

Mikko Rantanen

# **AIKAKRIITTISEN ETHERNET-VERKON TOTEUTTAMINEN HYÖDYNTÄEN TIME- SENSITIVE NETWORKING -TEKNIKKAA**

Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta  
Kandidaatintyö  
Heinäkuu 2019

# TIIVISTELMÄ

Mikko Rantanen

Aikakriittisen Ethernet-verkon toteuttaminen hyödyntäen Time-Sensitive Networking -tekniikkaa  
Using Time-Sensitive Networking to implement time-sensitive Ethernet network

Tampereen yliopisto

Kandidaatintyö, 36 sivua

Teknisten tieteiden kandidaatin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Automaatiotekniikka

Tarkastaja: Mikko Salmenperä

Heinäkuu 2019

---

Tämän kandidaatintyön tarkoituksena on tutkia Time-Sensitive Networking (TSN) -tekniikkaa sekä sitä edeltänyttä Audio Video Bridging (AVB) -tekniikkaa. TSN on joukko IEEE:n 802 Ethernet alastandardeja, jotka mahdollistavat aikakriittisen tietoliikenteen siirtämisen tavallisessa Ethernet-verkossa. Työssä ei käsitellä aivan kaikkia TSN:n standardeja, vaan TSN:n toiminnan kannalta oleellimmat standardit. Myös TSN:ää edeltänyt AVB käsitellään lyhyesti, koska jotkin TSN:n standardit pohjautuvat AVB:n standardeihin.

TSN:n standardeihin perehtymisen lisäksi työssä käydään läpi, mitä TSN:n standardeja tukevia laitteita markkinoilla on jo olemassa tämän työn kirjoittamisen aikana. Viimeisenä osana työtä esitellään työssä toteutettu kokeellinen toteutus, jonka tarkoituksena oli demonstroida TSN:n toimintaa tietoverkossa, joka koostui kahdesta päätepestelaitteesta sekä kahdesta kytkimestä.

Markkinoilla olevien TSN:n standardeja tukevien laitteiden löytämiseksi selvitettiin, mitkä teollisuus- ja teknologiayritykset ovat mukana TSN:n kehittämisessä. Tämän tiedon perusteella yritysten tuotevalikoimia käytiin yksitellen läpi samalla karsien joukosta pois kaikki yritykset, joiden tuotevalikoimassa ei ollut TSN:ää tukevia tuotteita.

TSN:n kokeellista toteutusta ei saatu kokonaisuudessaan suoritettua demonstraatioissa ilmenneen lisenssiongelman vuoksi. Työssä kuitenkin saatiin suoritettua TSN:n toiminnallisuuden konfigurointi tietoverkon kytkimiin sekä demonstroitua TSN:n aikasynkronointiominaisuus. Työssä myös osoitettiin, että olemassa olevilla laitteilla ja niiden käyttöön liittyvillä ohjeilla olisi mahdollista toteuttaa kokonainen TSN:n toiminnallisuuksia demonstroiva toteutus. Täten työtä ja sen lähteitä voidaan hyödyntää tulevaisuudessa perinpohjaisempaan TSN:n ominaisuuksien demonstrointiin.

Avainsanat: Time-Sensitive Networking, deterministinen Ethernet, Audio Video Bridging

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -ohjelmalla.

# ALKUSANAT

Tämä kandidaatintyö on tehty Tampereen yliopistolle systeemitekniikan laitokselle vuonna 2019. Haluan kiittää perhettäni tuesta ja kannustuksesta kandidaatintyön tekemisen aikana sekä ohjaajaani Mikko Salmenperää kaikesta häneltä saamastani avusta työn tekemiseen.

Tampereella, 8.8.2019

Mikko Rantanen

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. TIME-SENSITIVE NETWORKING .....	3
2.1 Audio Video Bridging.....	4
2.1.1 Aikasynkronointi laitteiden välillä.....	4
2.1.2 Kaistanleveyden varaaminen .....	7
2.1.3 Tietoliikenteen hallinta .....	8
2.2 TSN:n yleiskuvaus .....	10
2.3 Aikasynkronointiratkaisu ja sen parannukset.....	12
2.4 Tietoliikenteen aikataulutus ja hallinta .....	12
2.5 Resurssien varaaminen .....	14
2.6 Tietoverkon luotettavuus .....	16
3. TSN:ÄÄ TUKEVAT LAITTEET .....	18
3.1 CAST, Inc. ....	18
3.2 Cisco.....	18
3.3 Comcores .....	19
3.4 Kontron .....	20
3.5 National Instruments .....	21
3.6 NetTimeLogic.....	23
3.7 SoC-e .....	23
3.8 TTTech .....	24
3.9 Xilinx .....	25
4. KOKEELLINEN TOTEUTUS .....	27
4.1 Alkuvalmistelut.....	27
4.2 DE-CNC:llä työskentely.....	29
4.3 Huomioita ja kokeellisen toteutuksen jatkaminen .....	31
5. YHTEENVETO.....	32
LÄHTEET .....	33

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

ATS	Asynchronous Traffic Shaping
AVB	Audio Video Bridging
AVBTP	AVB Transport Protocol
BMCA	Best Master Clock Algorithm
CBS	Credit-Based Shaper
CDT	Control-Data Traffic
CNC	Central network controller
CNCe	Centralized Network Configuration element
DE-CNC	Deterministic Ethernet – Central Network Controller
FPGA	Field Programmable Gate Array
FRER	Frame Replication and Elimination for Reliability
GCL	Gate Control List
gPTP	generalized Precision Time Protocol
IE	Industrial Ethernet
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IIC	Industrial Internet Consortium
LLDP	Link Layer Discovery Protocol
MSRP	Multiple Stream Registration Protocol
PTP	Precision Time Protocol
SNMP	Simple Network Management Protocol
SP	Strict Priority
SR	Stream Reservation
SRP	Stream Reservation Protocol
TAS	Time Aware Shaper
TSN	Time-Sensitive Networking

# 1. JOHDANTO

Digitalisaation sekä Teollisen Internetin (Industrial Internet of Things) kehittymisen myötä tietoa halutaan kerätä paljon myös tuotantoprosesseista anturien ja sensorien sekä muiden älykkäiden laitteiden yleistyessä tuotantolaitteissa. Tämä tuotantolaitteilta saatava datanmäärä on valtavan suuri ja vaatii laajan kaistanleveyden. Kenttäväylät eivät kuitenkaan pysty yksin mahdollistamaan kasvavaa tarvetta laajalle kaistanleveydelle. Ethernet-tekniikalla olisi puolestaan mahdollista hyödyntää suurta kaistanleveyttä, mutta tavallinen IEEE 802 -standardin Ethernet-tekniikka ei välitä dataa reaaliaikaisesti, saati deterministisesti. Tämä on ohjannut kehittämään teknologiaa, joka mahdollistaisi deterministisen ja reaaliaikaisen tiedonvälityksen tavallisen Ethernetin ylitse. Tällaisen palvelun tarjoaa tekniikka nimeltä Time-Sensitive Networking (TSN). TSN on joukko Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) 802 Ethernet-alastandardeja, jotka IEEE:n TSN-työryhmä on määritellyt. TSN:n tavoite on taata deterministinen ja reaaliaikainen tiedonsiirto Ethernet-verkon ylitse. TSN mahdollistaa myös sen, että aikakriittinen ja ei-aikakriittinen tietoliikenne voivat kulkea samassa Ethernet-verkossa. Deterministisen ja reaaliaikaisen tietoliikenteen takaamiseksi TSN hyödyntää aikasykronointia ja tietoliikenteen priorisointia. Näiden ominaisuuksien lisäksi TSN takaa mm. tietoliikenteen muokkauksen ja hallinnan optimoiduilla verkkolaitteilla, redundanssin sekä tietoliikenteen aikataulutuksen. (Messenger 2018)

TSN:n kehitys on edennyt niin paljon, että sen standardeja tukevia laitteita löytyy jo markkinoilta. Useat yritykset ovat liittyneet mukaan kehittämään TSN:n standardeja, mikä on mahdollistanut TSN:n standardeja tukevien laitteiden valmistamisen. Monet näistä yrityksistä ovat hyödyntäneet kyseisiä laitteitaan demonstroidakseen TSN:n toimintaa toisille yrityksille ja ihmisille, jotka ovat kiinnostuneita TSN:stä. TSN:n kehittämisessä mukana oleviin yrityksiin lukeutuvat mm. Cisco, Siemens, TTTech sekä monia muita yrityksiä, mutta aivan jokainen mukanaolevista yrityksistä ei ole vielä julkaissut markkinoille TSN:n standardeja tukevia laitteita.

Osana työtä toteutetaan myös kokeellinen toteutus, jolla voidaan demonstroida TSN:n toimintaa. Demonstraatiossa käytetään tietoverkkoa, joka koostuu kahdesta Ciscon TSN:ää tukevasta kytkimestä sekä kahdesta päätepiistelaitteesta. Toteutuksen tarkoituksena on myös osoittaa, että TSN:n standardeja tukeva laite on mahdollista konfiguroida hyödyntämään näiden standardien mahdollistamia ominaisuuksia.

Kokeellinen toteutus kuvataan niin, että tätä työtä voidaan käyttää avuksi samankaltaisessa demonstraatiossa.

Tämä työ koostuu kirjallisuusosuudesta, jossa esitellään TSN:n toimintaa ja sen ominaisuuksia sekä lyhyesti sitä edeltänyttä Audio Video Bridging (AVB) -tekniikkaa, josta TSN:n kehitys on lähtenyt liikkeelle. Työ kuitenkin keskittyy pääkohtaisesti TSN:ään, ja sen avulla aikakriittisen Ethernet-verkon toteuttamiseen. Työssä myös otetaan selvää, mitä laitteita on tällä hetkellä markkinoilla, jotka jo toteuttavat TSN:n ominaisuuksia. Tämän lisäksi työssä tehdään kokeellinen toteutus, jolla demonstroidaan TSN:n toiminnallisuuksia. Työssä esitellään kokeellisen toteutuksen alkuvalmistelut, tulokset, toteutuksessa ilmenneet ongelmat sekä ideoita ja neuvoja kokeellisen toteutuksen jatkamiselle.

## 2. TIME-SENSITIVE NETWORKING

Time-Sensitive Networking (TSN) on joukko 802 Ethernet -alastandardeja, jotka Institute of Electrical and Electronics Engineersin (IEEE) TSN-työryhmä on määritellyt. Tämä työryhmä on muodostunut IEEE:n Audio Video Bridging (AVB) -työryhmän pohjalta, joka aiemmin kehitti AVB:n standardeja. AVB:n tarkoitus alun perin oli mahdollistaa reaaliaikaisen äänen ja videon välittäminen Ethernetin yli. Teollisuuden eri tahot kiinnostuivat tekniikasta, mutta AVB itsessään ei vielä ollut kykenevä vastaamaan kaikkiin teollisuuden sovellusalueiden tarpeisiin, kuten tiukkoihin aikarajoitteisiin ja vaatimuksiin viiveelle (Lee et al. 2016; Pahlevan & Obermaisser 2018a). Tämän seurauksena AVB-työryhmä laajeni TSN-työryhmäksi kehittämään uusia standardeja vastaamaan teollisuuden tarpeisiin.

Standardeja, jotka TSN-työryhmä on määritellyt näille teknologioille, on paljon, ja standardilista kasvaa sekä muuttuu yhä. Tämä johtuu siitä, että TSN:n standardointiprosessi on yhä käynnissä. Jotkin standardit myös saatetaan pudottaa pois listalta silloin, kun niistä julkaistaan paranneltu versio uudella nimellä.

Designation	Title	Incorporation	Further information
802.1Qat	Stream reservation protocol	802.1Q-2011	<a href="http://standards.ieee.org/findstds/standard/802.1Qat-2010.html">http://standards.ieee.org/findstds/standard/802.1Qat-2010.html</a>
802.1Qav	Forwarding and queuing enhancements for time-sensitive streams	802.1Q-2011	<a href="http://standards.ieee.org/findstds/standard/802.1Qav-2009.html">http://standards.ieee.org/findstds/standard/802.1Qav-2009.html</a>
802.3br	Interspersing express traffic	Standalone standard	<a href="http://standards.ieee.org/findstds/standard/802.3br-2016.html">http://standards.ieee.org/findstds/standard/802.3br-2016.html</a>
802.1Qbu	Frame preemption	802.1Q-2018	<a href="http://standards.ieee.org/findstds/standard/802.1Qbu-2016.html">http://standards.ieee.org/findstds/standard/802.1Qbu-2016.html</a>
802.1Qbv	Enhancements for scheduled traffic	802.1Q-2018	<a href="http://standards.ieee.org/findstds/standard/802.1Qbv-2015.html">http://standards.ieee.org/findstds/standard/802.1Qbv-2015.html</a>
802.1Qci	Per-stream filtering and policing	802.1Q-2018	<a href="http://standards.ieee.org/findstds/standard/802.1Qci-2017.html">http://standards.ieee.org/findstds/standard/802.1Qci-2017.html</a>
802.1Qch	Cyclic queuing and forwarding	802.1Q-2018	<a href="http://standards.ieee.org/findstds/standard/802.1Qch-2017.html">http://standards.ieee.org/findstds/standard/802.1Qch-2017.html</a>
802.1CB	Frame replication and elimination for reliability	Standalone standard	<a href="http://standards.ieee.org/findstds/standard/802.1CB-2017.html">http://standards.ieee.org/findstds/standard/802.1CB-2017.html</a>
802.1CM	Time-sensitive networking for fronthaul	Standalone standard	<a href="https://standards.ieee.org/findstds/standard/802.1CM-2018.html">https://standards.ieee.org/findstds/standard/802.1CM-2018.html</a>
P802.1Qcr	Asynchronous traffic shaping	802.1Q amendment project	<a href="http://www.ieee802.org/1/pages/802.1cr.html">http://www.ieee802.org/1/pages/802.1cr.html</a>
P802.1Qcc	SRP enhancements and performance improvements	802.1Q amendment project	<a href="http://www.ieee802.org/1/pages/802.1cc.html">http://www.ieee802.org/1/pages/802.1cc.html</a>
P802.1AS-Rev	Timing and synchronization for time-sensitive applications – revision	Standalone project	<a href="http://www.ieee802.org/1/pages/802.1AS-rev.html">http://www.ieee802.org/1/pages/802.1AS-rev.html</a>

**Kuva 1.** Lista Time-Sensitive Networking -standardeista (Messenger 2018).

Kuvassa 1 on taulukko standardeista, joita Messenger (2018) käsittelee artikkelissaan. Taulukossa eivät ole kaikki TSN:n standardit, ja osa standardeista on saattanut jo ehtiä muuttua tai niistä on julkaistu uudempia versioita. Tässä työssä pyritään käymään läpi TSN:n pääominaisuuksiin liittyvät standardit, jotka ajan kuluessa ovat pysyneet melko muuttumattomina. Koska TSN:ää on alettu kehittämään AVB:n pohjalta, viitataan joihinkin TSN:n standardeihin yhä AVB:n standardeina. Tämän vuoksi on hyödyllistä esitellä myös lyhyesti AVB:tä.



## 2.1 Audio Video Bridging

Audio Video Bridging pyrkii mahdollistamaan reaaliaikaisen datan välittämisen Ethernetin ylitse sekä takaamaan vakioviiveen tietoliikenteelle. Näiden lisäksi AVB pyrkii takaamaan tietoliikenteiden siirtämiseksi tietyn palvelunlaadun (Quality of Service). Tärkeimmät AVB:n ominaisuudet, jotka mahdollistavat nämä toiminnot, ovat aikasynkronointi tietoverkossa olevien laitteiden välillä, kaistanleveyden varaaminen AVB-tietoliikenteelle sekä tietoliikenteen priorisointi ja jonoihin lajittelu. (Park et al. 2016)

Keskeisimmät standardit, joihin AVB:n ominaisuuksien toiminta perustuu ovat

- IEEE 802.1AS: Timing and Synchronization for Time-Sensitive Applications
- IEEE 802.1Qat: Stream Reservation Protocol (SRP)
- IEEE 802.1Qav: Forwarding and Queuing Enhancements for Time-Sensitive Streams.

