

Sami Saloheimo

**TAVARAJUNAN JARRUJEN TOIMINNAN
VARMISTUS AUTOMAATTISESTI LAN-
GATTOMALLA MITTAUSJÄRJESTEL-
MÄLLÄ**

Diplomityö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tammikuu 2021

TIIVISTELMÄ

Sami Saloheimo: Tavarajunan jarrujen toiminnan varmistus automaattisesti langattomalla mittausjärjestelmällä

Diplomityö

Tampereen yliopisto

Automaatiotekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Tammikuu 2021

Tavaraliikenteen automatisointi mahdollistaa suuria hyötyjä raideliikenteen operaattoreille. Automaattinen liikenne mahdollistaa nopeammat kääntöajat, raidekapasiteetin kasvattamisen ja liikenteen luotettavuuden parantamisen. Jotta tavaraliikenne voidaan automatisoida, on tavarajunan liikuttamiseen liittyvät prosessit automatisoitava. Yksi automatisoitavista prosesseista on tavarajunan liikkeellelähtötarkastus, ja siihen liittyvä jarrujen toiminnan varmistuksen aliprosessi, joka suoritetaan normaalisti visuaalisesti kiertämällä tarkastettava juna kuljettajan toimesta.

Tämän diplomityön tavoite on luoda pohja tavarajunan liikkeellelähtötarkastuksen automaattisoinnille tutkimalla mahdollisuuksia automatisoida tavarajunan jarrujen täydellinen-, ja osittainen jarrujen tarkastus. Tämän tehtävän suorittaa normaalisti tavarajunan kuljettaja, ja sen toteuttamiseen voi mennä 20–60 minuuttia riippuen vaunujen määrästä. Jarrujen tarkastuksen tavoite on todeta, että jarrut toimivat oikein, vaunujen jarrutoimilaitteiden asettimet ovat oikeissa asennoissa ja että jarrujärjestelmässä ei ole turvallisuutta vaarantavia vikoja.

Työssä tutustuttiin tavarajunan jarrujärjestelmään ja sen toimintaan, langattomiin mittausjärjestelmiin sekä tavaraliikenteen haasteisiin. Teorian pohjalta suunniteltiin mittausarkkitehtuuri jarrujen normaalin ja epänormaalin toiminnan havaitsemiseksi, jonka lisäksi mittausjärjestelmään soveltuvat langattomat tiedonsiirtomenetelmät pisteytettiin valitun kriteeristön mukaan. Syntyneelle langattomalle mittausjärjestelmälle suunniteltiin tämän jälkeen kokeet, jotka toteutettiin Pieksämäen varikolla viiden raakapuuvaunun kokoisella koerungolla. Mittausjärjestelmää arvioitiin tämän jälkeen laadullisesti tarkastelemalla kokeiden mittaustuloksia.

Työssä havaittiin, että tavaravaunun jarrujärjestelmän normaali ja epänormaali toiminta on havaittavissa riittävällä tarkkuudella, mikäli tavaravaunusta mitataan jarrujohdon paine, jarrusylinterin paine, jarrusylinterin liike, jarrulajiasettimen asento, ruuvijarrun tila, sekä akseleiden pyörintä. Lisäksi havaittiin se, että solmuverkot mahdollistavat koko junan kattavan tiedonsiirtoverkon muodostamisen, ja että kaikki kokeessa käytetyt mittauslaitteet saivat yhteyden veturissa sijaitsevaan tukiasemaan. Onnistuneista kokeista huolimatta, tarkemman analyysin jälkeen, järjestelmän tiedonsiirrossa havaittiin haittaavan suuria viiveitä. Suurimmat viiveet syntyivät kuormitustilanteissa ja olivat jopa 19 minuutin suuruisia tehden koejärjestelmästä liiketoiminnallisesti kannattamattoman.

Koska viiveet johtuivat kuormitustilanteista, luotiin järjestelmälle työn päätteeksi teoreettinen viitekehys, jossa havaitut ongelmat ratkaistiin tutkimuksen tulosten pohjalta. Teoreettisessa viitekehysessä järjestelmän kuormitus on minimoitu hyödyntämällä kevyttä reunalaskentaa ja optimoimalla järjestelmän tietoliikennettä. Tuloksena on teoreettinen viitekehys, joka mahdollistaisi jarrujen toiminnan varmistamisen 40 vaunun kokoiselle junalle noin viidessä minuutissa.

Tutkimuksen pohjalta voidaan luotettavasti todeta, että tavarajunan jarrujentarkastus on mahdollista toteuttaa hyödyntämällä langatonta mittausjärjestelmää. Mittausjärjestelmä on silti optimoitava äärimmäisyyksiinsä, sillä olemassa olevat matalan energian tiedonsiirtoprotokollat eivät pysty siirtämään mittavia määriä tietopaketteja mittauslaitteelta pilveen ilman, että viiveet kasvavat liian suuriksi. Lisäksi jarrujen toiminnan varmistamiseen suunniteltu langaton mittausjärjestelmä tarvitsee tueksi tavarajunan ulkoisen mittausjärjestelmän, jolla voidaan havaita liikennöinti-turvallisuuden kannalta muut olennaiset asiat, kuten alustan murtumat, lastin ulottuman ja jarruanturoiden kuluneisuuden.

Avainsanat: Tavaraliikenne, Tavarajuna, Tavaravaunu, Jarrujärjestelmä, Liikkeellelähtötarkastus, Jarrujen tarkastus, Automaatisaatio, Langaton mittausjärjestelmä, Mittauslaite, Solmuverkot, IoT

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ABSTRACT

Sami Saloheimo: Automation of brake checks for freight trains with wireless sensor networks
Master of Science Thesis
Tampere University
Master's Degree Programme in Automation Engineering
January 2021

Automation of rail freight has potential to create great benefits for rail operators. Automated traffic enables faster turnaround times, increased track capacity and improved traffic reliability. To automate freight rail traffic, all the processes that are necessary for the movement of a train must also be automated. One such process is the railway safety inspection that takes part before a train can leave a station. Within the rail safety inspection process there is a sub process that is called a brake test. During a brake test the driver verifies that the brakes are working correctly by walking around the train and by performing a visual check on each wagon and its brakes.

The aim of this paper is to create a basis for the automation of the freight train railway safety inspection process by exploring the possibilities of automating the complete and partial brake tests for a freight train. This task is normally performed by the train driver and it takes around 20–60 minutes to complete depending on the size of the train. The purpose of a brake check is to verify that the brakes are working properly, that the levers on the wagons are in correct position and that there are no significant faults that would risk the safety of the train operation.

The paper starts out with an introduction to theory considering freight wagons' brake system, wireless sensor networks and challenges of freight rail. Based on the theory, a measurement architecture for detection of normal and abnormal behavior of brakes was designed. In addition to that, different wireless communication methods for the system were scored based on their suitability for the proposed architecture, introduced challenges and the actual business case. To test the proposed measuring system, varying experiments were then designed. These experiments were carried out at Pieksämäki depot for a test unit consisting of 5 raw timber wagons. The measurement system was then evaluated qualitatively by looking at the measurement data gathered during the tests.

From the data it was possible to determine with certainty that it is indeed possible to detect normal and abnormal operation of freight wagons' brake components within the brake system by measuring brake pipe pressure, brake cylinder pressure, brake cylinder movement, changeover device position, hand brake position, and axle rotation. In addition, it was determined that a mesh network provides a reliable data transmission network that covers a whole freight train. During the experiments all the measuring devices used were able to connect to the gateway located in the locomotive. Despite very successful experiments, after a more detailed analysis, long delays were found within the system. The largest delays occurred in stress situations and longest delays were up to 19 minutes making the test system commercially unviable.

As the delays were due to stress situations, a theoretical framework was created for the system, in which the identified problems were handled based on the results of the study. In the framework, the system load is minimized by utilizing light edge computing and optimizing the system communication. The result is a theoretical framework that could make it possible to verify the operation of the brakes on a train of 40 carriages in about five minutes.

Nevertheless, it is possible to reliably state that it is possible to automate the brake inspection of a freight train by utilizing a wireless measuring system. The measurement system still needs to be optimized, as existing low-energy communication protocols are unable to transfer large amounts of data packets from the measurement device to the cloud without the delays growing too long. It should also be stated that a wireless measuring system designed to ensure the operation of the brakes needs to be supported by an external measuring system, which can detect other issues relevant to railway safety, such as chassis cracks, load reach and brake pad wear.

Keywords: Rail freight, Freight train, Freight wagon, Brake system, Railway safety inspection, Brake checks, automatization, wireless sensor network, mesh network, IoT

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

ALKUSANAT

Olen kuvitellut vuosien saatossa opiskelua eräänlaisena akateemisena vuoren huiputuksena. Kun fuksina aloitamme opiskelun, lähdemme professoreiden ja tutoreiden mukaan vaeltamaan kohti vuorta, joka huiputettaisiin valmistumalla diplomi-insinööriksi. Matkalla on mahdollista oppia kiipeilystä, tutustua ihmisiin ja pitää hauskaa. Koko matka vuoren juurelle on pitkä, mutta koska jokaisella on sama tavoite, niin eteneminen tapahtuu kuin luonnostaan. Osa on motivoituneempia kuin toiset ja he painavat vuoren rinteelle pikavauhtia, toiset taas haluavat nauttia matkasta ja ottavat aikansa vuoren juurelle saapumiseen. Uusien ryhmien kelkkaan on kuitenkin aina helppo hypätä mukaan, ja suurin osa opiskelijoista löytääkin lopulta tiensä vuoren juurelle. Tässä vaiheessa professorit nostavat kädet ilmaan ja toivottavat onnea matkaan. Opiskelijat löytävät vuoren juurelta sponsorin ja aloittavat kiipeämisen.

Diplomityön tekoa voi hyvinkin kuvailla vuoren huiputuksena. Alussa nouseminen tuntuu helpolta, ja ensimmäinen huippu siintää tavoitettavissa. Jokainen kuitenkin huomaa pian, että ensimmäisen huipun takana siintää taas uusi huippu, ja käy selväksi, että todellinen määränpää on vielä kaukana silmien kantamattomissa. Osa oppilaista on valmistautunut urakkaan paremmin kuin toiset, ja he paahtavat pysähtymättä kohti tavoitettaan vauhdilla. Osa oppilaista taas on lähtenyt huiputukseen takki auki ja kuluttavat sponsorin tarjoamat matkaeväät jo alkumatkassa. Kun sponsorin eväät loppuvat, vaikenee huiputus huomattavasti. On tarve jatkaa kiipeämistä, mutta samalla on tarve varmistaa, että ruoka ja juoma ei lopu kesken. Yhtäkkiä kiipeämisen vauhti hidastuu huomattavasti, ja huippu alkaa näyttämään yhä kaukaisemmalta. Monet opiskelijat luovuttavatkin tässä vaiheessa ja päättävät palata kiipeämiseen myöhemmin omakustanteisesti. Osa taas päättää, että vuori huiputetaan, vaikka henki menisi. Itse kuulun tähän viimeiseen ryhmään. Kun seison nyt viimein täällä vuoren harjalla janoisena ja puolikuolleena, tulee tahtomattakin pohdittua, olisinko näin jälkikäteen tehnyt jotain toisin, jos se olisi mahdollista. Lyhyen harkinnan jälkeen päätän, että vastaus on ei. Vaikka yliopistossa opiskelu on ollut itselle pitkä ja kivinen taival, on se muovannut minusta juuri sen ihmisen, joka nyt olen. Olen löytänyt vahvuuteni, heikkouteni ja tarkoitukseni tässä maailmassa. Vaikka siihen meni vietävästi aikaa, on se sen arvoista.

Kiitos kaikille läheisilleni, jotka ovat tukeneet minua tällä matkalla. Erityiskiitokset Tampereen Teknillisen Yliopiston muistolle, diplomityön ohjaajalle ja tarkastajille yliopistonlehtori Timo Lehtoselle ja tutkijatohtori Jarkko Pakkaselle, työni sponsorille VR Fleetcarelle, työkavereilleni Hannu Heikkilälle, Sami Kalevirralle, Mikko Alangolle, ja Mihail Lipiäiselle. Kiitos äidilleni Tuula Saloheimolle, sekä sisarilleni Tuuli, Hannu ja Juha Saloheimolle. Kiitos myös Seppo Aallolle, Anne Haapalalle, Jallukokkaajille, Fokualle, PuTille ja Blebeijikerholle tuesta ja kannustuksesta työn aikana. Ilman teitä olisin ollut yksi luovuttajista – nyt olen yksi valmistuneista. Kiitokset sydämeni pohjasta.

Lue tai nauti.

Mäntyharjulla, 12.1.2021

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
1.1 Tutkimuksen tavoitteet ja rajaus	2
1.2 Aiempaa tutkimusta	2
1.3 Työn vaiheet	3
2. TAVARAVAUNUN JARRUJÄRJESTELMÄ JA SEN TOIMINTA	5
2.1 Jarrutoimilaitteet	5
2.1.1 Toimiventtiili	6
2.1.2 Apuilmasäiliö	6
2.1.3 Jarrusylinteri	6
2.1.4 Jarrulajiasetin	7
2.1.5 Ruuvijarru	7
2.1.6 Vivusto, kuormavaihde ja vivuston säätäjä	8
2.1.7 Jarrukenkä ja jarruantura	9
2.2 Jarrujärjestelmän toiminta ja ohjaus	9
2.2.1 Toimiventtiin ja apuilmasäiliön toiminta	10
2.2.2 Vivuston ja jarrusylinterin männän liike	13
2.3 Tavarajunien jarrujärjestelmän toiminnan varmistaminen	13
2.3.1 Jarrujärjestelmän tiiveystesti	14
2.3.2 Jarrujen koettelu ja tarkastus	14
2.3.3 Osittainen jarrujen tarkastus	15
3. LANGATON MITTAUSJÄRJESTELMÄ	16
3.1 Langattoman mittauslaitteen komponentit	16
3.2 Langattoman mittauslaitteen ohjelmisto	17
3.3 Langattoman mittausjärjestelmän protokollapino	18
3.3.1 Fyysinen kerros	19
3.3.2 Siirtoyhteyseros ja MAC-protokolla	20
3.3.3 Verkkokerros ja topologiat	21
3.4 Tiedonsiirtoprotokollan suorituskyky	22
3.4.1 Pulssisuhde	22
3.4.2 Kaistanleveys	22
3.4.3 Läpisyöttö	22
3.4.4 Tiedonsiirron viive ja verkon syntymiseen kuluva aika	23
4. TAVARALIIKENTEEEN HAASTEET MITTAUSJÄRJESTELMÄLLE	25
4.1 Tavaravaunujen pitkä elinkaari ja vanha teknologia	25
4.2 Tavaravaunun operatiivinen toimintaympäristö	25
4.2.1 Syrjäiset toiminta-alueet ja sähköistämättömät rata-alueet	26
4.2.2 Tavaravaunujen operointi ja runkokuljetusjärjestelmä	26
4.3 Haastavat ympäristöolosuhteet	27
5. MITTAUSJÄRJESTELMÄN SUUNNITTELU	29
5.1 Mittausperiaatteiden valinta	29
5.1.1 Jarruanturoiden kiinnittyminen ja irtoaminen	29
5.1.2 Ruuvijarrun asento	31

5.1.3	Jarruanturoiden kuluminen.....	32
5.1.4	Jarrulajiasettimen asento	33
5.1.5	Kuormajarruasettimen asento	33
5.1.6	Roikkuvien letkukytkimien ripustus ja kytkinhanan tarkistus	34
5.1.7	Vuotojen havaitseminen.....	35
5.1.8	Viimeisen vaunun jarruttomuus	35
5.1.9	Vikaantuneiden jarrujen sulkeminen.....	36
5.2	Tiedonsiirtomenetelmän valinta.....	36
5.2.1	Pisteytykseen valitut tiedonsiirtoprotokollat	37
5.2.2	Pisteytyksen periaatteet.....	37
5.2.3	Pisteytyksen tulokset	39
5.3	Mittausjärjestelmän arkkitehtuuri	40
6	MITTAUSJÄRJESTELMÄN PROTOTYYPPI JA KOEJÄRJESTELYT	42
6.1	Prototyypin esittely ja arkkitehtuuri	42
6.2	Mittalaitteiston esittely	44
6.2.1	Paineen mittauslaite.....	44
6.2.2	Kulman mittauslaite.....	45
6.2.3	Kiihtyvyyden mittauslaite.....	46
6.3	Toimilaitteiden anturointi	46
6.3.1	Jarrujohdon anturointi	46
6.3.2	Jarrusylinterin paine	47
6.3.3	Sylinterin männän liike	48
6.3.4	Jarrulajiasettimen asento	49
6.3.5	Ruuvijarrun asento.....	50
6.3.6	Pyörän liike ja kiihtyvyys	51
6.4	Toteutettavien kokeiden esittely	52
6.4.1	Paikallaan tehtävät kokeet	52
6.4.2	Liikkeessä tehtävät kokeet.....	53
6.4.3	Vikatilanteiden simulointi.....	53
7	MITTAUSKOKEIDEN TULOKSET	55
7.1	Toimilaittekohtaiset mittaustulokset.....	55
7.1.1	Jarrujohdon paine	55
7.1.2	Jarrusylinterin paine.....	56
7.1.3	Sylinterin männän liike	56
7.1.4	Jarrulajiasettimen ja ruuvijarrun asennot.....	57
7.1.5	Pyörän pyörintä ja kiihtyvyydet.....	59
7.2	Paikallaan tehdyt kokeet	61
7.2.1	Paine-ilmajärjestelmän mittaus ja asteittainen jarrutus	62
7.2.2	Jarrujärjestelmän toiminta, jarrulaji M.....	62
7.2.3	Jarrujärjestelmän toiminta, jarrulaji T.....	63
7.2.4	Jarrusylinterin männän liike, kun vaunu on taarassa	64
7.2.5	Jarrusylinterin männän liike, kun vaunu on kuormassa	65
7.3	Liikkeessä tehdyt kokeet	66
7.3.1	Jarrujärjestelmän paineet koerungon liikkuessa	66
7.3.2	Jarrusylinterin männän työntymä koerungon liikkuessa.....	67
7.3.3	Liikkeen aiheuttamat häiriöt ruuvijarrun ja jarrulajiasettimen kulma- anturissa.....	68
7.3.4	Pyörän pyörinnän mittaus	69
7.4	Vikatilanteiden simulointi ja mittaus.....	70

7.4.1 Ruuvijarrun päälle jääminen.....	71
7.4.2 Vaunun paineettomuus	72
7.4.3 Vivuston säätäjän vikatila.....	74
7.4.4 Pyörän lukkiutuminen.....	75
8.TULOSTEN ANALYSOINTI	77
8.1 Mittausjärjestelmän toiminnallisuus	77
8.1.1 Täydellinen jarrujen tarkastus	77
8.1.2 Osittainen jarrujen tarkastus	79
8.2 Mittausjärjestelmän tiedonsiirtomenetelmän arviointi.....	79
8.2.1 Mittausjärjestelmän topologia ja mukautuminen muuttuvaan junakokoonpanoon	79
8.2.2 Yhteyden katkeamiset ja datan purkautuminen	81
8.2.3 Viiveet mittausjärjestelmän tiedonsiirrossa.....	82
8.2.4 Verkon muodostamiseen kuluva aika.....	83
9.KEHYS OPTIMOIDUN JARRUJEN TOIMINNAN VARMISTAMISEN MITTAUSJÄRJESTELMÄLLE.....	86
9.1 Langattoman mittausjärjestelmän optimointi.....	86
10. YHTEENVETO	89
10.1 Työn tulokset.....	89
10.2 Tutkimuksen akateeminen merkitys	89
LÄHTEET.....	92
LIITEET.....	96

KUVALUETTELO

<i>Kuva 1. Jarrujärjestelmän periaatekuva KE-GP (Knorr-Bremse 2002, s. 28)</i>	<i>5</i>
<i>Kuva 2. Jarruventtiili KE1c (Valtionrautatiet 1971, s. 36).....</i>	<i>6</i>
<i>Kuva 3. Jarrusylinterin periaatekuva (Knorr-Bremse 2002, s. 56).....</i>	<i>7</i>
<i>Kuva 4. Ruuvijarrun toiminta (Wabtec Corporation 2003, s. 17).....</i>	<i>8</i>
<i>Kuva 5. Jarruvivuston periaatekuva (Valtionrautatiet 1971, s. 30).....</i>	<i>9</i>
<i>Kuva 6. Toimiventtiili levossa (Anon 2020).....</i>	<i>10</i>
<i>Kuva 7. Toimiventtiili jarrutuksen aikaan (Anon 2020).....</i>	<i>11</i>
<i>Kuva 8. Toimiventtiili jarrujen irrotuksen aikaan (Anon 2020).....</i>	<i>12</i>
<i>Kuva 9. Kuormavaihteen vaikutus jarruvivuston liikkeeseen (Mukaiilu, Knorr-Bremse 2002, s. 48).....</i>	<i>13</i>
<i>Kuva 10. Langattoman mittauslaitteen komponentit (Sohdraby et al. 2007, s. 18)</i>	<i>16</i>
<i>Kuva 11. Geneerinen malli ohjelmistosta (Sohdraby et al. 2007, s. 79).....</i>	<i>18</i>
<i>Kuva 12. Radiotaajuudet ja elektromagneettinen spektri (Karl and Willig 2005, s. 86)</i>	<i>20</i>
<i>Kuva 13. Tähti- ja solmutopologiat.....</i>	<i>21</i>
<i>Kuva 14. Kuunteluajan ja nukkuma-ajan muodostama jakso (Sohdraby et al. 2007, s. 168).....</i>	<i>22</i>
<i>Kuva 15. Solmun ja tukiaseman välinen viive</i>	<i>23</i>
<i>Kuva 16. Viive solmuverkossa</i>	<i>24</i>
<i>Kuva 17. Valtion rataverkko (Väylävirasto 2018).....</i>	<i>26</i>
<i>Kuva 18. Tavaravaunujen runkokuljetusjärjestelmä (Mukaiilu, Väylävirasto 2018).....</i>	<i>27</i>
<i>Kuva 19. Voimansiirto jarruanturalle (Mukaiilu, Valtionrautatiet 1971, s.30)</i>	<i>30</i>
<i>Kuva 20. Vaihtoehdot ruuvijarrun asennon mittaukselle (Mukaiilu, Wabtec Corporation 2003, s. 17).....</i>	<i>32</i>
<i>Kuva 21. Vaihtoehtoisia sijainteja kuormavaihteen toiminnan mittaukselle (Mukaiilu, Valtionrautatiet 1971, s.30)</i>	<i>34</i>
<i>Kuva 22. Tiedonsiirron toteutus tavarajunassa (Bernal 2019b)</i>	<i>36</i>
<i>Kuva 23. Vaunun mitattavat toimilaitteet, anturit ja niiden asennuspaikat vaunussa</i>	<i>40</i>
<i>Kuva 24. SPS-vaunu (VR Group 2010).....</i>	<i>42</i>
<i>Kuva 25. Kulma-anturin pyörintä akselit xyz -koordinaatistossa (mukaiillen, Haltian 2020).....</i>	<i>45</i>
<i>Kuva 26. Jarrujohdon mittaus toteutettiin letkuliittimestä</i>	<i>47</i>
<i>Kuva 27. Jarrusylinterin mittaus toimiventtiilin lohkoista.....</i>	<i>48</i>
<i>Kuva 28. Jarrusylinterin männän mittaus liike-kulma adapterin avulla.....</i>	<i>49</i>
<i>Kuva 29. Jarrulajiasettimen asennon mittaus anturin kulmasta y-akselin suhteen.....</i>	<i>50</i>
<i>Kuva 30. Ruuvijarrun mittaus.....</i>	<i>51</i>
<i>Kuva 31. Akselin pyörinnän mittaus kulmalla anturin x-akselin suhteen</i>	<i>51</i>
<i>Kuva 32. Jarrujohdon paine</i>	<i>55</i>
<i>Kuva 33. Jarrusylinterin paine (täysi- ja puolitehoinen jarrutus).....</i>	<i>56</i>
<i>Kuva 34. Jarrusylinterin männän työntymä (täysijarrutus)</i>	<i>57</i>
<i>Kuva 35. Jarrulajiasettimen tila</i>	<i>58</i>
<i>Kuva 36. Ruuvijarrun tilan muutos</i>	<i>59</i>
<i>Kuva 37. Akselin pyörintä</i>	<i>60</i>
<i>Kuva 38. Kiihtyvyydet pyörän pyörintää mittaavassa anturissa</i>	<i>61</i>
<i>Kuva 39. Porrastettu jarrutus ja irrotus.....</i>	<i>62</i>
<i>Kuva 40. Jarrujärjestelmän toiminta jarrulaji M.....</i>	<i>63</i>
<i>Kuva 41. Jarrujärjestelmän toiminta jarrulaji T.....</i>	<i>64</i>
<i>Kuva 42. Jarrusylinterin männän liike vaunun ollessa taarassa.....</i>	<i>65</i>
<i>Kuva 43. Jarrusylinterin männän liike vaunun ollessa kuormassa</i>	<i>66</i>
<i>Kuva 44. Jarrujärjestelmän paineiden mittaus liikkeessä</i>	<i>67</i>
<i>Kuva 45. Jarrusylinterien mäntien mittaus liikkeessä</i>	<i>68</i>

