vaatimukset, olettaen, että ne alustetaan satunnaisella arvolla. Satunnaisen luvun generointiin tarvitaan entropian lähde. Entropian lähteen tulisi myös olla suojattu mahdollisen hyökkääjän manipulaatiolta. Huomioitavaa entropian keräämiseen on myös se, että todennäköisesti autentikointi tapahtuu hyvin pian käynnistyksen jälkeen. Täten järjestelmän tulee kyetä keräämään riittävästi entropiaa lyhyessä ajassa. Esimerkiksi heikkoja entropian lähteitä on ohjainyksikön pinnien käyttö antennina (engl. floating pin) tai mikä tahansa tietoverkkoliikenteen kommunikoinnin käyttäminen. Liitteessä on myös kehoitettu huomioimaan, että kun mahdollinen hyökkääjä pääsee fyysisesti käsiksi ohjainyksikköön, on tärkeää vuotaa mahdollisimman vähän tietoa ulos, kun suoritetaan salaukseen vaadittavaa laskentaa. Tähän sisältyy aikapoikkeamat, tehon kulutus, lämmön tuotto ja EMC ominaisuudet tai muut, joilla voidaan päätellä jotain prosessorin tilasta [5].

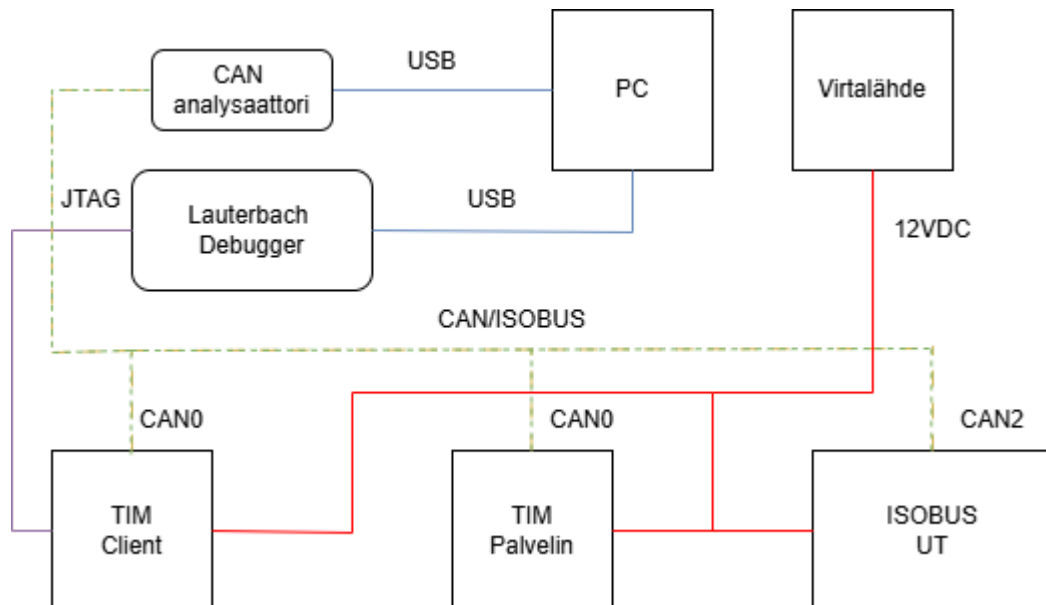
6. TESTIJÄRJESTELMÄ

Diplomityön aikana järjestelmää on testattu konseptitasolla. Tarkoituksena oli saada rakennettua testiympäristö, jossa voitaisiin testata ISOBUS-toimintoja ja TIM-toiminnallisuuksia. Testijärjestelmän kokoonpano on kaksi ECU:a, joista toinen toimii TIM-clientinä ja toinen palvelimena, näyttö, joka toimii UT:na ja debugger, jolla pääsee tutkimaan ECU:jen sisältöä reaaliajassa koodin suorituksen aikana. Testijärjestelmässä ECU:ina toimivat TTControlin valmistamat TTC500-sarjan ohjainyksiköt, sillä niitä oli nopeasti saatavilla testauskäyttöön diplomityön ajaksi. Tarkemmin TTC580 ja TTC540, joista TTC540 on development-versio ja siinä on JTAG-portti. Näyttönä ja virtuaalisena terminaalina toimii TTC Vision 305 VT, jossa on UT-toiminnallisuus. Debuggerina on Lauterbach LA-3500 debugger ja TTC 500 -sarjan ARM Cortex-prosessoreille soveltuva LA-7843 debug-kaapeli. CAN analysaattori on Kvaser leaf light v2. Testilaitteisto on Kuva 13 ja laitteiston rakennetta ja laitteiden välisiä liityntöjä on esitetty Kuva 14. Testilaitteiston puutteena on AUX-N -laitteen puute. Testijärjestelmällä ei voida kokeilla funktioiden toimintojen ohjaamista AUX-N -laitteella. Tämä on selkeä ero suunniteltuun lopulliseen

laitteeseen. Testijärjestelmän tavoite kuitenkin on testata, että laitteet ja kirjasto toimivat ja että arvoja voidaan muokata halutusti.



Kuva 13. Kuva Testijärjestelmästä.



Kuva 14. Testijärjestelmän rakenne kuvattuna.

Testissä näyttö on toiminnallisuudeltaan valmis ISOBUS UT, mutta TIM client ja palvelin eivät. Ohjainyksiköihin on tehty ISOBUS-sovellukset käyttäen OSB connagtiven

ISOAgLibSE enhanced versiota. Tämä on valmis C-kielellä toteutettu ohjelmakirjasto, jolla voidaan toteuttaa ISOBUS-toiminnallisuutta sulautetuissa järjestelmissä. Kirjasto valittiin järjestelmään, sillä TTC:n ohjainyksiköihin oli jo ennestään käytetty kyseisen kirjaston matalampaa versiota, jossa ei ollut TIM-toiminnallisuuden tukea. Täten uuden toiminnon käyttöönotto oli huomattavasti pienempi prosessi kuin tyhjästä aloittaminen.