Näistä standardeista IEEE 802.1AS määrittelee protokollan tarkalle aikasynkronoinnille aika-kriittisten laitteiden välille. Standardi IEEE 802.1Qat käsittelee määrityksen protokollalle, jonka avulla on mahdollista varata tietoverkon resursseja tietyille datavirroille, kuten AVB-tietoliikenteelle. Standardi IEEE 802.1Qav puolestaan määrittelee, miten aikakriittinen ja ei-aikakriittinen tietoliikenne jaotellaan prioriteetteihin ja prioriteetteja vastaaviin luokkiin sekä jonoihin. (Imtiaz et al. 2009; Bello 2014; Park et al. 2016)

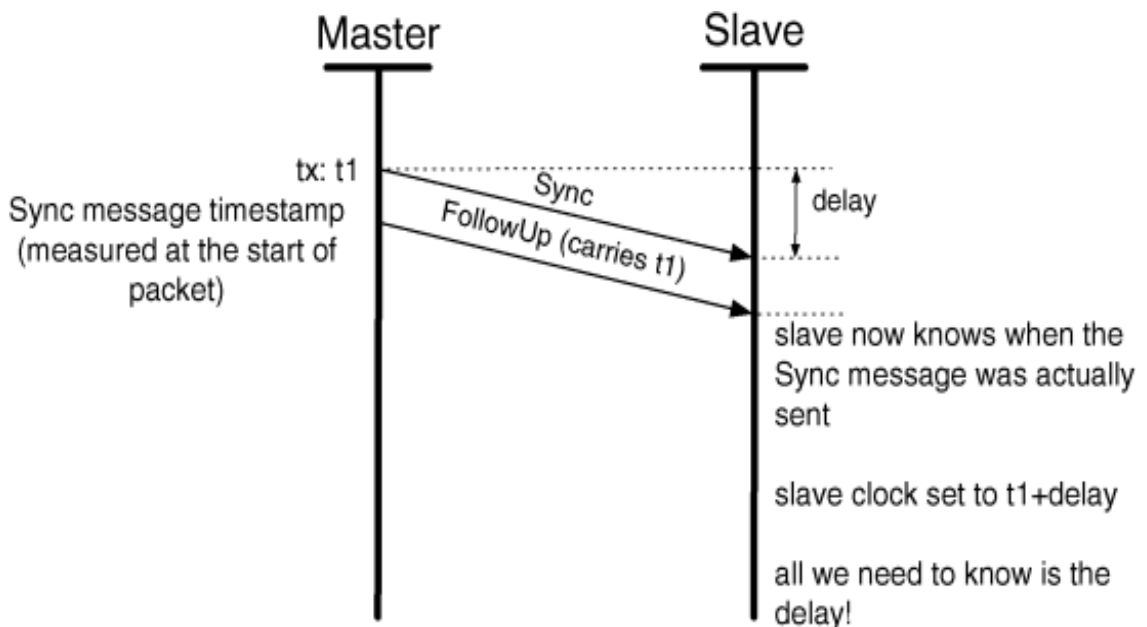
Imtiaz et al. (2011) ja Johas Teener et al. (2013) mainitsevat myös muina AVB:n kannalta oleellisina standardeina standardit IEEE 802.1BA Audio Video Bridging Systems ja IEEE 1722 Layer 2 AVB Transport Protocol (AVBTP). Näistä standardeista 802.1BA Audio Video Bridging Systems määrittelee vaatimukset järjestelmä- ja tietoverkkoarkkitehtuureille, joissa halutaan siirtää aikakriittistä tietoliikennettä. IEEE 1722 Layer 2 AVB Transport Protocol puolestaan määrittelee OSI-mallin 2. kerroksen tiedonsiirtoprotokollan aikakriittisen tietoliikenteen tiedonsiirrolle.

### 2.1.1 Aikasynkronointi laitteiden välillä

AVB:n laitteiden välinen aikasynkronointi perustuu generalized Precision Time Protocol (gPTP) -protokollaan, joka puolestaan pohjautuu IEEE 1588 -standardin määrittämään protokollaan Precision Time Protocol (PTP). Nämä kaksi protokollaa muistuttavat toisiaan paljon, minkä vuoksi IEEE 802.1AS -standardin määrittämästä protokollasta käytetään joskus nimeä PTP. Näillä kahdella protokollalla on kuitenkin eroavuuksia,

kuten niiden käyttämät Best Master Clock Algorithm (BMCA) -algoritmit, joita käytetään pääisäntälaitteen (grandmaster) valintaan, ovat hieman erilaiset (Garner & Ryu 2011).

Jotta laitteet voidaan synkronoida samaan aikaan, täytyy ensin valita yksi tietoverkon laitteista pääisäntälaitteeksi, jonka kellon mukaan muut laitteet synkronoidaan. Kuten edellä todettiin, AVB hyödyntää pääisäntälaitteen valintaan BMCA-algoritmia. Algoritmi toimii niin, että kaikki tietoverkon laitteet, jotka kykenevät toimimaan pääisäntälaitteena, ilmoittavat kyvystään naapurilaitteilleen. Laitteiden välissä olevat kytkimet lähettävät omille naapureilleen eteenpäin vain ilmoituksen laitteesta, jolla on parhain kyky toimia pääisäntälaitteena. Jos pääisäntälaitteeksi kykenevä laite vastaanottaa ilmoituksen laitteesta, jolla on parempi kyky toimia pääisäntälaitteena kuin sillä itsellään, lopettaa kyseinen laite oman ilmoituksensa lähettämisen. Kun tietoverkossa on jäljellä enää yksi laite, joka lähettää ilmoitusta kyvystään toimia pääisäntälaitteena, valitaan tämä laite pääisäntälaitteeksi. (Johas Teener et al. 2013)

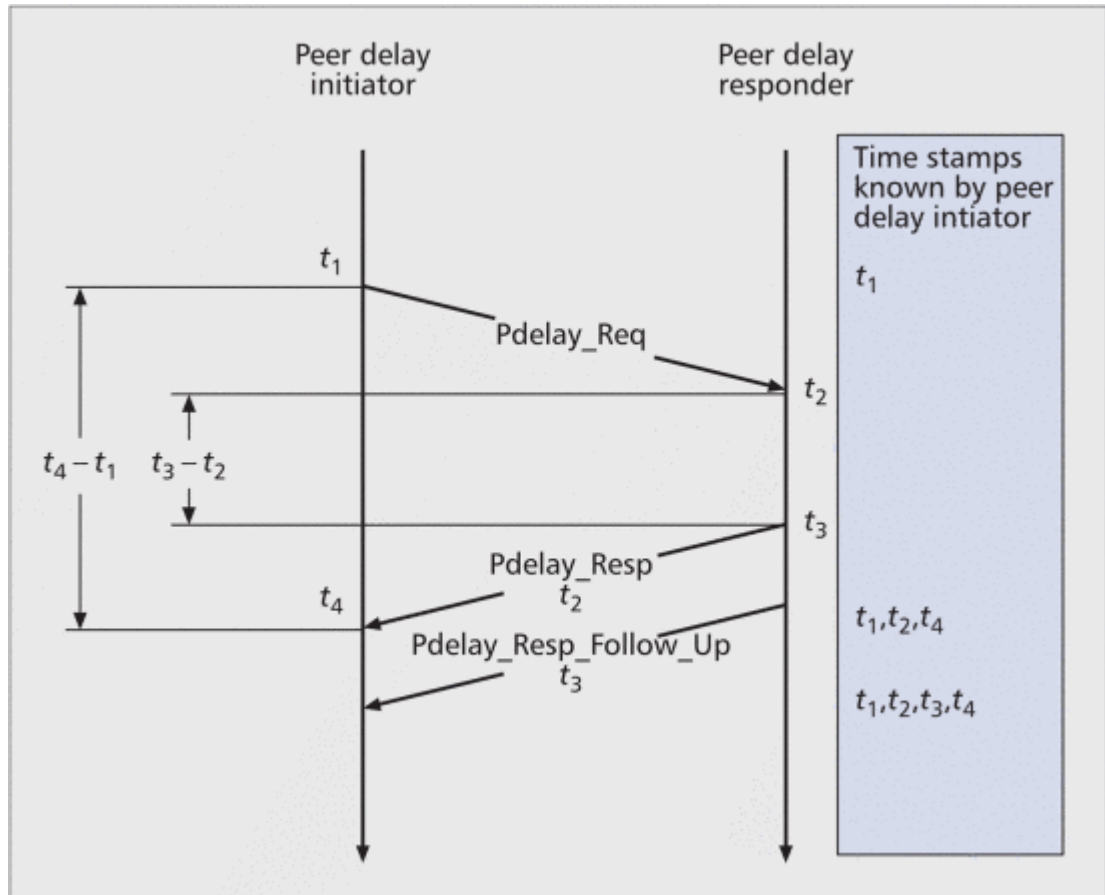


**Kuva 2.** Synkronisointiajan lähettäminen kahden askeleen menetelmää käyttäen (Johas Teener et al. 2013).

Kun pääisäntälaitte on valittu, lähettää pääisäntälaitte muille laitteille tiedon ajasta, johon niiden tulee synkronoitua. Koska kyseessä on pääisäntälaitte, ovat muut laitteet siihen nähden orjalaitteita. Pääisäntälaitte lähettää tiedon ajasta synkronointiviestinä sen vieressä oleville orjalaitteille. Orjalaitte ottaa tämän synkronointiviestin lähetysajan  $t_1$  aikaleimana talteen ja asettaa omaksi ajakseen  $t_1 + d$ , jossa  $d$  on synkronointiviestin lähetysajan ja saapumisajan välinen viive. (Johas Teener et al. 2013) Tällaista kahden viestin käyttämistä kutsutaan ”kahden askeleen menetelmäksi”, jota kuva 2 havainnollistaa.

Pelkän tarkan synkronointiajan lähettäminen orjalaitteelle ei vielä riitä, vaan vielä pitää kompensoida tietoverkossa oleva viive, joka syntyy laitteiden välissä olevista kytkimistä, sekä viestin etenemisviive. Kytkimen aiheuttama viive korjataan laskemalla kytkimen vastaanottaman synkronointiviestin ja jatkoviestissä olevan aikaleiman välinen viive  $d$ , kuten kahden askeleen menetelmässä. Tämän jälkeen kytkin lähettää synkronointiviestin eteenpäin seuraavalle laitteelle, ja sen perässä uuden jatkoviestin, jonka aikaleimaksi on annettu uusi aika  $t_1^*$ . Tämä uusi aikaleima on summa, joka koostuu alkuperäisen synkronointiviestin lähetysajasta  $t_1$ , alkuperäisen synkronointiviestin ja jatkoviestissä olevan aikaleiman välisestä viiveestä  $d$  sekä alkuperäisen synkronointiviestin saapumisajan  $t_2$  ja eteenpäin lähetetyn synkronointiviestin lähetysajan  $t_3$  erotuksesta. (Johas Teener et al. 2013)

Garner & Ryu (2011) sekä Johas Teener et al. (2013) esittelevät artikkeleissaan etenemisviiveen laskemiseen käytettävän vertaisviivemekanismin (peer delay mechanism), joka muistuttaa hieman kahden askeleen menetelmää. Laite, joka haluaa mitata etenemisviiveen, lähettää Pdelay\_Req-viestin toiselle laitteelle, joka toimii tässä viestiketjussa vertaisviiveen vastaajana (Peer delay responder). Viestin lähettäjä puolestaan on vertaisviiveen alullepanija (Peer delay initiator). Viestin lähettäjä ottaa talteen lähetetyn viestin lähetysajan  $t_1$  aikaleiman. Kun viesti saapuu siirtoyhteyttä pitkin vertaisviiveen vastaajalle, ottaa tämä laite talteen Pdelay\_Req-viestin saapumisajan  $t_2$  aikaleiman. Tämän jälkeen vertaisviiveen vastaaja lähettää vertaisviiveen alullepanijalle Pdelay\_Resp-vastausviestin, joka sisältää ensimmäisen viestin saapumisajan  $t_2$ , ja ottaa itse talteen vastausviestin lähetysajan  $t_3$  aikaleiman. Kun vertaisviiveen alullepanija saa vastausviestin, ottaa tämä laite talteen vastausviestin saapumisajan  $t_4$ . Vertaisviiveen vastaaja lähettää vielä vastausviestin perään Pdelay\_Resp\_Follow\_Up-jatkoviestin, joka sisältää vastausviestin lähetysajan  $t_3$ . Kun vertaisviiveen alullepanijan on vastaanottanut jatkoviestin, on sillä tiedossa kaikki tarvittavat aikaleimat etenemisviiveen laskemiseen, joka on puolet väliaikojen  $t_4 - t_1$  ja  $t_3 - t_2$  summasta. (Garner & Ryu 2011; Johas Teener et al. 2013) Kuva 3 havainnollistaa vertaisviivemenetelmän toimintaa.



**Kuva 3.** Etenemisviiveen mittaus käyttäen vertaisviivemekanismia (Garner & Ryu 2011).

Kun kaikki viiveet ovat tiedossa, pystyy gPTP-protokolla synkronoimaan tietoverkon laitteet pääisäntälaitteen aikaan. Synkronointiviestiketjuja ja vertaisviiveviestiketjuja lähetetään ajoittain, jotta tietoverkko pystyy nopeammin uudelleen konfiguroitumaan, jos pääisäntälaitte vaihtuu tai tietoverkon topologiassa tapahtuu muutoksia (Garner & Ryu 2011).

## 2.1.2 Kaistanleveyden varaaminen

Taatakseen palvelunlaadun aikakriittiselle tietoliikenteelle AVB varaa tietoverkon resursseja, kuten kaistanleveyttä, kyseisille datavirroille Puhujan (Talker) ja Kuuntelijan (Listener) välillä (Kleineberg et al. 2011; Bello 2014; Kim et al. 2015). Tietoverkossa Puhuja on laite, joka lähettää tietoliikennettä, ja Kuuntelija on laite, joka vastaanottaa kyseisen tietoliikenteen. AVB:n kyky varata resursseja perustuu IEEE 802.1Qat -standardiin ja sen määrittämään SRP-protokollaan. Tämä SRP-protokolla määrittelee aikakriittiselle tietoliikenteelle kaksi Stream Reservation (SR) -luokkaa, jotka ovat luokka A ja luokka B. Luokka A takaa tietoliikenteen siirtämiselle maksimissaan 2 ms viiveen ja luokka B puolestaan maksimissaan 50 ms viiveen, kun Puhujan ja Kuuntelijan välissä on

enintään seitsemän kytkintä tai joitain muita tietoverkkolaitteita. Luokan A ja luokan B tietoliikenteelle voidaan maksimissaan varata 75 % kokonaiskaistanleveydestä, jolloin jäljelle jäävät 25 % kaistanleveydestä ovat ei-aikakriittisen best effort -tietoliikenteen käytettävissä. (Lim et al. 2012a; Park et al. 2016)

Ennen kuin tietoliikennettä voidaan lähettää Puhujalta Kuuntelijalle, täytyy varmistaa, että Puhujan ja Kuuntelijan välissä olevilla laitteilla on tarpeeksi kaistanleveyttä ja resursseja tietoliikenteen kuljettamista varten. Tähän hyödynnetään Multiple Stream Registration Protocol (MSRP) -protokollaa ja sen neljää eri viestityyppiä, jotka ovat Puhujan mainostaminen (Talker advertise), Puhuja epäonnistui (Talker failed), Kuuntelija valmis (Listener ready) ja Kuuntelijan kysely epäonnistui (Listener asking failed). Puhuja lähettää Kuuntelijan suuntaan datavirtaansa mainostavan viestin, jonka perusteella kytkimet kykenevät laskemaan tarvittavan kaistanleveyden datavirtaa varten. Tämän jälkeen kytkimet tietävät, kykenevätkö ne varaamaan tämän verran kaistanleveyttä. Sen jälkeen mainosviesti lähetetään eteenpäin Kuuntelijaa kohti. Kun Kuuntelija vastaanottaa Puhujan mainosviestin, ilmoittaa se halustaan vastaanottaa datavirtaa lähettämällä Kuuntelija valmis -viestin Puhujan suuntaan. Vasta kun kytkin vastaanottaa Kuuntelijan lähettämän Kuuntelija valmis -viestin, tekee se kaistanleveyden varaamisen datavirtaa varten. Kun Puhuja on vastaanottanut Kuuntelija valmis -viestin, voi se aloittaa datavirran lähettämisen. (Imtiaz et al. 2011 & Johas Teener et al. 2013)

Imtiaz et al. (2011) & Johas Teener et al. (2013) kertovat artikkeleissaan myös, mitä tapahtuu, jos jonkin kytkimistä Puhujan ja Kuuntelijan välillä ei pysty takaamaan riittävää kaistanleveyttä tai resursseja datavirralle. Tällöin MSRP-protokolla muuttaa Puhujan mainostaminen -viestin Puhuja epäonnistui -viestiksi, joka sitten lähetetään edelleen Kuuntelijalle. Samalla tavalla Kuuntelija valmis -viesti muuttuu Kuuntelijan kysely epäonnistui -viestiksi ja se lähetetään edelleen Puhujalle. Tällä tavoin sekä Puhuja että Kuuntelija saavat molemmat tiedon siitä, onnistuiko kaistanleveyden ja resurssien varaaminen vai ei. Tällöin mahdollisessa epäonnistumistilanteessa molemmat saavat myös tiedon siitä, missä kohtaa tietoverkkoa esiintyi ongelma kaistanleveyden varaamisessa.