<i>Kuva 46. Ruuvijarrujen ja jarrulajiasettimien mittaus liikkeessä</i>	69
<i>Kuva 47. Akselin pyörintä liikkeessä</i>	70
<i>Kuva 48. Ruuvijarru päällä</i>	71
<i>Kuva 49. Vaunun jarrusylinterin paineettomuus ja hätäjarrutus</i>	73
<i>Kuva 50. Vivustonsäätäjän vikatila ja korjaantuminen</i>	74
<i>Kuva 51. Liikkeellelähtö lukkiutuneella pyörällä</i>	75
<i>Kuva 52. Topologia, kun koerunko oli paikallaan</i>	80
<i>Kuva 53. Topologia, liikkeellä tehtävien kokeiden aikaan</i>	80
<i>Kuva 54. Mittaustapahtumien määrä ja pilveen rekisteröityneiden tapahtumien määrä per minuutti</i>	81
<i>Kuva 55. Viive mittauksen ja pilveen saapumisen osalta</i>	83

TAULUKKOLUETTELO

<i>Taulukko 1. Automaation aste (Mukaiitu, Pylvänäinen et al. 2020, s.27)</i>	1
<i>Taulukko 2. Tyypillisiä tuntoelimiä ja niiden ominaisuudet (Mukaiitu, Suhonen et al. 2012, s. 21)</i>	17
<i>Taulukko 3. OSI malli, mukailtu (International Organization for Standardization 1994)</i>	19
<i>Taulukko 4. Viestin kehyksen formaatti (Sohdraby et al. 2007, s. 184)</i>	23
<i>Taulukko 5. Mittapisteen sijainnin merkitys häiriön havaitsemisen kannalta</i>	31
<i>Taulukko 6. Pisteytettävät tiedonsiirtoprotokollat (Mahmoud & Mohamad 2016, Sohdraby et al. s.105, 2007, Le Trung 2014, Wirepas 2020)</i>	37
<i>Taulukko 7. Tiedonsiirtomenetelmien pisteytys (1 = huono, 3= hyvä)</i>	39
<i>Taulukko 8. Jarrujärjestelmän toimilaitteiden toiminnan mittausperiaatteet</i>	41
<i>Taulukko 9. Mittauslaitteiden alkuperäinen arkkitehtuuri kokeiden aikana</i>	43
<i>Taulukko 10. Mittauslaitteiden muutettu arkkitehtuuri kokeiden aikana (liikkeessä)</i>	44
<i>Taulukko 11. Paikallaan toteutetut kokeet</i>	52
<i>Taulukko 12. Liikkeellä tehtävät kokeet</i>	53
<i>Taulukko 13. Vikatilannesimulaatiot, tavoitteet ja vaikuttavat anturit</i>	54
<i>Taulukko 14. Täydellisen jarrujen tarkastuksen tarkistuslista</i>	78
<i>Taulukko 15. Osittaisen jarrujen tarkastuksen tarkistuslista</i>	79
<i>Taulukko 16. Verkon muodostumiseen kulunut aika</i>	84
<i>Taulukko 17. GoA-taulukko tavaraliikenteelle (Mukaiitu, Pylvänäinen et al. 2020)</i>	91

LYHENTEET JA MERKINNÄT

ATO	Automatic Train Operations
ATP	Automatic Train Protection
Ble	Bluetooth Low Energy
FRA	Federal Railway Administration
GOA	Grade of Automation
HTN	Hybrid Technology Networking
IEC	International Electrotechnical Commission
IoT	Internet of Things
ISO	International Organization for Standardization
LLC	Logical Link Control
MAC	Medium Access Control
MEMS	Micro Electro Mechanical Systems
OSI	Open System Interconnection
SPS-vaunu	Raakapuuvaunun lyhenne VR Transpointin nimeämiskäytännön mukaan
UHF	Ultra High Frequency
WSN	Wireless Sensor Networks
<i>B</i>	Kaistanleveys
<i>f</i>	Taajuus
<i>T</i>	<i>Viive tai aika</i>

1. JOHDANTO

Rautatiealalla on tapahtumassa murros. Perinteiset toimintamallit eivät ole riittäviä, kun kilpailu marginaaleiltaan kapeassa logistiikan liiketoimintasegmentissä kiristyy. Kumipyöräliikenne on tehostanut logistiikkaa harppauksin digitaalisten ratkaisujen avulla, kun taas kiskoliikenne käyttää edelleen samaa 50 vuotta vanhaa teknologiaa samoilla vanhoilla toimintamalleilla. Tähän epäkohtaan on kuitenkin viimein herätty, ja rautatiealalla on lähdetty panostamaan toiminnan digitalisointiin. Tämä näkyy Euroopan laajuisten automaattista rataoperointia (Automatic Train Operations, ATO) tavoittelevien rautatiekehityshankkeiden kasvaneesta määrästä (Shift2Rail.org 2020), josta esimerkkinä Suomessakin käynnistyvä Digirata -hanke (Pylvänäinen et al. 2020).

Suurin potentiaali rautatieliikenteen tehostamiselle nähdään kaluston ja liikenteenohjauksen digitalisoinnissa ja automaatioasteen nostossa, sillä ne mahdollistavat raiteiden kapasiteetin kasvattamisen, elinkaarikulujen pienentämisen ja luotettavuuden ja turvallisuuden parantamisen (Shift2Rail.org 2020). Junaliikenteen automatisointia voidaan kuvata sen automaation asteella (Grade of Automation, GoA), jotka on kuvattu Taulukossa 1.

Taulukko 1. Automaation aste (Mukaiilu, Pylvänäinen et al. 2020, s.27)

Automaation aste	Junan operointi	Liikkeelle lähtö	Pysähtymien	Ovien hallinta	Operointi häiriön sattuessa
GoA 1	ATP (kulunvalvonta) ja kuljettaja	Kuljettaja	Kuljettaja	Kuljettaja	Kuljettaja
GoA 2	ATP ja ATO kuljettajan kanssa	Automaatio	Automaatio	Kuljettaja	Kuljettaja
GoA 3	Ilman kuljettajaa	Automaatio	Automaatio	Junahenkilöstö	Junahenkilöstö
GoA 4	Ilman kuljettajaa	Automaatio	Automaatio	Automaatio	Automaatio

Ensimmäinen automaatioaste 0 ei sisällä minkäänlaista automatiikkaa. Automaatioasteet 1 ja 2 kuvaavat avustettua liikkumista ja tasot 3 ja 4 esittävät automatisoitua liikkumista. Suomen rataverkolla on käytössä automaatioaste 1 (Pylvänäinen et al. 2020), mutta maailmalta löytyy useita esimerkkejä kaikista automaatioasteista rataliikenteessä (International Association of Public Transport 2019).

Kuten Taulukosta 1 voidaan havaita, sisältää se matkustajaliikenteelle ominaisia määritelmiä, kuten "ovien hallinta" ja "junahenkilöstö". Tämä johtuu siitä, että taulukko on toteutettu matkustajaliikennettä varten, eikä sinällään kata tavaraliikenteen automatisoinnin osa-alueita. Vastaavan

automatisoinnin asteen taulukon puuttuminen tavaraliikenteelle taas kertoo siitä, että tavaraliikenteen digitalisointi ja automatisointi ovat vielä alkutekijöissään Euroopan laajuisista hankkeista huolimatta.

Yksi taulukosta puuttuva ja rataturvallisuuden kannalta kriittinen osatekijä on liikkuvan kaluston turvallisuuden varmistaminen ennen liikkeellelähtöä. Matkustajaliikenteessä tämä toteutetaan muutamia minuutteja kestäville automaattisilla tarkastuksilla, jotka käyttävät väylään liitettyjä mittauslaitteita. Tavaraliikenteessä sen sijaan junan turvallisuuden varmistamisen vaatimat tarkistukset tehdään manuaalisesti, joiden tekeminen kestää 20–60 minuuttia riippuen junan koosta ja havaituista häiriöistä (Liite 2). Manuaalinen liikkeellelähtötarkastus johtaa suuriin työvoimakuluihin, tavarajunan hitaaseen kääntöaikaan ja inhimillisten virheiden aiheuttamiin omaisuusvahinkoihin (Väylä 2019, s. 42).

Tavarajunan liikkeellelähtötarkastus koostuu kolmesta osakokonaisuudesta: jarrujen toiminnan varmistaminen, vaunun alustan tarkastus ja vaunun lastauksen turvallisuuden tarkastus (VR Group 2019). Koska tarkastukset voidaan lukea kentällä suoritettaviksi kunnossapitotoimenpiteiksi, on sen automatisointi ja erilaisten komponenttien toiminnan etäseuranta kiinnostavaa kiskokalustoa kunnossapitävälle – ja tämän työn tilaajalle - VR Fleetcarelle.

1.1 Tutkimuksen tavoitteet ja rajaus

Tässä diplomityössä tutkitaan, kuinka liikkeellelähtötarkastuksen osakokonaisuus - jarrujen toiminnan varmistaminen - voitaisiin toteuttaa hyödyntämällä langatonta mittausjärjestelmää. Työ on osa VR Fleetcaren laajempaa tavoitetta digitalisoida ja automatisoida tavaraliikenteen liikkeellelähtötarkastus.

Työssä tutkitaan tavaravaunun jarrujärjestelmää, sen toimilaitteiden mittaukseen soveltuvia mittalaitteita, sekä mittausjärjestelmän paikallista tiedonsiirtoa. Tutkimuksessa suunnitellaan langatonta mittausjärjestelmää, jonka tehtävänä on pystyä korvaamaan ihmisen tekemä tavarajunan jarrujen koettelu mukaiset täydellinen- ja osittainen jarrujen tarkastus. Suunnitellun mittausjärjestelmän toiminnallisuus todennetaan koejärjestelyillä, joita varten luodaan mittausjärjestelmästä prototyyppi. Koejärjestelyillä tutkitaan, kuinka luotettavasti langattomalla mittausjärjestelmällä pystytään varmistamaan tavaravaunun jarrujen toiminta ja millaisia haasteita siihen liittyy.

1.2 Aiempaa tutkimusta

Langattomia mittausjärjestelmiä on hyödynnetty useilla eri aloilla jo kauan, kuten rakennusten kunnonvalvonnassa, liikenteen ohjauksessa ja kaivostoiminnassa (Karl and Willig 2005, s. 3–6, Sohdraby et al. 2007, s. 10–12, Dargie et al. 2010, s. 17–44). Rautatieympäristössä langatonta mittausjärjestelmää on tutkittu vasta 2010-luvulla, kun Nebraska-Lincoln Yliopisto aloitti tutkimuksen Zigbee teknologian hyödyntämisestä tavaravaunujen toimilaitteiden mittaukseen (Mahasukhon et al. 2010, 2011, Rakshit et al. 2012a, 2012b, 2016). Muualla maailmassa tutkimus on pääasiassa keskittynyt radalta tehtävään mittaukseen (Chong et al. 2010, Palo 2012, Jo et al.

2018) ja vaunujen yksittäisten ilmiöiden ja telematiikan mittaukseen (Matsumoto et al. 2008, Monje et al. 2011, Bosso et al. 2016, Aimar and Soma 2017, Balog and Knapcikova 2018).

Rakshit et al. (2016) esitti tutkimuksissaan, että Zigbeetä hyödyntävä solmuverkko ei kykene lähettämään riittävän pienellä viiveellä tietoa mittauslaitteelta veturille johtuen junan aiheuttamasta puumaisesta topologiasta. Korvaajaksi hän esitteli kahden eri protokollan, 802.15.4 ja 802.11, yhdistävää tiedonsiirtoprotokollien hybridiä (Hybrid Technology Networking, HTN), jonka haasteeksi muodostui vaunuihin asennettavan tukiaseman energian kulutus. Tutkimukseen osallistui Rakshitin lisäksi Schiavo (2016), joka tutki tavaravaunuun asennettavan mittausjärjestelmän tukiaseman sähkönkulutuksen optimointia. Rakshit et al. julkaisi HTN tulokset vuonna 2017, jossa hän käsitteli järjestelmää sen energian optimoinnin osalta (Rakshit et al. 2017), mutta totesi suurimmaksi haasteeksi järjestelmän osalta kustannustehokkuuden parantamisen.

1.3 Työn vaiheet

Tämä diplomityö jakaantuu kolmeen selkeään osakokonaisuuteen. Nämä ovat teoriaosuus, toiminnallinen osuus ja analyttinen osuus. Teoriaosuudessa esitellään taustatietoja tavarajunan jarrujärjestelmästä, mittausjärjestelmistä, ja tavaraliikenteen haasteista. Toiminnallisessa osuudessa esitellään suunniteltu mittausjärjestelmä, prototyyppi ja koejärjestelyt. Työ päättyy analyttiseen osuuteen, jossa käydään läpi tulokset ja niiden analysointi, sekä luodaan kehys jarrujen toiminnan varmistamisen automatisoinnille.

Teoriaosuus taustoittaa mittausjärjestelmän suunnittelun kannalta olennaiset osakokonaisuudet. Kappaleessa 2 esitellään tavaravaunun jarrujärjestelmän toimilaitteet, niiden toiminta, sekä jarrujärjestelmän toiminnan varmistamisen osakokonaisuudet. Kappaleessa 3 käydään läpi langattoman mittausjärjestelmien komponentteja, ohjelmistoa, protokollapinoja ja suorituskykyyn liittyvää termistöä. Kappaleessa 4 esitellään tavaraliikenteen aiheuttamia haasteita langattoman mittausjärjestelmän suunnittelulle.

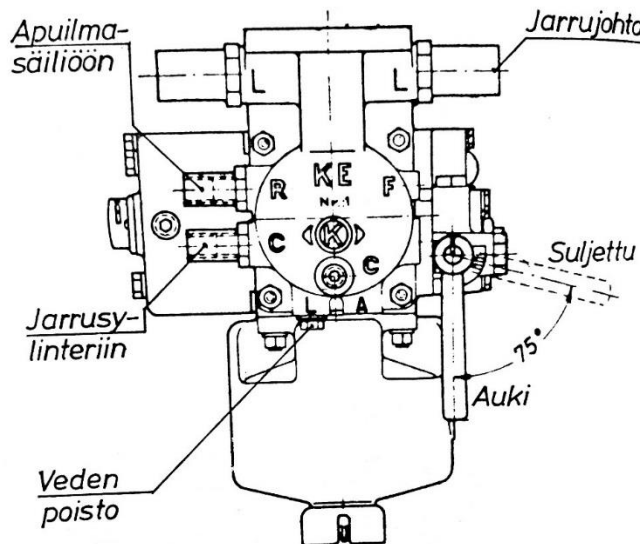
Toiminnallisessa osuudessa esitellään mittausjärjestelmä ja sen arviointiin soveltuvat koejärjestelyt. Toiminnallinen osuus alkaa kappaleella 5, jossa valitaan järjestelmälle mittausperiaatteet, tiedonsiirtomenetelmät ja suunnitellaan mittausjärjestelmälle arkkitehtuuri. Kappaleessa 6 esitellään mittausjärjestelmän arviointiin soveltuva prototyyppi, siinä käytettävät mittauslaitteet ja niiden asennus, sekä esitellään järjestelmän arviointiin suunnitellut kokeet.

Analyttinen osuus alkaa kappaleella 7, joka esittelee tulokset neljässä osassa. Tulokset on jaoteltu kokeiden mukaisesti toimilaittekohtaisiin kokeisiin, paikallaan tehtäviin kokeisiin, liikkeessä tehtäviin kokeisiin ja simuloituihin vikatilanteisiin. Tuloksissa esitellään tärkeimmät havainnot, sekä käydään läpi valitun mittausjärjestelmän vahvuudet ja heikkoudet. Mittaustuloksien esittelyn jälkeen kappaleessa 8 analysoidaan mittausjärjestelmän toiminnallisuutta ja sen tiedonsiirtoprotokollan suorituskykyä. Kappaleessa 9 esitetään tulosten pohjalta muodostettu tuotannolliseen toimintaympäristöön soveltuvan mittausjärjestelmän kehys ja jarrujen automaattisen tarkastuksen

teoreettinen malli. Työ päättyy yhteenvetoon, jossa kerrataan vielä työn tulokset ja pohditaan tutkimuksen akateemista merkitystä.

2.1.1 Toimiventtiili

Toimiventtiin tehtävänä on ohjata vaunun jarrulaitteiden toimintaa junan läpi kulkevan jarrujohdon painevaihteluitten mukaan. Knorr-Bremsen KE-GP jarrujärjestelmässä toimiva toimiventtiili KE1c on esitetty alla Kuvassa 2.



Kuva 2. Jarruventtiili KE1c (Valtionrautatiet 1971, s. 36)

Jarrulaitteen toiminnassa esiintyy kolme päävaihetta:

1. Apuilmasäiliön täyttäminen, jolloin varataan jarrutuksessa tarvittava paineilma.
2. Paineilman laskeminen apuilmasäiliöstä jarrusylinteriin, mikä aiheuttaa jarrutuksen.
3. Paineilman laskeminen jarrusylinteristä ulos, mikä aiheuttaa jarrujen irtoamisen

Nämä toiminnot on mahdollista saada aikaan erirakenteisten ja myös erilaisten periaatteiden mukaan toimivien toimiventteilleitten avulla. (Valtionrautatiet 1971, s. 22)

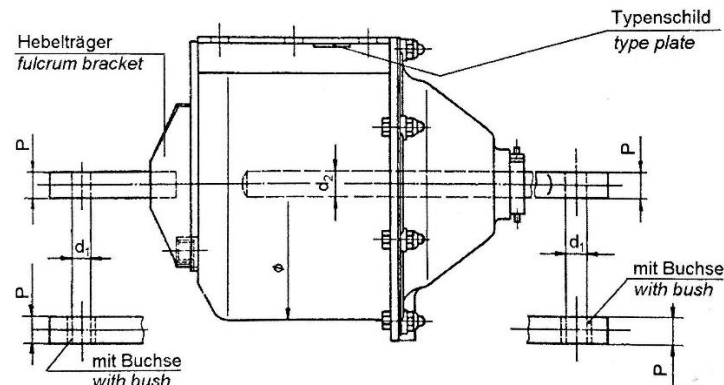
2.1.2 Apuilmasäiliö

Apuilmasäiliön tehtävä on varastoida jarrutukseen tarvittava energia (3,8 bar) ja tuottaa painetta jarrusylinterille jarrutuksen yhteydessä. Apuilmasäiliö sijaitsee normaalisti jarruventtiin puolella, jotta se ei olisi mekaanisten laitteiden tiellä. Apuilmasäiliö latautuu, kun jarrujohdossa vallitsee lepopaine (5 bar).

2.1.3 Jarrusylinteri

Jarrusylinteri (Kuva 3) muuntaa jarrujärjestelmässä käytettävän paineilman voimaksi. Kun paine jarrusylinterissä nousee, voittaa se jossain vaiheessa männässä olevan jousen jousivoiman, mikä johtaa männän siirtymisen ulospäin. Tämä voima siirtyy mekaanisesti vivuston avulla jarrukenkiin ja jarruanturoille. Kun paine laskee riittävästi, jarrusylinterissä sijaitseva jousi vetää sylinterin takaisin sisäänsä. Tämä liike aiheuttaa myös vastaavasti vivuston vetäytymisen ja jarruanturoiden

irtoamisen pyörien kehältä. Jarrusylinterin maksimi paine on 3,8 baaria, joka syntyy, kun paine jarrujohdossa on laskenut 3,5 baariin.