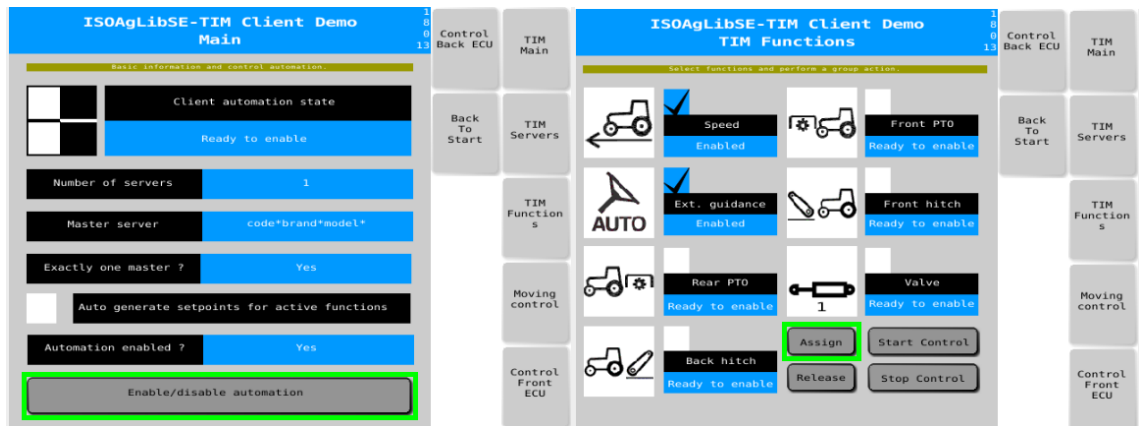
Testijärjestelmän pystyttämisenä huomioitavaa oli OSB:n kirjaston toimimaan saaminen TTC:n ohjainyksiköillä. OSB:n kirjasto vaatii ohjainyksikön CAN-vestiliikenteen toteutusta sekä kellosignaalia ohjainyksiköltä toimiakseen. CAN-ajurien käyttö on oleellista ISOBUS:n kannalta, sillä viestiliikenne tapahtuu CAN-väylällä. TTC tarjoaa valmiita demoprojekteja heidän laitteilleen. Tällaisesta projektista saatiin valmiina toteutettu CAN-toiminto. OSB tarjoaa demosovelluksia taas IOSBUS-kirjastonsa käyttöön. OSB tarjoaa demosovellukset monelle ISOBUS-toiminnolle, mutta oleellisia ovat TIM-palvelimen ja clientin sovellukset. Täten testijärjestelmään luotiin projekti, jossa kirjaston rajapintaan tarjottiin TTC:n CAN-toteutus ja ohjainyksikön kello. Toiselle ohjainyksikölle käännettiin TIM-client demosovellus OSB:ltä ja toiselle TIM-palvelin -demosovellus. Täten järjestelmässä olisi näennäisesti traktori, UT ja työkone. Lauterbach debugger vaatii myös oman rajapintansa toimiakseen TTC:n ohjainyksikön kanssa. Tähän TTC:llä on valmis pohja, mutta lisätoimintona debuggerille lisättiin sovellukseen tulostusominaisuus. Tällä saadaan tulostettua ulos sovellukseen asetettuja tulosteita reaaliaikaisesti suorituksen aikana.

Yksinkertaisuudessaan testisovellus koostuu main sovelluksesta, debuggerin vaatimista sovelluksista, ISOBUS CAN-rajapinnasta sekä OSB:n kirjastosta ja sen testisovelluksista. OSB tarjoaa myös työkalun, jolla voi luoda käyttöliittymiä eli IOP-tiedostoja ISOBUS VT:lle. Testisovelluksissa kuitenkin oli valmiit käyttöliittymät, joten niiden muokkaaminen ei ole tarpeellista demon aikana.

Käytännössä sovellus ladataan ohjainyksikölle käyttäen CAN-rajapintaa. TTC tarjoaa TTC downloader-työkalun, jolla sovellus voidaan ladata ohjainyksikölle. Sovelluksen voi myös ladata ohjainyksikköön käyttäen debuggeria ja JTAG-porttia. Tämä edellyttää Lauterbachin TRACE32 ohjelmaa. Ohjelmakoodin editoimiseen käytetään Microsoftin Visual Studio Codea. TTC500-sarjan ohjainyksiköt käyttävät AEM Cortex R4F-ytimiä Texas Instrumentsin TM570-kontrollerissa. Kääntäjäksi TTC500-sarjan ohjainyksiköille käytetään TI ARM Code Generation -työkaluja [16].