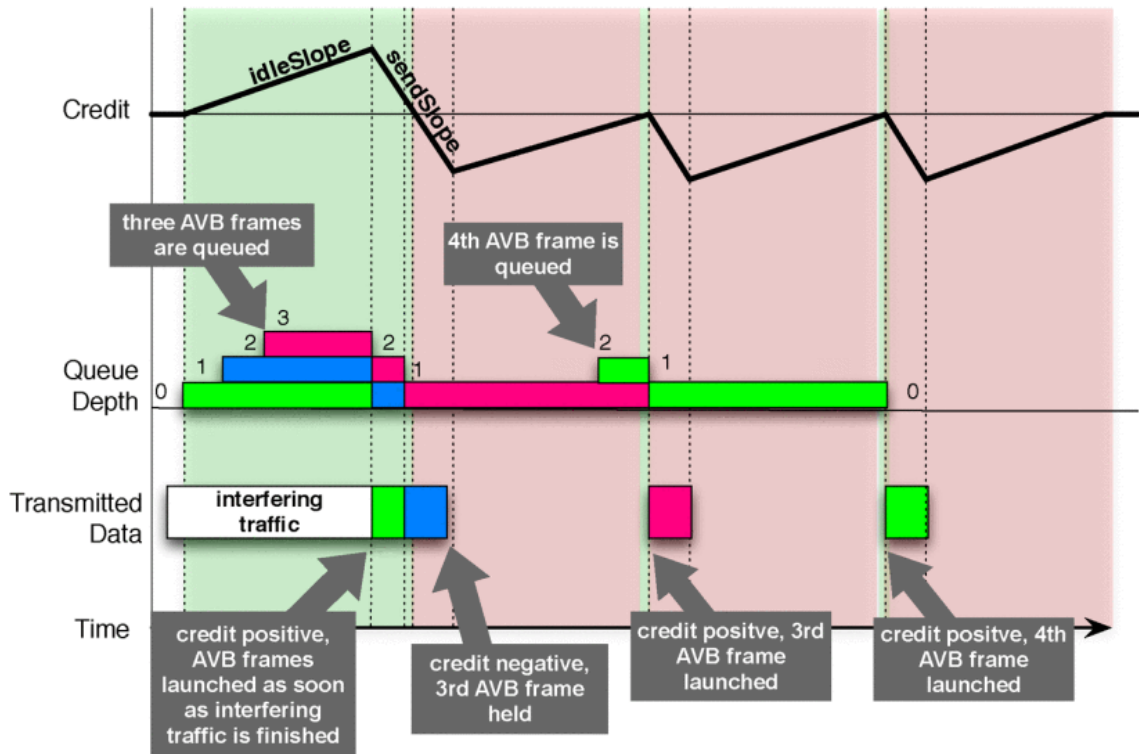
### **2.1.3 Tietoliikenteen hallinta**

SRP ei yksin pelkästään kykene vastaamaan palvelunlaatuvaatimuksiin, minkä vuoksi AVB hyödyntää tietoliikenteen käsittelyyn standardia IEEE 802.1Qav. Tämä standardi esittelee parannuksia aikakriittisen tietoliikenteen eteenpäin lähettämiseksi ja jonottamiselle. Nämä parannukset ovat korkean prioriteetin kartoittaminen SRP:n määrittelemille SR-luokille A ja B sekä Credit-Based Shaper (CBS) -algoritmi. CBS-

algoritmia hyödynnetään aikakriittisen tietoliikenteen lähettämiseen, kun taas tavalliselle best effort -tietoliikenteelle hyödynnetään perinteisempää Strict Priority (SP) -algoritmia. SP-algoritmin toiminta perustuu siihen, että tietoliikenne, joka on korkeamman prioriteetin jonossa, lähetetään ennen tietoliikenteitä, joka on matalamman prioriteetin jonossa. (Lim et al. 2012b) SP-algoritmin toiminta on tietoliikenteen siirtämiseen riittävä niin kauan, kun korkean prioriteetin tietoliikennettä on vain vähän, eikä tietoliikenteellä ole tiukkoja vaatimuksia viiveelle. SP-algoritmi ei ole kuitenkaan riittävä toimimaan aikakriittisen tietoliikenteen kanssa, jolla on tiukat viivevaatimukset ja korkeampi prioriteetti kuin best effort -tietoliikenteellä (Johas Teener et al. 2013). Tämän vuoksi aikakriittisen tietoliikenteen kanssa käytetään CBS-algoritmia.

CBS-algoritmi määrittelee SR-luokille A ja B krediitit (credit), joilla määritetään, onko näiden luokkien jonoissa olevien aikakriittisten tietoliikenteiden datapakettien eteenpäin lähettäminen sallittua. Datapaketteja voidaan lähettää eteenpäin vain, jos jonon krediittien määrä on suurempi tai yhtä suuri nolla. Tietoliikenteen lähettämiseen vaikuttavat myös, odottaako samalla hetkellä korkeampaa prioriteettia oleva tietoliikenne lähettämistä, jolloin sille annettaisiin lähetysvuoro. Tämän lisäksi lähettämiseen vaikuttaa, lähetetäänkö kyseisellä hetkellä eteenpäin tietoliikennettä, joka vie suurimman osan kaistanleveydestä, sillä CBS ei pysy keskeyttämään tietoliikenteen lähettämistä. Kunkin jonon krediittien määrä alustetaan nolnaan, ja jonon krediittien määrä myös palautuu nolnaan, kun jonossa ei ole jäljellä enää yhtäkään tietoliikenteen datapakettia. Kun tietoliikenteen datapaketteja lähetetään jonosta eteenpäin, vähenee jonon krediittien määrä Lähetyskulman (sendSlope) mukaan, ja kun datapaketit joutuvat odottamaan jonossa lähettämistä, nousee jonon krediittien määrä Joutilaskulman (idleSlope) mukaan. (Imtiaz et al. 2009; Lim et al. 2012b; Geyer et al. 2013; Johas Teener et al. 2013; Bello 2014)

Kuvassa 4 on esitetty CBS-algoritmin toiminta yhden jonon näkökulmasta. Kyseisellä jonolla on datapaketteja jonossa, jotka joutuvat aluksi odottamaan, että ei-aikakriittinen tietoliikenne on ensin lähetetty, koska sen lähettäminen aloitettiin ennen kuin datapaketit saapuivat jonoon. Odottamisen aikana jonon krediittien määrä kasvaa niin kauan, kunnes datapaketteja voidaan lähettää eteenpäin, jolloin krediittien määrä alkaa laskemaan. Kun krediittien määrä laskee negatiivisen puolelle, ei jonosta voida lähettää enempää datapaketteja eteenpäin ennen kuin jonon krediittien määrä on taas positiivinen.



**Kuva 4.** Credit-Based Shaper ja sen määrittelemä tietoliikenteen aikataulus ja eteenpäin lähetyks (Johas Teener et al. 2013).

Jono, josta datapaketteja aletaan lähettämään eteenpäin, valitaan jonon prioriteetin mukaan, jolloin jonosta, jolla on korkein prioriteetti, lähetetään datapaketteja ensimmäisenä. Jos kuitenkin kyseisessä jonossa ei ole datapaketteja tai sen krediittien määrä on negatiivinen, siirtyy datapaketien lähetyksvuoro jonolle, jolla on seuraavaksi korkein prioriteetti (Lim et al. 2012a). SR-luokkien A ja B jonoille on kartoitettu korkeammat prioriteetit kuin best effort -tietoliikenteen jonoille, jotta ne olisivat ensisijaisessa asemassa eteenpäin lähettämistä varten. Best effort -tietoliikennettä pystytään kuitenkin lähettämään eteenpäin samaan aikaan aikakriittisen tietoliikenteen kanssa, jos jäljelle jäävä kaistanleveys on riittävä tälle tietoliikenteelle (Imtiaz et al. 2009).

## 2.2 TSN:n yleiskuvaus

TSN:n tavoite on mahdollistaa ja taata reaaliaikainen ja luotettava sekä deterministinen eli ennustettava tiedonsiirto samassa Ethernet-verkossa kulkeville aikakriittisille tietoliikenteille, joilla voi olla erilaisia prioriteettivaatimuksia. Samalla TSN-tekniikka mahdollistaa samassa verkossa tiedonsiirron myös tavalliselle ei-aikakriittiselle tietoliikenteelle. (Messenger 2018) Tämä mahdollistaisi yhden joustavan Ethernet-verkon käytön tietoliikennesovelluksille sen sijaan, että jouduttaisiin rakentamaan monimutkainen verkkoinfrastruktuuri sovelluksille, joilla on erilaisia prioriteetti- tai kriittisyysvaatimuksia. Päästäkseen näihin tavoitteisiin TSN hyödyntää

aikasynkronointia, resurssien varaamista, robustista redundanssia sekä tietoliikenteen aikataulutusta ja priorisointia (Pahlevan & Obermaisser 2018a). Nämä teknologiat mahdollistavat useita eri käyttötapauksia TSN-tekniikalle erilaisissa teollisissa automaatioverkoissa.

Monet TSN:n hyödyntämistä ominaisuuksista perustuvat AVB:n ominaisuuksiin, joiden pohjalta TSN:n ominaisuuksia on kehitetty. Koska nämä AVB:n ominaisuudet eivät kykene täysin vastaamaan koviin reaaliaikavaatimuksiin, tarjoavat TSN-työryhmän kehittämät standardit parannuksia AVB:n ominaisuuksiin TSN:n ominaisuuksien kautta. Tärkeimmät standardit, jotka mahdollistavat TSN:n ominaisuudet ovat

- IEEE 802.1AS-Rev: Timing and Synchronization for Time-Sensitive Applications
- IEEE 802.1Qbv: Enhancements for Scheduled Traffic
- IEEE 802.1Qbu: Frame Preemption
- IEEE 802.1CB: Frame Replication and Elimination for Reliability (Seamless Redundancy).

IEEE 802.1AS-Rev -standardi esittää parannuksia sitä edeltäneeseen aikasynkronointistandardiin IEEE 802.1AS, jotta laitteiden välinen aikasynkronointi olisi optimoidumpi. Standardi IEEE 802.1Qbv esittelee parannuksen CBS-algoritmiin sekä tietoliikenteen aikataulutukseen. Standardi IEEE 802.1Qbu määrittelee, miten TSN kykenee keskeyttämään ei-aikakriittisen tietoliikenteen lähettämisen ja jatkamaan sitä sen jälkeen, kun aikakriittinen tietoliikenne on siirretty eteenpäin. Tämän standardin avulla TSN pystyy hyödyntämään tietoverkon kaistanleveyttä paljon tehokkaammin. IEEE 802.1CB -standardi määrittelee TSN:lle redundanssimekanismin, jolla tiettyjen tietoliikenteiden datapaketteja voidaan lähettää useampaa reittiä pitkin määränpään. (Zhao et al. 2018a)

Myös muut TSN-työryhmän tekemät standardit ovat oleellisia TSN:n toiminnan kannalta, kuten standardit IEEE 802.1Qca: Path Control and Reservation sekä IEEE 802.1Qcc: Stream Reservation Protocol Enhancements and Performance Improvements. Näistä ensimmäinen mahdollistaa useampien reittien luomisen ja varaamisen tietoverkon minkä tahansa päätepistelaiteparin välille. Tätä standardia tarvitaan yhdessä IEEE 802.1CB -standardin kanssa mahdollistamaan redundanssi tietyille tietoliikenteille. Standardi IEEE 802.1Qcc puolestaan esittelee parannuksia SRP-protokollaan ja mahdollistaa SR-luokkien ja aikakriittisten datavirtojen konfiguroinnin. (Kehrer et al. 2014)



### 2.3 Aikasynkronointiratkaisu ja sen parannukset

Jotta TSN voisi vastata reaaliaikaisuuden aikavaatimuksiin, kuten datapakettien lähettämiseen ja saapumiseen juuri oikeaan aikaan, tulee kaikkien tietoverkon laitteiden olla synkronoituna samaan aikaan. Tällä hetkellä TSN:n käyttää aikasykronisointiratkaisunaan standardia IEEE 802.1AS, joka esiteltiin jo AVB:n yhteydessä. TSN-työryhmällä on kuitenkin kehitteillä IEEE 802.1AS -standardiin liittyviä parannuksia, jotka esitellään standardissa IEEE 802.1AS-Rev. Tämä standardi on kuitenkin vielä luonnosvaiheessa, eikä sitä siis ole vielä täysin julkaistu. Tämän vuoksi monet TSN:ää hyödyntävät laitteet käyttävätkin IEEE 802.1AS -standardin esittelemää aikasykronointiratkaisua.

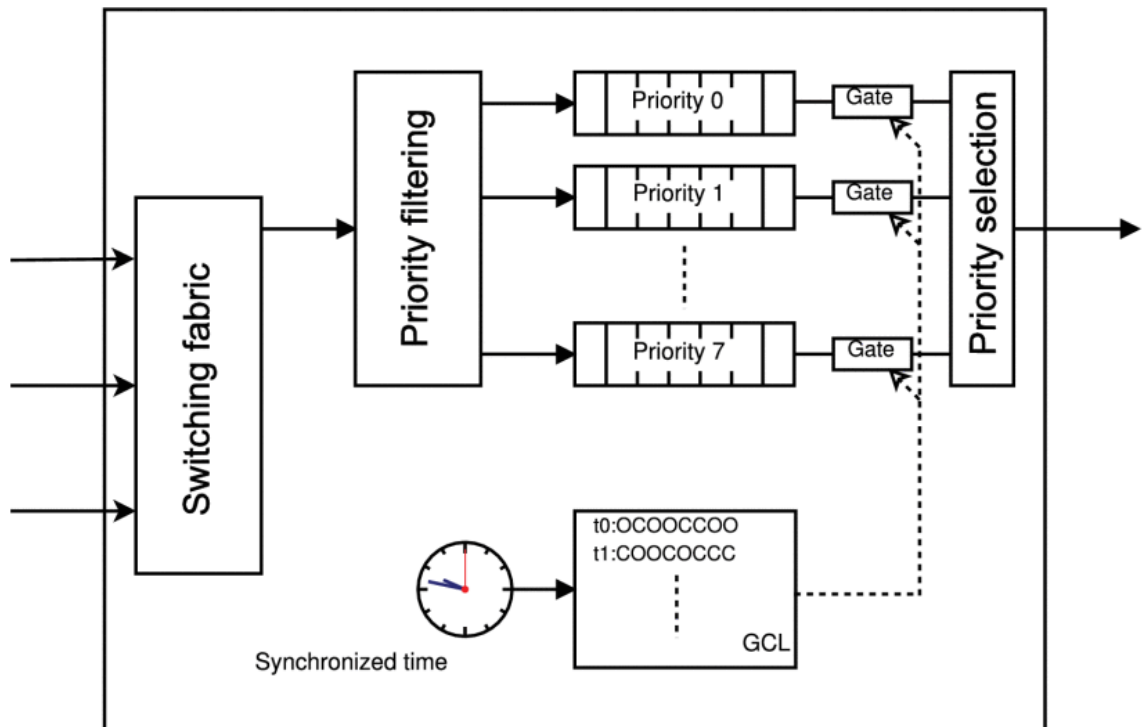
IEEE 802.1AS-Rev -standardin tärkeimpiä parannuksia ovat tuki usealle aika-alueelle sekä usean synkronisoidun pääisäntälaitteen käyttö tietoverkossa, joiden avulla TSN parantaa tietoverkon vikasetoisuutta. Kun tietoverkossa on yksi pääisäntälaitte, jonka ajassa laitteet ovat, ja muita pääisäntälaitteita, jotka ovat valmiustilassa, onnistuu pääisäntälaitteen vaihtaminen nopeammin, jos sen hetkinen pääisäntälaitte lopettaa toimintansa. (Nasrallah et al. 2019b; Samii & Zinner 2018)

### 2.4 Tietoliikenteen aikataulutus ja hallinta

AVB:n ratkaisu tietoliikenteen aikataulutukselle perustui CBS-algoritmiin. Tämä algoritmi ei kuitenkaan pysty keskeyttämään käynnissä olevaa datapakettien lähettämistä tai etukäteen varaamaan aikakriittiselle tietoliikenteelle lähetysikkunaa, jonka aikana datapaketti lähetettäisiin eteenpäin. Tämän vuoksi CBS-algoritmi ei kykene takaamaan determinististä päästä-päähän viivettä tietoliikenteelle (Pahlevan & Obermaisser 2018a). Tähän ongelmaan TSN:n standardi IEEE 802.1Qbv esittelee Time Aware Shaper (TAS) -algoritmin, joka perustuu ajastettuun aikataulutukseen ja datapakettien lähettämiseen. TAS-algoritmin aikataulutuksen perusteena on etukäteen määritellyt tietoliikenneluokat, joihin lukeutuvat AVB:n esittelemät SR-luokat A ja B, best effort -tietoliikenneluokat sekä TSN:n uutena tietoliikenneluokkana esittelemä Control-Data Traffic (CDT) -luokka. CDT-luokalla on kaikista tietoliikenneluokista korkein prioriteetti ja se on varattu reaaliaikaista tietoliikennettä varten (Thangamuthu et al. 2015). Korkeimman prioriteetin tietoliikenteen ei pitäisi käytännössä ollenkaan joutua odottelemaan jonossa, vaan se lähetetään saman tien jonoon saapuessaan eteenpäin.