Kuva 3. Jarrusylinterin periaatekuva (Knorr-Bremse 2002, s. 56)

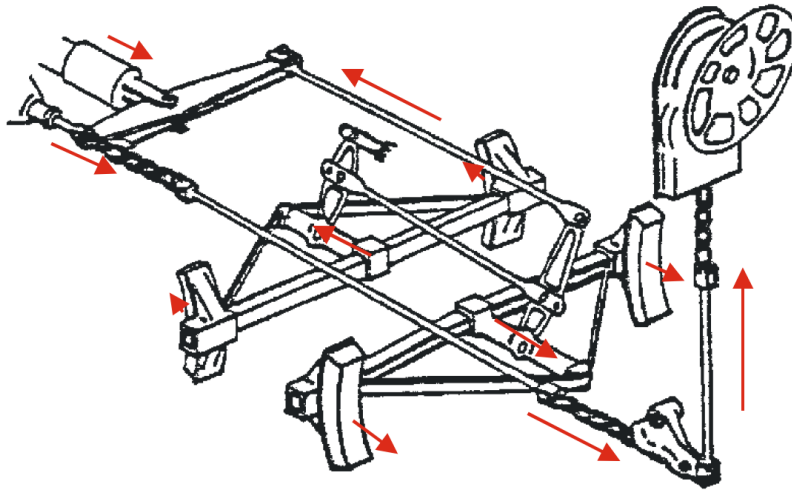
Sylinterin tuottama jarruvoima ja sitä vastustava jousivoima riippuu sylinterin halkaisijasta. Tutkimuksessa käytettävissä SPS-vaunuissa on halkaisijaltaan 14 tuumaiset (355 mm) sylinterit. Tämä tuottaa jarruvoimaksi 3,8 baarin paineella 36 000 Newtonia. Vetävän liikkeen toteuttava jousivoima taas on 1600 Newtonia. (Knorr-Bremse 2002 s. 57)

2.1.4 Jarrulajiasetin

Jarrulajiasettimella on kaksi asentoa: Matka (M) ja Tavara (T) -asennot. Riippuen asennosta, jarruventtiili ohjaa jarrusylinterille painetta joko nopeasti tai hitaasti. T-asennossa täysjarrutus kestää 18–30 sekuntia ja suora irrotus 45–60 sekuntia. M-asennossa taas täysjarrutus kestää vain 3–5 sekuntia ja irrotus 15–20 sekuntia. Tavarajunissa jarrulajiasetinta pidetään käytännössä aina T-asennossa. Muutamat nopeat tavarajunat ja käytännössä kaikki matkustajajunat käyttävät jarrulajiasetinta M-asennossa. (Valtionrautatiet 1971, s. 13)

2.1.5 Ruuvijarru

Ruuvijarrua käytetään lähtökohtaisesti vaunujen paikallaanpysymisen varmistamiseksi. Sitä ohjataan vaunun päästä kammella, joka pyörittää ruuvitankoa, mikä puolestaan muutetaan mekaanisesti edestakaiseksi liikkeeksi. Tämä liike ohjaa vivustoa samaan tapaan, kuin jarrusylinterin männän liike. Kuvassa 4 on esitetty pääpiirteittäin ruuvijarrun mekanismi.



Kuva 4. Ruuvijarrun toiminta (Wabtec Corporation 2003, s. 17)

Kuten kuvasta voidaan huomata, ruuvijarru on suoraan yhteydessä vivuston avulla jarruanturoihin. Vaikka mekaniikka on yksinkertainen, on siinä perinpohjaisia ongelmia. Kiristämällä ruuvijarrua, ei käyttäjällä ole varmuutta siitä, kuinka vahvasti ruuvijarru aidosti jarruttaa. Koska ruuvijarruja ei voida irrottaa veturista käsin paineilmalla, unohtuvat ne usein päälle aiheuttaen omaisuusvahinkoja. Ruuvijarru voidaan myös kiristää liian tiukasti, mikäli kiristys tapahtuu normaalin paineilmajarrutuksen yhteydessä. Tällöin ruuvijarrun avaaminen käsin on erittäin haastavaa ja vaatii lähtökohtaisesti veturin paineilmajarrutuksen avaamisen avuksi. Ruuvijarrun operointi on siis erittäin fyysistä työtä, ja sen on koettu aiheuttavan ergonomisia ongelmia vaihtotyöntekijöille. Näistä syistä ruuvijarrun käyttöä on vähennetty systemaattisesti Suomessa, ja nykyään sen käyttö on erityistapauksia lukuun ottamatta kielletty Suomen rataverkolla.

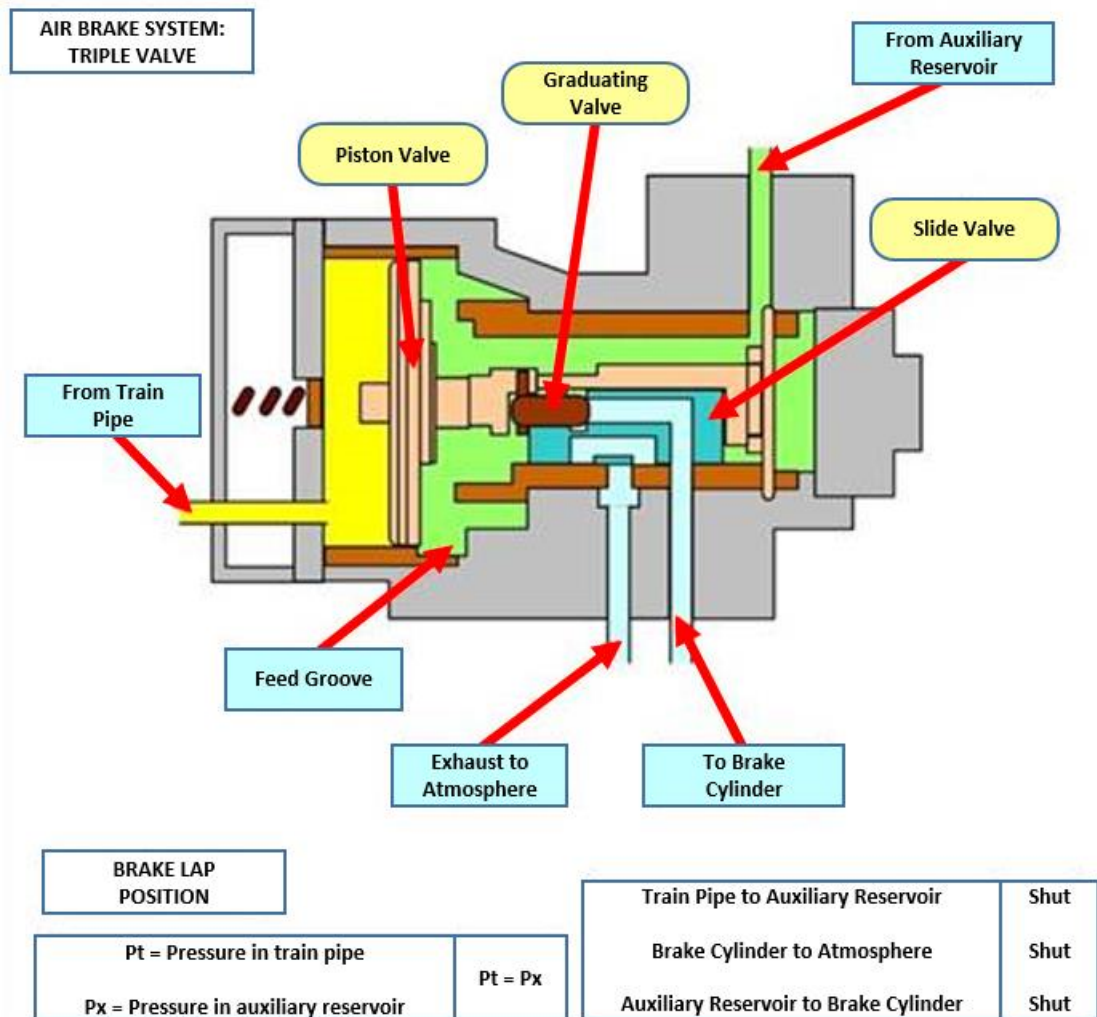
2.1.6 Vivusto, kuormavaihde ja vivuston säätäjä

Vivuston tehtävä on siirtää jarruvoima jarrusylinteriltä ja ruuvijarrulta jarrukengille ja jarrupaloille. Vivuston liike aiheuttaa tavaravaunuissa jarrukenkien puristumisen, joka taas painaa jarrupaloja vaunun pyöriä vasten. Vivusto koostuu mekaanisista tangoista, nivelistä, ja vivuston säätäjästä Kuvan 5 mukaisesti. Vivuston liikkeeseen vaikuttaa myös kuormavaihde, joka mahdollistaa vivuston suuremman vipuvoiman, mikäli vaunu on kuormassa. Kuormavaihteen toiminta on nähtävissä myös Kuvasta 5. (Knorr-Bremse 2002, s. 25–29)

hätäjarrutus kaikissa tilanteissa. Vaunukohtaisen jarrutuksen toteuttaa vaunuissa sijaitsevan toimiventtiilin ja paineakun yhteistoiminta. (Knorr-Bremse 2002, s. 14)

2.2.1 Toimiventtiilin ja apuilmasäiliön toiminta

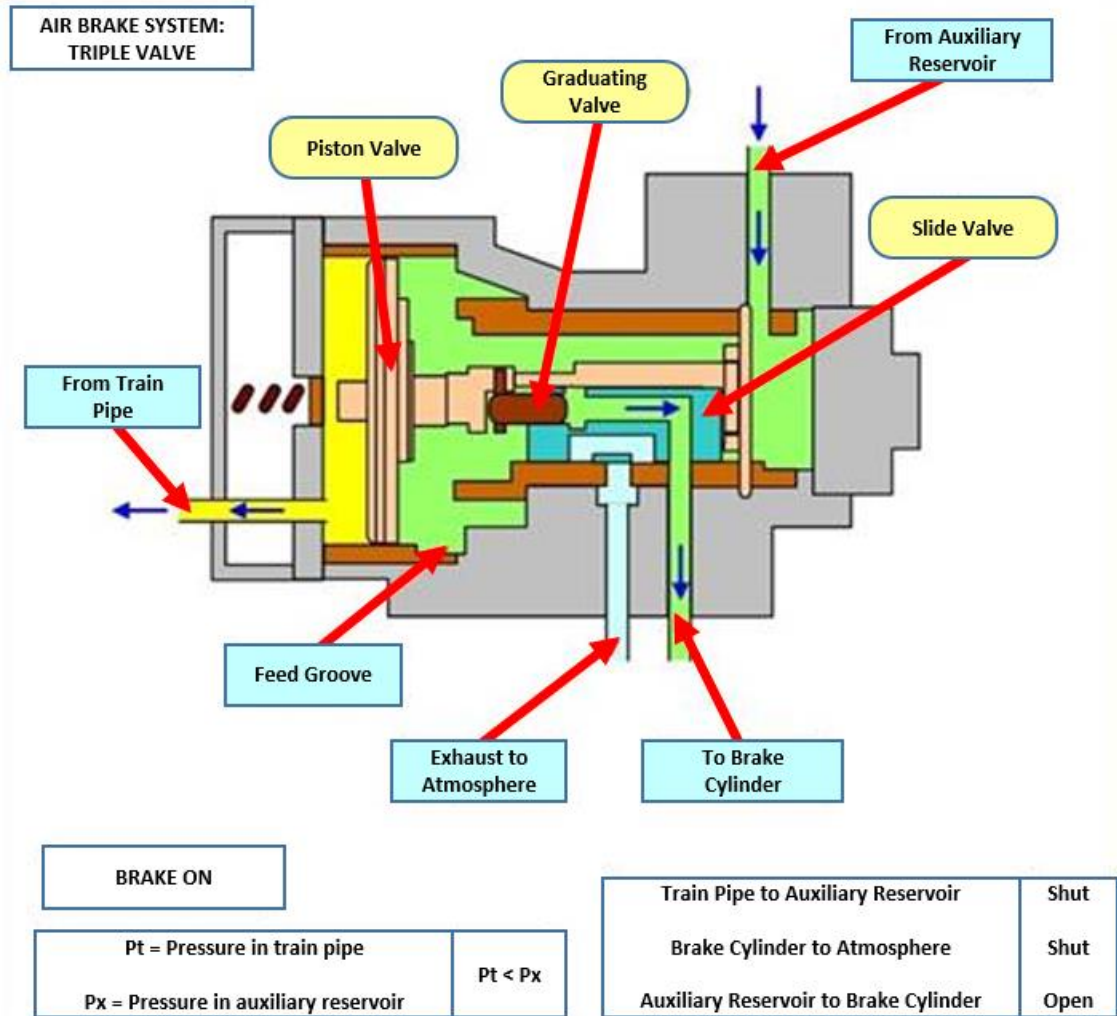
Toimiventtiili on vaunun jarrujärjestelmän tärkein osa. Se seuraa jarrujohdossa olevaa painetta, ja ohjaa vaunun jarrujärjestelmää sen mukaan. Kun jarrujohdossa ja apuilmasäiliössä on lepopaine (5 bar), on toimiventtiili lepotilassa. Toimiventtiilin lepotila on esitettyä Kuvassa 6.



Kuva 6. Toimiventtiili levossa (Anon 2020)

Kuten kuvasta voidaan nähdä, lepotilassa olevassa venttiilissä jarrujohdon ja apuilmasäiliön välinen paine-ero on 0. Lepotilassa venttiilin karat ovat neutraalissa asennossa, niin että paine ei siirry jarrujohdon, apuilmasäiliön, eikä jarrusylinterin välillä.

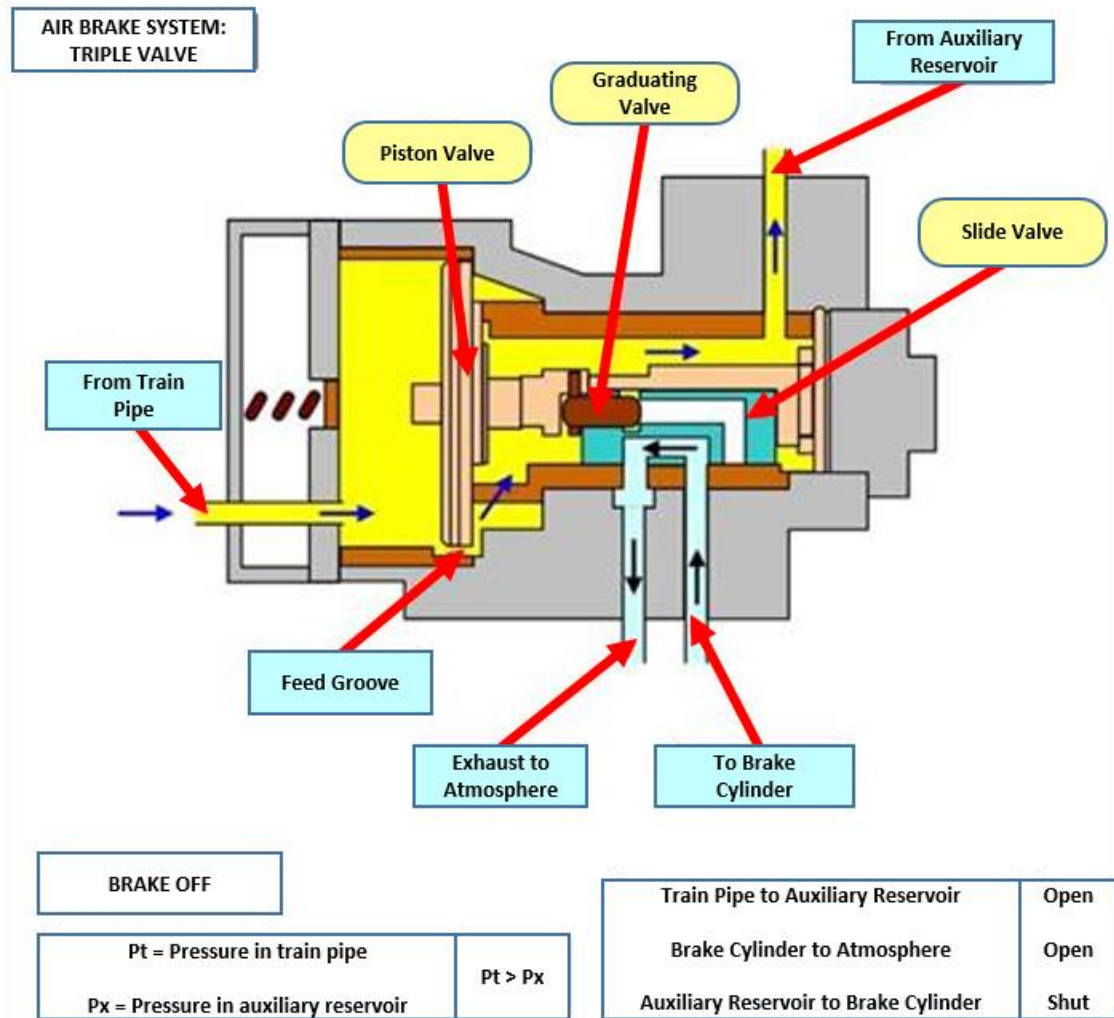
Kun kuljettaja aloittaa jarrutuksen, siirtyy toimiventtiili jarrutasentoon. Tämän aiheuttaa painetasapainon rikkoutuminen jarrujohdon ja apuilmasäiliön välillä. Jarruttava toimiventtiili on esitetty Kuvassa 7.



Kuva 7. Toimiventtiili jarrituksen aikaan (Anon 2020)

Kun kuljettaja jarruttaa, putoaa jarrujohdon paine 5 baarin alapuolelle. Tämä aiheuttaa kuvan mukaisesti vastaventtiilin sulkeutumisen, kun apuilmasäiliön paine säilyttää korkeamman paineen. Vastaventtiilin sulkeutuminen aiheuttaa apuilmasäiliön ja jarrusylinterin välisen kanavan avautumisen, mikä johtaa jarrusylinterin paineen nousuun ja jarrujen kiinnittymiseen.

Jarrituksen lopettamiseksi nostaa kuljettaja jarrujohdon paineen takaisin 5 baarin tasolle. Koska apuilmasäiliön paineilmasta on osa siirtynyt jarrusylinterille, on apuilmasäiliön paine pudonnut alle 5 baarin paineen. Jarrujohdon korkeampi paine siirtää venttiilin karan toiseen ääripäähän, jonka takia toimiventtiili siirtyy irrotustilaan. Toimiventtiilin irrotustila on esitetty Kuvassa 8.



Kuva 8. Toimiventtiili jarrujen irrotuksen aikaan (Anon 2020)

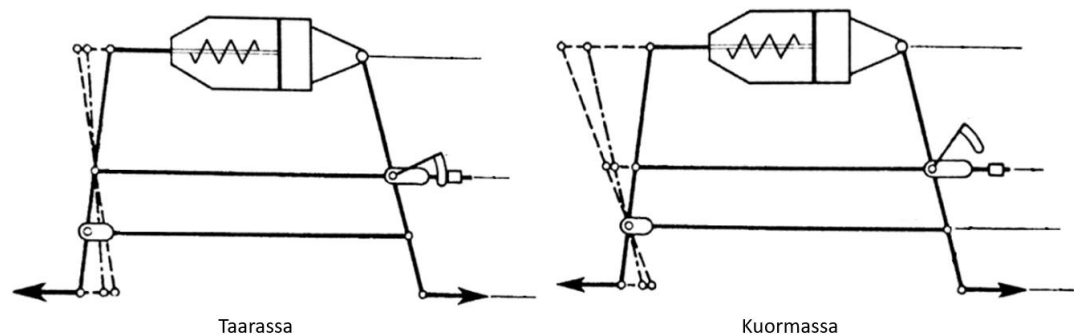
Kun jarrujohdon paine on korkeampi kuin apuilmasäiliön paine, on toimiventtiilin kara toisessa ääripäässä, kuten Kuvasta 8 voidaan nähdä. Venttiilin karan siirtyminen toiseen ääripäähän sulkee apuilmasäiliön reitin jarrusylinterille ja avaa vastaventtiilin jarrujohdon ja apuilmasäiliön välille, jolloin jarrujohto alkaa täyttämään apuilmasäiliötä. Samalla avautuu jarrusylinterin puolella oleva päästöventtiili, joka tyhjentää sylinteristä paineen ja päästää sylinterissä olevan jousen vetämään sylinterin männän takaisin sisäänsä irrottaen jarruanturat pyörän kehiltä.

Tilanteissa, jossa junayksikön veturi vaihtuu, voi tapahtua niin kutsuttu ylilatautuminen. Tämä tarkoittaa tilannetta, jossa vaunujen apuilmasäiliöön on varastoitunut korkeampaa painetta, kuin mitä uuden veturin kompressori syöttää jarrujärjestelmään. Tämä johtaa venttiilin häiriötilaan, jossa venttiili siirtyy ja pysyy jarrutustilassa. Häiriötilassa paineen purkaminen jarruttavalta jarrusylinteriltä ei onnistu ilman veturista tehtävää ylilatauksen poistoa. Ylilatauksen poistolla tarkoitetaan operaatiota, jossa jarrujohdon paine nostetaan hetkellisesti korkeammaksi, kuin normaali 5 baarin paine. Tämän avulla paineakusta vuodatetaan pois ylimääräinen paine, joka kalibroii jarrujärjestelmän painetasot veturin kanssa yhteensopivaksi.

2.2.2 Vivuston ja jarrusylinterin männän liike

Kun jarrutus tapahtuu, nousee jarrusylinterissä paine niin korkeaksi, että sen tuottama voima voittaa sylinterissä olevan jousen vastavoiman ja mäntä puskeutuu sylinteristä ulos. Jarrutuksen aikana jarrusylinterin mäntä muuntaa jarrusylinterissä olevan paineen mekaaniseksi voimaksi, joka johdetaan jarruanturoille mekaanisen vivuston avulla. Vivuston mekaniikka painaa jarruanturat pyörien kehää vasten. (Knorr-Bremse 2002, s. 40–50)

Jarrusylinterin liikkeen määrään vaikuttaa kuormavaihte, joka liikuttaa Kuvan 9 mukaista karaa riippuen siitä onko vaunu lastattuna tai tyhjänä. Tämä mahdollistaa jarrusylinterin männälle pidemmän iskunpituuden, kun vaunu on lastattu. Pidempi männän iskunpituus mahdollistaa jarrusylinterille enemmän vipuvartta – ja siten voimaa - jarrutuksen toteuttamiseen. Pidemmästä männän iskunpituudesta on kuitenkin haittaa, jos vaunu on taarassa (tyhjä). Tämä johtuu siitä, että liian suuri jarrutusvoima aiheuttaa helposti pyörien lukkiutumisen (Knorr-Bremse 2002, s. 17). Suomen radalla yleisimmän, 4-akselisen vaunun männän iskun pituus tulisi olla lastattuna 130–140 mm ja tyhjänä 60–110 mm (Valtionrautatiet 1971. s. 9)



Kuva 9. Kuormavaihteen vaikutus jarruvivuston liikkeeseen (Mukailtu, Knorr-Bremse 2002, s. 48)

Jarrusylinterin liikemäärään vaikuttaa kuormavaihteen lisäksi jarruanturoiden välykset ja niihin reagoiva vivuston säätäjä. Kuten kappaleessa 2.1.6 mainittiin, vivuston säätäjä pystyy säätämään jopa 600 mm jarrujen välyksiä. Mikäli sylinteri ja vivusto toimii niin kuin pitäisi, jarruvoima jakaantuu tasaisesti jokaiselle jarruanturalle ja jarruanturat kiinnittyvät pyörien kehälle jarrutuksen aikana ja irtoavat siltä jarrutuksen päätyttyä. Näin ei kuitenkaan tapahdu käytännössä, vaan vikatilat ja jarruanturoiden epäsymmetrinen kuluminen on normaaleja ilmiöitä.