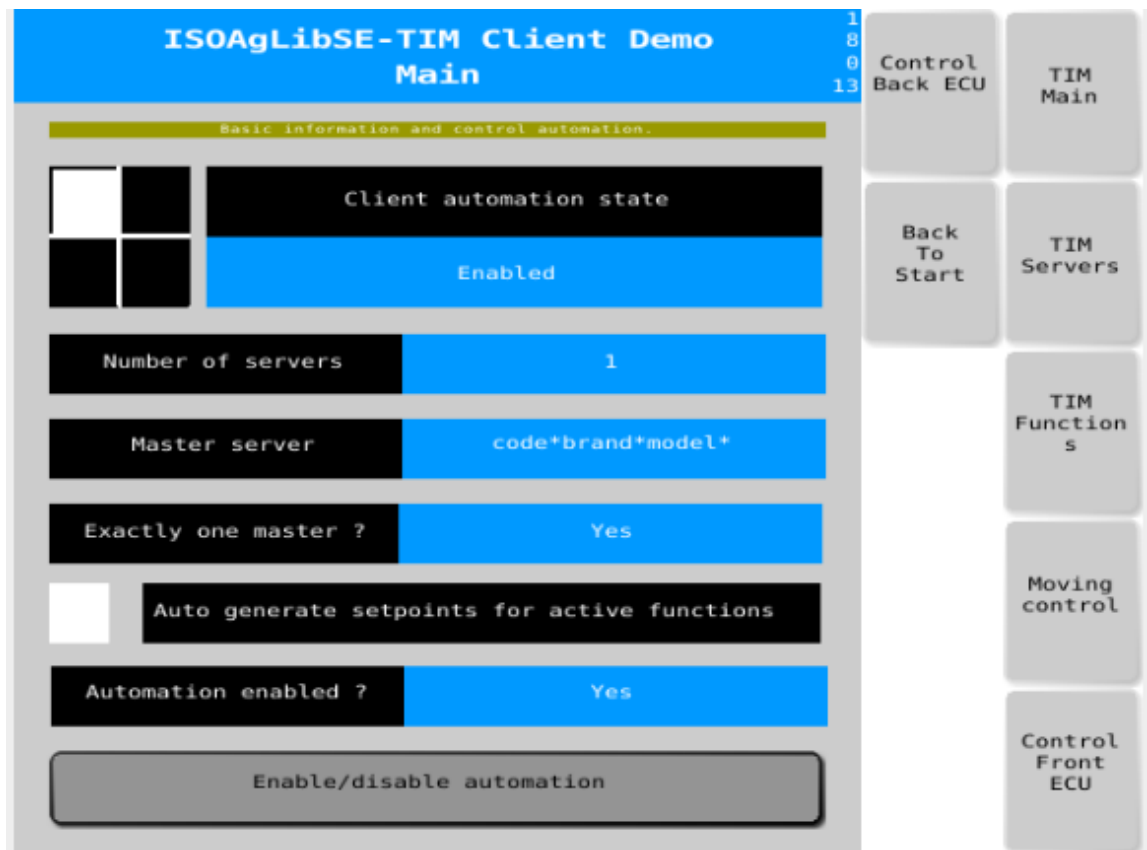
Käyttöliittymästä täytyy asettaa automaatio enable-tilaan. Tällöin client näyttää Kuva 12 mukaista automation ready to enable tilaa. Tähän tilaan päästään, kun autentikointi on

suoritettu onnistuneesti. Funktiot tulee liittää (engl. assign) kyseisen TIM clientin käyttöön. Kuva 15 vasemmalla näkyy TIM clientin tila sekä automaatio asetettuna enabled-tilaan ja oikealla näkyy TIM-funktioita assignnattuna clientille.



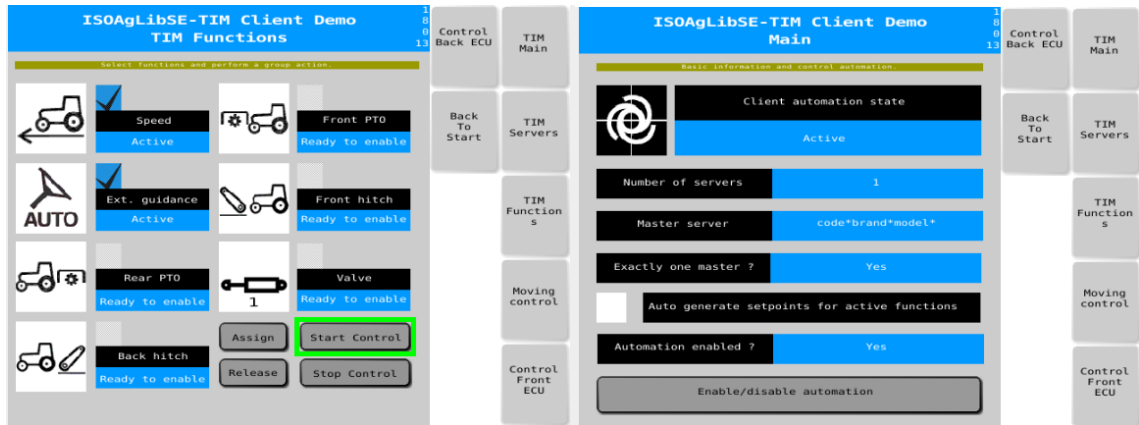
Kuva 15. Käyttöliittymä aloituksessa.

Kuva 16 näkyy käyttöliittymä, kun automaatio on enabloitu operaattorin toimesta ja funktiot ovat liitetty TIM-clientille. Käyttöliittymässä näkyy automaation tilana Kuva 12 mukainen symboli.