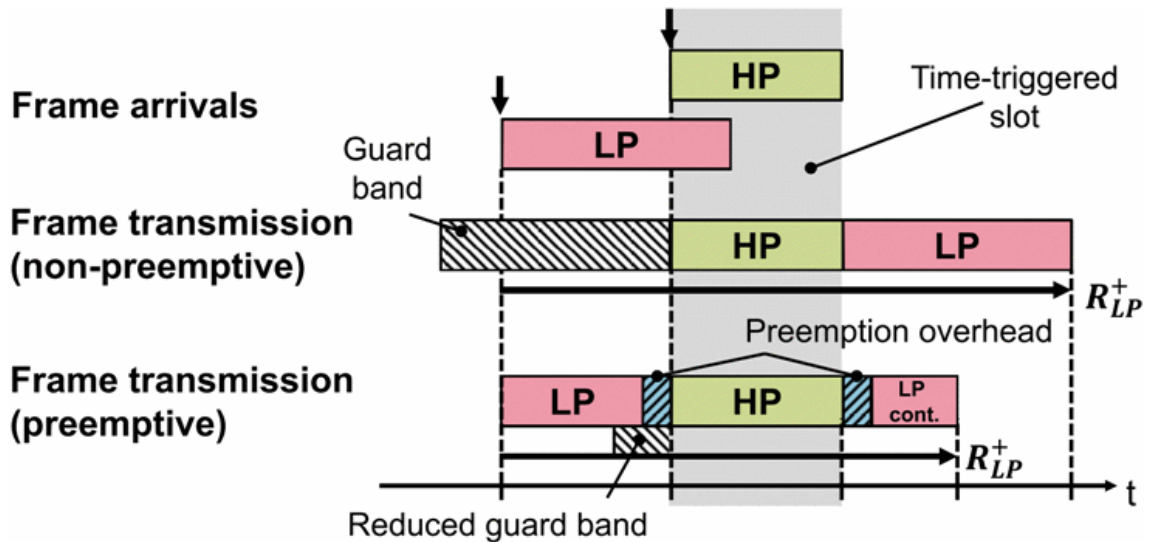
Jokaisen tietoliikenneluokan jonon edessä on portti, jolla on kaksi tilaa ”auki” tai ”kiinni”. Tietoliikennettä pystytään lähettämään vain, kun tietoliikenneluokan jonon portti on auki. Jonossa olevien datapakettien lähettämisyjärjestykseen puolestaan käytetään FIFO-

metodia, eli ensimmäisenä jonoon tullut datapaketti lähetetään jonosta pois ensimmäisenä. Portit aukeavat ja sulkeutuvat syklisesti tietyn aikataulun mukaisesti, jonka määrittämisestä vastaa Gate Control List (GCL). Tämä GCL konfiguroi porttien aukeamis- ja sulkeutumisaikakohdat tietoverkon synkronisoidun ajan perusteella. Jos useamman jonon portit ovat yhtä aikaa auki valitaan datapaketteja lähettävä jono jonon prioriteetin mukaan. (Pahlevan & Obermaisser 2018a; Serna Oliver et al. 2018; Zhao et al. 2018a; Zhao et al. 2018b) Kuvassa 5 näkyy, miten GCL on laskenut TSN-kytkimessä aikataulun, jonka mukaan kukin portti aukeaa ja sulkeutuu.



**Kuva 5.** GCL:n toiminta IEEE 802.1Qbv -standardia tukevassa kytkimessä (Zhao et al. 2018b).

Jotta matalamman prioriteetin tietoliikenne ei häiritsisi korkeamman prioriteetin aikakriittisen tietoliikenteen lähettämistä, TSN hyödyntää suojakaistaa (guard band) aikakriittisen tietoliikenteen edessä. Tämän suojakaistan aikana yhtäkään datapakettia ei voida lähettää, jolloin suojakaistan loppumisen jälkeen lähetetään saman tien aikakriittisen tietoliikenteen datapaketti. Yksinkertaisessa toteutuksessa suojakaistan pituus olisi yhtä pitkä kuin pisimmän ei-aikakriittisen datapaketin pituus, jolloin tietoliikennetyhteyttä ei pystytä hyödyntämään tehokkaasti. TSN:n standardi IEEE 802.1Qbu esittelee datapaketin estämisen (frame preemption), jonka avulla ei-aikakriittisen tietoliikenteen datapaketin lähetyksen pystytään keskeyttämään ja jatkamaan aikakriittisen datapaketin lähettämisen jälkeen. Datapaketin estämisen avulla suojakaista pystytään pienentämään datapaketin lyhyimmän palasen (fragment) pituiseksi. (Thiele & Ernst 2016; Messenger 2018; Zhao et al. 2018a)



**Kuva 6.** Suojakaistan käyttö korkeaprioriteettisen datapakettien edessä ilman datapakettien estämistä ja sen kanssa (Thiele & Ernst 2016).

Kuva 6 näyttää, miten datapakettien estäminen pienentää suojakaistan kokoa mahdollistaen kaistanleveyden ja tietoliikenneyhteyden tehokkaamman käytön, koska alemman prioriteetin datapakettia voidaan alkaa lähettämään jo sen saapuessa. Kuvassa näkyy myös datapakettien estämisen aiheuttama laskennallinen yleisrasite (overhead). Tämä yleisrasite aiheutuu sen hetkisen datapakettien palasen lähettämisen keskeyttämisestä ja toimintayhteyden siirtämisestä korkeamman prioriteetin tietoliikenteelle sekä myöhemmin takaisin alemman prioriteetin tietoliikenteelle (Nasrallah et al. 2019b).

Standardit IEEE 802.1Qbv ja IEEE 802.1Qbu ovat jo TSN-työryhmän julkaisemia standardeja. Tietoliikenteen aikataulukseen liittyen työryhmällä on tällä hetkellä työn alla standardi IEEE 802.1Qcr Asynchronous Traffic Shaping (ATS). Tämän standardin tarkoituksena olisi mahdollistaa TAS-algoritmin takaama deterministinen tietoliikenteen tiedonsiirto ilman laitteiden tiukkaa aikasykronointia eli tiedonsiirto tapahtuisi asynkronisesti. ATS auttaisi tietoverkon kasvaessa, jolloin tietoverkon aikasykronisointi muuttuu kompleksisemmaksi ja synkronisointihaasteita nousee esiin. (Nasrallah et al. 2019a; Nasrallah et al. 2019b) Tämä standardi on yhä kuitenkin luonnosvaiheessa ja se vaatiikin vielä lisää tutkimusta ennen kuin ATS voisi korvata TAS-algoritmin.

## 2.5 Resurssien varaaminen

Resurssien, kuten kaistanleveyden, varaaminen pohjautuu AVB:n esittelemään SRP-protokollaan. Koska muutokset tietoverkossa voivat aiheuttaa aikakriittiselle tietoliikenteelle viiveitä, esittelee TSN:n standardi IEEE 802.1Qcc parannuksia SRP-protokollaan, kuten varausviestien koon sekä niiden toistumistiheyden pienentämisen.

Näiden parannuksien lisäksi standardi IEEE 802.1Qcc esittelee keskitetyn verkkokonfiguroinnin hallintajärjestelmän, joka ottaa vastuun tietoverkon hallinnasta sekä resurssien varaamisesta. Tästä hallintajärjestelmästä käytetään nimeä Centralized Network Configuration element (CNCE). (Álvarez et al. 2018; Nasrallah et al. 2019b)

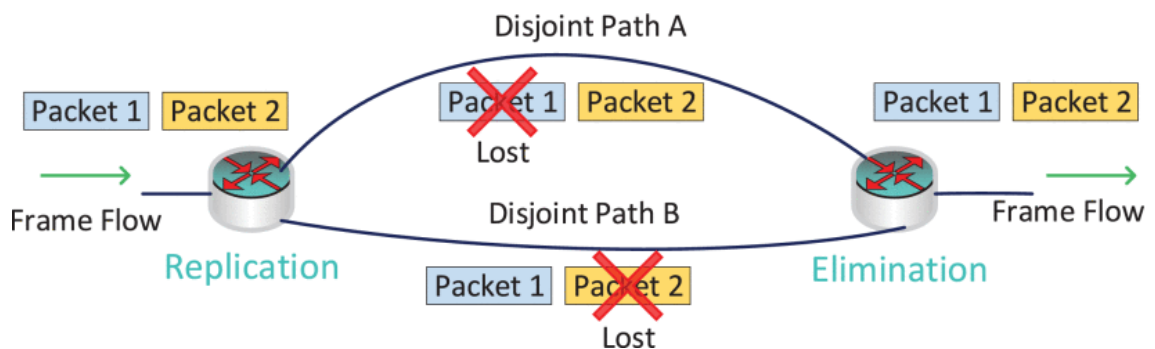
CNCE-hallintajärjestelmällä on tiedossa kaikki tietoverkkoon kuuluvat laitteet ja niiden ominaisuudet sekä tietoverkossa liikkuvat datavirrat, jotta se voi ohjata tietoverkkoa sekä konfiguroida kaikki tietoverkossa olevat laitteet oikein. Näiden tietojen keräämiseen CNCE hyödyntää käyttäjä-verkko-rajapintaa (User Network Interface), jota käytetään datavirtojen vaatimusten ilmoittamiseen. Tämä käyttäjä-verkko-rajapinta toimii joko päätepisteiden ja kytkimien välillä tai keskitetyn käyttäjäkonfiguraattorin (Centralized User Configurator) ja CNCE-hallintajärjestelmän välillä. Käyttäjä-verkko-rajapinnan käyttöalue riippuu käytettävästä konfigurointiarkkitehtuurista, joita IEEE 802.1Qcc-standardi esittelee kolme. Nämä konfigurointiarkkitehtuurit ovat täysin hajautettu malli, osittain keskitetty malli sekä täysin keskitetty malli. Täysin hajautetussa mallissa käyttäjä-verkko-rajapinta toimii päätepelilaitteiden ja kytkimien välillä, eikä tietoverkossa tällöin käytetä CNCE-hallintajärjestelmää. Sen sijaan datavirtojen resurssivaatimukset ilmoitetaan tietoverkolle ja tarvittavat resurssit varataan luvussa 2.1.3 esitellyn SRP-protokollaan mukaisesti Puhujan ja Kuuntelijan välisen viestikommunikoinnin aikana. Myös osittain keskitetyssä mallissa käyttäjä-verkko-rajapinta toimii päätepelilaitteiden ja kytkimien välillä, mutta kytkimet kommunikoivat suoraan CNCE-hallintajärjestelmän kanssa. Täysin keskitetyssä mallissa keskitetty käyttäjäkonfiguraattori kommunikoi suoraan päätepelilaitteiden kanssa ja hakee niiltä tiedot datavirtojen vaatimuksista. Tässä mallissa käyttäjä-verkko-rajapinta toimii keskitetyn käyttäjäkonfiguraattorin sekä CNCE-hallintajärjestelmän välillä. (Pop et al. 2018)

Täysin keskitetyssä sekä osittain keskitetyssä konfigurointiarkkitehtuurimalleissa CNCE-hallintajärjestelmä kartoittaa datavirtojen kulkureitit fyysisessä tietoverkossa perustuen tietoverkon laitteiden ominaisuuksiin, kuten niiden resursseihin, ja kytkimien siirtonopeuksiin. Tämän jälkeen CNCE-hallintajärjestelmä määrittää jokaista Puhujan ja Kuuntelijan välistä laitetta kohden aikataulut, joiden mukaan yksittäiset datapaketit tulee lähettää kultakin laitteelta eteenpäin. Jos kulkureittien sekä aikataulujen määrittäminen sujuu onnistuneesti, jakelee CNCE-hallintajärjestelmä nämä määritetyt konfiguraatiot tietoverkon laitteille. Tähän konfigurointitietojen jakeluun voidaan käyttää erinäisiä protokollia, kuten esimerkiksi NETCONF- tai Simple Network Management Protocol (SNMP) -protokollaa. (Pop et al. 2018) Kun uusi konfigurointitieto on päivitetty tietoverkon laitteille, voivat Puhujat aloittaa tietoliikenteen lähettämisen Kuuntelijoille.

## 2.6 Tietoverkon luotettavuus

Tietoverkoissa, joissa siirretään reaaliaikaista sekä aikakriittistä tietoliikennettä, tulee tietoliikenteen siirtämisen tapahtua luotettavasti ja deterministisesti myös silloin, kun fyysisessä tietoverkossa tapahtuisi joitain vikatilanteita, kuten verkkolaitteen hajoaminen ja putoaminen pois tietoverkosta. Parantaakseen tietoverkon luotettavuutta TSN hyödyntää redundanssia ja tietoliikenteen suodatusta. Mahdollistaakseen redundanttisen tietoverkon TSN esittelee standardit IEEE 802.1Qca Path Control and Reservation ja IEEE 802.1CB Frame Replication and Elimination for Reliability (FRER) ja tietoliikenteen suodatukseen TSN hyödyntää standardia IEEE 802.1Qci Per-Stream Filtering and Policing. (Nasrallah et al. 2019b)

TSN:n esittelemä redundanssivastaus perustuu siihen, että tietyistä datapaketeista lähetetään kopioita määränpäähen eri verkkoyhteyksiä pitkin ja määränpäässä turhat kopiot tuhotaan. Jos taas jokin datapaketti hukkuu matkalla, saapuu sen kopio kuitenkin määränpäähen. Näin määränpää vastaanottaa käytännössä yhden saumattoman tietovirran, kuten kuvassa 7 esitetään. Tavallisesti tietoliikenteen siirtämiseen varattaisiin vain lyhin tietoliikennyhteys Puhujalta Kuuntelijalle, mutta IEEE 802.1Qca-standardi mahdollistaa muidenkin kuin lyhyimmän reitin varaamisen siirrettävälle tietoliikenteelle. Useamman verkkoyhteysreitin varaamisessa IEEE 802.1Qca-standardi määrittelee datapaketin kohde- sekä monilähetykselle yksikäsitteiset erilliset reitit, joita pitkin datapaketit kulkevat vastaanottajalle. Tämä lieventää kytkentäprotokollien uudelleenyhtymisestä aiheutuvia häiriöitä. (Nasrallah et al. 2019b)



**Kuva 7.** Datapaketin lähettäminen lähettäjältä vastaanottajalle kahta eri reittiä pitkin (Nasrallah et al. 2019b).

Datapaketin kopioimisesta sekä datapaketin ja niiden kopioiden lähettämisestä vastaanottajalle eri reittejä pitkin vastaa FRER eli standardi IEEE 802.1CB. FRER määrittelee lähetettävälle datapaketille järjestysnumerot, joita käytetään kunkin datapaketin tunnistamiseen. Määränpäässä tai sitä edeltävässä kytkimessä tarkastetaan

saapuneiden datapakettien järjestysnumerot ja verrataan niitä jo saapuneiden datapakettien järjestysnumeroihin. Jos saapuneen datapaketin järjestysnumero on sama, kuin jollain aiemmin vastaanotetulla datapakettilla, tuhotaan kyseinen datapaketti. (Finn 2018; Pahlevan & Obermaisser 2018b; Tan & Park 2018) Datapakettien järjestysnumeroista on hyötyä myös muualla, sillä sen avulla voidaan selvittää, onko kaikki datapaketit vastaanotettu, vai hukkuiko jokin datapaketti matkalla. Jos puolestaan tietoverkossa tapahtuu vikatilanne, voivat datapaketit saapua eri järjestyksessä vastaanottavalle laitteelle, kuin missä ne lähetettiin. Tällöin järjestysnumeroilla voidaan myös määrittää datapakettien oikea järjestys.