2.3 Tavarajunien jarrujärjestelmän toiminnan varmistaminen

Jotta jarrujen toimintaan voidaan luottaa, on tavaravaunujen jarrujärjestelmän toiminta varmistettava ennen liikkeellelähtöä. Jarrujärjestelmän toiminta varmistetaan jarrujen täydellisillä ja osittaisilla koetteluilla. Jarrujen täydellinen koettelu tehdään seuraavissa tilanteissa:

1. Valmiiksi lähtöä varten kootulle vaunustolle
2. Kuormauksen ja purkamisen jälkeen

3. Junaan lisätylle vaunuryhmälle
4. Koko junalle, kun junaan lisätään enemmän kuin yksi vaunuryhmä
5. Mikäli koko junan jarrut on jouduttu irrottamaan irrotusventtiilejä käyttäen
6. Yli 24 tuntia paikallaan seisseelle vaunustolle, paitsi vaunustolle, joka on jarrujen testauksen jälkeen koko ajan kytkettynä toimivaan jarrujenkoettelulaitteeseen.

Koejarrutuksella varmistetaan kaikkien toimivien vaunujen jarrujen kiinnittyminen ja irtoaminen. Koettelu aloitetaan junan jarrujärjestelmän täytöllä, jossa jarrujärjestelmän paine nostetaan 5 baariin, ja tekemällä jarrujärjestelmän tiiveystesti. (VR Group 2019)

2.3.1 Jarrujärjestelmän tiiveystesti

Junayksiköiden jarrujärjestelmää testataan tiiveystestillä täydellisen jarrujen testauksen yhteydessä. Kun junassa on useita liitoksia vaunujen ja niiden toimilaitteiden välillä, on yleisesti hyväksyttyä ja mitoitettua, että jarrujärjestelmässä on vuotoja. Jarrujärjestelmän vuodon enimmäisarvo on 0,6 bar/min jarrujohdon syötön ollessa suljettuna. Jarrujohto on riittävän tiivis, kun vakiintuneen virtauksen maksimiarvo on 50 l/min per 100 m junapituutta. Tämä tarkoittaa, että normaalissa 40 vaunun mittaisessa tavarajunassa vuodot saavat olla liikennekäytössä jopa 600 litraa minuutissa. Tämä ei kuitenkaan ole ongelma, sillä veturin kompressori tuottaa paineilmaa 2,9m³/min, jonka lisäksi vetureista löytyy tyypillisesti 800 litran kokoinen ja 10 baarin paineinen pääilmasäiliö. Kun tiiveystesti on suoritettu ja jarrujärjestelmä on tasaantunut 5 baarin käyttöpaineeseen, jarrujen koejarrutuksen voi aloittaa. (VR Group 2014, 2019)

2.3.2 Jarrujen koettelu ja tarkastus

Kun tiiveystesti on todettu onnistuneeksi, voidaan aloittaa jarrujen koettelu ja tarkastus. Jarrujen tarkastus tehdään koejarrutuksen aikana, jolloin tarkastaja toteuttaa visuaalisen tarkastuksen jarrujärjestelmän toimilaitteille kiertämällä junayksikön. Tarkastuksen toteuttamiseksi tarkastaja kulkee junarungon toista puolta rungon viimeiselle vaunulle tarkastaen, että jarrut ovat kiinnittyneet. Kun tarkastaja pääsee rungon perälle, voidaan jarrut irrottaa. Tämän jälkeen tarkastaja kävelee rungon toista puolta takaisin veturille, ja varmistaa, että kaikki anturat ovat irronneet pyörän kehiltä ja toimilaitteet ovat oikeilla asetuksilla.

Junan toiminnan varmistamiseksi tarkastuksessa on todettava:

1. Jarruanturoiden kiinnittyminen ja irtoaminen
2. Ruuvijarrut ovat irti
3. Jarruanturat eivät ole kuluneet käyttörajamittaansa
4. Jarrulajiasettimet ovat oikeissa asennoissaan (M / T)
5. Mikäli vaunuissa on kuormajarruasetin, niin se on oikeassa asennossa.
6. Vaunuissa ei ole vapaina roikkuvia letkukytkimiä, ja ne ovat ripustettuna lepopidikkeisiinsä kytkinhanat suljettuina.

7. Mahdollisten vuotojen toteaminen kuuntelemalla
8. Viimeinen vaunu ei ole jarruton
9. Vikaantuneiden jarrujen sulkeminen

Jarrujen täydellinen tarkastus ei kuitenkaan ole aina välttämätöntä, vaan tietyissä tilanteissa voidaan tehdä myös kevyempi osittainen jarrujen tarkastus. (VR Group 2019)

2.3.3 Osittainen jarrujen tarkastus

Osittainen jarrujen tarkastus tehdään seuraavissa tilanteissa:

1. Kun kuljettajaventiili vaihtuu, eli vaunusto kytketään uuteen veturiin tai jarrujen koettelu-laitteeseen
2. Veturi siirtyy junan toiseen päähän

Osittaisessa jarrujen koettelussa ja tarkastuksessa testataan viimeisen vaunun paineilmajarrujen kiinnittyminen ja irtoaminen, sekä kaikkien paineilmajarrujen irtoaminen. Osittaisen koejarrutuksen tarkoitus on varmistaa junarungon turvallisen jarrituksen kannalta olennaiset asiat. Tarkastuksella varmistetaan, että vaunuston jarrujärjestelmään ei ole syntynyt suuria vuotoja tai tukoksia vaihdon yhteydessä. Lisäksi varmistetaan, että junarungon viimeinen vaunu ei ole jarruton, ja että jarrut eivät ole lukittuneet kiinni esimerkiksi jäätyneen tai yllilatauksen takia.

3. LANGATON MITTAUSJÄRJESTELMÄ

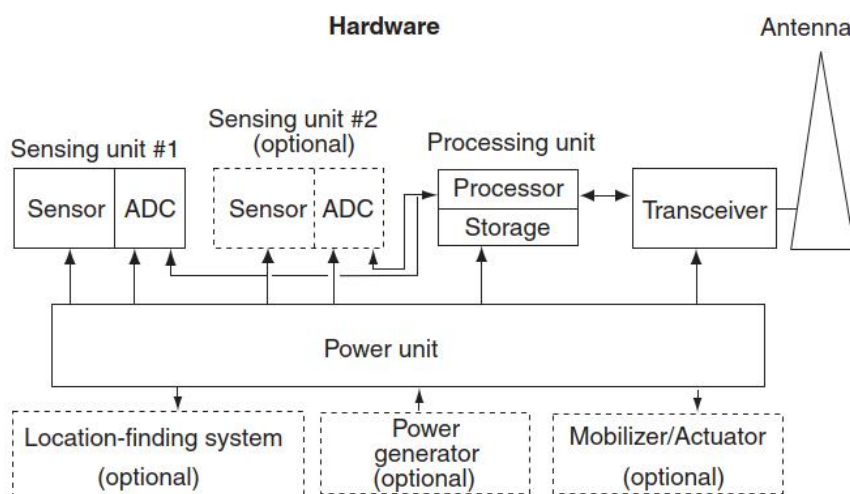
Mittauksia toteutetaan yhä kasvavissa määrin langattomilla antureilla (Statista 2020), sillä ne mahdollistavat mittauksen toteuttamisen haastavissa ja syrjäisissä kohteissa (Dargie et al. 2010). Langattomia mittausjärjestelmiä (Wireless Sensor Networks, WSN), ja niissä toimivia laitteita voidaan pitää sulautettuina järjestelminä (Kuorilehto 2008, s. 4). Ne koostuvat langattomista antureista, yhdestä tai useammasta tukiasemasta, nämä laitteet yhdistävästä verkosta, sekä mittadatan keräävästä ja prosessoivasta tietokoneesta (Sohdraby et al. 2007, s. 1).

Langattomia mittausjärjestelmiä löytyy tyypillisesti sijainneista, joissa energiaa ei ole tarjolla (Sohdraby et al. 2007, s. 75). Tästä syystä langattomalle mittausjärjestelmälle ja sen mittauslaitteille tavoitellaan yleensä pitkää elinikää, joka merkitsee akullisissa laitteissa sähkönkulutuksen minimoimista. Tämä saadaan aikaan yleensä minimoimalla pulssisuhdetta, toteuttamalla reunalaskentaa ja minimoimalla lähetysten etäisyyttä hyödyntämällä muita ympärillä olevia mittauslaitteita toistimina. (Sohdraby et al. 2007, s. 7)

Tässä kappaleessa perehdytään mittauslaitteen komponentteihin ja ohjelmistoon, laitteet yhdistävää verkkoa ohjaavaan protokollapinoon, ja tiedonsiirtoprotokollan suorituskykyyn liittyviin termeihin.

3.1 Langattoman mittauslaitteen komponentit

Langaton mittauslaite, eli järjestelmän solmu, koostuu lähtökohtaisesti mittauksen tekevästä sensorista, mikrokontrollerista, antennista ja akusta (Dargie et al. 2010, s. 47). Kuvassa 10 on esitelty mittauslaitteen komponentit, jotka koostuvat minimissään energianlähteestä, tuntoelimestä, prosessorista, lähettimestä ja antennista.



ADC = Analog-to-Digital Converter

Kuva 10. Langattoman mittauslaitteen komponentit (Sohdraby et al. 2007, s. 18)

Solmu on verkkoon kytketty elektroninen laite, joka voi luoda, vastaanottaa, tai lähettää informaatiota tietoliikennekanavaa pitkin. Koska solmut ovat yleensä akkukäyttöisiä, olisi solmuja suunniteltaessa mietittävä tarkasti kunkin komponentin energian kulutus. Yleensä suurimmat energiahäviöt tapahtuvat tietoliikennepiirissä ja antennissa. (Sohdraby et al. 2007, s.18)

Komponenttitasolla energian kulutukseen voidaan vaikuttaa esimerkiksi valitsemalla passiivisesti toimiva anturi (Sohdraby et al. 2007, s. 18) tai suunnittelemalla mittausmenetelmät energian kulutuksen mukaan. Tuntoelimen valinnalla on huomattavasti vaikutuksia energian kulutukseen, mikä voidaan nähdä Taulukosta 2.

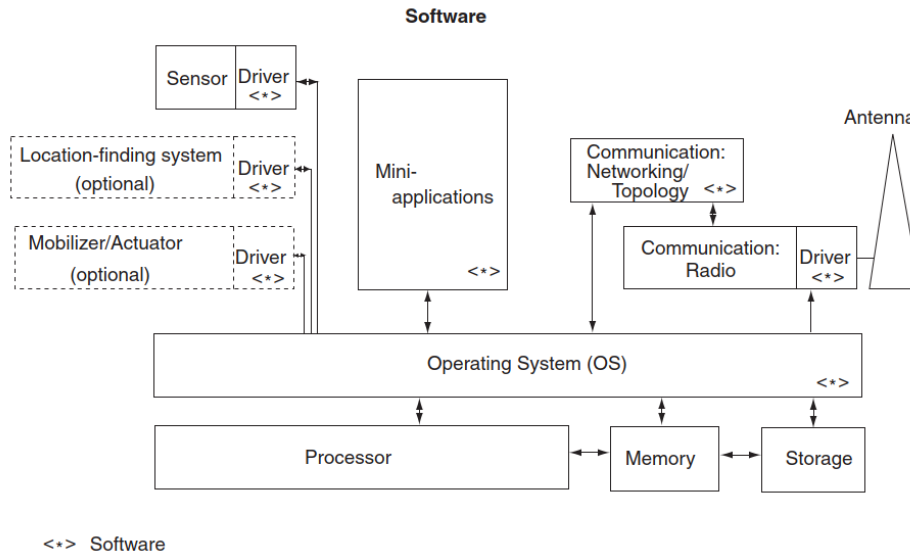
Taulukko 2. Tyypillisiä tuntoelimiä ja niiden ominaisuudet (Mukaiitu, Suhonen et al. 2012, s. 21)

Fyysinen ominaisuus	Esimerkki sensori	Tarkkuus	Käyttövirta	Mittausaika	Energian kulutus
<i>Kiihtyvyys</i>	VTI SCA3000	1 %	120 μ A	10 ms	3,6 μ J
<i>Ilman paine</i>	VTI SCP1000	150Pa	25 μ A	110 ms	8,3 μ J
<i>Kosteus</i>	Sensorion SHT15	2 %	300 μ A	210 ms	190 μ J
<i>Valoisuus</i>	Avago APDS-9002	50 %	2,0 mA	1,0 ms	6,0 μ J
<i>Infrapuna</i>	Fuji MS-320	-	35 μ A	jatkuva	-
<i>Magneettikenttä</i>	Hitachi HM55B	5 %	9,0 mA	30 ms	810 μ J
<i>Asento</i>	Fastrax iTRAX03	1,0 m	32 mA	4,0 s	380 mJ
<i>Lämpötila</i>	Dallas DS620U	0,5 °C	800 μ A	200 ms	480 μ J

Anturiteknologia on kehittynyt tällä vuosikymmenellä kovasti, kuten taulukon äärimmäisen pienistä energian kulutuksista voidaan päätellä. Tämä johtuu siitä, että nykyaikaiset anturit ovat enää vain hiekanjyvän kokoisia (Gabriel et al. 1988), ja vievät siten erittäin vähän virtaa (Warneke and Pister, 2002).

3.2 Langattoman mittauslaitteen ohjelmisto

Langaton lähetein ei koostu vain komponenteista, vaan siinä on aina osana myös sulautettu ohjelmisto. Langattoman mittausjärjestelmän kannalta ohjelmistolla on suuri rooli, sillä se ohjaa laitteiston antureiden toimintaa, kehittää mittaustuloksia, ylläpitää omaa toimintaansa ja järjestää yhteyden muihin laitteisiin. Kuvassa 11 on esimerkki mittalaitteistossa normaalisti toimivasta ohjelmistosta ja sen eri komponenteista.



Kuva 11. Geneerinen malli ohjelmistosta (Sohdraby et al. 2007, s. 79)

Laitteiston ohjelmistolla on yleisesti viisi eri alajärjestelmää (Sohdraby et al. 2007, s. 80), jotka ovat:

1. Käyttäjärjestelmä, joka tarjoaa mittauslaitteen muille sovelluksille rajapinnan toteuttaa eri funktioita.
2. Tuntoelinajurit, jotka pitävät huolen tuntoelinten normaalista toiminnasta.
3. Tietoliikenneprosessorit, jotka ohjaavat muun muassa tiedonsiirron toteuttamista, reititystä, topologiaa, ja tiedon salausta
4. Tietoliikenneajurit, jotka pitävät huolen radioyhteyksien eheydestä, synkronoinnista, signaalin tuottamisesta, bittien laskennasta ja modulaatiosta.
5. Dataprosessoinnin minisovellukset, jotka tuottavat, muokkaavat ja tallentavat mittaus-
tuloksia.

Yhdessä komponenttien kanssa, ohjelmisto luo mittausjärjestelmän yhden osakokonaisuuden: mittauslaitteen. Mittausjärjestelmä koostuu mittauslaitteen lisäksi myös tukiasemasta ja mittauslaitteen ja tukiaseman välisestä tiedonsiirrosta. Näiden laitteiden väliselle tiedonsiirrolle tarvitaan säännöt ja ohjeistukset, joita kutsutaan protokollapinoksi.

3.3 Langattoman mittausjärjestelmän protokollapino

Tiedonsiirtoa laitteiden välillä hallitaan protokollapinolla, joka koostuu protokollakerroksista. Protokollapinon tärkein tehtävä on varmistaa, että verkon kaikki laitteet kommunikoivat keskenään samoja sääntöjä, formaattia ja menetelmiä hyödyntäen.

Protokollapinojen viitemalleja on langattomille mittausjärjestelmille useita, mutta ne perustuvat pääosin ISO/IEC 7498-1:199 standardin mukaiseen OSI- viitemalliin (Open System Interconnec-

tion). OSI-viitemalli jakaa tiedonsiirron hallitsemisen 7 hierarkkiseen kerrokseen, jotka ovat sovel-
lus-, esitystapa-, istunto-, kuljetus-, verkko-, siirtoyhteys-, ja fyysinen kerros (International Or-
ganization for Standardization 1994). OSI-malli on esitettyä alla olevassa Taulukossa 3.

Taulukko 3. OSI malli, mukailtu (International Organization for Standardization 1994)

Kerros	Kuvaus
<i>Sovelluskerros (Application layer)</i>	Käyttäjän sovellusten viestintärajapinta
<i>Esitystapakerros (Presentation Layer)</i>	Vastaa merkistöjen yhteensopivuudesta
<i>Istuntokerros (Session layer)</i>	Huolehtii yhteyksien aloittamisesta, ylläpidosta ja lopetta- misesta. Mahdollistaa niin yksi-, kuin kaksisuuntaiset yh- teydet.
<i>Kuljetuskerros (Transfer Layer)</i>	Huolehtii, että paketit tulevat perille ja järjestää ne oike- aan järjestykseen.
<i>Verkkokerros (Network Layer)</i>	Mahdollistaa datakokonaisuuksien kuten tietoliikennepa- kettien siirtämisen kohteiden kuten tietokoneiden välillä.
<i>Siirtoyhteyserros (Data-link layer)</i>	Toteuttaa yhteyden solmujen välillä. Määrittelee protokol- lan yhteyden aloittamiselle ja lopettamiselle. Sisältää MAC ja LLC alakerrokset.
<i>Fyysinen kerros (Physical Layer)</i>	Lähetysten ja vastaanoton toteuttaminen. Muuntaa bitin signaaliksi ja signaalin bitiksi.

Langattomat mittausjärjestelmät hyödyntävät yleensä protokollapinoja, jotka on johdettu OSI-mal-
lista. Yleisimpiä protokollastandardeja langattomille mittausjärjestelmille ovat IEE 802.15.1
PAN/Bluetooth, IEE 802.15.3 Ultrawideband ja IEE 802.15.4/Zigbee (Sohdraby et al. 2007, s. 14).
Nämä standardit määrittelevät lähtökohtaisesti vain OSI-mallin pohjakerroksia, eli fyysistä-, siir-
toyhteys-, ja verkkokerrosta.

3.3.1 Fyysinen kerros

Fyysisen kerroksen tehtävä on mittauslaitteen datan lähetys ja vastaanotto, eli bitin modulointi
signaaliksi ja signaalin digitalisointi takaisin bitiksi. Tätä kutsutaan moduloinniksi, jonka tehtävänä
on sisällyttää mahdollisimman paljon siirrettävää dataa valituille taajuuksille ilman, että ympärillä
vaikuttava kohina ja interferenssi haittaa tiedonsiirron luotettavuutta.

Fyysisessä kerroksessa määritellään myös langattoman järjestelmän käyttämä taajuusalue elekt-
romagneettisesta spektristä, jossa moduloidut signaalit siirretään. Elektromagneettinen spektri
voidaan jakaa taajuusalueisiin, jotka lähtevät kilohertsien taajuuksista ja nousevat aina gigahert-
sien taajuuksiin asti. Elektromagneettinen spektri taajuusalueineen on esitetty Kuvassa 12. (Karl
and Willig 2005, s. 86)

Frequency	3 kHz	30 kHz	300 kHz	3 MHz	30 MHz	300 MHz	3 GHz	30 GHz	300 GHz
	VLF	LF	MF	HF	VHF	UHF	SHF	EHF	
Wavelength	100 km	10 km	1 km	100 m	10 m	1 m	10 cm	1 cm	1 mm

VLF = Very low frequency VHF = Very high frequency
 LF = Low frequency UHF = Ultrahigh frequency
 MF = Medium frequency SHF = Super high frequency
 HF = High frequency EHF = Extremely high frequency

Kuva 12. Radiotaajuudet ja elektromagneettinen spektri (Karl and Willig 2005, s. 86)

Oikean taajuusalueen valinta on ensiarvoisen tärkeää langattomalle järjestelmälle, sillä se määrittelee tiedonsiirtosignaalin etenemisen. Se vaikuttaa siihen, kuinka hyvin signaali kiertää tai läpäisee esteitä, ja kuinka paljon vapaita taajuuksia on samassa suuruusluokassa.

Käytännössä kuitenkin suuri osa taajuuksista on jo varattu esimerkiksi lentoliikenteelle, puolustusvoimille ja GSM:lle, sekä muille valtioiden hyödyntämille taajuusalueille. Ilmaiset, kaupallisessa käytössä olevat taajuudet ovat pääasiassa 2,4–2,5 GHz alueella (European Communications Office 2020). Tämä on kuitenkin huono alue langattoman mittausjärjestelmän antennille, sillä UHF alueen taajuuden amplitudi voi olla jopa 12,5 cm, kun laitteiden antennit ovat mikrometrin kokoisia. Antennin tehokkuus heikkenee sitä mukaa, mitä suurempi amplitudin ja antennin kokojen ero on. (Karl and Willig 2005, s. 87)

3.3.2 Siirtoyhteyskerros ja MAC-protokolla

Energiatehokkuuden kannalta tärkeimmässä roolissa on siirtoyhteyskerros, ja etenkin sen sisältämä Medium Access Control (MAC) -protokolla (Sohdraby et al. 2007, s. 143). MAC-protokollan valinnalla on suurin vaikutus langattoman mittausjärjestelmän suorituskykyyn. Se vaikuttaa järjestelmän viiveeseen, suoritustehoon, robustisuuteen, skaalautuvuuteen ja stabiliteettiin, sekä toteuttaa oikeudenmukaisuutta jakamalla kaistaa muiden solmujen kanssa. (Sohdraby et al. 2007, s. 145–148)

MAC-protokollan toiminta vaikuttaa erittäin paljon langattoman tiedonsiirtojärjestelmän energiatehokkuuteen. Energian kulutukseen vaikuttavat lähteet voidaan jakaa Sohdrabyn (2007, s. 147–148) mukaan viiteen kategoriaan:

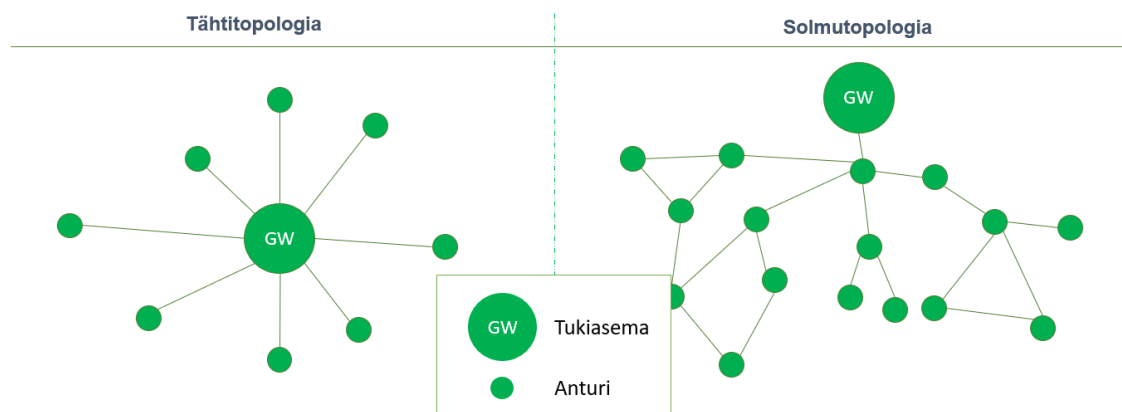
1. Liikenteen törmäys: Kun kaksi solmua yrittävät viestittää yhtä aikaa.
2. Turha kuuntelu: Kun solmu yrittää kuunnella viestiä, jota ei tule.
3. Ohikuuleminen: Solmu vastaanottaa lähetyksen, joka ei ole tarkoitettu sille.
4. Ohjaavien pakettien määrä: Ohjaavien pakettien määrä verrattuna sisältönä kulkeviin paketteihin.
5. Toimintamoodien turha vaihtelu: Vaihtelu lepo- ja aktiivimoodien välillä kuluttaa virtaa.