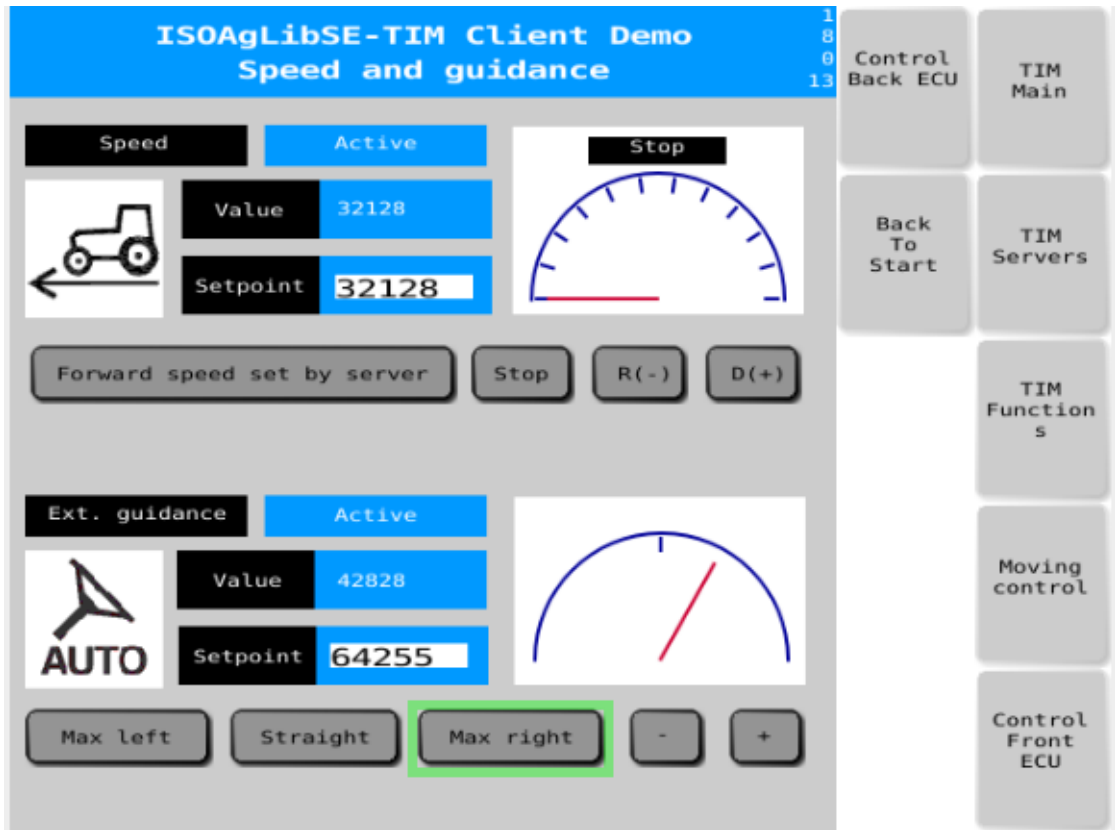
Kuva 16. TIM-clientin automaation tilana enabled.

Funktioiden ohjaus täytyy aloittaa TIM clientin toimesta. Funktion ohjaamisen aloittamisen vaatimisen jälkeen TIM-clientillä on mahdollisuus asettaa ohjausarvoja funktioille. Kuva 17 vasemmalla näkyy TIM-funktioiden ohjaamisen aloittaminen ja oikealla TIM clientin automaation tilana aktiivinen. TIM clientin automaation tilana näytetään Kuva 12 mukaista symbolia.



Kuva 17. Käyttöliittymä TIM-funktioiden ohjauksessa.

Kun nämä asiat ovat tehty käyttöliittymältä, voidaan moving control -ikkunasta hallita ajonopeutta ja ulkoista ohjausta. Kuva 18 näkyy kun ulkoisen ohjauksen asetusarvo on muutettu maksimiarvoon painamalla Max right -painiketta. Mittariston viisari esittää TIM-palvelimelta saatua arvoa.



Kuva 18. Ajonopeuden ja ulkoisen ohjauksen hallintaikkuna.

Käyttöliittymältä voi myös asettaa ajonopeuden asetusarvot eteen ja taaksepäin tai pyytää pysähtymistä. Käyttöliittymä on vain testikäyttöön ja sillä demonstroidaan funktioiden toiminnallisuutta. Todellisuudessa ulkoisen ohjauksen arvot asetettaisiin AUX-N-funktioina joystickin avulla, jolloin TIM-palvelin hoitaa ohjauksen säätämisen ja asettamisen pyydettyyn arvoon. Joystick toimisi siis funktioiden asetusarvojen reaaliaikaisena input-laitteena.

7. JATKOKEHITYS

Diplomityön aiheena oli selvittää vaatimuksia ISOBUS TIM -toiminnoille sekä luoda POC-järjestelmästä saatavilla olevilla laitteilla. Vaatimusten selvittämisessä ei suoritettu riskiarviointia tuotteelle eikä muutenkaan tarkemmin selvitetty, mitä vaatimuksia standardeissa vaaditaan. Selvityksessä esitettiin, mitä standardeja tulee ainakin noudattaa, muttei kuitenkaan tarkemmin standardeissa järjestelmälle asetettuja yksittäisiä vaatimuksia. Selvityksessä paneuduttiin tarkemmin AEF:n määrittelemiін vaatimuksiin TIM-laitteille, sillä nämä ovat oleellisia tuotteen markkinoille saattamisen sekä turvallisuuden osalta.

Sillä tuote on teknisesti mahdollinen, tulisi jatkokehityksenä tuotteelle tehdä riskien arviointia. Tämä kannattaa tehdä käyttäen ISO 12100-standardia ja mahdollisesti soveltaa SFS-ISO/TR 14121-2:2013-dokumentin ohjeita riskiarvion tekemiseksi. Täten voidaan varmistua siitä, että riskiarvio on suoritettu oikein. Jos riskiarviossa todetaan riskejä, jotka vaativat ISO 25119-mukaisia turvatoimintoja, tulee ISO 25119-prosessia seurata tuotekehityksessä. Kuitenkin ennen riskienarvioinnin suorittamista tulisi pohtia, mikä on tuotteen todellinen käyttöympäristö, käyttökohde ja tarkoitus. Tuotetta muuttaa selkeästi se, missä sitä käytetään ja kenelle sitä myydään. Jos joystick-ohjausta halutaan käyttää ainoastaan ajosuunnan ollessa eteenpäin, ei tarvitse huolehtia operaattorin mahdollisuuksista yliohtaa järjestelmää hätätilanteessa, sillä operaattorilla on edessään normaalit hallintalaitteet, joilla yliohtaus voidaan toteuttaa. Jos penkki on taaksepäin, tulee operaattorilla olla mahdollisuus yliohtaa järjestelmä. Esimerkiksi traktorivalmistajan taakseajolaitteiden avulla. Kenelle tuotetta myydään myös muuttaa sitä, tehdäänkö tuote koneidirektiivin mukaisen puolivalmisteen prosessin mukaisesti, vaiko valmiin tuotteen, joka tulee CE-merkitä.