Usean eri reitin varaaminen tietoliikenteelle ja datapakettien sekä niiden kopioiden lähettäminen määränpäähän useaa reittiä pitkin ylikuormittaisivat tietoverkkoa, jos nämä operaatiot tehtäisiin jokaiselle tietoliikennetyypille. Tämän vuoksi voidaan valita, että TSN:n redundanssiratkaisua hyödynnetään vain aikakriittisen tietoliikenteen siirtämiseen, ja tavallinen best effort -tietoliikenne siirretään normaalisti lyhyintä tietoliikenneyhteyttä pitkin (Nasrallah et al. 2019b).

Kytkimille saapuvan tietoliikenteen tulee vastata täysin sille tietoverkossa määriteltyjä resurssivaatimuksia, ettei se vie resursseja muilta kytkimille saapuvilta tietoliikenteiltä. Jos näin kävisi, ei jotain muuta tietoliikennettä enää pystyittäisi siirtämään sen vaatimuksien, kuten viivevaatimusten, mukaisesti. Tämän vuoksi TSN suodattaa ja valvoo kytkimille saapuvaa tietoliikennettä. Saapuvan tietoliikenteen suodattamisesta ja valvomisesta vastaa standardi IEEE 802.1Qci, joka suodattaa tietoliikennettä tarkistamalla jatkuvasti kytkimen sisääntuloportilla, vastaako saapuva tietoliikenne sille määriteltyjä vaatimuksia. Jos tietoliikenne ei vastaa määriteltyjä vaatimuksia, kuten saapumisaikaa tai resurssivaatimuksia, se suodatetaan pois. IEEE 802.1Qci-standardi suodattaa pois myös tietoliikenteen, jonka StreamID ei vastaa sallittuja tietoliikenne tunnisteita. Tätä puolestaan voidaan käyttää haitallista tietoliikennettä hyödyntäviä tietoverkkohyökkäyksiä vastaan, joilla koitetaan häiritä sallitun tietoliikenteen siirtämistä. (Nasrallah et al. 2019b).

### 3. TSN:ÄÄ TUKEVAT LAITTEET

IEEE:n TSN-työryhmän lisäksi TSN:n kehittämisessä on mukana muitakin organisaatioita, kuten Avnu Alliance ja Industrial Internet Consortium (IIC). Näiden organisaatioiden kanssa puolestaan työskentelee suuri joukko teollisuuden eri yrityksiä, joihin lukeutuvat mm. National Instruments, Siemens, Rockwell Automation, Cisco, TTTech sekä Intel. Aktiivisen yhteistyönsä puolesta jotkin näistä yrityksistä ovat jo valmistaneet laitteita, jotka tukevat TSN:n ominaisuuksia. Tällaisia laitteita ostettaessa tulee kuitenkin varmistaa, mitä TSN:n ominaisuuksia kyseiset laitteet tukevat, sillä vaikka laitteet mainostavat tukevansa TSN:ää, eivät ne välttämättä hyödynnä kaikkia TSN:n ominaisuuksia.

#### 3.1 CAST, Inc.

CAST, Inc. on digitaalisten IP-ydinten (Intellectual Property core) ja osajärjestelmien toimittaja. Se on keskittynyt kehittämään, myymään ja tukemaan puolijohteisia IP-ratkaisuja. CAST on kehittänyt TSN:ää tukevan konfiguroitavan osajärjestelmän, jonka nimi on TSN\_CTRL. Tämän osajärjestelmän tarkoitus tehdä päätepielaitteiden käyttöönotto TSN:n standardeja tukevassa Ethernet-verkossa helpommaksi. TSN\_CTRL tukee standardeja IEEE 802.1AS, IEEE 802.1Qav sekä IEEE 802.1Qbv. TSN\_CTRL koostuu kolmesta laitteistonipusta (hardware stack), joista yksi vastaa aikasykronoinnista hyödyntäen standardia IEEE 802.1AS ja toinen laitteistonippu vastaa liikenteen hallinnasta standardien IEEE 802.1Qav ja IEEE 802.1Qbv mukaisesti. Näiden lisäksi osajärjestelmään kuuluu matalan viiveen Ethernet Mac laitteistonippu. (CAST, Inc. 2019)

TSN\_CTRL osajärjestelmää voidaan hyödyntää Ethernet-verkossa, jossa vaaditaan laitteiden väliseltä tietoliikenteeltä robustisuutta, matalaa viivettä sekä deterministisyyttä. Tällaisia tietoverkkoja käytetään yleensä erityisesti teollisuudessa. CAST ei sivuillaan ilmoita tämän osajärjestelmän hintaa, joten hintatietojen saamiseksi tulisi ottaa yhteyttä heidän myyntiosastoonsa.

#### 3.2 Cisco

Cisco on yksi maailman johtavia IT- ja verkkoratkaisujen toimittajia. Ciscon tuotteista kaikki Industrial Ethernet (IE) 4000 -tuoteperheeseen kuuluvat tuotteet tukevat TSN:n ominaisuuksia. Nämä IE-4000 -tuotteet ovat teollisuusympäristöön tarkoitettuja

Ethernet-kytkimiä, jotka ovat hyvin skaalautuvia ja kestävät hyvin karuissakin ympäristöissä. IE-4000 -kytkimet toimivat tietoverkon siltoina TSN-datavirroille tietoverkon päätepisteiden välillä. TSN:n ominaisuuksista Ciscon IE-4000-kytkimet tukevat aikasykronointistandardia IEEE 802.1AS sekä tietoliikenteen aikataulutuksen standardia IEEE 802.1Qbv. (Cisco 26.3.2019)

Ciscolla on 12 eri laitemallia IE-4000 -kytkimestä. Suoraan Ciscon sivuilta ei löydy hintoja näille kytkimille, vaan tarkan tiedon löytämistä varten olisi otettava yhteyttä suoraan Ciscoon tai heidän tuotteidensa jälleenmyyjään. Internethaulla voidaan kuitenkin löytää suuntaa antavaa tietoa kytkimien hinnoista. Industrial Networking Solutionsin sivuilla IE-4000 -kytkimien hinnat vaihtelevat 1 865.77 dollarista 5 312.75 dollariin. Itprice.com sivustolta löytyy myös hintoja IE-4000 kytkimille, joiden hinnat vaihtelevat 1794 dollarista 9055 dollariin. Koska nämä hintatiedot ovat vain suuntaa antavia, eivätkä suoraan Ciscolta saatuja, ei niitä sen tarkemmin esitetä tässä työssä.

Kytkimien lisäksi Cisco on kehittänyt osaksi TSN-ratkaisuaan Central network controllerin (CNC), jonka tarkoitus on ohjata tietoverkossa olevia kytkimiä ja konfiguroida kytkimet TSN-toimintaa varten (Cisco 2018). Tämän perusteella CNC vaikuttaa olevan Ciscon itse kehittämä CNCE-hallintajärjestelmä. CNC määrittää reitit tietoverkon laitteille sekä muodostaa aikataulun, jonka mukaan TSN-datapaketit kulkevat tietoverkossa. CNC ei ainakaan vielä ole virallinen Ciscon tuote, vaan demonstrointikäyttöön rakennettu sovellus. Tämän vuoksi CNC:tä ei löydy myytävänä Ciscon sivuilta, eikä Cisco myöskään tarjoa tukea kyseiselle sovellukselle.

### 3.3 Comcores

Comcores on yksi johtavista IP-ydinten toimittajista ja he toimittavat IP-ytimiä Field Programmable Gate Array (FPGA) ja Application Specific Integrated Circuit (ASIC) -mikropiireille sekä sulautetuille järjestelmille. FPGA on digitaalinen mikropiiri, joka voidaan konfiguroida helposti uudelleen, ja ASIC puolestaan on mikropiiri, joka on suunniteltu jotain tiettyä tarkoitusta varten. Comcoresin IP-ytimet tukevat monien eri teollisuusalojen tarpeita ja teknologioita. Comcores on saanut kehitettyä kolme tuotetta tukemaan TSN:n ominaisuuksia. Nämä tuotteet ovat 10/100/1000/2500M Ethernet TSN MAC, 10G/25G Ethernet TSN MAC sekä IEEE 1588v2 PTP.

10/100/1000/2500M Ethernet TSN MAC on MAC-ydin (MAC-core), jota voidaan hyödyntää deterministisen matalan viiveen ja taatun kaistanleveyden puolesta aikakriittisille sovelluksille. Tämä MAC-ydin tukee TSN:n standardeja IEEE 802.1Qbu, IEEE 802.1Qbv ja IEEE 802.1AS. Tuotteesta voidaan myös kytkeä itsenäisesti kytkeä



TSN:n ominaisuudet päälle ja pois päältä. Tuotteen nimestä nähdään, että se tukee 10M-2.5G Ethernet nopeuksia. (10/100/1000/2500M Ethernet TSN MAC)

10G/25G Ethernet TSN MAC on myös MAC-ydin. Se tukee 10G ja 25G Ethernet nopeuksia, mikä mahdollistaa sen käyttämisen suurilla nopeuksilla vaativissa aikakriittisissä sovelluksissa. 10G/25G Ethernet TSN MAC tukee TSN:n standardia IEEE 802.1 Qbu sekä siihen on mahdollista saada lisäosana tuki standardille IEEE 802.1AS. Myös tästä tuotteesta voidaan itsenäisesti kytkeä TSN:n ominaisuudet päälle ja pois päältä. (10G/25G Ethernet TSN MAC 2019)

Viimeisimpänä on IEEE 1588v2 PTP, joka on tarkkaan aikasynkronointiin tarkoitettu IP-ydin. IEEE 1588v2 PTP tukee TSN:n aikasynkronointistandardia IEEE 802.1AS, mikä mahdollistaa sen käytön TSN-sovelluksissa. Tuote on helposti konfiguroitavissa ja se tukee eri Ethernet nopeuksia. (IEEE 1588v2 PTP 2019) Comcores ei sivuillaan ilmoita tuotteiden hintoja, vaan hintatietojen saamiseksi olisi otettava yhteyttä heidän myyntiosastoonsa.

### 3.4 Kontron

Kontron on yksi maailman johtavia sulautettujen ohjelmistoteknologioiden toimittajia. Kontron tarjoaa laitteistoja, väliohjelmistoja sekä palveluita IoT- ja Industry 4.0 -sovelluksille. Näihin liittyen Kontron on kehittänyt myös tuotteita, jotka tukevat TSN:n ominaisuuksia. Kontron ei tosin kerro kaikista TSN:ää tukevista tuotteistaan, mitä TSN:n ominaisuuksia ne tukevat. Kontron ei myöskään kerro sivuillaan tuotteidensa hintoja, vaan hintatiedot tulisi kysyä Kontronin myyntiosastolta.

KBox A-230-LS on teollisuustietokone tietoverkoille, jotka vaativat aikakriittistä tiedonsiirtoa. Se on suunniteltu toimimaan yhtäjaksoisesti, mikä tekee siitä pätevän teollisuustoimintoihin. KBox A-230-LS sisältää viisi TSN-kykyistä 1GB Ethernet porttia, jotka tukevat IEEE 802.1 TSN määrittelyjä. (KBox A-230-LS 2019) Kontron ei kuitenkaan tarkemmin kerro, mitä TSN:n standardeja laite hyödyntää.

PCIE-0400-TSN Network Interface Card on liitäntäsovituskortti, jolla teollisuustietokoneesta voidaan tehdä TSN:n ominaisuuksia tukeva. Liitäntäsovituskortti sisältää integroidun kytkimen, jossa on neljä 10/100/1000 Mbps -tietoliikennenopeuksia tukevaa porttia. Laitteesta mainitaan, että se tukee TSN:n ominaisuuksista ainakin aikasynkronointia, tietoliikenteen aikataulutusta, datapaketin estämistä sekä resurssien varaamista. Myös esimerkiksi tuki TSN:n redundanssistandardille olisi mahdollista saada päivityksen avulla. (PCIE-0400-TSN Network Interface Card 2019)

KBox C-102-2 TSN Starterkit on TSN lisäosa, jolla voidaan helposti tuoda TSN:n ominaisuudet osaksi teollisuustietokoneita. Starterkit tekee myös päätepelilaitteiden lisäämisen TSN-kykyiseen tietoverkkoon helpommaksi. Starterkit sisältää evaluoidun teollisuusautomaatioon tarkoitetun TSN-alustan sekä Intelin i5 ydin pohjaisen KBox C-102-2 kaksikorttipaikkaisen teollisuustietokoneen, jossa toinen korttipaikka on varustettu PCIe-0400-TSN Network Interface Card -liitäntäsovituskortilla. PCIe-0400-TSN Network Interface Card mahdollistaa, että KBox C-102-2 TSN Starterkit tukee TSN:n standardeja IEEE 802.1AS, IEEE 802.1Qbu, IEEE 802.1Qbv sekä IEEE 802.1Qcc. (KBox C-102-2 TSN Starterkit 2019)

### 3.5 National Instruments

National Instruments on yksi maailman johtavista automaattisten testi- ja mittausjärjestelmien toimittajista. National Instruments on kehittänyt hajautetulle Ethernet-pohjaiselle mittausjärjestelmälle neljä laiteryhmää, joiden laitteista osa tukee TSN:ää. Nämä laiteryhvät ovat CompactDAQ Chassis, CompactRIO Controller, Industrial Controller sekä FieldDAQ. Nämä TSN:ää tukevat laitteet hyödyntävät TSN:n IEEE 802.1AS -standardin takaamaa aikasynkronointiominaisuutta, jolla mittausjärjestelmän laitteet synkronoidaan samaan aikaan. Kaikkien laitteiden hinnat on esitetty taulukossa 1.

CompactDAQ Chassis on kannettava modulaarinen asennusalusta, joka ohjaa ajastamista, synkronointia ja tiedonsiirtoa NI C-Series I/O -moduulien ja ulkoisen isännän välillä (CompactDAQ Chassis 2019). Tässä laiteryhmässä on kaksi eri laitemallia, jotka tukevat TSN:n aikasynkronointiominaisuutta. Nämä laitemallit ovat cDAQ-9185 ja cDAQ-9189, joista molemmilla on kaksi hintaa. Ero saman laitemallin hinnoissa johtuu siitä, että kalliimmat laitteet ovat konformisesti päällystettyjä, mikä suojaa laitteiden elektroniikkaa kosteudelta.