Yksi suurimmista tekijöistä energian suurelle kulutukselle on turha kuuntelu. Tätä hallitaan MAC-kerroksessa optimoimalla matala pulssisuhde. Pulssisuhde kuvaa anturin radiotaajuuden kuuntelun ja nukkumisen sykliä. (Sohdraby et al. 2007, s. 168)

3.3.3 Verkkokerros ja topologiat

Järjestelmän topologiaa hallitaan verkkokerroksesta (Karl and Willig 2005, s. 163–164). Erilaisia tiedonsiirtotopologioita on tunnistettu kahdeksan kappaletta: pisteestä-pisteeseen, väylä, sarja, tähti, rengas, solmu, puu, hybridi (Bicsi 2002). Langattomat mittausjärjestelmät voidaan kuitenkin lähtökohtaisesti jakaa Kuvan 13 mukaisesti kahteen pääkategoriaan (Sohdraby et al. 2007, s. 7):

1. Tähtitopologiaan perustuvat mittausjärjestelmät, kuten mobiiliverkko, Wi-Fi, LoRa, Sigfox ja Bluetooth -yhteydet. Nämä ovat tyypillisesti joko pitkän kantaman tai suuren kaistanleveyden omaavia järjestelmiä.
2. Solmutopologiaan perustuvat mittausjärjestelmät, kuten Zigbee, Bluetooth mesh, Thread ja Wirepas -yhteydet. Nämä ovat tyypillisesti lyhyen kantaman ja pienen kaistanleveyden järjestelmiä.



Kuva 13. Tähti- ja solmutopologiat

Kuten kuvasta voidaan nähdä, tähtitopologisessa verkossa langattomat mittalaitteet ovat yhden siirtymän päässä maaverkkoon ohjaavasta tukiasemasta. Tähtitopologiaa hyödyntävien verkkojen kantama voi olla jopa satoja metrejä, mutta ne eivät tue toisten antureiden mittauksien edelleen lähetystä. (Sohdraby et al. 2007, s. 39)

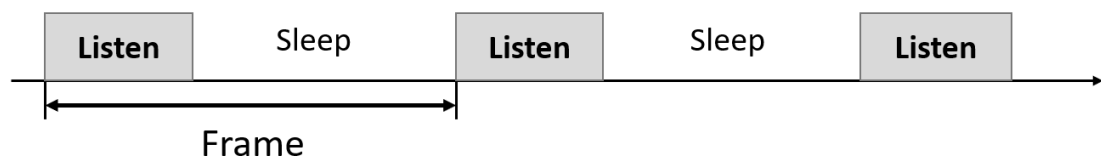
Solmutopologialla taas tarkoitetaan arkkitehtuuria, jossa langattomat mittalaitteet voivat olla useamman siirtymän päässä tukiasemasta. Järjestelmän sensorit toimivat samalla mittalaitteena ja reitittimenä, joten niille riittää tyypillisesti lyhyemmän kantaman lähetyskäytävät. (Sohdraby et al. 2007, s.40)

3.4 Tiedonsiirtoprotokollan suorituskyky

Langattoman tiedonsiirron suorituskyky koostuu useasta eri tekijästä. Yleisimmät suorituskykyyn liitettävät termit ovat tiedonsiirtojärjestelmän pulssisuhde, kaistanleveys, läpisyöttö ja tiedonsiirron viive. Näistä termeistä pulssisuhde, kaistanleveys ja läpisyöttö liittyvät vahvasti tiedonsiirtoprotokollan konfigurointiin, kun taas tiedonsiirron viive on näiden tekijöiden kokonaisvaikutuksesta syntyvä negatiivinen tulos.

3.4.1 Pulssisuhde

Pulssisuhteella viitataan siihen, miten kauan mittauslaite kuuntelee haluttua radiotaajuusalueutta suhteessa sen lepoaikaan. Kuuntelu-aika ja lepoaika muodostavat mittauslaitteelle toimintajakson (Kuva 14), joka toimii solmujen välisen kommunikaation perustana. (Sohdraby et al. 2007, s. 168)



Kuva 14. Kuunteluajan ja nukkuma-ajan muodostama jakso (Sohdraby et al. 2007, s. 168)

Pulssisuhteella on suuri merkitys mittausjärjestelmän suorituskykyyn, viiveisiin ja laadukkuuteen. Matala pulssisuhde mahdollistaa huomattavasti matalamman energian kulutuksen, kun mittauslaitteen ei tarvitse tuhlaa energiaa turhalle kuuntelulle. Toisaalta matala pulssisuhde voi vaikeuttaa kommunikointia, pienentää mittausjärjestelmän kaistaa, sekä luoda viivettä, mikäli ympärillä olevien mittauslaitteiden kommunikointia ei ole optimoitu mittauslaitteen pulssisuhteen kanssa yhteensopivaksi. (Sohdraby et al. 2007, s. 143–148, 168–173)

3.4.2 Kaistanleveys

Kaistanleveydellä viitataan taajuuksien alueeseen, jossa tiedonsiirto tapahtuu. Se on niiden taajuuksien summa, joissa moduloituja signaaleja voidaan lähettää ja vastaanottaa. Kaistanleveys (B) voidaan laskea fyysisessä kerroksessa valitun taajuusalueen korkeimman (f_2) ja matalimman taajuuden (f_1) erotuksena.

$$B = f_2 - f_1$$

Kaistanleveys ilmoitetaan hertseissä (Hz), joka ei ota kantaa siihen millä taajuusalueella tiedonsiirto tapahtuu. Mitä enemmän tiedonsiirtoprotokollalla on taajuuksia käytettävissä, sitä enemmän se pystyy välittämään paketteja. Se vaikuttaa siten verkon kapasiteettiin ja sitä kautta läpisyötön suuruuteen.

3.4.3 Läpisyöttö

Läpisyötöllä tarkoitetaan sitä maksimikapasiteettia, millä tiedonsiirtojärjestelmä pystyy siirtämään hyötykuormaa eteenpäin. Se voidaan ilmoittaa sovelluksen mukaisesti joko viesteinä sekunnissa

(pkt/s) tai bitteinä sekunnissa (b/s). Verkossa liikkuvat viestit sisältävät hyötykuorman lisäksi muutakin dataa, mitä on havainnollistettu Taulukossa 4. (Sohdraby et al. 2007, s. 146)

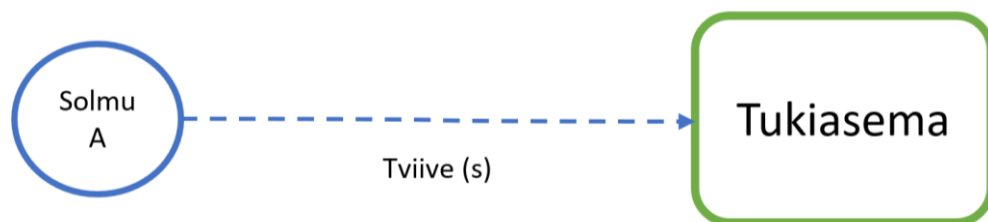
Taulukko 4. Viestin kehyksen formaatti (Sohdraby et al. 2007, s. 184)

MAC ylätunniste		MAC hyötykuorma		MAC alatunniste	
Kehyksen ohjaus	Datatyypin numero	Osoitteen tiedot	Data	Kehyksen tarkistus sekvenssi	
2 tavua	1 tavu	4–20 tavua	Määriteltävissä	2 tavua	

Verkossa liikkuvassa viestissä on hyötykuorman lisäksi MAC ylä- ja alatunniste, joilla varmistetaan, että hyötykuorma saapuu eheänä oikeassa muodossa oikeaan osoitteeseen. Tästä, sekä keskustelevien linkkien välisen yhteyden ylläpitämiseen tarvittavan viestiliikenteen takia, läpisyöttö on aina aitoa kapasiteettia matalampi. (Sohdraby et al. 2007, s. 178–192)

3.4.4 Tiedonsiirron viive ja verkon syntymiseen kuluva aika

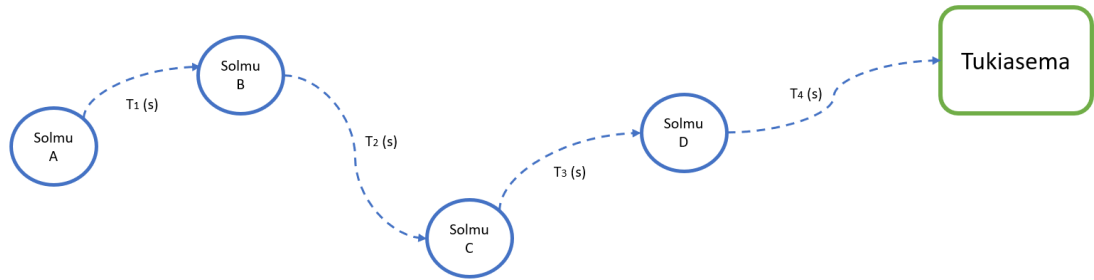
Viive (Kuva 15) voidaan määrittellä sinä aikana, joka kestää, kun tietty signaali tai datapaketti kulkee tietoverkossa lähtöpaikasta määränpäähän (Butterfield & Szymanski, 2018). Toisaalta se voidaan myös määrittellä sinä aikana, jonka datapaketti viettää MAC-protokollassa, ennen kuin se on siirretty onnistuneesti. (Sohdraby et al. 2007, s. 145)



Kuva 15. Solmun ja tukiaseman välinen viive

Viive voi syntyä useasta eri tekijästä, kuten etäisyyden, kuormituksen tai MAC protokollan takia. Etäisyys luo aina viivettä, joka riippuu käytettävästä mediaanista (kuten valonnopeus). Kuormitus taas aiheuttaa viivettä, mikäli tietoverkon kuormitus ylittää sille asetetun läpisyötön raja-arvon. Raja-arvon ylittyessä liikkuvat paketit joutuvat odottamaan vuoroaan, mikä luo viivettä tiedonsiirtoon. Kolmas tekijä on MAC-protokolla, joka määrittelee milloin mikäkin solmu saa kommunikoida sanomansa ulos. Mikäli säännöt kommunikoinnille on toteutettu protokollassa heikosti, voi kaistan vapautumisessa – ja siten tiedon lähetyksessä – kestää pitkäkin aika.

Viivettä synnyttää myös lähtöpisteen ja määränpään väliset välitapit. Mikäli välitapilla tieto vastaanotetaan, tallennetaan ja lähetetään edelleen, syntyy välitettävän viestin prosessoinnista viive, joka voi kertaantua jokaisella välitapilla (Kuva 16).



Kuva 16. Viive solmuverkossa

Jos tieto lähtee esimerkiksi solmuverkossa liikkeelle Solmulta A, kulkee se useamman solmun kautta päästäkseen tukiasemalle. Solmuverkossa viive ei ole täten suoraan riippuvainen solmun fyysisestä etäisyydestä tukiasemaan, vaan viive kasvaa välissä olevien siirtymien mukaan. Koska paketti joutuu kulkemaan koko tiedonsiirtoketjun läpi, on sen kokonaisviive koko ketjun viiveiden ($T_1 - T_4$) summa.

$$Viive_A(s) = T_1 + T_2 + T_3 + T_4$$

Vastaava viive esiintyy tiedonsiirron suunnasta riippumatta. Mikäli tukiasemalta halutaan lähettää tietoa solmulle, syntyy siinä yhtä suuri viive. Tämä on otettava huomioon esimerkiksi verkon muodostuksen yhteydessä, jonka nopeus riippuu siitä, kuinka nopeasti tieto tukiasemasta tavoittaa kaukaisimman solmun. Tämä voidaan ilmaista esimerkiksi verkon muodostumiseen kuluvan ajan suureena.

Verkon muodostumiseen kulunut aika kertoo, kuinka nopeasti verkossa kiinni olevat solmut voivat alkaa lähettämään dataa tukiasemalle. Verkon muodostuksesta vastaa tiedonsiirtojärjestelmän MAC-protokollan mukainen pulssisuhde, mikä määrittelee sen, kuinka nopeasti viesti tukiaseman liittymisestä verkkoon saadaan kaikille solmuille. Verkon muodostumiseen kuluva aika on viiveen tavoin riippuvainen myös solmun etäisyydestä tukiasemasta.

4. TAVARALIIKENTEEEN HAASTEET MITTAUSJÄRJESTELMÄLLE

Mittausjärjestelmää suunniteltaessa on otettava huomioon mittauksen ympäristö ja mittausjärjestelmän käyttötarkoitus. Haasteet tavarajunan jarrujen toiminnan varmistamiseen soveltuvalla mittausjärjestelmälle voidaan jakaa kolmeen kategoriaan (Bernal 2019a).

1. Tavaravaunujen pitkä elinkaari ja vanha teknologia
2. Tavaravaunun operatiivinen toimintaympäristö
3. Haastavat ympäristöolosuhteet

Nämä kokonaisuudet vaikuttavat mittausjärjestelmän komponenttivalintoihin, mittapisteiden sijainteihin, tiedonsiirron toteutukseen ja järjestelmän prosessien suunnitteluun. Tässä kappaleessa tutustutaan näihin haasteisiin, jotka toimivat myöhemmin mittausjärjestelmän suunnittelun pohjana.

4.1 Tavaravaunujen pitkä elinkaari ja vanha teknologia

Suurimpana haasteena mittausjärjestelmän toteutukselle voidaan nähdä tavaravaunujen pitkä elinkaari ja sen takia olemassa oleva tavaravaunujen toimilaitteiden vanha teknologia. Tavaravaunun keskimääräinen elinikä on noin 40 vuotta ja kalustosta vain 2–3 % päivitetään vuosittain (European Commission 2020). Tämä tarkoittaa sitä, että kaikkien uusien innovaatioiden on oltava yhteensopivia 40 vuotta vanhojen vaunujen kanssa.

Hidas uusiutuminen on johtanut esimerkiksi siihen, että tavaravaunuissa ei ole vielääkään sähkönsiirtoa tai datayhteyttä veturilta vaunulle. Kuten kappaleessa 2 esiteltiin, toimii tavarajunissa tiedon- ja energian siirtomediaanina jarrujohdon paineilma. Se tosin mahdollistaa vain hyvin rajoituneen tiedonsiirron veturilta vaunulle, eikä sitä voida hyödyntää helposti energianlähteenä sähköisille laitteille.

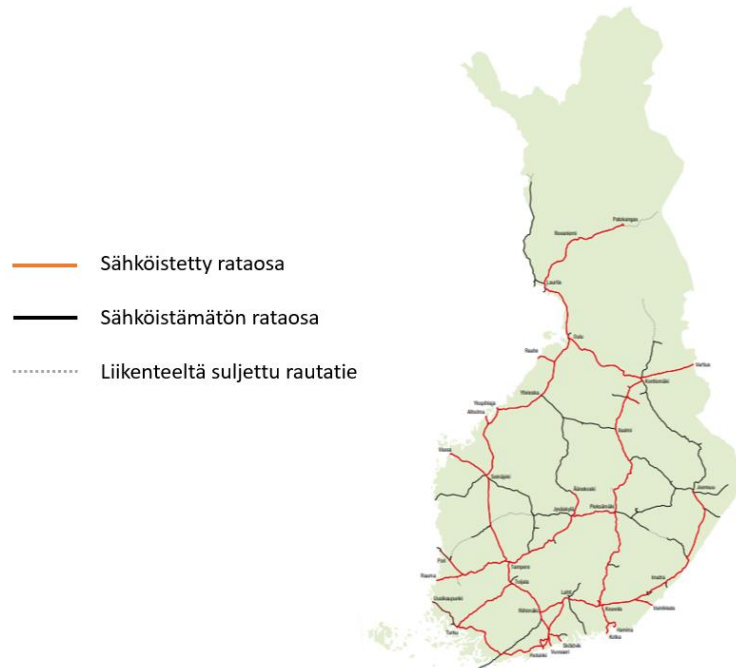
Tämä teknologiavelka, jos sitä sellaiseksi voidaan kutsua, asettaa siten mittausjärjestelmälle vaatimuksia. Vaunujen ollessa eri vuosikymmeniltä, on mittausjärjestelmän toimittava toimilaitteiden eri sukupolvien kanssa. Sähkön ja tiedonsiirron puuttuminen luo siten vaatimuksen mittauslaittekohtaiselle energianlähteelle ja langattomalle tiedonsiirtojärjestelmälle.

4.2 Tavaravaunun operatiivinen toimintaympäristö

Tavaravaunun operatiivinen toimintaympäristö kattaa tavaraliikenteen toiminta-alueen ja liikenteenohjauksen järjestelmän. Mittausjärjestelmän tiedonsiirron suunnittelua vaikeuttaa tavaraliikenteen syrjäiset toiminta-alueet ja sähköistämättömät rataosuudet, sekä tavaraliikenteen runkokuljetusjärjestelmä ja vaunujen yksilöity operointi.

4.2.1 Syrjäiset toiminta-alueet ja sähköistämättömät rata-alueet

Tavaraliikenteen operatiivinen toiminta-alue kattaa lähes koko Suomen. Näin laaja toiminta-alue kattaa sähköistämättömiä alueita ja katvealueita. Muun muassa Digiratahankkeen yhtenä johtopäätöksenä oli, että kaupallisten verkkojen peitto ei riitä rautateiden tietoliikenteen tarpeisiin, sillä katvealueita on liikaa (Pylvänäinen et al. 2020). Kuva 17 esittää Suomen rataverkkoa, josta sähköistämätöntä rataa on lähes 2600 km (Väylävirasto 2018).



Kuva 17. Valtion rataverkko (Väylävirasto 2018)

Tavaraliikenteen operoidessa koko rataverkolla, on sähköttömyys ja radalla sijaitsevien lastauslevikkeiden syrjäisyys otettava huomioon mittausjärjestelmää suunniteltaessa. Mittausjärjestelmän tulisi siten toimia ympäristössä, jossa rataanfraan asennettavat tukiasemat eivät ole vaihtoehto, eikä laadukasta mobiiliverkkoa välttämättä ole tarjolla. Kaupallisten verkkojen lisäksi tarjolla on matalan energian langattomia verkkoja, kuten Sigfox ja LoraWAN, mutta niiden kattavuus on vielä heikompi kuin yleisillä mobiiliverkoilla. (Elisa 2020, Telia 2020, Connected Finland 2020, Digita 2020)

4.2.2 Tavaravaunujen operointi ja runkokuljetusjärjestelmä

Mittausjärjestelmää suunniteltaessa on myös huomioitava se, kuinka tavaravaunuja operoidaan yksilöinä. Tavaraliikenne jakautuu kahteen toimintamalliin, jotka ovat asiakasjunat ja runkokuljetusjärjestelmä. Siinä, missä asiakasjunat palvelevat asiakkaita viemällä kuljetuksen suoraan lähtöpisteestä määränpäähän, koostuu runkokuljetusjärjestelmä runko-, jakelu- ja keräilyliikennejunnista (VR Transpoint 2020). Kuvassa 18 on havainnollistettu runkokuljetusjärjestelmää kahden vaunun A ja B osalta Suomen rataverkolla.



Kuva 18. Tavaravaunujen runkokuljetusjärjestelmä (Mukaiu, Väylävirasto 2018)

Kuvassa ensimmäiset etapit, Seinäjoki ja Äänekoski, kuvastavat runkokuljetusjärjestelmän ke-räily -osuutta. Matka Tampereelta Riihimäelle kuvastaa runkojunaliikennettä, ja jatko Riihimäeltä Vuosaareen ja Kotkaan kuvastaa jakeluliikennettä.

Tavaraliikenteen operointi runkokuljetusjärjestelmänä johtaa mittausjärjestelmän kannalta siihen, että junakokoonpanot eivät pysy aina identtisinä lähtöpaikasta määränpäähän. Vaunuilla voi olla toisistaan poikkeavat lähtö- ja päätepisteet (Kuvassa A ja B), mutta osan matkasta vaunut saat-tavat kulkea yhdessä (Kuvassa AB). Tämä johtaa siihen, että mittausjärjestelmän on pystyttävä mukautumaan muuttuviin vaunu- ja junakokoonpanoihin, ja toimimaan maantieteellisestä sijain-nista riippumatta.

4.3 Haastavat ympäristöolosuhteet

Mittausjärjestelmän on toimittava luotettavasti haastavista ympäristöolosuhteista huolimatta (Ber-nal 2019a). Rataverkolla nämä voivat vaihdella huomattavasti, sillä Suomessa on mitattu lämpö-tiloja välillä $-51,5^{\circ}\text{C}$ – $37,2^{\circ}\text{C}$ (Ilmatieteenlaitos 2020). Mittauslaitteiden, ja etenkin niiden energi-anlähteiden, tulisi toimia pakkasessa, sateessa, loskassa ja kesähelteessä.

Suomen helteet eivät ole suuri ongelma, mutta kelin siirtyessä pakkasen puolelle, alkaa synty-mään mittalaitteita potentiaalisesti häiritseviä tekijöitä. Alhaiset lämpötilat aiheuttavat rajoitteita esimerkiksi soveltuvan akun valinnalle, sillä tietyt akkumateriaalit eivät yksinkertaisesti toimi kyl-missä olosuhteissa (Crompton 2000, s. 80–88). Alhainen lämpötila on otettava huomioon myös mittausperiaatteita suunniteltaessa, sillä lämpötilavaihtelut vaikuttavat materiaalien kimmomo-duuliin (Rahemi & Li 2015) ja aiheuttavat metallin lämpölaajenemista (Drebushchak 2020).