Teknisesti jatkokehityskohteita on testijärjestelmän siirtäminen TIM:lle soveltuvammalle TTC 2000-sarjan ohjainyksiköille. 2000-sarjan ohjainyksiköt mahdollistavat paremmat tietoturvatoinnot kuin vanhemmat 500-sarjan ohjainyksiköt. 2000-Sarja mahdollistaa yksityisten avainten ja yhteisten salaisuuksien säilönnän turvalliseen moduuliin, joka on selkeä tapa säilöä näitä asioita. Testausympäristöön tulisi myös lisätä toiminto, jolla TIM-funktioiden ohjausarvoja voitaisiin ohjata AUX-N-inputilla, OSB:n tarjoaman testikäyttöliittymän sijaan. Tällöin tuote vastaisi enemmän todellista loppukäyttötilannetta. AUX-N-funktioiden lisääminen on kuitenkin vain sivuseikka kokonaisuudessa, sillä on merkityksentöntä, tuleeko ohjausarvo napista näytöltä vai joystickin asennosta. Oleellista on se, että ohjausarvo saadaan annettua palvelimelle, joka taas vuorostaan hoitaa arvon välit-

tämisen eteenpäin traktorin laitteille, jotka taas hoitavat oikeasti ohjauksen. OSB:n testiympäristössä on myös erona autentikointi todelliseen järjestelmään. Testijärjestelmässä käytetään niin sanottua dummy-autentikointia, joka ei vastaa todellista autentikointiprosessia. Autentikointikirjasto on luovutettavissa ainoastaan AEF:n toimesta sitä hakeville tahoille, eikä OSB voi luovuttaa kirjastoa testikäyttöön. Täten autentikointiprosessi suoritetaan näennäisesti testijärjestelmässä.

Jatkokehityksen kannalta on myös oleellista pohtia, miten tulevaisuuden vaatimukset vaikuttavat tuotteeseen. Esimerkiksi vuonna 2027 konedirektiivi ollaan korvaamassa koneasetuksella ja Euroopan unionin CRA (engl. Cyber Resilience Act) on astumassa voimaan. CRA:lla pyritään ehostamaan tietoturvallisuuden tasoa kaikissa digitaalisissa tuotteissa. Näiden lainsäädäntöjen tuomat muutokset ja vaatimukset ovat nopeasti edessä, joten niitä kannattaa pyrkiä pohtimaan jo mahdollisuuksien mukaan etukäteen. Tämä on myös osasy syy tuotteen TTC 2000-srajaan siirtämiselle.

TIM-tuotteen kehityksessä tulee olla myös AEF:n jäsen vähintään siinä vaiheessa, kun tarvitaan oikeaa autentikointikirjastoa testaukseen tai tuotetta ollaan hyväksyttämässä conformance-testissä. Diplomityön aikana tuotetta pyrittiin tutkimaan ilman jäseneksi liittymistä. Jatkokehityksen kannalta on siis oleellista liittyä AEF:n jäseneksi ja hakea tuotteelle kehitysertifikaatit sekä oikea autentikointikirjasto.

8. YHTEENVETO

ISOBUS on hyvin yleinen tiedonsiirtoprotokolla nykypäivän työkoneiden ja traktorien välillä. ISOBUS on nopeaa vauhtia kehittyvää teknologiaa ja väylän käyttöön kehitetään jatkuvasti uusia toimintoja koneiden automatisoitumisen yleistyessä. Steer-by-wire-järjestelmät ovat myös kehittyvää ja yleistyvää teknologiaa, ja näiden kahden elementin yhdistäminen on mielenkiintoinen aihe. Diplomityön tarkoitus oli selvittää toteuttamiskelpoisuutta sähköiselle joystick-ohjausjärjestelmälle ISOBUS-väylältä, joka toimisi hybridiohjausjärjestelmänä traktorin omia hallintalaitteita ja ohjauselementtejä käyttäen. Tarkoituksena oli myös luoda Proof-of-concept-laitteisto, jolla pystyy demonstroimaan järjestelmän toimivuutta.

Tulosten tulkinta riippuu monesta asiasta. Lainsäädännön ja vaatimusten täyttäminen on pakollista kaikille, ja joskus nämä asiat rajoittavat laitteiden toiminnallisuuksia. Tietenkään laitteen käyttö ei saa aiheuttaa turvallisuuden vaarantamista, vaan turvallisuuden on mentävä toiminnallisuuden edelle. Tästä seuraa se, että laitteen toteutukseen vaikuttavat hyvin monet asiat. Mitä laitteelta halutaan, mihin sitä halutaan käyttää ja millaisia rajoituksia laitteen käytössä siedetään. Näiden ja monen muun seikan perusteella voidaan tehdä päätöksiä siitä, onko laitetta järkevää tehdä tai olisiko sen käyttö käytännössä hyödyllistä, haluttua tai mielekästä. Diplomityössä kuitenkin selvitettiin enimmäkseen teknisiä vaatimuksia ja rajoitteita ISOBUS:n ja SBW-tekniikan yhdistämiselle. Työn perusteella voidaan todeta, että ISOBUS TIM-toiminnolla voidaan tehdä laite, jolla traktoria voitaisiin ohjata SBW-tekniikalla joystickin avulla, olettaen, että kaikkia turvallisuusvaatimusten mukaisia menettelyjä on seurattu.