CompactRIO Controller on modulaarinen huipputehoinen sulautettu ohjain, jolla on teollisuusstandardisertifikaatit (CompactRIO Controller 2019). TSN:ää tukevia laitteita tästä laiteryhmästä löytyy 19 kappaletta, joista 15 kappaletta on eri laitemalleja. Konformisen päällystämisen lisäksi laitteilla löytyy eroavaisuuksina mm. porttien lukumäärä, ohjelmointimetodi, lämpötilaväli, jolla ohjain toimii sekä keskusmuistin määrä. Laitteet tukevat TSN:n aikasynkronoinnin lisäksi determinististä kommunikointia laitteiden välillä. Laitteiden hinnat vaihtelevat 1226 eurosta 7690 euroon.

National Instrumentsin Industrial Controller on huipputehoinen ohjain, joka tarjoaa suuren prosessointitehon ja liitettävyyden automaattiseen kuvankäsittelyyn ja

tiedonkeruuseen (Industrial Controller 2019). Tässä laiteryhmassä on viisi eri laitetta, jotka tukevat TSN:n aikasykronointiominaisuutta. Näissäkin laitemalleissa on hieman eroja toisiinsa nähden, kuten laitemallin suoritusnopeuden tyyppi. Laitteiden hinnat vaihtelevat 3240 eurosta 9080 euroon.

Viimeisin National Instrumentsin laiteryhmä on FieldDAQ, joka on tiedonkeruuseen kehitetty laite, jolla voidaan mitata jännitteen syöttösignaaleita, lämpötilan syöttöä tai kytkinpohjaisia sensoreita (FieldDAQ 2019). Kaikille kolmelle mittaustypille on oma FieldDAQ-laite, joka tukee TSN:n aikasykronointiominaisuutta.

Taulukko 1. *National Instrumentsin myynnissä olevat TSN:n ominaisuuksia tukevat laitteet ja niiden hinnat (CompactDAQ Chassis 2019; CompactRIO Controller 2019; Industrial Controller 2019; FieldDAQ 2019).*

Laiteryhmä	Laitemalli	Hinta (€)
CompactDAQ Chassis		
	cDAQ-9185	1 210
	cDAQ-9185	1 620
	cDAQ-9189	1 740
	cDAQ-9189	2 150
CompactRIO Controller		
	cRIO-9035	3 590
	cRIO-9039	7 690
	cRIO-9040	2 829
	cRIO-9041	3 111
	cRIO-9042	4 243
	cRIO-9042	5 440
	cRIO-9043	5 187
	cRIO-9043	6 440
	cRIO-9045	3 301
	cRIO-9046	3 772
	cRIO-9047	4 715
	cRIO-9047	5 940
	cRIO-9048	5 658
	cRIO-9048	6 940
	cRIO-9049	7 074
	cRIO-9053	1 226
	cRIO-9054	1 885
	cRIO-9056	1 885
	cRIO-9057	2 829
Industrial Controller		
	IC-3171	3 240
	IC-3172	4 170
	IC-3173	5 090
	IC-3173	5 550
	IC-3173	9 080
FieldDAQ		
	FD-11603	3 210
	FD-11613	2 040
	FD-11614	3 500
	FD-11637	4 370

### 3.6 NetTimeLogic

NetTimeLogic on erikoistunut tuottamaan FPGA-teknologiaa käyttäviä IP-ytimiä, jotka hyödyntävät aikasykronisointi ja redundanssi-protokollia. Nämä IP-ytimet toimivat ratkaisuna reaaliaikaisuutta, aikasykronisointia ja redundanssia vaativille sovelluksille. NetTimeLogic on julkaissut markkinoille yhden TSN:n ominaisuuksia tukevan tuotteen, jonka nimi on TSN Network Node. TSN Network Node on itsenäisesti toimiva IP-ydin. Tämän lisäksi NetTimeLogic on kehittämässä toista TSN:n ominaisuuksia tukevaa laitetta, mutta tätä laitetta ei ole vielä julkaistu markkinoille. TSN Network Node tukee useimpia TSN:n standardeja, mikä mahdollistaa suurimman osan TSN:n ominaisuuksien hyödyntämisestä. Näihin tuettuihin standardeihin lukeutuvat standardit IEEE 802.1AS, IEEE 802.1Qbv, IEEE 802.1Qch, IEEE 802.1Qav, IEEE 802.1Qbu, IEEE 802.1Qcc sekä IEEE 802.1CB. (NetTimeLogic 2019)

Laitetta voidaan käyttää redundanttina päätepelilaitteena, linkkinä redundantin ja ei-redundantin tietoverkon välillä sekä mahdollisesti kytkentäisenä päätepelilaitteena. Kaikki protokollat ja algoritmit on toteutettu laitteistossa, mikä mahdollistaa TSN:n protokollien itsenäisen toimisen. Itse tuotteesta NetTimeLogic ei sivuillaan kerro hintaa, mutta he ovat ilmoittaneet hinnat laitteen kahdesta lisenssistä. Projektin lähdekoodilisenssin hinta on 19 500 dollaria ja kohdepaikan lähdekoodilisenssin hinta on puolestaan 35 100 dollaria.

### 3.7 SoC-e

SoC-e toimittaa Ethernet kommunikointiratkaisuja, jotka perustuvat FPGA-teknologiaan. SoC-e on omistautunut kehittämään IP-ytimiä, jotka toteuttavat uusimpia tietoverkko-, synkronisointi- sekä tietoturvatknologioita. Täten SoC-e on ollut mukana myös TSN:n kehittämisessä ja tarjoakin kaksi tuotetta, jotka tukevat TSN:n ominaisuuksia. Näistä tuotteista toinen on Multiport TSN Switch IP Core ja toinen tuote on Multiport TSN Switch KIT, josta on myynnissä kaksi eri versiota.

Multiport TSN Switch IP Core on IP-ydin, joka toimii monitoimilaiteratkaisuna tuoden TSN:n ominaisuudet asiakkaan järjestelmään. Multiport TSN Switch IP Core tukee standardeja IEEE 802.1AS, IEEE 802.1Qbv, IEEE 802.1Qav, IEEE 802.1Qcc, IEEE 802.1Qci, IEEE 802.1AB, IEEE 802.1w, IEEE 802.1s sekä IEEE 802.1CB. (Multiport TSN Switch IP Core 2019) Kattavan standardilistan puolesta Multiport TSN Switch IP Core pystyy tukemaan suurinta osaa TSN:n ominaisuuksista. Tuotteen hintaa ei valitettavasti ole ilmoitettu SoC:n sivuilla, joten hintatietojen saamiseksi tulisi ottaa yhteyttä itse yritykseen.

Multiport TSN Switch KIT ei itsessään ole mikään kytkin tai IP-ydin, vaan se on enemmänkin työkalukokoonpano, jolla voidaan määrittää sekä testata Multiport TSN Switch IP Coren toimintaa. Toinen Kit pohjautuu Zynq Ultrascale+ MPSoC -järjestelmäpiiriin ja toinen Zynq-7000 SoC -järjestelmäpiiriin. Multiport TSN Switch KITit sisältävät TSN-tietoliikennegeneraattoria sekä TSN-adapteria, jotka hyödyntävät TAS-algoritmia, joten molemmat tuotteet tukevat ainakin standardia IEEE 802.1Qbv. Zynq Ultrascale+ MPSoC -järjestelmäpiiriin pohjautuvan Multiport TSN Switch KIT -version hinta on 2 600 euroa ja Zynq-7000 SoC -järjestelmäpiiriin pohjautuvan version hinta on 2 500 euroa. (Multiport TSN Switch KIT 2019)

### 3.8 TTTech

TTTech on teollisuusyritys, joka tuottaa markkinoita johtavia turvallisuusvalvontalustoja, deterministisen Ethernetin tietoverkkoratkaisuja sekä muita teknologiaratkaisuja, joiden tarkoituksena on parantaa teollisuuselektronikkajärjestelmien turvallisuutta ja luotettavuutta. Yritys pyrkii tekemään uusimpia teknologiaratkaisujen osaksi todellisuutta teollisuuden eri osa-alueilla. Osana reaaliaikaisia tietoverkkoratkaisuja TTTech on mukana TSN:n kehittämisessä ja TSN:n standardeja on hyödynnetty heidän reaaliaikaisissa tietoverkkoratkaisuissaan. TTTechillä on viisi TSN:n ominaisuuksia tukevaa tuotetta heidän tuotekokoelmassaan. TTTech ei ole ilmoittanut tuotteidensa hintoja sivuillaan, joten hintatietojen saamiseksi olisi otettava yhteyttä heidän myyntiosastoonsa.

IP Core Flex on joustava deterministiseen Ethernetiin tarkoitettu IP-ydin erikoisvalmisteiselle mikrosirulle tai ASIC-tuotteille. IP Core Flex tarjoaa laajan valikoiman konfiguroitavia ominaisuuksia sekä varmennusympäristön, jossa voidaan tarkastaa IP:n ominaisuuksien kattavuus sekä laatu. IP Core Flex tukee TSN:n standardeja IEEE 802.1AS, IEEE 802.1Qcc, IEEE 802.1CB, IEEE 802.1Qbv, IEEE 802.1Qbu sekä vuodesta 2019 alkaen standardia IEEE 802.1Qci. Näiden standardien avulla IP Core Flex pystyy takaamaan matalaviiveisen kommunikoinnin aikakriittiselle tietoliikenteelle. (IP Core Flex 2019)

Edge IP Solution on OSI-mallin 2. kerroksen IP-ydin ja sovelluspaketti, jolla voidaan yksinkertaisesti tuoda TSN:n toiminnallisuudet osaksi tietoverkon päätepelilaitteita, kuten teollisuusohjaimia. Edge IP Solution voidaan integroida suoraan laitteen FPGA-mikropiiriin mahdollistamaan TSN-kytkennän sekä TSN-päätepelilaitteen toiminnallisuuden kolmesta viiteen Ethernet-porttiin. Tuote tukee TSN:n standardeja IEEE 802.1AS, IEEE 802.1Qbv, IEEE 802.1Qbu sekä IEEE 802.1Qcc. Edge IP

Solutionia voidaan käyttää yhdessä kahden muun TTEchin TSN:ää tukevan tuotteen, Slate XNS ja <sup>DE</sup>Evaluation Board, kanssa. (Edge IP Solution 2019)

Slate XNS on selainpohjainen ohjelmisto, joka tekee helpommaksi topologioiden mallintamisen, aikataulujen luomisen sekä konfigurointien jakamisen TSN-kykyisille tietoverkoille. Slate XNS pystyy tekemään tietoverkon konfiguroinnin myös ilman verkkoyhteyttä intuitiivisen graafisen käyttöliittymän ansiosta. Aikataulujen määrittämiseen Slate XNS hyödyntää TTEchin ohjelmistoon sisäänrakennettua aikataulutuskonetta. Slate XNS ei itse suoraan tue TSN standardeja, mutta sitä voidaan käyttää laitteiden kanssa, jotka tukevat TSN:n standardeja IEEE 802.1Qbv, IEEE 802.1Qbu, IEEE 802.1Qcp, IEEE 802.1CB, IEEE 802.1Qci sekä IEEE 802.1AS. Ohjelmistoa voidaan käyttää Edge IP Solution -tuotteen konfiguroimiseen. (Slate XNS 2019) Näiden tietojen perusteella Slate XNS vaikuttaisi olevan TTEchin valmistama CNCe-hallintajärjestelmä.

<sup>DE</sup>Evaluation Board on neljäporttinen liitäntäsovituskortti, jolla voidaan integroida ja määrittää TSN:n toiminnallisuudet järjestelmään. <sup>DE</sup>Evaluation Board on tarkoitettu käytettäväksi yhdessä Edge IP Solution -tuotteen kanssa, jonka toiminta voidaan määrittää <sup>DE</sup>Evaluation Board -tuotetta käyttäen. Yhdistettynä Edge IP Solution -tuotteeseen <sup>DE</sup>Evaluation Board tukee TSN:n standardeja IEEE 802.1AS, IEEE 802.1Qbv sekä IEEE 802.1Qbu. (<sup>DE</sup>Evaluation Board 2019)

Viimeisimpänä TTEchin TSN:ää tukevana tuotteena on MFN 100, joka on karuihin teollisuusympäristöihin tarkoitettu teollisuustietokone. Tuotteen keskeisimpiä etuja ovat resurssien virtualisointi, datan liitettävyyys, avoin toimivuus yhdessä muiden hankkijoiden teknologiaratkaisujen kanssa sekä keskitetty hallinta mm. ohjelmistopäivitysten toimittamisessa. Tuotteeseen on integroitu TSN:n toiminnallisuus determinististä Ethernet-tietoliikennettä varten, mutta tuotteesta ei kerrota, mitä TSN:n standardeja se hyödyntää.

### 3.9 Xilinx

Xilinx on FPGA-tekniikan sekä ohjelmoitavien SoC-järjestelmien kehittäjä. Xilinx kehittää innovaatioita laajasti teollisuus- ja teknologia-alueille, minkä puolesta se on uusien teknologioiden kehittämisessä mukana. Xilinxillä itseltään löytyy kolme eri tuotetta, jotka tukevat TSN:n ominaisuuksia. Nämä tuotteet ovat 10G/25G Ethernet Subsystem, 100M/1G TSN Subsystem ja 10G/25G Ethernet TSN Subsystem. Näiden tuotteiden lisäksi Xilinx mainostaa sivuillaan muutaman yhteistyökumppaniensa, kuten SoC-e:n ja Comcoresin, kehittämiä TSN:ää tukevia ratkaisuja.

Xilinxin tuotteista 10G/25G Ethernet Subsystem ja 10G/25G Ethernet TSN Subsystem eivät juurikaan eroa TSN:n ominaisuuksiltaan, sillä molempien tuotteiden TSN -ratkaisuun kuuluu tuki TSN -standardille IEEE 802.1Qbu ja sitä tukevalle IEEE 802.3br -standardille, jotka mahdollistavat datapaketin hetkellisen keskeyttämisen ja pikaliikenteen sirottelen IEEE 802.1CM Time-Sensitive Networking for Fronthaul -standardin profiileille. Tämä standardi määrittelee profiilit tietoverkoille, joilla voidaan kuljettaa aikakriittistä fronthaul-tietoliikennettä (IEEE Std 802.1CM-2018 2018). Ero näiden tuotteiden välillä on, että 10G/25G Ethernet Subsystem tarjoaa tämän TSN:n ominaisuuden vain 10G Ethernet MAC/PCS:lle, kun 10G/25G Ethernet TSN Subsystem tarjoaa sen myös 25G Ethernet MAC/PCS:lle.

100M/1G TSN Subsystemillä on paljon kattavampi tuki TSN:n ominaisuuksille, minkä ansiosta se pystyy takaamaan ennustettavan ja pienen viiveen sekä kaistanleveyden aikakriittisille sovelluksille. 100M/1G TSN Subsystem tukee suurta osaa TSN:n standardeista, kuten standardeja IEEE 802.1ASrev, IEEE 802.1Qbv, IEEE 802.1Qci, IEEE 802.1CB ja IEEE 802.1Qcc (Xilinx 2019). Tämän vuoksi 100M/1G TSN Subsystem vaikuttaa olevan hyvä valinta teollisuus- tai autosovelluksille, jotka haluavat hyödyntää TSN:ää.

Xilinxin sivuilla ei valitettavasti näille tuotteille ilmoiteta hintoja ja ostaakseen Xilinxin tuotteita tulisi olla yhteydessä paikalliseen Xilinxin myyntiosaston edustajaan. Xilinxin tuote-ehdoissa on myös määritetty, että tuotteen ostajan tulee olla luvanvarainen Ethernet -asiakas.

## 4. KOKEELLINEN TOTEUTUS

Time-Sensitive Networking kokeellinen toteutus suoritettiin Tampereen yliopiston Hervannan kampuksella. Kokeellisen toteutuksen tarkoituksena oli demonstroida TSN:n toimintaa konfiguroimalla kahteen Ciscon IE-4000 -kytkimeen TSN:n toiminnallisuus Ciscon ohjeiden (Cisco 2018) mukaan ja testata TSN:n ominaisuuksia, kuten aikasykronointia ja tietoliikenteen aikataulutusta. Työssä myös käytettiin virtuaalikoneella Ciscolta saatua Deterministic Ethernet – Central Network Controller (DE-CNC) -sovellusta, josta käytetään myös nimeä CNC, sekä kahta Raspberry Pi -laitetta tietoverkon päätepisteinä. Toisen näistä Raspberry Pi -laitteista oli tarkoitus toimia Puhujana ja toisen Kuuntelijana.