Matala lämpötila vaikuttaa materiaalien fyysisten ominaisuuksien lisäksi myös mittauslaitteita ympäröiviin olosuhteisiin. Pakkasen mukana tulee yleensä lunta ja jäätä, jotka voivat estää mittauslaitteita toimimasta halutusti. Mittauslaitteet voivat esimerkiksi jäätyä tai optiset sensorit huurtua.

Kun lämpötilat vuorostaan kohoavat, alkavat tavaravaunuihin muodostunut lumi ja jää sulamaan. Tämä johtaa jäälohkareiden tippumiseen radalle, joka voi kolhia suojaamattomia laitteita. Lisäksi lumen sulaessa, mittauslaitteet joutuvat sietämään hyvin kosteita olosuhteita (Ludvigsen & Klæboe 2014). Laitteiden olisi siis oltava kokonaisuudessaan pakkasen-, veden-, kosteuden-, ja iskunkestäviä.

5. MITTAUSJÄRJESTELMÄN SUUNNITTELU

Mittausjärjestelmä suunniteltiin sen mittaustavoitteiden, eli jarrujen toiminnan varmistamisen, edellytyksien mukaan. Jarrujen toiminnan varmistaminen voidaan toteuttaa havaitsemalla jarrujärjestelmän normaali ja epänormaali käyttäytyminen. Tässä kappaleessa suunnitellaan ensimmäinen iteraatio jarrujen toiminnan varmistamiseen soveltuvasta mittausjärjestelmästä.

Suunnitelma rakennetaan mittausperiaatteiden ja tiedonsiirtomenetelmän pohjalta ja esitetään vaunukohtaisena arkkitehtuurina. Suunnitelma toteutettiin rautatietekniikan johtavien asiantuntijoiden kanssa käytyjen keskusteluiden ja aivoriihien pohjalta. Mittausjärjestelmän suunnittelua ohjasi sen tavoitteiden lisäksi kolme pääperiaatetta, jotka olivat kustannustehokkuus, asennuksen helppous ja yksinkertaisuus. Lisäksi suunnitelmassa huomioitiin luvussa 4 esitellyt tavaraliikenteen haasteet.

5.1 Mittausperiaatteiden valinta

Mittausjärjestelmää lähdettiin suunnittelemaan täydellisen jarrujentarkastuksen tarkistuslistan pohjalta, joka esitettiin kappaleessa 2.3.2. Junan jarrujärjestelmä voidaan todeta toimivaksi, mikäli mittauksien avulla pystytään toteamaan tarkistuslistan mukaiset kohdat:

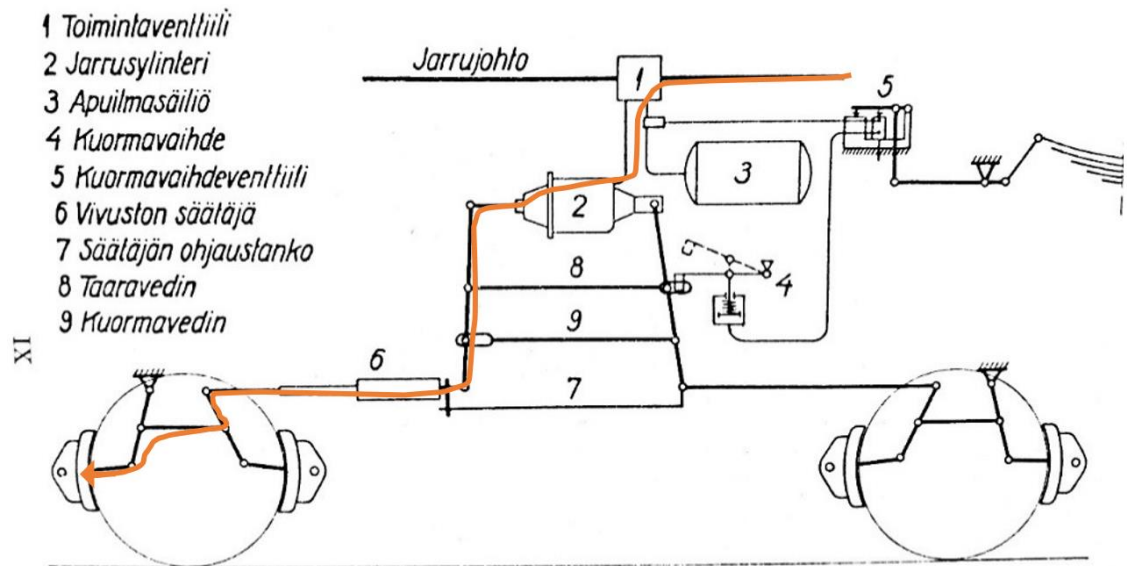
1. Jarruanturoiden kiinnittyminen ja irtoaminen
2. Ruuvijarrun asento
3. Jarruanturoiden kuluminen
4. Jarrulajiasettimen asento
5. Kuormajarruasettimen asento
6. Roikkuvien letkukytkimien ripustus ja kytkinhanojen tarkistus
7. Vuotojen havaitseminen
8. Viimeisen vaunun jarruttomuuden tarkastus
9. Vikaantuneiden jarrujen sulkeminen

Tässä kappaleessa käydään tarkistuslistan jokainen kohta läpi, ja valitaan sille sopiva mittausperiaate. Päätöksen yhteenveto on esitetty mittausarkkitehtuurin ohella kappaleessa 5.3.

5.1.1 Jarruanturoiden kiinnittyminen ja irtoaminen

Tavarajunan jarrujärjestelmän tehtävä on ohjata jarruanturan kiinnittymistä ja irtoamista. Jarrutukseen vaadittava energia tuotetaan veturissa sijaitsevalla kompressorilla, joka syötetään jarrujohdon avulla vaunujen toimilaitteille. Jarrujohdossa oleva paine toimii sekä voimansiirtona, että veturilta vaunuille toimivana kommunikointimenetelmänä.

Jarrujohdon paineen muutos ohjaa vaunun toimiventtiiliä, joka puolestaan ohjaa apuilmasäiliön avulla jarrusylinterin painetta. Jarrusylinterin mäntä muuntaa paineen mekaaniseksi voimaksi työntymällä ulos tai vetäytymällä sisään paineen muutosten mukaan. Jarrusylinterin mäntä puolestaan on liitoksissa jarrujärjestelmän mekaaniseen vivustoon, joka taas ohjaa jarrukenkiä jarrusylinterin männän liikkeen mukaan. Jarrukengissä kiinni olevat jarruanturat toimivat viimeisenä komponenttina jarrujärjestelmän ja pyörän kehän välissä. Yksinkertaistettuna, jarrujärjestelmällä ohjataan näiden jarruanturoiden kiinnittymistä ja irrottamista pyörän kehältä. Tämä ketju on nähtävissä Kuvassa 19.



Kuva 19. Voimansiirto jarruanturalle (Mukaiilu, Valtionrautatiet 1971, s.30)

Jarruanturan kiinnittymisen ja irtoamisen manuaalinen tarkistaminen on ollut helppo keino varmistaa, että koko jarrujärjestelmä toimii. Mikäli joku osa Kuvan 19 mukaisesta jarrujärjestelmän ketjusta on rikki, näkyy se jarruanturan estyneessä liikkeessä. Tarkimman varmistuksen jarrujärjestelmän toiminnasta saisi siten mittaamalla vaunun jokaisen jarruanturan jarrutusvoimat erikseen, mutta se on erittäin kallis menetelmä mitata jarrujärjestelmän toimintaa. Tämä johtuu siitä, että uusissa tavaravaunuissa jarruanturoita voi olla jopa 16 kpl, jolloin myös mittauslaitteita tarvittaisiin tämän kohdan havaitsemiseen samaiset 16 kpl. Tästä syystä kysymykseksi nousee, mikä on riittävä luotettavuus, jolla jarrujen toiminta tulisi varmistaa. Kuinka paljon arvoa tuottaa jarrujen toiminnan mittaus jarruanturalta verrattuna mittaukseen jarrujärjestelmän muista osakokonaisuuksista. Tätä vertailua on esitelty Taulukossa 5.

Taulukko 5. Mittapisteen sijainnin merkitys häiriön havaitsemisen kannalta

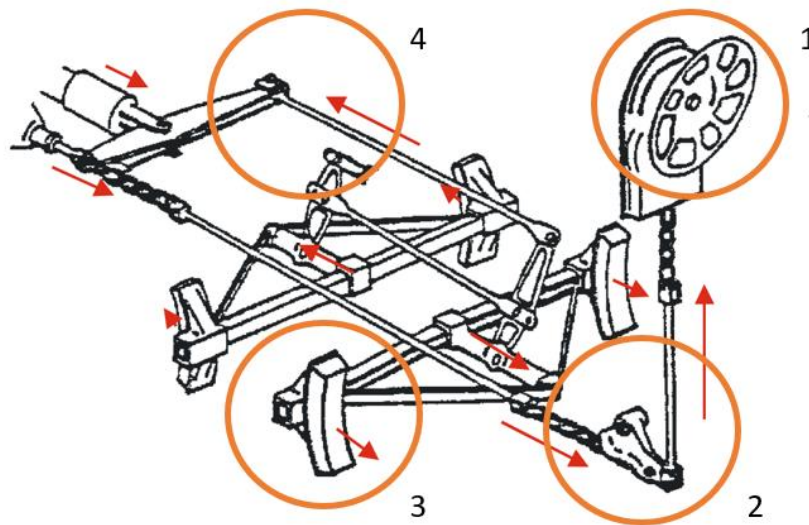
Havaittavat häiriöt	Mittaus jarruanturalta	Mittaus jarrusylinterin männän päästä	Jarrusylinterin paineen mittaus
<i>Jarrujohdon tukos (kytkinhana kiinni)</i>	Jarruantura ei kiinnity	Jarrusylinteri ei liiku	Sylinterin paine ei nouse
<i>Vaunun paineettomuus</i>	Jarruantura ei kiinnity	Jarrusylinteri ei liiku	Sylinterin paine ei nouse
<i>Vuoto</i>	Jarruvoima heikentyy	Jarrusylinterin tuot- tama voima heikkenee	Sylinterin paineen karkaus
<i>Jarrusylinterin männän nurjahdus / vään- tyminen</i>	Jarruanturan ei liiku	Jarrusylinteri ei pa- laudu	Ei
<i>Vivustonsäätäjän yli- säätö</i>	Jarruantura jumittuu kiinni	Jarrusylinterin liike- määrä muuttuu	Ei
<i>Vivustonsäätäjän ali- säätö</i>	Jarruantura ei puristu kiinni	Jarrusylinterin liike- määrä muuttuu	Ei
<i>Jarruanturan jumittu- minen pyörän kehälle</i>	Jarruanturan irrotus ei onnistu	Ei	Ei

Taulukosta 5 voidaan havaita, että jarrujärjestelmän virhetiloista suurin osa voidaan havaita jarrusylinterin männältä ja jarrusylinterin paineesta. Ainoastaan anturan lukkitumista pyörän kehälle, on vaikeaa, ellei mahdotonta havaita jarrusylinterin männän puolelta, sillä monimutkainen mekaaninen vivusto mahdollistaa anturoiden virhetilat vaikuttamatta vivuston kokonaistoimintaan. Pyörän kehälle lukkiutunut jarruantura on vakava ja yleinen tapahtuma Suomen raiteilla, joten sitä ei voida ohittaa huomioimatta.

Tästä syystä tarvitaan kompromissi, joka ottaa huomioon jarrujärjestelmän kaikki virhetilat mittamatta jokaista pyörän anturaa. Pitkän tutkinnan ja useiden aivoriihien jälkeen päädyimme ratkaisuun, jossa jarruanturoiden lukkiutuminen pyörän kehälle havaitaan sen vaikutuksesta estää pyörää pyörimästä. Mittaamalla pyörän pyörintää, pystymme varmistamaan jarrujen absoluuttisen toiminnan 16 mittalaitteen sijaan 4 mittauslaitteella. Mittaamalla pyörän pyörinnän lisäksi jarrusylinterin männän liikettä, ja jarrusylinterin painetta, saadaan tulokseksi erittäin kattava järjestelmä havaitsemaan jarrujärjestelmän normaali ja virheellinen toiminta.

5.1.2 Ruuvijarrun asento

Ruuvijarrun aseman mittaukseen on useita vaihtoehtoja. Ruuvijarrun toimintamekanismi pohjautuu mekaaniseen voimaan, joka tuotetaan pyöritettävällä kammella. Ruuvijarrun mekanismi esitetty Kuvassa 20.



Kuva 20. Vaihtoehdot ruuvijarrun asennon mittaukselle (Mukai, Wabtec Corporation 2003, s. 17)

Kuten Kuvasta voidaan nähdä, on ruuvijarru yhteydessä vaunun vivustoon ja sitä kautta jarruanturoihin. Tästä syystä ruuvijarrun asennon mittauspaiikkoja on useita ja se voidaan mitata seuraavista paikoista:

1. Kammen kierrosta / voimasta
2. Ruuvijarrun mekaanisten tankojen liikkeistä
3. Vivuston liikkeistä
4. Jarruanturan liikkeestä / voimasta

Näistä vaihtoehdoista jokainen mittausmenetelmä sopisi ruuvijarrun tilan määrittelyyn. Mitä kauemmaksi ruuvijarrun kammelta siirrytään, sitä epätarkemmaksi liikkeen tai voiman aiheuttajan määrittely menee. Lisäksi voiman mittaus vaatisi tuntoelimen asentamisen mekaanisten komponenttien väliin, joka johtaisi asentamisen vaikeutumiseen ja kustannusten kasvuun. Näistä syistä, eksplisiittisesti ruuvijarrun havaitsemiseen tarkoitettu mittauslaite olisi järkevää asentaa mitaamaan ruuvijarrun kammen liikuttaman ruuvitangon liikettä.

5.1.3 Jarruanturoiden kuluminen

Jarruanturoiden tehtävä on jarruttaa vaunua muuntamalla vaunun liike-energia lämpöenergiaksi hyödyntämällä kitkaa. Kun jarruanturaa painetaan pyörivän pyörän kehää vasten (jarrutetaan), kappaleiden välille syntyy liikettä vastustava kitkavoima. Tapahtuman aikana jarruanturan ja pyörän kehän lämpötilat nousevat, jolloin juna hidastuu. Samalla syntyy myös eroosiota, joka johtaa jarruanturan kulumiseen. Mikäli jarruantura kuluu loppuun, jäljelle jää vain jarrukenkä. Jarrukengällä jarruttamista ei haluta, sillä sen jarrutusominaisuudet ovat huonot, ja korjaus kallista. Jotta näin ei kävisi, tarkastetaan jarrujen tarkistuksessa jarruanturoiden paksuus. Mikäli jarruanturan paksuus on alle käyttörajamitan (2–3 cm), on ne vaihdettava.

Jarruanturan kulumisen mittaukseen on useita eri keinoja. Mittauksessa on kuitenkin muistettava vivuston säätäjän toiminta, joka pitää jarruanturan välyksen vakiona pyörän kehää kohden. Jarruanturan paksuus voidaan mitata muun muassa:

1. Mittaamalla jarrukengän etäisyys pyörän kehästä optisella sensorilla
2. Jarrupalan paksuuden kuvaus konenäöllä
3. Jarrupalan lämpötilan muutoksen nopeuden mittaus lämpömittarilla

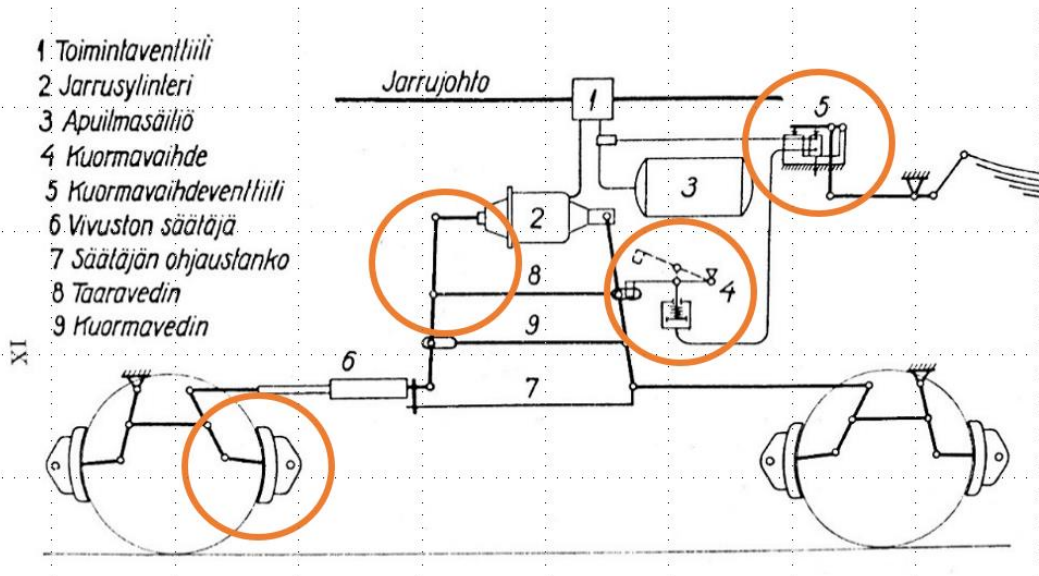
Nämä esimerkit ovat kaikki potentiaalisia menetelmiä mitata jarruanturan kulumisen, mutta mittauksessa tulee eteen yksi suuri haaste. Kuinka toteuttaa jarrupalan kulumisen mittaus kustannustehokkaasti, kun jarrupaloja on yhdessä tavaravaunussa jopa 16kpl. Koska se ei ole nykyisellä teknologialla kustannustehokasta, jouduttiin jarruanturoiden kulumisen mittauksesta luopumaan mittausjärjestelmän osalta. Sen sijaan jarrupalan käyttörajamitan havaitseminen sovittiin siirrettäväksi ulkoiselle mittausjärjestelmälle, joka hyödyntäisi esimerkiksi vaihtoehdon 2 mukaisesti konenäköä.

5.1.4 Jarrulajiasettimen asento

Kuten kappaleessa 2.1.4 esitettiin, jarrulajiasetin ohjaa jarrutusnopeutta vaikuttamalla jarrusylinterin paineen muutosnopeuteen. Tästä syystä jarrulajiasettimen asentoa voidaan mitata joko jarrusylinterin paineen nousukulmasta, tai yksinkertaisesti mittaamalla jarrulajiasettimen kulmaa. Koska mittausjärjestelmä on esikehitysvaiheessa, on jarrulajiasettimen asennon havaitseminen yksinkertaisinta toteuttaa jarrulajiasettimen asennosta. Mikäli jarrulajiasettimen asento voidaan arvioida laskennallisesti jarrusylinterin paineen noususta ja laskusta eksplisiittisesti, olisi se mahdollisesti hieman kustannustehokkaampi ja siten parempi toteutustapa.

5.1.5 Kuormajarruasettimen asento

Manuaalisesti ohjattavaa kuormajarruasetinta ei ole enää nykyaikaisissa vaunuissa. Jarrujärjestelmän jarrutusvoimaa säätää sen sijaan Kuvassa 21 esitetty kuormavaiheventtiili (5) ja kuormavaihe (4). Kuormavaiheventtiili mittaa vaunun lastin painoa paineilman avulla, ja ohjaa sen mukaan kuormavaihdetta.



Kuva 21. Vaihtoehtoisia sijainteja kuormavaihteen toiminnan mittaukselle (Mukailtu, Valtionrautatiet 1971, s.30)

Kuormavaihteen toiminta mahdollistaa vivuston suuremman liikemäärän, jolloin jarrutusvoima vipuvoimavaikutuksen takia kasvaa. Kuormavaihdetta on siksi mahdollista mitata useasta Kuvassa 21 esitetystä kohdasta. Nämä ovat

1. Kuormajarruventtiilin (5) paineesta
2. Kuormavaihteen karan (4) liikkeestä
3. Jarrusylinterin männän (2) liikemäärästä
4. Jarruanturaan kohdistuvan voiman kasvusta.

Kuormajarruventtiilin paineen mittaaminen on haastavaa, sillä venttiileissä ei ole valmiita mittauspisteitä. Jarruanturaan kohdistuva voima taas vaatisi useita mittausrakenteita tehden siitä kustannustehottoman. Hyviksi vaihtoehtoisiksi koettiin sekä kuormavaihteen karan liikkeen mittaaminen, sekä jarrusylinterin männän liikemäärän muutoksen havaitseminen. Koska kuormavaihteen kara on asennusteknisesti hankalassa paikassa, päädyttiin mittaamaan kuormavaihte jarrusylinterin männän liikemäärästä.

5.1.6 Roikkuvien letkukytkimien ripustus ja kytkinhanan tarkistus

Letkukytkin on tavaravaunujen jarrujohdot yhdistävä liitin. Kytkinhana on taas jarrujohdossa sijaitseva palloventtiili, jolla voidaan estää paineilman karkaaminen avoimesta letkukytkimestä. Jotta junan jarrujärjestelmä toimisi oikein, on vaunujen väliset letkukytkimet oltava yhdistettynä ja kytkinhanat auki. Poikkeuksen aiheuttaa junayksikön viimeinen vaunu, jonka letkukytkin on vapaana ja letkukytkin tulisi olla suljettuna. Koska roikkuva letkukytkin voi rikkoa radalla sijaitsevia junan kulunvalvontaan liittyviä komponentteja, tulee se ripustaa lepopidikkeeseensä.

Kytkinhanan tila voidaan tunnistaa asentamalla paineanturi jokaiseen vaunuun joko jarrujohtoon tai jarrusylinteriin. Mikäli jostain syystä jarrujohtoon tai jarrusylinterille ei synny painetta, johtuu se joko suuresta vuodosta tai letkukytkimen virhetilasta. Sen sijaan letkukytkimen roikunta voidaan havaita usealla eri tavalla. Muutamia vaihtoehtoja ovat:

1. Kytkimen asennon seurauksen kulma-anturilla
2. Lepopidikkeeseen asennettava magneettinen kytkin
3. Letkukytkimen kuvaus konenäöllä

Koska vaunut voivat olla junayksikössä kummin päin tahansa, olisi vaunun molempien päiden kytkimet instrumentoitava. Tämä tarkoittaisi 40 vaunua pitkässä junassa 80 letkukytkimen mitausta, jotta viimeisen vaunun letkukytkimen roikunta voitaisiin havaita. Kokonaisuutena ajatus on erittäin kustannustehoton ja siten letkukytkimien osalta päädyttiin esittämään niiden roikunnan havaitsemista ulkopuoliselle järjestelmälle. Vaihtoehtona voisi olla jarruanturoiden kulumisen mittauksenkin ehdotettu ulkoinen konenäköjärjestelmä.