Tuotteen tulee täyttää joko konedirektiivin mukaiset vaatimukset koneelle tai puolivalmisteelle, riippuen, olisiko tuote oma standalone -laite, vai johonkin toiseen koneeseen liitettävä lisäosa. Selkeänä hyväksyttävänä keinona osoittaa vaatimustenmukaisuutta on noudattaa Euroopan unionin virallisesta lehdestä löytyviä harmonisoituja standardeja. Riskien arviointiin soveltuva standardi on ISO 12100. Tätä noudattamalla voidaan tehdä riskien arviointi koneelle, jonka perusteella voidaan päättää, mitkä vaatimukset ovat oleellisia koneen kannalta.

AEF on luonut inherent safety -konseptiin perustuvia turvallisuusvaatimuksia automaatiotoiminnoille, joilla esitetään minimivaatimukset koneen automaatiotoimintojen turvallisuudelle toiminnalle. Kuitenkin jos riskiarviossa todetaan näiden olevan riittämättömiä, tulee ohjausjärjestelmän seurata esimerkiksi ISO 25119-prosessia. AEF:n dokumentaatiossa

vaaditaan suoritettua riskien arviointia esimerkiksi ISO 12100 mukaisesti. Selkeä standardi, josta AEF antaa vaatimuksia ohjausjärjestelmille, on ISO 10975. Tässä katetaan automaattiohjaukseen liittyviä sääntöjä ja vaatimuksia.

Oleellista TIM:n kannalta on myös tietoturvallisuus asiat. TIM-kommunikaatio vaatii autentikointia osapuolten välillä. Tällä varmistetaan, että molemmat osapuolet ovat valideja aloittamaan kommunikaation keskenään. Kun voidaan varmistaa turvallisella tavalla osapuolten validius, kyetään varmistumaan siitä, että osapuolet ovat läpäisseet AEF:n conformance testin, jolloin ainakin minimiturvallisuusvaatimukset ovat täytetty. Selkeä haavoittuvaisuus kuitenkin TIM-kommunikoinnissa on se, ettei kommunikaatiota ole salattu. Täten olisi mahdollista asettaa esimerkiksi clientin ja väylän välille laite, joka imitoi TIM-client osapuolta autentikoinnin jälkeen. Viestin sisällöstä ei siis voida varmistua. AEF myös tiedostaa asian ja ohjeistaa standardin mukaiseen identity spoofing vastaiseen menettelyyn.

Yhteenvetona diplomityöstä voidaan todeta, että tutkimuksen aiheena oleva steer-by-wire -järjestelmän toteuttaminen ISOBUS TIM-toiminnolla voi olla mahdollinen riippuen useista tekijöistä. Käytännössä TIM-toiminto mahdollistaa ohjausarvon muuttamista ja tämä on traktorille hyväksyttävä tapa vastaanottaa ohjaussignaalia. Kuitenkin järjestelmän tulee noudattaa tarkkoja vaatimuksia mahdollisesti harmonisoiduista standardeista sekä AEF:n määrittämiä guideline-dokumentteja. Kaikki kuitenkin pohjautuu valmistajan suorittamaan riskien arviointiin, jolla päätellään, mitä tuotteelle on tehtävä. Mahdollisesti tämä vaatii ISO 25119:n prosessin noudattamista, joka tekee projektista raskaamman kuin jos prosessia ei tarvitsisi noudattaa. Järjestelmä tulisi myös käyttää jollakin testijärjestelmästä poikkeavalla laitteella. Vaikka testiympäristö on toimiva jo 500-sarjan ohjainyksiköillä, ne eivät kuitenkaan soveltuisi lopulliseen tuotteeseen sen tietoturvaomaisuuksien puutteen takia. Tuotetta tulisi myös päästä testaamaan käytännössä todellisessa järjestelmässä, jossa pääsisi näkemään selkeästi toiminnallisuutta.

LÄHTEET

- [1] AEF Released international Guideline ISOBUS Automation Principles AEF 023 RIG 4, Agricultural Industry Electronics Foundation, 2025.
- [2] AEF Released international Guideline ISOBUS Automation Safety Requirements AEF 007 RIG 3, Agricultural Industry Electronics Foundation, 2025.
- [3] AEF Released international Guideline ISOBUS Guideline for protection against inadvertent actuation of safety related functions is ISOBUS Systems AEF 006 RIG 1, Agricultural Industry Electronics Foundation, 2013.
- [4] AEF Released international Guideline ISOBUS Implementation ISO 11783 Exceptions AEF 009 RIG 1, Agricultural Industry Electronics Foundation, 2019.
- [5] AEF Released international Guideline ISOBUS Security Principles AEF 040 RIG 1, Agricultural Industry Electronics Foundation, 2023.
- [6] AEF Teams and Projects, Agricultural Industry Electronics Foundation, 2022.
- [7] AEF Technical Training, Agricultural Industry Electronics Foundation, 2024.
- [8] CAN Error Handling, HQ Kvaser AB, Mölndal, 2025, Saatavissa (viitattu 15.10.2025): <https://kvaser.com/lesson/can-error-handling/>
- [9] CAN Specification 2.0 Part B, Robert Bosch GMBH, Stuttgart, 1991, pp. 42-55. Saatavissa (viitattu 15.10.2025): <http://esd.cs.ucr.edu/webres/can20.pdf>
- [10] Ergosteer, AGCO Corporation, Saatavissa (viitattu 16.2.2026): <https://access.agcocorp.com/en/products/ergosteer.html>
- [11] Euroopan Parlamentin ja Neuvoston Direktiivi 2006/42/EY, 2006. Saatavissa (viitattu 10.12.2025): <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:02006L0042-20190726>
- [12] Fileserver Release, Agricultural Industry Electronics Foundation, 2021, Saatavissa (viitattu 19.10.2025): <https://www.aef-online.org/aef-news/fileserver-release.html>
- [13] G. Genta, Conventional and slip steering for multi-wheel planetary rovers, Accademia delle Scienze di Torino, Torino, Italia, 2010, 6 p.
- [14] GriTech Joystick, GriTech, Saatavissa (viitattu 16.2.2026): <https://gritech.nl/product/gritech-joystick/>
- [15] History of CAN technology, CAN in automation, Saatavissa (viitattu 19.10.2025): <https://www.can-cia.org/can-knowledge/history-of-can-technology>
- [16] HY-TTC 500 Family, TTControl GmbH, Saatavissa (viitattu 5.2.2026): <https://www.ttcontrol.com/sites/default/files/documents/01-TTControl-TTC-500-Family-Flyer-1.pdf>