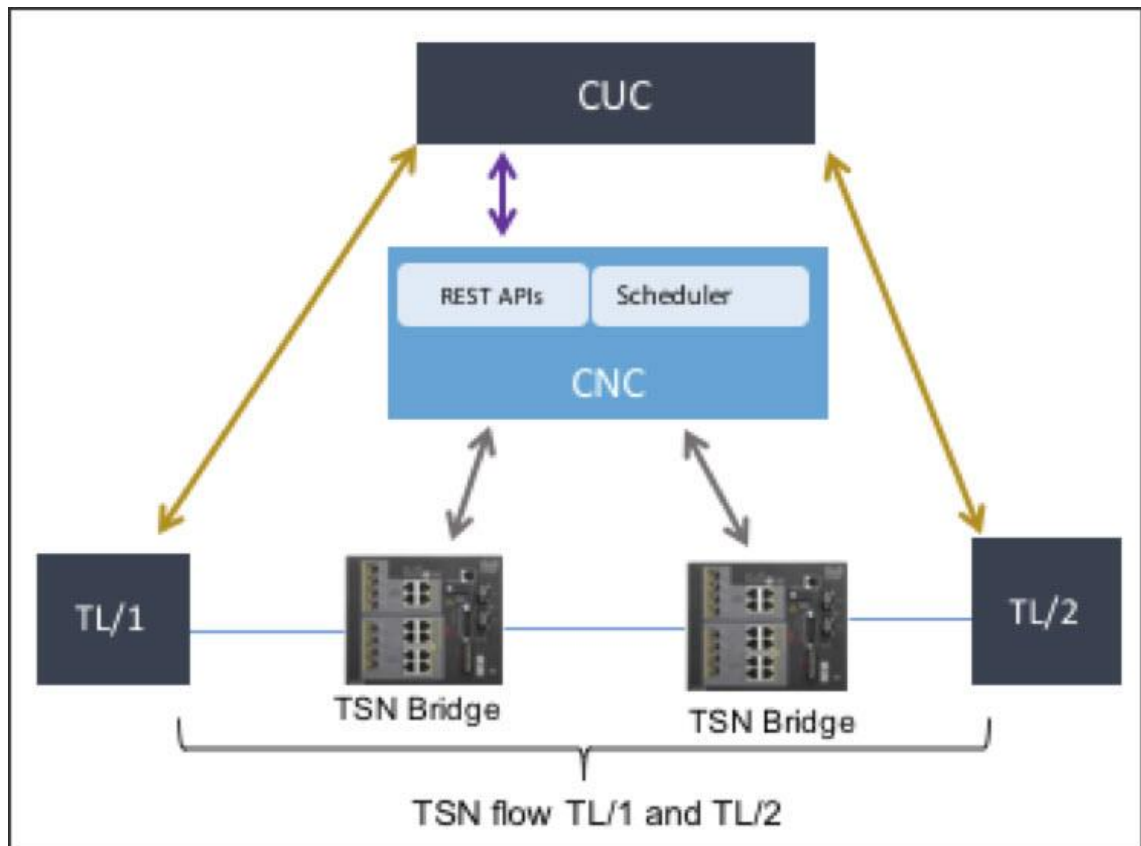
### 4.1 Alkuvalmistelut

Ensimmäiseksi työssä täytyi konfiguroida IE-4000 -kytkimet tukemaan TSN:n toiminnallisuuksia. Koska tuki TSN:lle on tuotu IE-4000 -kytkimiin vasta IOS-versiossa 15.2(5)E2, täytyi molempien kytkimien käyttöjärjestelmä päivittää oikeaan versioon. Käyttöjärjestelmäversio ladattiin Ciscon sivuilta SD-muistikortille, joka sen jälkeen yhdistettiin kytkimeen. Jotta kytkin saatiin päivittämään käyttöjärjestelmänsä SD-kortilta, täytyi kytkimeen tehdä päivityskäske. Kytkin yhdistettiin tietokoneen USB-porttiin ja kytkimeen luotiin yhteys PuTTY:llä, joka on SSH- ja Telnet-asiakasohjelma. PuTTY:llä kytkintä pystyttiin käyttämään komentorivin kautta. Kytkimelle annettiin päivityskomento, jonka jälkeen kytkin asensi itseensä uuden päivityksen SD-kortilta ja käynnisti itsensä uudelleen. Käyttöjärjestelmäpäivityksen jälkeen kytkimiin piti vielä aktivoida TSN lisenssi, jonka aktivointi tapahtui komentoriviltä komennolla ” license right-to-use activate tsn”.

IE-4000 -kytkimen TSN:n konfigurointi tapahtui suoraviivaisesti Ciscon ohjeiden (Cisco 2018) mukaan, eikä konfigurointi vaatinut montaa komentoa. Kytkimiin piti tallentaa salasana, jota CNC käyttää yhdistyäkseen kytkimiin. Seuraavaksi kytkimet konfiguroitiin tukemaan IEEE 802.1AS -standardia. Tämän jälkeen kytkimille konfiguroitiin staattiset IP-osoitteet 10.1.1.11 ja 10.1.1.12 aliverkkoon 255.255.255.0. Kytkimille valittiin kyseiset IP-osoitteet, jotta ne olisivat samassa IP-verkossa työssä käytettävän CNC:n kanssa, jolle oli valmiiksi konfiguroitu kyseiseen aliverkkoon IP-osoite 10.1.1.1. Myös päätepisteinä käytettäviin Raspberry Pi -laitteisiin konfiguroitiin saman IP-verkon staattiset IP-osoitteet 10.1.1.13 ja 10.1.1.14. Raspberry Pi -laitteisiin piti myös asentaa Link Layer Discovery Protocol (LLDP) -protokolla, jota CNC käyttää löytääkseen kaikki



tietoverkon topologiassa olevat laitteet. IE-4000 -kytkimissä tämä LLDP-protokolla oli jo valmiiksi asennettuna. IP-osoitteiden konfiguroinnin jälkeen CNC voitiin yhdistää kytkimiin aiemmin annetulla salasanalla.



**Kuva 8.** Ciscon esimerkkitopologia TSN-tietoverkon laitteille (Cisco 2018).

Ennen kuin CNC:tä voitiin käyttää, täytyi vielä viimeistellä tietoverkon topologia valmiiksi. Tietoverkon topologia tehtiin vastaamaan parhaimman mukaan kuvan 8 esittämää esimerkkitopologiaa, vaikkakin topologiaan ei sisällytetty keskitettyä käyttäjäkonfiguraattoria, koska Cisco ei tällaista tarjoa, vaan se tulisi joko itse valmistaa tai hankkia se päätepelilaitteiden toimittajalta, mikä ei tässä demonstraatiossa ollut mahdollista. Täten tietoverkon topologia vastasi enemmänkin osittain keskitettyä konfigurointiarkkitehtuuria. Tietoverkon topologian rakentaminen tapahtui yhdistämällä Raspberry Pi -laitteet kytkimiin ja kytkimet toisiinsa sekä yhdistämällä toinen kytkin kiinni tietokoneeseen, jolla ohjattiin virtuaalikonetta. Kun kytkimet yhdistettiin toisiinsa, tapahtui niiden välillä pääisäntälaitteen valinta BMCA-algoritmin kuvaamalla tavalla, sillä IE-4000 -kytkimet pystyvät myös itse toimimaan pääisäntälaitteena tietoverkolle. Pääisäntälaitteen valinta varmistettiin tekemällä kytkimille kyselyt kytkimien kellojen tiedoista ja kytkimien isäntälaitteiden tiedoista.

```

sn_switch2#show ptp parent
PTP PARENT PROPERTIES
Parent Clock:
Parent Clock Identity: 0x4:EB:40:FF:FE:FF:AB:80
Parent Port Number: 5
Observed Parent Offset (log variance): 16640
Observed Parent Clock Phase Change Rate: N/A

Grandmaster Clock:
Grandmaster Clock Identity: 0x4:EB:40:FF:FE:FF:AB:80
Grandmaster Clock Quality:
  Class: 248
  Accuracy: Unknown
  Offset (log variance): 16640
  Priority1: 246
  Priority2: 248

Clock Identity Path Trace:
Clock Identity 0: 0x4:EB:40:FF:FE:FF:AB:80

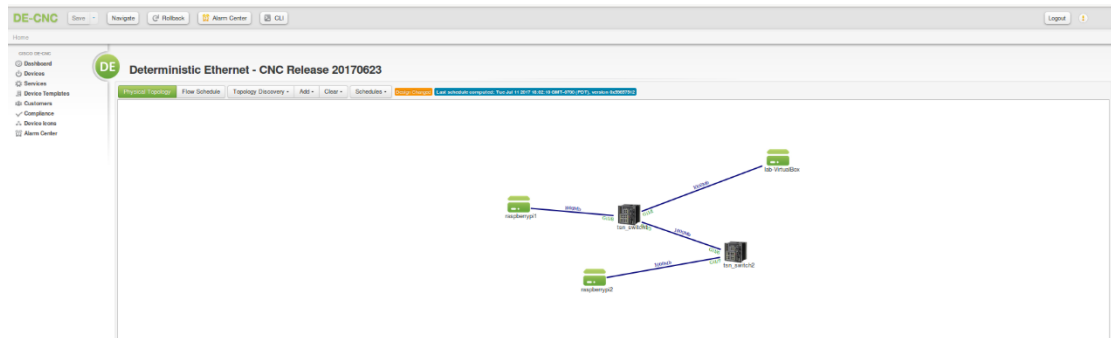
```

**Kuva 9.** IE-4000 -kytkimen isäntälaitetekysely.

Kuvassa 9 on esitetty toiselle IE-4000 -kytkimelle tehty isäntälaitetekysely. Tästä kyselystä nähdään kyseisen kytkimen isäntälaitteen ja pääisäntälaitteen kellojen identiteetit, jotka ovat samat. Toiselle kytkimelle suoritetusta kellon tietojen kyselystä puolestaan selvisi, että kuvassa 9 esitetty pääisäntälaitteen kellon identiteetti on sama kuin tämän toisen kytkimen kellon identiteetti.

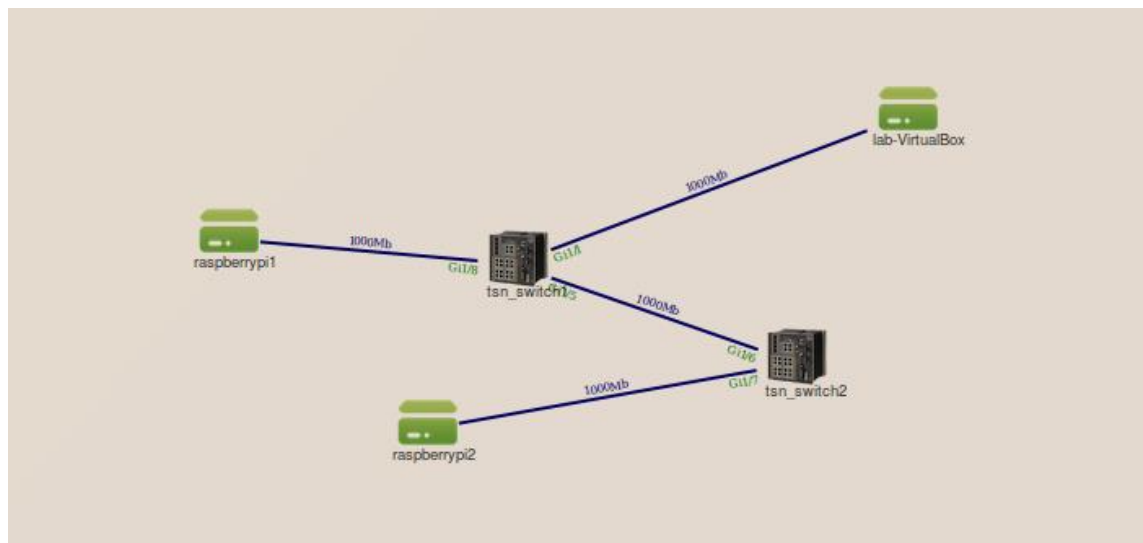
## 4.2 DE-CNC:llä työskentely

Ciscolta saatiin työtä varten demonstrointikäyttöön rakennettu sovellus nimeltä DE-CNC, josta käytetään myös nimeä CNC. Sovellus vaatisi normaalisti Linux Ubuntu-käyttöjärjestelmän, mutta siitä oli myös mahdollista asentaa Windows-käyttöjärjestelmälle Oracle-virtuaalikoneen kautta käytettävä versio, joka myös sisälsi valmiiksi konfiguroidun Ubuntu-käyttöjärjestelmän virtuaalikonetta varten. Itse sovellusta virtuaalikoneessa käytettiin Mozilla Firefox -selaimen kautta menemällä verkkosivulle <http://localhost:8080/> ja kirjautumalla sovellukseen sisään. Sisäänkirjautumisen jälkeen verkkosivu aukaisi kuvan 10 mukaisen näkymän DE-CNC sovelluksesta.



**Kuva 10. DE-CNC -sovellus.**

DE-CNC:llä on tarkoitus määrittää datavirtojen aikataulut, joiden mukaan kytkimet tietävät, milloin niiden kuuluu lähettää datapaketteja eteenpäin. Aikataulujen lisäksi määritetään, mikä laite toimii Puhujana ja mitkä laitteet toimivat Kuuntelijoina. Tätä varten DE-CNC:n tulee ensin saada selville tietoverkon topologia, joka aiemmin rakennettiin. Kuvasta 11 nähdään DE-CNC:n selville saama tietoverkon topologia, joka vastaa luotua tietoverkon topologiaa. DE-CNC näyttää topologiassa myös itse virtuaalikoneen, jonka kautta sovellusta käytetään.



**Kuva 11. DE-CNC:n löytämä tietoverkon topologia.**

Topologian löytämisen jälkeen DE-CNC:llä aloitettiin määrittämään ensimmäistä aikataulua datavirrälle Raspberry Pi -laitteiden välillä. Tämän aikataulun laskemisen aikana sovellus kuitenkin ilmoitti, että sovelluksen yhtä lisenssiä ei pystytty vahvistamaan. Tutkimuksen jälkeen selvisi, että sovelluksen kyseinen lisenssi oli vanhentunut, minkä vuoksi sovellusta ei tällä hetkellä pystytty käyttämään aikataulujen määrittämiseen. Asiasta otettiin yhteyttä Ciscoon, mutta tämän työn kirjoittamisen aikana Ciscolta ei ole saatu ratkaisua ongelmaan.

### 4.3 Huomioita ja kokeellisen toteutuksen jatkaminen

Demonstraatiota ei pystytty toteuttamaan loppuun yllä mainitun lisenssiongelman vuoksi, joten tämän työn kokeellinen toteutus keskeytyi datavirtojen aikataulujen määrittämiseen. Jos aikataulut olisi saatu määritettyä, olisi ne seuraavaksi jaettu kytkimille. Aikataulun perusteella kytkimet tietävät, milloin niiden tulisi vastaanottaa kunkin datavirran datapaketteja ja milloin kyseiset datapaketit täytyy lähettää kytkimeltä eteenpäin. Kun kytkimet ovat vastaanottaneet aikataulun, voi Puhuja aloittaa tietoliikenteen lähettämisen Kuuntelijalle. Aikataulujen jakamisen jälkeen olisi myös otettu selvää, miten eri tietoliikenteitä Puhujan ja Kuuntelijan välillä olisi simuloitu tässä demonstraatiossa.

IE-4000 -kytkimet ovat kiinnostuneita vain niiden sisään tulevista ja ulosmenevistä datavirroista. Yhdistäytymällä kytkimeen voidaan tarkastella kytkimen tietoja näistä sisään tulevista ja ulosmenevistä datavirroista. Sisään tulevasta datavirrasta kytkin kerää tilastoja odottamattomista, oikeaan aikaan saapuneista, aikaisin saapuneista ja myöhässä saapuneista datapaketeista. Kytkin voi näyttää näitä tilastoja edellisestä saapuneesta datavirrasta sekä yhteenlaskettuja historiatilastoja kaikista aiemmista saapuneista datavirroista. Uloslähtevistä datavirroista kytkin kerää useita eri tilastoja, kuten aikakriittisten ja best effort -datapaketien lukumääriä sekä lukumääriä erinäisistä datapaketien virhetiloista, jotka johtavat datapaketin poispudottamiseen. Kytkimeltä saatavilla tilastotiedoilla voitaisiin osoittaa, että kytkin siirtää aikakriittistä tietoliikennettä oikea-aikaisesti sekä best effort -tietoliikennettä aikakriittisen tietoliikenteen kanssa. Ciscon (2018) ohje selventää tarkemmin, mitä kaikkia tilastotietoja kytkin kerää datavirroista ja miten näitä tilastotietoja voidaan hyödyntää.