5.1.7 Vuotojen havaitseminen

Tavarajunan jarrujärjestelmä on mitoitettu niin, että sen paineilmajärjestelmä kestää suuriakin vuotoja. Vuotojen realisoitumista hallitaan tiiveystestillä, jossa jarrujärjestelmän täytön jälkeen mitataan paineen putoamista. Tämän lisäksi tarkastaja havainnoi jarrujen tarkastuksen yhteydessä vuotoja korvakuulolla, ja arvioi sen voimakkuudesta vuotojen suuruutta.

Koska vuoto voi tapahtua missä junayksikön osiossa vain, on sen havaitseminen haastavaa anturilla. Jotta voimme valita oikean mittausmetodin, on ongelma ratkaistava tapahtuman sijainnin sijaan sen vaikutuksesta.

Riippuen sijainnista jarrujärjestelmässä, vuoto voi aiheuttaa toisen kahdesta häiriötilasta. Mikäli vuoto sijaitsee jarrujohdossa, voi se aiheuttaa paikallisen tai koko junan kattavan jarrujohdon paineen alenemisen. Tämä voi johtaa joko jarrutukseen, tai jarrujärjestelmän heikkoon lataukseen ja siten heikkoon jarrutusvoimaan. Mikäli taas vuoto sijaitsee vaunussa apuilmasäiliössä tai jarrusylinterissä, johtaa se heikkoon jarrutukseen ja jarrutusvoiman nopeaan tippumiseen.

Vuotojen havaitseminen onnistuu siten parhaiten mittaamalla jarrujohdon ja jarrusylinterin paineita, koska jokainen näistä tilanteista tuottaa jarrusylinterille epänormaalia käyttäytymistä. Koska jarrusylinterillä on valmiiksi paineen mittaukselle mittauspiste, on se helppo valinta.

5.1.8 Viimeisen vaunun jarruttomuus

Jarruttomuudella tarkoitetaan rautatiemaailmassa vaunun jarrujärjestelmän paineettomuutta. Vaunu tehdään jarruttomaksi kytkimellä, joka erottaa vaunun jarruventtiilin jarrujohdosta. Kytke-
misen yhteydessä vaunun apuilmasäiliö tyhjenetään paineesta erillisellä päästöventtiilillä. Koska vaunun jarruttomuus tarkoittaa sitä, että vaunun jarrut on eristetty muusta jarrujärjestelmästä, on se havaittavissa vertaamalla vaunun jarrupaineen reagoimattomuutta jarrujohdon jarrutuskäskyyn. Tästä syystä mittausperiaatteiksi sopisivat joko apuilmasäiliön tai jarrusylinterin paineen

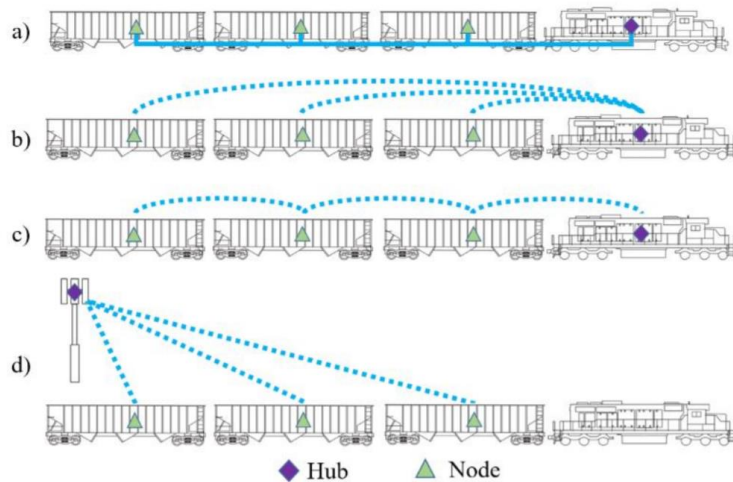
mittaus. Koska jarrusylinteristä löytyy valmiiksi mittauspiste paineen mittausta varten, on se jälleen helppo valinta.

5.1.9 Vikaantuneiden jarrujen sulkeminen

Vikaantuneiden jarrujen sulkeminen vaatisi mittausjärjestelmän sijaan ohjausjärjestelmän. Vaikka samaa tiedonsiirtojärjestelmää voitaisiin käyttää vaunun jarrujärjestelmän poistamiseen käytöstä, on se mittausjärjestelmän määritelmän ulkopuolella. Tästä syystä vikaantuneiden jarrujen sulkeminen hyväksytään kuljettajan tehtäväksi.

5.2 Tiedonsiirtomenetelmän valinta

Mittauslaitteiden tulee olla edullisia, luotettavia, huoltovapaita ja helppoja asentaa, jotta mittausjärjestelmä olisi toteuttamiskelpoinen ja kustannustehokas (Bernal 2019b). Bernalin (2019a) mukaan tavarajunan mittausjärjestelmien tiedonsiirto voidaan toteuttaa 4 eri tavalla. Mittausjärjestelmien periaatteet on esitetty Kuvassa 22.



Kuva 22. Tiedonsiirron toteutus tavarajunassa (Bernal 2019b)

Kuvan ratkaisut esittävät itseasiassa erittäin yleisiä tiedonsiirtojärjestelmiä. Kohta a) esittää väylätiedonsiirtoa, kohta b) esittää langatonta lähiverkkoa, kohta c) esittää solmuverkkoa ja kohta d) esittää valtakunnallista GSM-verkkoa. Nämä arkkitehtuurit ovat kaikki valideja vaihtoehtoja tavaraliikenteen tiedonsiirtomenetelmäksi, mutta niitä hyödyntävillä protokollilla on selkeitä eroavuuksia toisiinsa nähden, jotka on otettava huomioon mittausjärjestelmän tiedonsiirtoa suunniteltaessa. Tästä syystä tavarajunan mittausjärjestelmäksi soveltuvimman tiedonsiirtomenetelmän valinta vaatii menetelmien kattavan arvioinnin ja vertailun. Arviointi toteutetaan pisteyttämällä eri tiedonsiirtomenetelmäehdokkaat valittujen kriteerien pohjalta. Tässä kappaleessa esitetään vertailuun valittavat tiedonsiirto-protokollat, pisteytyksen periaatteet ja viimeisenä pisteytyksen tulokset.

5.2.1 Pisteytykseen valitut tiedonsiirtoprotokollat

Tiedonsiirtoprotokollia on useita ja jokaisella niistä on eroavat ominaisuudet. Tavarajunan tiedonsiirtoprotokollaksi sopii näennäisesti kaikki protokollavaihtoehdot, mutta mikä näistä sopii parhaiten, saadaan selville vain vertailemalla protokollia keskenään. Tästä syystä pisteytykseen on valittu laaja kattaus yleisiä tiedonsiirtoprotokollia. Pisteytykseen valikoitujen tiedonsiirtoprotokollien valintaan vaikutti vaihtoehtojen yleisyys Suomessa ja tarjolla olevat ratkaisutoimittajien vaihtoehdot. Mittausjärjestelmän kannalta olennaisia ominaisuuksia ovat energian kulutus, läpisyöttö, kantama ja taajuusalue. Vaihtoehdot ja niiden pääpiirteiset ominaisuudet on listattu Taulukkoon 6.

Taulukko 6. Pisteytettävät tiedonsiirtoprotokollat (Mahmoud & Mohamad 2016, Sohdraby et al. s.105, 2007, Le Trung 2014, Wirepas 2020)

Kriteeri	Väylä	4G	Wi-Fi	Ble	Sigfox	Lora-WAN	Zigbee	Wirepas
Toteutustapa (Kuva 22)	a)	d)	b)	b)	d)	d)	c)	c)
Energian kulutus (mW)	-	Korkea	Korkea	Matala	Erittäin matala	Erittäin matala	Erittäin matala	Erittäin matala
Läpisyöttö	10Gbs	1 Gb/s	54 Mb/s	0,27 Mb/s	100b/s	5468 b/s	250 Kb/s	250 Kb/s
Kantama	-	1000 km	35–115 m	30–100 m	6 km	5–15 km	10–100 m	10–100 m
Taajuusalue	-	1800/2600 MHz	2,4-5GHz	2,4GHz	868 MHz	433/868 MHz	2,4GHz	2,4GHz

Kuten Taulukosta 6 voidaan nähdä, tiedonsiirtoprotokollilla on eroavaisuuksia. Jokaiselle tiedonsiirtoprotokollalle on myös esitetty sen toteutustapa Kuvan 22 mukaan, jotta pisteytyksen kattavuus voidaan havainnollistaa. Toteutusmalleista on valittu useita eri tiedonsiirtoprotokollia, kuten 4G, Wi-Fi, Ble (Bluetooth Low Energy), Sigfox, LoraWAN (Long Range Wide Area Network), Zigbee ja Wirepas. Toteutusmallia a) esittämään on nimetty yksinkertaisesti "Väylä", sillä tämän taustatutkimuksen kannalta väylän protokollalla ei ole merkitystä.

Tiedonsiirtoprotokollien ominaisuudet ovat kaikki säädettävissä suuntaan tai toiseen käyttötapaan mukaan, joten taulukossa annetut arvot ovat vain suuntaa antavia. Arvoilla on tosin lähtökohtaisesti korrelaatioita keskenään, joten kantaman tai läpisyötön kasvatus johtaa yleensä myös energian kulutuksen kasvuun ja toisinpäin. Tästä syystä taulukkoon on listattu yleisiä arvoja, jotka ovat löytyneet kirjallisuudesta, protokollatoimittajien julkaisuissa ja olemassa olevista käytätapauksista. Arvojen yksinkertaistus on tärkeää pisteytyksen helpottamiseksi.

5.2.2 Pisteytyksen periaatteet

Kaikkien ominaisuuksien osalta koettiin yksinkertaiseksi antaa pisteitä 1–3, niin että mittausjärjestelmän tarpeiden mukaan huonosti soveltuvalla tuloksella sai yhden (1) pisteen ja mittausjärjestelmän tarpeisiin hyvin soveltuvalla tuloksella sai kolme (3) pistettä. Pisteytyksen periaatteiksi valittiin yhdistelmä ominaisuuksia, jotka koostuvat tiedonsiirron suorituskyvyn ominaisuuksista, tavaraliikenteen aiheuttamista haasteista ja yleisistä liiketoiminnallisista tarpeista. Nämä ovat energian kulutus, läpisyöttö, mukautuvuus, hinta, kantama ja tuotetuki.

Energian kulutus koettiin erityisen tärkeäksi ominaisuudeksi, koska kuten kappaleessa 4 esiteltiin, on mittauslaitteilla oltava oma energianlähde ja sen on kestävä pitkään. Akunvaihtosyklin on oltava vähintään 2 vuotta, sillä akun vaihto ei saa aiheuttaa ylimääräisiä huoltokäyntejä. Toisin sanoen, mitä pienempi energian kulutus, sitä pidempi akunvaihtosykli, ja sitä enemmän pisteitä. Koska tiedonsiirtoteknologian energian kulutusta voidaan muokata erilaisilla konfiguroinneilla, kuten läpisyöttöä rajoittamalla ja muokkaamalla laitteiden lepo- ja kuuntelusyhtä, on energian kulutus määritelty teknologioittain kirjallisuuskatsauksen pohjalta karkeasti kolmeen kastiin yleisen näkemyksen mukaan. Pisteytys toteutettiin energian kulutuksen osalta niin, että korkean energian kulutuksen teknologiat saivat 1 pisteen, matalan energian kulutuksen teknologiat 2 pistettä ja erityäin matalan energian kulutuksen teknologiat 3 pistettä.

Läpisyöttö mahdollistaa tai rajoittaa mittausjärjestelmän toimintaa. Suuri läpisyöttö mahdollistaa näytteenottotaajuuksien noston, jolloin laitteita voidaan analysoida tarkemmin. Läpisyöttöllä on myös suora korrelaatio viiveisiin, kun viestit voivat liikkua alku- ja määränpään välillä vapaita kanavia pitkin. Tavaravaunulle suunniteltu mittausjärjestelmä toimii parhaiten suurella läpisyöttöllä, mutta jarrujärjestelmän hitaiden liikkeiden ja tapahtumien takia myös pienempi läpisyöttö riittää. Näistä syistä korkea Mb/s-Gb/s läpisyöttö saa 3 pistettä, Kb/s-Mb/s läpisyöttö saa 2 pistettä ja ~b/s-kb/s saa 1 pisteen.

Muuttuviin olosuhteisiin *mukautuva* tiedonsiirtoprotokolla on tärkeä ominaisuus mittausjärjestelmän skaalautuvuuden osalta. Mittausjärjestelmän pitäisi pystyä luomaan luotettavasti mittausjärjestelmän vaatimat verkot ilman ihmisen jatkuvaa konfigurointia välissä. Mittausjärjestelmän on oltava skaalautuva niin, että tukiasemien ja antureiden lisääminen, poistaminen ja muuttaminen ei aiheuta verkon muodostamiseen ongelmia. Koska tämän arviointiin ei ole numeerista arvoa, toteutetaan pisteytys kvalitatiivisesti oman ymmärryksen pohjalta.

Koska mittausjärjestelmää suunnitellaan operatiiviseksi järjestelmäksi, on sen tuotannollinen versio oltava mahdollisimman kustannustehokas. Tästä syystä *hint*a on ominaisuus, jolle on annettava painoarvo tiedonsiirtoprotokollan valinnassa. Hinta ohjaa tiedonsiirtoprotokollan valintaa kohti liiketoiminnallisesti kannattavinta vaihtoehtoa. Tiedonsiirtoprotokollat on siten pisteytetty niin, että kallis järjestelmä saa 1 pisteen ja edullinen järjestelmä 3 pistettä.

Kantama on tärkeä ja pisteytettävä tiedonsiirtoprotokollan ominaisuus, sillä junat ovat pitkiä. Mittausjärjestelmän tiedonsiirron pitää pystyä palvelemaan kaikkia junayksikössä olevia vaunuja riippumatta siitä, onko vaunuja 5, 20 tai 40. Suomen rataverkolla pisimmät junat ovat 40 vaunun mittaisia, eli noin 1200 metriä pitkiä. Mikäli mittausjärjestelmää halutaan myydä myös Suomen rajojen ulkopuolelle, pitää tiedonsiirtomenetelmän pystyä palvelemaan jopa 80 vaunun (2400 m) mittaista tavarajunaa. Tästä syystä, tiedonsiirtoprotokollan kantamasta annettiin 2 pistettä, mikäli protokollan kantama riittää 1200 m palvelemiseen ja 3 pistettä, mikäli sen kantama ylettää 2400 m junan palvelemiseen. Mikäli kantaman toteutti valtakunnallinen verkko, vähennettiin 3 pisteestä pisteitä kattavuuden ja katvealueiden mukaan.

Tuotetuki koettiin tärkeäksi osaksi tuotekehitystä, sillä teknologian implementointi kokonaisjärjestelmään vaatii aina paljon keskusteluita ja kompromisseja toteutuksen osalta. Kun järjestelmää

suunnitellaan valtakunnalliseksi, mobiiliksi ja haastavissa olosuhteissa toimivaksi mittausjärjestelmäksi, on tuotetuki erittäin arvokasta tuotekehitykselle. Tuotetukea pisteytettiin laadullisesti sen mukaan, kuinka paljon tuotetukea saadaan Suomesta ja suomen kielellä, sekä sen mukaan missä maassa protokollaa kehitetään. Tästä syystä 2 pistettä saivat ne, joilla kattavaa tuotetukea tarjottiin suomen kielellä, ja parhaat pisteet annettiin niille tiedonsiirtoprotokollille, joita kehitetään tämän lisäksi Suomessa.

5.2.3 Pisteytyksen tulokset

Pisteytykseen valittiin tiedonsiirtoprotokollat 4G, Wi-Fi, Ble, Sigfox, LoraWan, Zigbee ja Wirepas, sekä väylätiedonsiirtoa kuvaava ”Väylä”. Protokollia pisteytettiin valittujen kriteereiden mukaan, jotka olivat energian kulutus, läpisyöttö, mukautuvuus, hinta, kantama ja tuotetuki. Pisteytys toteutettiin skaalalla 1–3, jossa 1 tarkoitti mittausjärjestelmän kannalta epäsuotuisaa tulosta ja 3 suotuisaa tulosta. Pisteytys ja tulokset on esitetty Taulukossa 7.

Taulukko 7. Tiedonsiirtomenetelmien pisteytys (1 = huono, 3= hyvä)

Kriteeri	Väylä	4G	Wi-Fi	Ble	Sigfox	LoraWAN	Zigbee	Wirepas
Energian kulutus	3	1	1	2	3	3	3	3
Läpisyöttö	3	3	3	3	1	1	2	2
Mukautuvuus	1	3	2	1	3	3	2	3
Hinta	1	1	2	3	3	3	3	3
Kantama	1	3	2	1	1	3	3	3
Tuotetuki	2	3	1	2	2	2	1	3
Yhteispisteet	11	14	12	13	13	15	14	17

Kuten taulukosta voidaan nähdä, oli mittausjärjestelmälle soveltuvien tiedonsiirtoprotokollien pisteytys erittäin tasaista. Huonoiten sijoittui väylätiedonsiirto ja Wi-Fi, kun taas parhaiten pärjäsivät LoraWAN ja Wirepas. Wirepas voitti LoraWAN:in niukasti paremmalla läpisyötöllä ja tuotetuella. Wirepas sai lähes täydet pisteet 17/18, ja ainoaksi puutteeksi koettiin hieman toiveita matalampi läpisyöttö.

Pisteytyksen pohjalta voittajaksi suoriutui Wirepas, joka on selvä kompromissi 4G verkon aiheuttaman liian suuren energian kulutuksen ja matalan energian tähtiverkkoihin kuuluvien LoraWAN- ja Sigfox -protokollien matalan pulssisuhteen väliltä. Solmuverkkojen yleisintä standardia Zigbeeta vasten Wirepas on lähtökohtaisesti mukautuvampi, kun verkkoon ei tarvitse suunnitella erillistä hierarkiaa. Lisäksi suomalaisena tiedonsiirtoprotokollana Wirepas -protokolla nauttii kiistattoman hyvää tuotetukea, kun tukea on tarjolla niin lukuisilta suomalaisilta järjestelmätoimittajilta kuin itse protokollan kehittäjältä.

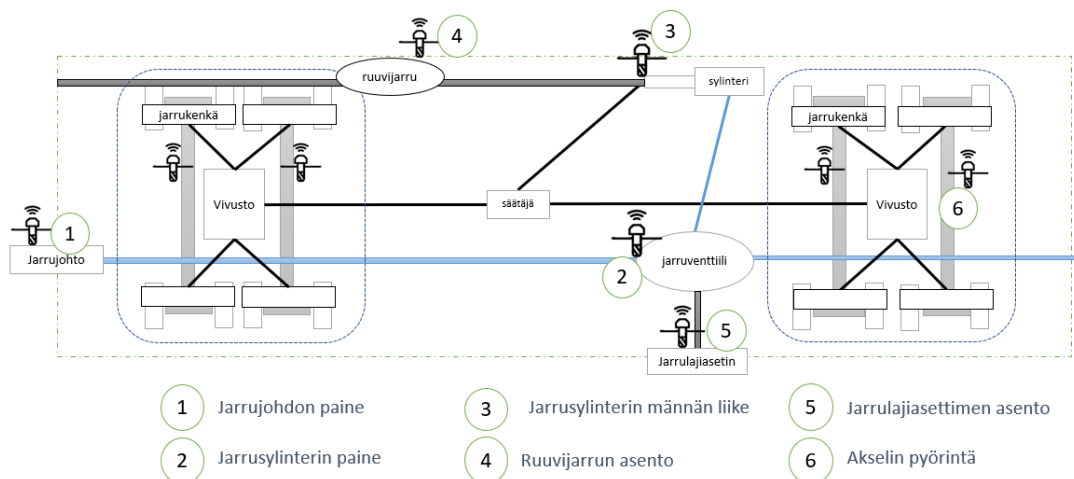
Wirepas tarjoaa skaalautuvuutta, mukautuvuutta, riittävää läpisyöttöä ja matalaa energian kulutusta. Wirepasin mukaan protokolla tukee jopa 4 miljardin laitteen kokoista verkkoa ja jopa 99,99 % luotettavuutta siirrettävien pakettien eheydelle. Läpisyötöksi Wirepas lupaa 1,5–150 pakettia

sekunnissa, joka on muokattavissa käyttötapauksen mukaan pulssisuhteen asetuksista. Matalla 1,5 pkt/s asetuksella Wirepas lupaa 4000mAh akulle eliniäksi jopa 5 vuotta, mikä tarjoaa tilaa muutoksille ja optimoinnille. (Wirepas 2020)

5.3 Mittausjärjestelmän arkkitehtuuri

Mittausjärjestelmä suunniteltiin kappaleessa 5.1 läpikäytyjen mittausperiaatteiden ja kappaleessa 5.2 valitun Wirepas -tiedonsiirtoprotokollan rajoitteiden mukaisesti. Suunnitteluun osallistui allekirjoittaneen lisäksi VR Fleetcaren jarrujärjestelmien johtava asiantuntija ja Wirepas -tiedonsiirto-protokollan päälle mittausjärjestelmiä toteuttavan järjestelmätoimittajan asiantuntijat.

Mittausjärjestelmän tavoitteena oli havaita kappaleessa 2.3.2 esitellyn täydellisen jarrujen tarkastuksen mukaiset jarrujärjestelmän tapahtumat mittauksen vasteista. Lisäksi järjestelmä suunniteltiin niin, että useat eri tapahtumat voidaan havaita kahden sensorin vasteesta. Esimerkiksi jarrutapahtuman käynnistys voidaan havaita jarrusylinterin liikkeestä, sekä jarrusylinterin paineen noususta. Suunniteltu mittausarkkitehtuuri (Kuva 23) sisälsi yhteensä 9 anturia.



Kuva 23. Vaunun mitattavat toimilaitteet, anturit ja niiden asennuspaikat vaunussa

Kuten kuvasta voidaan nähdä, tavaravaunusta päädyttiin mittaamaan jarrujohdon paine, jarrusylinterin paine, jarrusylinterin männän liike, ruuvijarrun asento, jarrulajiasettimen asento ja jokaisen akselin pyörintä. Kuten 5.1 kappaleessa ilmeni, voidaan jokainen seurattava tapahtuma mitata useasta paikasta usealla eri tavalla. Kuvan arkkitehtuuri on siten vasta 1. iteraatio mittausjärjestelmälle, jonka toimivuus validoidaan tämän tutkimuksen kokeiden avulla. Taulukkoon 8 on koostettu jarrujärjestelmään asennettavan mittausjärjestelmän mittauslaitteiden yksilöidyt mitaustavoitteet.