- [17] Introducing TIM – a Farmer’s New Best Friend, Precision Farming Dealer, 2020. Saatavissa (viitattu 02.01.2026) <https://www.precisionfarmingdealer.com/articles/4474-introducing-tim-a-farmers-new-best-friend>
- [18] ISO 26322-1:2008, Tractors for agriculture and forestry – Safety, International Organization for Standardization, Geneva, 2008.
- [19] ISOBUS Conformance- testauspalvelut, Luonnonvarakeskus, Saatavissa (viitattu 2.2.2026): <https://www.luke.fi/fi/palvelut/isobus-conformance-testauspalvelut>
- [20] ISOBUS in Functionalities. Agricultural Industry Electronics Foundation, 2015, Saatavissa (viitattu 10.11.2025): https://www.aef-online.org/fileadmin/user_upload/Content/pdfs/AEF_handfan_EN.pdf
- [21] ISOBUS test and Database Requirements AEF 019 RIG 2, Agricultural Industry Electronics Foundation, 2020
- [22] J. Griffith, What Do CAN Bus Signals Look like? Texas Instruments, Dallas, Texas, USA, 2015, pp. 2. Saatavissa (viitattu 20.10.2025): <https://www.ti.com/lit/ta/ssztcn3/ssztcn3.pdf?ts=1760889891108>
- [23] J. Leppänen, Hybridipyöräkuormaajan ohjausarkkitehtuurin suunnittelu ja toteutus. Tampereen Yliopisto. 2023. Saatavissa (viitattu 10.11.2025): <https://urn.fi/URN:NBN:fi:tuni-2023122011133>
- [24] J1939-21, Data Link Layer, Society of Automotive Engineers, 1994, pp. 29-36.
- [25] Koneet (MD), Euroopan komissio, 2025, Saatavissa (viitattu 15.12.2025): https://single-market-economy.ec.europa.eu/single-market/goods/european-standards/harmonised-standards/machinery-md_en
- [26] Koneita koskevat vaatimukset, Turvallisuus- ja kemikaalivirasto (Tukes), Saatavissa (viitattu 11.12.2025): <https://tukes.fi/tuotteet-ja-palvelut/koneet>
- [27] M. Di Natale, H. Zeng, P. Giusto, A. Ghosal, Understanding and Using the Controller Area Network Communication Protocol: Theory and Practice, Springer, New York, USA, 2012, pp 20-21.
- [28] M. Falch, Can Bus Explained – A Simple Intro [2025], CSS Electronics, 2025, Saatavissa (viitattu 11.10.2025): <https://www.csselectronics.com/pages/can-bus-simple-intro-tutorial>
- [29] M. Falch, ISOBUS (ISO 11783) Explained – A Simple Intro [2023], CSS Electronics, 2022, Saatavissa (viitattu 11.10.2025): <https://www.csselectronics.com/pages/isobus-introduction-tutorial-iso-11783>
- [30] M. Falch, J1939 Explained – A Simple Intro [2025], CSS Electronics, 2025, Saatavissa (viitattu 22.10.2025): <https://www.csselectronics.com/pages/j1939-explained-simple-intro-tutorial>
- [31] M. Gannon, Steer-by-wire: the next generation of machine design, Parker Hannifin, 2026, Saatavissa (viitattu 26.02.2026): <https://www.mobilehydraulictips.com/steer-by-wire-the-next-generation-of-machine-design/>
- [32] M. Huova, Steering systems, Tampereen Yliopisto, 2025, s. 2-12.