Vaikka tämän työn kokeellisessa toteutuksessa ei pystytty viimeistelemään demonstraatiota, saatiin kuitenkin osoitettua, että IE-4000 -kytkimiin pystytään konfiguroimaan TSN:n toiminnallisuus. Tämän lisäksi työssä osoitettiin, että TSN:n aikasynkronointiominaisuus toimii tämän jälkeen TSN:ää tukevissa IE-4000 -kytkimissä. Jos kokeellinen toteutus tehtäisiin uudelleen, olisi suositeltavaa hyödyntää National Instrumentsin TSN:ää tukevia laitteita tietoverkossa päätepisteinä, sillä niitä on hyödynnetty useassa muussa TSN:n kokeellisessa toteutuksessa IE-4000 -kytkimien kanssa. Tällöin jo olemassa olevien kokeellisten toteutuksien dokumentaatioita voitaisiin hyödyntää.

## 5. YHTEENVETO

Tämän kandidaatintyön tarkoituksena oli tutustua IEEE:n määrittämään 802 Ethernet -alastandardijoukkoon TSN, ja miten TSN mahdollistaa aikakriittisen Ethernet-verkon luomisen. Tämän kattavan standardijoukkonsa ansiosta TSN pystyy takaamaan reaaliaikaisen, luotettavan ja deterministisen tiedonsiirron samassa Ethernet-verkossa kulkeville aikakriittisille tietoliikenteille. TSN:n standardien pääratkaisu näiden ominaisuuksien takaamiseen on synkronisoida kaikki tietoverkossa olevat laitteet samaan aikaan, jakaa tietoliikenteet niiden prioriteetteja vastaaviin jonoihin sekä aikatauluttaa tietoliikenteiden datapakettien lähettäminen niin, että vain tiettytyyppisiä datapaketteja siirretään vain tiettyjen aikaikkunoiden aikana.

Vaikka TSN on melko uusi tekniikka, on sen standardeja tukevia laitteita jo olemassa. Nämä laitteet eivät kuitenkaan toteuta kaikkia TSN:n ominaisuuksia, vaan suurin osa laitteista hyödyntää vain TSN:n aikasynkronointiominaisuutta. TSN:ää tukevien laitteiden ja laitevalmistajien määrä tulee todennäköisesti kasvamaan tulevaisuudessa yhä useamman yrityksen halutessa päästä hyödyntämään TSN:n ominaisuuksia tietoverkoissaan. Jo nyt TSN:ää tukevien laitteiden laitevalmistajien joukossa on hyvin tunnettuja yrityksiä, kuten Cisco sekä National Instruments.

Tässä työssä onnistuttiin myös osittain testaamaan TSN:n toimintaa, vaikkakin se ei sujunut täysin ongelmitta, eikä demonstraatiota saatu suoritettua täysin niin kuin oli tarkoitus. Kokeellisessa toteutuksessa onnistuttiin aikasynkronoimaan tietoverkon kytkimet keskenään ja näin todistamaan, että TSN:n aikasynkronointiominaisuus toimii Ciscon IE-4000 -kytkimissä. Tarkoitus oli myös testata datapakettien lähettämisen aikatauluttamista sekä resurssien varaamista aikakriittiselle tietoliikenteelle. Tätä ei kuitenkaan kyetty suorittamaan DE-CNC:ssä ilmenneen lisenssiongelman vuoksi, joka johti siihen, että kokeellista toteutusta ei kyetty jatkamaan pidemmällä.

Tätä työtä voidaan mahdollisesti hyödyntää TSN:n jatkotutkimuksissa. Tällöin DE-CNC:stä on mahdollisesti saatavilla uudempi lisenssi, jonka avulla TSN:n kokeellista toteutusta olisi mahdollista jatkaa pidemmällä sekä tehdä testausta kattavammin. Suositeltavaa olisi myös hyödyntää, mikäli se on mahdollista, National Instrumentsin CompactRIO Controller -laitteita kokeellisessa toteutuksessa tietoverkon päätepestelaitteina Raspberry Pi -laitteiden sijasta, sillä tämän työn taustatutkimuksessa löydetyissä demonstraatioissa oli hyödynnetty kyseisiä laitteita.

# LÄHTEET

Álvarez, I., Proenza, J. & Barranco, M. (2018). Mixing Time and Spatial Redundancy Over Time Sensitive Networking. 2018 48th Annual IEEE/IFIP International Conference on Dependable Systems and Networks Workshops (DSN-W), pp. 63-64.

Bello, L.L. (2014). Novel trends in automotive networks: A perspective on Ethernet and the IEEE Audio Video Bridging. Proceedings of the 2014 IEEE Emerging Technology and Factory Automation (ETFA), pp. 1-8.

CAST, Inc. TSN\_CTRL TSN Ethernet Subsystem. verkkosivu. Saatavissa (viitattu 11.6.2019): [http://www.cast-inc.com/ip-cores/interfaces/automotive/tsn\\_ctrl/index.html](http://www.cast-inc.com/ip-cores/interfaces/automotive/tsn_ctrl/index.html).

Cisco. (2018) Installing Cisco IOS Software TSN Support on a Cisco IE 4000 Switch. Opaskirja. Päivitetty 11.9.2018. Saatavissa (8.6.2019): [https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/switches/lan/cisco\\_ie4000/tsn/b\\_tsn\\_ios\\_support.html](https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/switches/lan/cisco_ie4000/tsn/b_tsn_ios_support.html)

Cisco. Time-Sensitive Networking: A Technical Introduction. Artikkel. Saatavissa (viitattu 26.3.2019): <https://www.cisco.com/c/dam/en/us/solutions/collateral/industry-solutions/white-paper-c11-738950.pdf>

Comcores. IEEE 1588v2 PTP. verkkosivu. Saatavissa (viitattu 16.6.2019): <http://www.comcores.com/IEEE1588HW.html>.

Comcores. 10/100/1000/2500 Ethernet TSN MAC. verkkosivu. Saatavissa (viitattu 16.6.2019): <http://www.comcores.com/EthMAC3.html>.

Comcores. 10G/25G Ethernet TSN MAC. verkkosivu. Saatavissa (viitattu 16.6.2019): <http://www.comcores.com/EthMAC1.html>.

Finn, N. (2018). Introduction to Time-Sensitive Networking, IEEE Communications Standards Magazine, Vol. 2(2), pp. 22-28.

Garner, G.M. & Ryu, H. (2011). Synchronization of audio/video bridging networks using IEEE 802.1AS, IEEE Communications Magazine, Vol. 49(2), pp. 140-147.

Geyer, F., Heidinger, E., Schneele, S. & von Bodisco, A. (2013). Evaluation of Audio/Video Bridging forwarding method in an avionics switched ethernet context. 2013 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC), pp. 711.

IEEE Std 802.1CM-2018. (2018). IEEE Standard for Local and metropolitan area networks - Time-Sensitive Networking for Fronthaul, IEEE. pp. 1-62.

Imtiaz, J., Jasperneite, J. & Han, L. (2009). A performance study of Ethernet Audio Video Bridging (AVB) for Industrial real-time communication. 2009 IEEE Conference on Emerging Technologies & Factory Automation, pp. 1-8.

Imtiaz, J., Jasperneite, J. & Schriegel, S. (2011). A proposal to integrate process data communication to IEEE 802.1 Audio Video Bridging (AVB). ETFA2011, pp. 1-8.

Johas Teener, M.D., Fredette, A.N., Boiger, C., Klein, P., Gunther, C., Olsen, D. & Stanton, K. (2013). Heterogeneous Networks for Audio and Video: Using IEEE 802.1 Audio Video Bridging. Proceedings of the IEEE, Vol. 101(11), pp. 2339-2354.

Kehrer, S., Kleineberg, O. & Heffernan, D. (2014). A comparison of fault-tolerance concepts for IEEE 802.1 Time Sensitive Networks (TSN). Proceedings of the 2014 IEEE Emerging Technology and Factory Automation (ETFA), pp. 1-8.

Kim, L. S., Park, C., Park, S. & Lee, J. (2015). Design of single stream reservation class for efficient data transmission in IEEE 802.1 AVB networks. 2015 IEEE 12th Malaysia International Conference on Communications (MICC), pp. 135-138.

Kleineberg, O., Fröhlich, P. & Heffernan, D. (2011). Fault-tolerant Ethernet networks with Audio and Video Bridging. ETFA2011, pp. 1-8.

Kontron. KBox A-230-LS. verkkosivu. Saatavissa (viitattu 16.6.2019): <https://www.kontron.com/industries/automation/kbox-a-230-ls.html>.

Kontron. PCIE-0400-TSN Network Interface Card. verkkosivu. Saatavissa (viitattu 17.6.2019): <https://www.kontron.com/products/iot/iot-industry-4.0/ethernet-tsn-switching/network-interfaces-tsn/pcie-0400-tsn-network-interface-card.html>.

Kontron. KBox C-102-2 TSN Starterkit. verkkosivu. Saatavissa (viitattu 19.6.2019): <https://www.kontron.com/products/iot/iot-industry-4.0/ethernet-tsn-switching/network-interfaces-tsn/kbox-c-102-2-tsn-starterkit.html>.

Lee, H., Lee, J., Park, C. & Park, S. (2016). Time-aware preemption to enhance the performance of Audio/Video Bridging (AVB) in IEEE 802.1 TSN. 2016 First IEEE International Conference on Computer Communication and the Internet (ICCCI), pp. 80-84.

Lim, H., Herrscher, D. & Chaari, F. (2012a). Performance comparison of IEEE 802.1Q and IEEE 802.1 AVB in an Ethernet-based in-vehicle network. 2012 8th International Conference on Computing Technology and Information Management (NCM and ICNIT), pp. 1-6.

Lim, H., Herrscher, D., Walzl, M.J. & Chaari, F. (2012b). Performance analysis of the IEEE 802.1 ethernet audio/video bridging standard. Proceedings of the 5th International ICST Conference on Simulation Tools and Techniques, pp. 27-36.

Messenger, J.L. (2018). Time-Sensitive Networking: An Introduction. IEEE Communications Standards Magazine, Vol. 2(2), pp. 29-33.

Nasrallah, A., Thyagaturu, A.S., Alharbi, Z., Wang, C., Shao, X., Reisslein, M. & Elbakoury, H. (2019a). Performance Comparison of IEEE 802.1 TSN Time Aware Shaper (TAS) and Asynchronous Traffic Shaper (ATS), IEEE Access, Vol. 7 pp. 44165-44181.

Nasrallah, A., Thyagaturu, A.S., Alharbi, Z., Wang, C., Shao, X., Reisslein, M. & Elbakoury, H. (2019b). Ultra-Low Latency (ULL) Networks: The IEEE TSN and IETF DetNet Standards and Related 5G ULL Research, IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 21(1), pp. 88-145.

National Instruments. CompactDAQ Chassis. verkkosivu. Saatavissa (viitattu: 18.3.2019): <http://www.ni.com/fi-fi/shop/select/compactdaq-chassis>.

National Instruments. CompactRIO Controller. verkkosivu. Saatavissa (viitattu 19.3.2019): <http://www.ni.com/fi-fi/shop/select/compactrio-controller>.

National Instruments. Industrial Controller. verkkosivu. Saatavissa (viitattu 19.3.2019): <http://www.ni.com/fi-fi/shop/select/industrial-controller>.

National Instruments. FieldDAQ. verkkosivu. Saatavissa (viitattu 19.3.2019): <http://www.ni.com/fi-fi/shop/select/fielddaq-category#facet:&productBeginIndex:0&orderBy:&pageView:grid&pageSize:&>.

NetTimeLogic. TSN Network Node. verkkosivu. Saatavissa (viitattu 12.6.2019): <https://www.nettimelogic.com/tsn-network-node.php>.

Pahlevan, M. & Obermaisser, R. (2018a). Evaluation of Time-Triggered Traffic in Time-Sensitive Networks Using the OPNET Simulation Framework. 2018 26th Euromicro International Conference on Parallel, Distributed and Network-based Processing (PDP), pp. 283-287.

Pahlevan, M. & Obermaisser, R. (2018b). Redundancy Management for Safety-Critical Applications with Time Sensitive Networking. 2018 28th International Telecommunication Networks and Applications Conference (ITNAC), pp. 1-7.

Park, C., Lee, J., Tan, T. & Park, S. (2016). Simulation of Scheduled Traffic for the IEEE 802.1 Time Sensitive Networking. Springer Singapore, Singapore, pp. 75-83.

Pop, P., Raagaard, M.L., Gutierrez, M. & Steiner, W. (2018). Enabling Fog Computing for Industrial Automation Through Time-Sensitive Networking (TSN), IEEE Communications Standards Magazine, Vol. 2(2), pp. 55-61.

Samii, S. & Zinner, H. (2018). Level 5 by Layer 2: Time-Sensitive Networking for Autonomous Vehicles, IEEE Communications Standards Magazine, Vol. 2(2), pp. 62-68.

Serna Oliver, R., Craciunas, S. S. & Steiner, W. (2018). IEEE 802.1Qbv Gate Control List Synthesis Using Array Theory Encoding. 2018 IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium (RTAS), pp. 13-24.

SoC-e. Multiport TSN Switch IP Core. verkkosivu. Saatavissa (viitattu 13.6.2019): <https://soc-e.com/mtsn-multiport-tsn-switch-ip-core/>.

SoC-e. Multiport TSN Switch KIT. verkkosivu. Saatavissa (viitattu 13.6.2019): <https://soc-e.com/mtsn-kit-a-comprehensive-multiport-tsn-setup/>.

Tan, T. & Park, S. (2018) Redundancy path implementation for schedule traffic. 2018 International Workshop on Advanced Image Technology (IWAIT), pp. 1-3.

Thangamuthu, S., Concer, N., Cuijpers, P. J. L. & Lukkien, J. J. (2015). Analysis of Ethernet-switch traffic shapers for in-vehicle networking applications. 2015 Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE), pp. 55-60.

Thiele, D. & Ernst, R. (2016). Formal worst-case performance analysis of time-sensitive Ethernet with frame preemption. 2016 IEEE 21st International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), pp. 1-9.

TTTech. IP Core Flex. verkkosivu Saatavissa (viitattu 23.6.2019): <https://www.tttech.com/products/industrial/deterministic-networking/fpga-asic/ip-core-flex/>.

TTTech. Edge IP Solution. verkkosivu. Saatavissa (viitattu 25.6.2019): <https://www.tttech.com/products/industrial/deterministic-networking/fpga-asic/ip-solution-edge/>.

TTTech. Slate XNS. verkkosivu. Saatavissa (viitattu 26.6.2019): <https://www.tttech.com/products/industrial/deterministic-networking/network-configuration/slate-xns/>.



TTTech. <sup>DE</sup>Evaluation Board. verkkosivu. Saatavissa (viitattu 26.6.2019):  
<https://www.ttech.com/products/industrial/deterministic-networking/hardware/de-evaluation-board/>.

TTTech. MFN 100. verkkosivu. Saatavissa (viitattu 26.6.2019):  
<https://www.ttech.com/products/industrial/industrial-iot/nerve/mfn-100/>.

Xilinx. 100M/1G TSN Subsystem. verkkosivu. Saatavissa (viitattu 31.3.2019):  
<https://www.xilinx.com/products/intellectual-property/1gtsn.html>.

Zhao, L., He, F., Li, E. & Lu, J. (2018a). Comparison of Time Sensitive Networking (TSN) and TTEthernet. 2018 IEEE/AIAA 37th Digital Avionics Systems Conference (DASC), pp. 1-7.

Zhao, L., Pop, P. & Craciunas, S.S. (2018b). Worst-Case Latency Analysis for IEEE 802.1Qbv Time Sensitive Networks Using Network Calculus, IEEE Access, Vol. 6 pp. 41803-41815.