- [33] New AEF ISOBUS Functionality ISB, Agricultural Industry Electronics Foundation, 2018, Saatavissa (viitattu 22.11.2025): <https://www.aef-online.org/aef-news/new-aef-isobus-functionality-isb.html>
- [34] P. van der Vlugt. The AEF – Ag Industry’s initiative in electronic standards implementation, Agricultural Industry Electronics Foundation, Saatavissa (viitattu 2.12.2025): https://www.aef-online.org/fileadmin/user_upload/Content/pdfs/AEF_Keynote_EN.pdf
- [35] P.S. Huang, A. Pruckner, Steer By Wire, in: M. Harrer, P. Pfeffer, Steering Handbook, Springer International Publishing, Switzerland, 2017, pp. 513-518.
- [36] R. Linkolehto, ISOBus perusteet 2020, Osa 3, Suomen Maatalousautomaatio ry, 2021, Saatavissa (viitattu 2.2.2026): https://maatalousautomaatio.fi/wp-content/uploads/2020/11/Isobus_Perusteet_3_AEF_AAF_DB_ChT_CT_ISO11783_GI_29012021.pdf
- [37] R.N. Jazar, Steering Dynamics, in: R.N. Jazar, Vehicle Dynamics: Theory and Application, Springer New York, New York, USA, 2014, 394 p.
- [38] Riskin arviointi, Metalliteollisuuden Standardisointiyhdistys ry, Saatavissa (viitattu 28.01.2026): <https://metsta.fi/koneturvallisuuden-standardit-metsta/turvallisuusstandardien-laadintaperiaatteet/riskin-arviointi/>
- [39] SAE J1939 Introduction, HQ Kvaser AB, Mölndal, 2025, Saatavissa (viitattu 10.11.2025): <https://kvaser.com/about-can/higher-layer-protocols/j1939-introduction/>
- [40] SFS-EN 894-1 + A1, Koneturvallisuus. Merkinantolaitteiden ja ohjaimien suunnittelun ergonomiset vaatimukset. Osa 1: Yleiset Periaatteet Koskien Ihmisen ja merkinantolaitteiden sekä ohjaimien vuorovaikutusta, Suomen standardisoimisliitto, Helsinki, 2009.
- [41] SFS-EN 894-2 + A1, Koneturvallisuus. Merkinantolaitteiden ja ohjaimien suunnittelun ergonomiset vaatimukset. Osa 2: Merkinantolaitteet, Suomen standardisoimisliitto, Helsinki, 2009.
- [42] SFS-EN 894-3 + A1, Koneturvallisuus. Merkinantolaitteiden ja ohjaimien suunnittelun ergonomiset vaatimukset. Osa 3: Ohjaimet, Suomen standardisoimisliitto, Helsinki, 2009.
- [43] SFS-EN 894-4 + A1, Koneturvallisuus. Merkinantolaitteiden ja ohjaimien suunnittelun ergonomiset vaatimukset. Osa 4: Merkinantolaitteiden ja ohjaimien sijoittaminen ja järjestely, Suomen standardisoimisliitto, Helsinki, 2009.
- [44] SFS-EN IEC 62061:2021, Koneturvallisuus. Turvallisuuteen liittyvien ohjausjärjestelmien toiminnallinen turvallisuus, Suomen standardisoimisliitto, Helsinki, 2021.
- [45] SFS-EN ISO 13849-1:2023, Koneturvallisuus. Turvallisuuteen liittyvät ohjausjärjestelmien osat. Osa 1: Yleiset suunnitteluperiaatteet, Suomen standardisoimisliitto, Helsinki, 2023.
- [46] SFS-EN ISO 13849-2:2023, Koneturvallisuus. Turvallisuuteen liittyvät ohjausjärjestelmien osat. Osa 1: Kelpuutus, Suomen standardisoimisliitto, Helsinki, 2023.

- [47] SFS-EN ISO 14982:en, Agricultural and forestry machinery. Electromagnetic compatibility. Test methods and acceptance criteria (ISO 14982:1998), Suomen standardisoimisliitto, Helsinki, 2009.
- [48] SFS-EN ISO 18497:2018:en, Agricultural machinery and tractors. Safety of highly automated agricultural machines. Principles for design (ISO 18497:2018), Suomen standardisoimisliitto, Helsinki, 2018.
- [49] SFS-EN ISO 25119-1:2023:en, Tractors and machinery for agriculture and forestry. Safety-related parts of control systems. Part 1: General principles for design and development (ISO 25119-1:2018), Suomen standardisoimisliitto, Helsinki, 2023.
- [50] SFS-EN ISO 25119-2:2023:en, Tractors and machinery for agriculture and forestry. Safety-related parts of control systems. Part 2: Concept phase (ISO 25119-2:2018), Suomen standardisoimisliitto, Helsinki, 2023.
- [51] SFS-EN ISO 25119-3:2023:en, Tractors and machinery for agriculture and forestry. Safety-related parts of control systems. Part 3: Series development, hardware and software (ISO 25119-3:2018), Suomen standardisoimisliitto, Helsinki, 2023.
- [52] SFS-EN ISO 25119-4:2023:en, Tractors and machinery for agriculture and forestry. Safety-related parts of control systems. Part 4: Production, operation, modification and supporting processes (ISO 25119-4:2018), Suomen standardisoimisliitto, Helsinki, 2023.
- [53] SFS-EN ISO 4254-1:en Agricultural machinery. Safety. Part 1: General requirements (ISO 4254-1:2013) Suomen standardisoimisliitto, Helsinki, 2015.
- [54] T. Oksanen, H. Auernhammer, ISOBUS – The Open Hard-Wired Network Standard for Tractor-Implement Communication 1987-2020, American Society of Agricultural and Biological Engineers, St. Joseph, Michigan, USA, 2021, pp 11-12.
- [55] The AEF Core Members, Agricultural Industry Electronics Foundation, Saatavissa (viitattu 3.12.2025): <https://www.aef-online.org/about-us/core-members.html>
- [56] The CAN Bus Protocol Tutorial, HQ Kvaser AB, Mölndal, 2025, Saatavissa (viitattu 3.12.2025): <https://kvaser.com/can-protocol-tutorial/>
- [57] TwinTrac, Valtra Oy Ab, Saatavissa (viitattu 16.2.2026): <https://www.valtra.fi/traktorit/tietoa-valtra-traktoreista/twintrac.html>
- [58] W. Voss, SAE J1939 and ISOBUS: Foundation of Agricultural Communication Protocols, Copperhill Technologies, 2025, Saatavissa (viitattu 10.11.2025): <https://jcom1939.com/sae-j1939-and-isobus-foundations-of-agricultural-communication-protocols/>
- [59] W. Voss, A Comprehensible Guide to J1939. Copperhill Media. 2008.
- [60] What is ISOBUS Protocol? Learn about its Architecture and Diagnostic Applications, Embitel, 2017, Saatavissa (viitattu 18.12.2025): <https://www.embitel.com/blog/embedded-blog/what-is-isobus-learn-about-its-architecture-and-diagnostic-applications>

- [61] X. Wu, *Advanced Chassis Control Technology for Steer-by-Wire Vehicles*, CRC Press, Boca Raton Florida, USA, 2024, pp. 2-8.
- [62] X.509 Authentication Service, GeeksforGeeks, 2025, Saatavissa (viitattu 9.1.2026) <https://www.geeksforgeeks.org/computer-networks/x-509-authentication-service/>