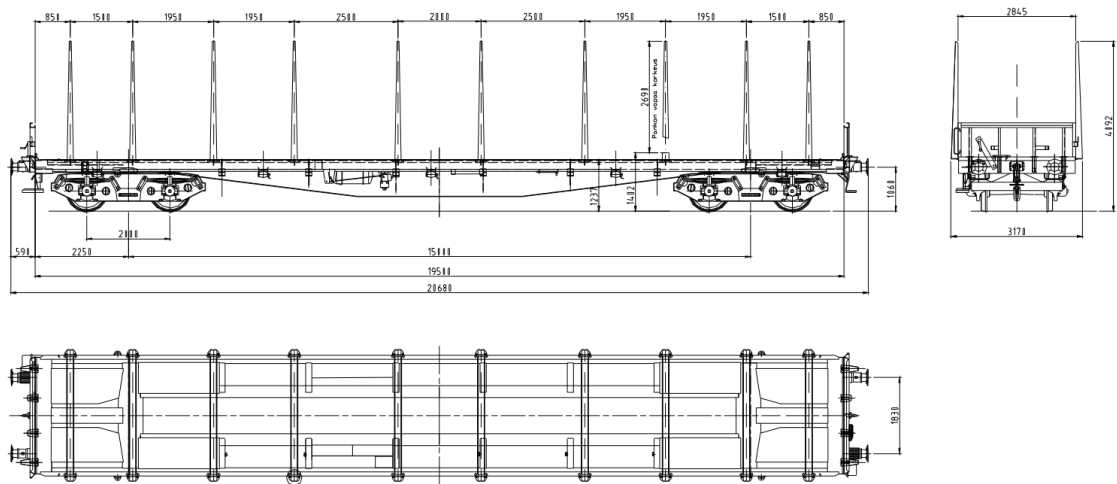
Taulukko 8. Jarrujärjestelmän toimilaitteiden toiminnan mittausperiaatteet

Mitattava toimilaite	Mittauslaitteen funktio	Mittausperiaate	Mittaustavoite
Jarrujohto	Jarrujohdon paineen mitaus	Paineen muutos	Havaita jarrutus, vuotoja ja kytkinhanojen asento
Jarrusylinteri	Jarrusylinterin paineen mitaus	Paineen muutos	Havaita jarrutus, vaunukohtaiset vuodot, vaunun jarruttomuus, toimiventtiilin normaali toiminta ja mahdollisesti jarrulajiasettimen asento.
Jarrusylinterin mäntä	Jarrusylinterin männän liikkeen mittaus	Liikematka / Kulman muutos	Havaita jarruanturoiden kiinnittyminen ja irtoaminen, sekä havaita sylinterin, vivuston ja kuormajarruvaihteen normaali toiminta.
Ruuvijarru	Ruuvijarrun mekaanisen liikkeen mitaus	Liikematka / Kulman muutos	Havaita ruuvijarrun asento (päällä – pois päältä)
Jarrulajiasetin	Jarrulajiasettimen asennon mittaus	Kulman muutos	Havaita, että jarrulajiasetin on oikeassa asennossa (M/T)
Pyöräkerta	Akselin pyörinnän mittaus	Kulman muutos	Varmistaa, että jarruanturat irtoavat pyörän kehältä

6. MITTAUSJÄRJESTELMÄN PROTOTYYPPI JA KOEJÄRJESTELYT

Mittausjärjestelmän toiminnallisuuden tutkimista varten toteutettiin prototyyppi, jonka testausta varten järjestettiin kokeet Pieksämäellä VR Fleetcaren konepajan ratapihalla. Mittausjärjestelmän toiminnallisuutta ja tiedonsiirron luotettavuutta haluttiin testata neljässä osakokonaisuudessa. Nämä olivat toimilaittekohtaiset mittaukset, paikallaan tehtävät jarrujärjestelmäkokeet, liikkeessä tehtävät kokeet ja vikatilannesimulaatiot.

Kokeissa oli käytössä viisi kappaletta juuri huollettuja VR Transpointin raakapuun kuljetukseen tarkoitettuja SPS-vaunuja (Kuva 24), joiden jarrujärjestelmää ohjattiin peräkärryssä kulkevalla jarrujen koettelulaitteella ja liikkeellä tehtävissä testeissä Valmetin Tve4 – 510 vaihtotyöveturilla.



Kuva 24. SPS-vaunu (VR Group 2010)

SPS-vaunut, jotka ovat 4-akselisia, 20 tonnin akselipainolle mitoitettuja S- luokan avotavaravaunuja. Jarrujärjestelmänä SPS-vaunussa on kappaleessa 2 esitelty Knorr-Bremsen KE-GP, jonka sylinterinä toimii Knorr BG14” ja säätäjänä DRV2A-600. Vaunu on tarkoitettu ensisijaisesti raakapuun kuljetukseen ja sillä voi kuljettaa maksimissaan 57 800 kg puutavaraa. Suurin sallittu nopeus vaunulla on 100 km/h. (VR Group 2010)

Tässä kappaleessa esitellään mittausjärjestelmän prototyypin arkkitehtuuri, koerungon toimilaitteiden anturointi ja kokeissa suoritettavat kokeet ja niiden tavoitteet.

6.1 Prototyypin esittely ja arkkitehtuuri

Mittausjärjestelmän toiminnallisuuden arviointia varten suunniteltiin mittausjärjestelmän prototyyppi, jonka arkkitehtuuri on esitelty Taulukossa 9. Prototyyppi suunniteltiin viiden vaunun mittaiselle koerungolle. Mittausjärjestelmän toimintaa päätettiin testata yhteensä 14 mittauslaitteen ko-

koisella järjestelmällä, jotka hyödynsivät valittua Wirepas-solmuverkkoprotokollaa. Mittauslaitteista 6 oli paineantureita ja 8 kulma-antureita. Koska mittauslaitteita ei riittänyt kaikkiin vaunuihin, sijoitettiin ne niin, että jokaista toimilaitetyyppiä mitattaisiin vähintään kahdesta eri vaunusta. Asettelulla haluttiin myös varmistaa, että solmuverkon solmut saavat yhteyden toisiinsa.

Taulukko 9. Mittauslaitteiden alkuperäinen arkkitehtuuri kokeiden aikana

Vaunun numero	1	2	3	4	5
<i>Jarrusylinterin paine</i>	x	x	x	x	x
<i>Jarrusylinterin männän liike</i>	x	x			
<i>Ruuvijarrun asento</i>		x	x		
<i>Jarrulajiasettimen asento</i>			x	x	
<i>Akselin pyörintä (ja kiihtyvyys)</i>					xx
<i>Muut</i>		JJ MSR165	JJ paine		

Lähtökohtaisesti jokaisesta vaunusta mitattiin jarrusylinterin painetta, jonka lisäksi muita antureita oli jaettu kaikille vaunuille 1–2. Näiden lisäksi vaunujen 2 ja 3 päätyihin asennettiin jarrujohdon painetta mittaavat JJ MSR165 referenssianturi ja Wirepas solmuverkoissa toimiva paineanturi (JJ paine).

Kokeiden aikana mittausjärjestelmän arkkitehtuuria muutettiin, jotta solmuverkon sopeutumista muuttuvaan junakokoonpanoon voitiin testata. Arkkitehtuuri muuttui niin, että suurin osa mittauslaitteista sijaitsi rungon perällä. Uusi arkkitehtuuri on esitetty Taulukossa 10.

Taulukko 10. Mittauslaitteiden muutettu arkkitehtuuri kokeiden aikana (liikkeessä)

Vaunun numero	1	2	3	4	5
Jarrusylinterin paine	x	x	x	x	x
Jarrusylinterin männän liike	x	x			
Ruuvijarrun asento	x	x			
Jarrulajiasettimen asento	x		x		
Akselin pyörintä (ja kiihtyvyys)	x	x			
Muut		JJ MSR165	JJ paine	reitittävä x2	reitittävä x2

Kuten Taulukosta 10 voidaan havaita, lisättiin vaunuihin 4 ja 5 myös reitittävät anturit. Reitittävillä antureilla varmistettiin yhteys veturilta koerungon viimeiselle vaunulle (Vaunu 1). Muuttuneet topologiat on esitetty kappaleessa 8.2.1 (Kuvat 52 ja 53).

6.2 Mittalaitteiston esittely

Mittausjärjestelmän mittausperiaatteina käytettiin paineen-, kulman-, ja kiihtyvyyden mittausta. Näitä mittauksia varten hankittiin Wirepas -protokollaa hyödyntävät langattomat anturit. Anturit sisälsivät energianlähteen (akun), mikrokontrollerin, muistin, tuntoelimen, lähettimen ja antennin.

Kaikki anturilukemat, raportoitiin pilveen JSON-tiedostona (Liite 1), joka sisälsi mitattavan suureen lisäksi tukiaseman tunnusteen, mittauksen aikaleiman, mittauksen tyyppin tunnusteen, konfiguraatiotyyppin tunnusteen, ja anturin oman tunnusteen. Lisäksi pilveen tallennettavaan JSON-tiedostoon tallennettiin pilveen saapumisen aikaleima.

6.2.1 Paineen mittauslaite

Painemittauksia varten järjestelmätoimittajan mittalaitteet räätälöitiin niin, että siihen saatiin kytkettyä analoginen paineanturi. Paineetta mittaavaksi tuntoelimeksi valittiin FST800-211A paineanturit, jotka perustuvat venymäliuskan resistiivisyyden muutoksen mittaamiseen. Anturin painealue oli 0–10 bar ja tarkkuus 0,5 %. (Hunan Firstrate Sensor Co 2020)

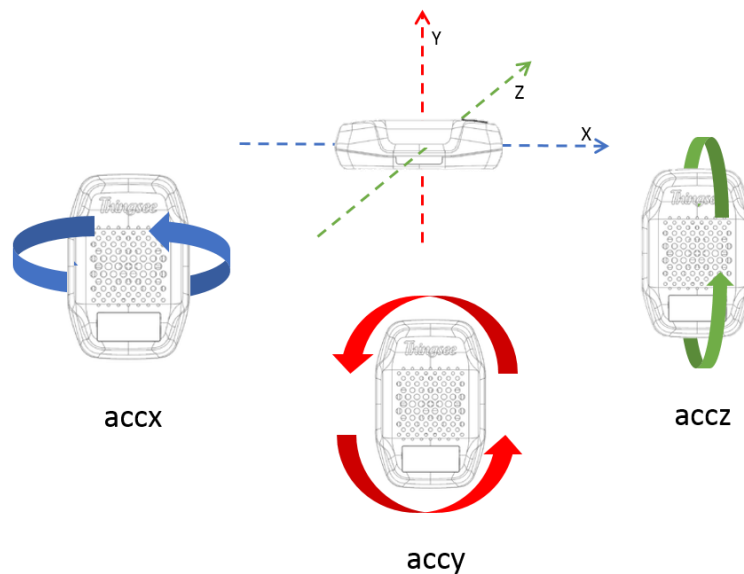
Painemittarit kalibroitiin toimistohuoneessa ilman erikoisjärjestelyitä, joten sisäänrakennettua epätarkkuutta syntyi. Paikan päällä oli myös käytössä referenssianturina MSR165 -ilmanpaineanturi, jonka tarkkuus on 2,5mbar (MSR Electronics GmbH 2010). Referenssianturin avulla tarkistimme, että käytetyt paineanturit olivat riittävän tarkkoja.

Paineen mittauslaitteille määriteltiin mittaus- ja lepoasetukset. Mittauslaite määriteltiin siirtymään mittausasetukseen, kun tuntoelin havaitsee selkeän muutoksen paineessa. Mittausasetuksessa paineanturi alkaa mittaamaan ja lähettämään mitatun arvon sekunnin välein solmuverkkoon. 1Hz

mittaustaajuus ja pulssisuhde todettiin riittäväksi, koska jarrulajiasettimen tilan mukaan jarrutuksen paine nousee nopeimmillaankin 3–5 sekunnissa. Kun paineen muutos pysähtyy, siirtyy mittauslaite lepoasetukseen, jossa sen mittaustaajuus on edelleen 1Hz, mutta pulssisuhde muuttuu huomattavasti pienemmäksi (1pkt/5min)

6.2.2 Kulman mittauslaite

Kulman mittaukseen valittiin Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) -teknologiaan perustuva orientaatioanturi, joka seuraa laitteen asentoa kolmen akselin suhteen. Tämä mahdollisti kulma-anturin helpon asennuksen mittauskohteisiin, kun mittauslaitteen asennolla ei ollut merkitystä. Mittauslaitteen pyörintäsuunnat on esitelty Kuvassa 25.



Kuva 25. Kulma-anturin pyörintä akselit xyz -koordinaatistossa (mukaillen, Haltian 2020)

Anturit lähettävät pilveen JSON-tiedoston, jossa kunkin anturin x-, y- ja z-positio on annettu numeerisesti skaalalla -1000...+1000. Anturit laskevat tämän acc arvon sinin radiaaneista:

$$acc_{xyz} = 1000 * \sin(xyz)$$

Kokeessa hyödynnetään kahta eri konfiguraatiota kulman laskemiseen riippuen siitä, mitaako se kytkimen kulmaa vai pyörän pyörintää. Annetun tehtävän mukaan antureille on annettu hieman eroavat lepoasetukset ja mittausasetukset.

Kulmaa mittaavien antureiden (sylinterin mäntä, ruuvijarru ja jarrulajiasetin) lepoasetus ohjaa anturia niin, että se laskee keskiarvon kuudelle viiden sekunnin välein otetulle mittaustapahtumalle kuluneen 30 sekunnin ajalta. Anturi ei lähetä tietoa pilveen, mikäli tulos on identtinen edellisen keskiarvon kanssa. Mikäli anturi kuitenkin huomaa kulman muuttuvan, se siirtyy mittaustilaan, jolloin se alkaa lähettämään mittaustietoja sekunnin välein pilveen. Kun kaksi edellistä mittausta ovat jälleen identtiset, siirtyy anturi takaisin lepoasetukseen.

Pyörien pyörintää mittaaville antureille annettiin tehostetut asetukset tavoitteena kuvata akselin pyörintää tarkemmin. Pyörintää mittaavien antureiden lepoasetus säädettiin laskemaan keskiarvo

25 kappaleelle 50Hz taajuudella mitatulle mittaustapahtumalle aina 0,5 sekunnin ajalta. Kun anturi havaitsee keskiarvomuutoksen, se siirtyy lepoasetuksesta mittausasetukseen ja aloittaa kulmatiedon lähettämisen solmuverkon kautta pilveen sille asetetun pulssisuhteen mukaan. Mittauspäivien aikana tätä pulssisuhdetta muutettiin useamman kerran riippuen siitä, millainen koe oli menossa. Pulssisuhdetta vaihdeltiin pyörän pyörintää mittaavilla antureilla 0,1Hz- 1Hz välillä.

6.2.3 Kiihtyvyyden mittauslaite

Kulma-anturit mahdollistivat myös kiihtyvyyksien mittauksen G-voimissa. Tätä ominaisuutta hyödynnettiin käytännössä vain akseleiden pyörintää mittaavien antureiden osalta. Mittaus tapahtui samoilla säädöillä ja pulssisuhteilla, kuin pyörivän pyörän kulman mittaus lepo- ja mittausasetukseen. Mittatuloksena saatiin anturin kokemat iskut eritasoisia g-voimia mittaavina histogrammeina (0–6), ja niiden kumulatiivisena summana, jota kutsutaan kiihtyvyyksien energiatasoksi. Esimerkki kiihtyvyyden tuottamasta JSON-tiedostosta löytyy Liitteestä 1.

6.3 Toimilaitteiden anturointi

Mittausjärjestelmän prototyyppi asennettiin koerunkoon ensimmäisenä koepäivänä Pieksämäen ratapihalla, jolloin koerungon jarrutoimilaitteet varustettiin mittauslaitteilla suunnitelman mukaisesti. Mittauslaitteita asennettiin jarrujohtoon, kaikkiin jarrusylintereihin, kahteen jarrusylinterin mäntään, kahteen jarrulajiasettimeen, kahteen ruuvijarruun ja kahteen pyöräkertaan. Tässä kappaleessa esitellään jokainen asennussijainti erikseen.

6.3.1 Jarrujohdon anturointi

Jarrujohdon mittaus toteutettiin sekä referenssimittauslaitteella MSR165, että yhdellä solmuverkossa toimivalla FST800-211A paineanturilla. Ne asennettiin jarrujohtoliittimeen asennettavaan lisäosaan Kuvan 26 mukaisesti. Koska kierteet eivät täsmänneet anturin kierteitä, väliin asennettiin adapteriholkki. Referenssianturin mittausdata tallennettiin sd-kortille, kun taas langatonta järjestelmää osana olleen mittauslaitteen mittausdata siirtyi pilveen solmuverkkoa pitkin. Referenssianturi asetettiin jarrujohtoon siksi, että sen avulla pystyttiin todentamaan järjestelmän mittausten oikea-aikaisuus ja luotettavuus. Referenssimittarin mittaussykli ja tarkkuus oli myös huomattavasti parempi kuin solmuverkossa toimivat FST800-211A paineantureilla.



Kuva 26. Jarrujohdon mittaus toteutettiin letkuliittimestä

Jarrujohdon paineen mittauksella pystytään käytännössä havaitsemaan kuljettajan tekemät jarrutukset jarrujärjestelmään ja mikäli antureita on useita, voidaan niiden avulla myös arvioida vuotojen sijaintia ja määrää junayksikössä. Lisäksi vertaamalla jarrujohdon painetta jarrusylinterien vasteeseen, on mahdollista havaita virheellisesti käyttäytyvät jarruventtiilit.

6.3.2 Jarrusylinterin paine

Samoin kuin jarrujohdon paineen mittauksessa, myös jarrusylinterin mittauksessa käytettiin myös FST800-211A anturia. Jarrusylinterin paineen mittausta varten Knorr-Bremse KE-GP venttiileissä on mittauksia varten reikä, johon mittauslaite asennettiin. Koska kierteet eivät täsmänneet, välissä oli alla olevassa Kuvassa 27 näkyvä kierreadapteri.

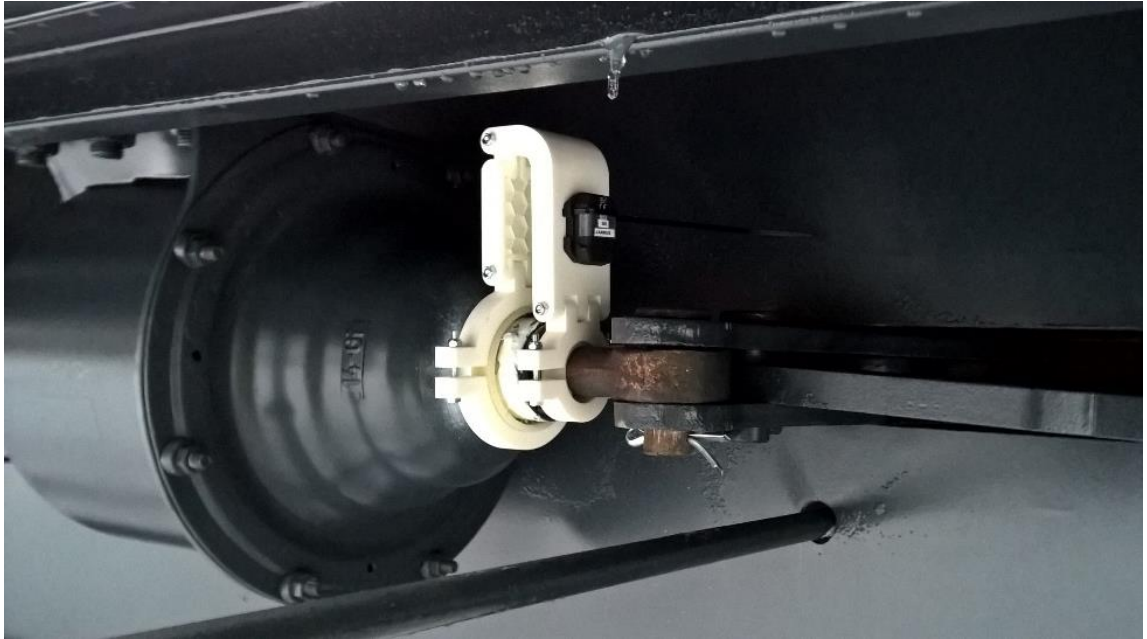


Kuva 27. Jarrusylinterin mittaus toimiventtiin lohkosta

Jarrusylinterin paineen mittaus on koko langattoman mittausjärjestelmän kannalta tärkeää, sillä siitä voidaan havaita jarrujärjestelmän toiminnan kannalta kriittiset tapahtumat. Paineen muutoksesta voidaan huomata esimerkiksi jarrutuskäskyn siirtyminen veturilta vaunulle, jarrujohdon rikkoutuminen ja vaunun jarrujen paineettomuus. Jarrusylinterin paineen nousukäyriä seuraamalla voidaan myös laskea jarrulajiasettimen asento ja arvioida venttiin kuntoa. Lisäksi jarrusylinterin paineen pysymistä seuraamalla voidaan arvioida sylinterin ja paineakun vuotoja.

6.3.3 Sylinterin männän liike

Jarrusylinterin männän liikettä mitattiin muuntamalla liike kulman muutokseksi. Jotta sylinterin männän liike saatiin mitattua kulmalla, suunniteltiin laitteen toimittajan kanssa liikkeen kulmaksi muuttava adapteri (Kuva 28), jonka toinen pää kiinnitettiin sylinterin kaulukseen ja toinen pää sylinterin männän holkkiin. Muutos haluttiin tehdä, sillä rautatieliikenteessä toimintaympäristö on haastava ja laitteiden tulisi olla kestäviä.



Kuva 28. Jarrusylinterin männän mittaus liike-kulma adapterin avulla

Kuten kuvasta voidaan havaita, muuttuu nivelen avulla mittauslaitteen kulma z-akselin suhteen riippuen männän työntymästä. Männän liikkeen mittaus on tärkeää, sillä se on suoraan verrannollinen vivuston liikkeeseen. Sylinterin männän holkki on kiinni suoraan vivuston rakenteessa, joka johtaa mekaanisen voiman vivuston säätäjän kautta jarrukengille ja edelleen jarruanturoille. Sylinterin liikkeestä voidaan todentaa, että sylinteri ja vivusto toimii oikein. Lisäksi seuraamalla männän liikematkaa, voidaan havaita vivuston säätäjän ja kuormaventtiilien oikea ja väärä toiminta.

6.3.4 Jarrulajiasettimen asento

Jarrulajiasettimen asento mitattiin myös kulma-anturilla. Mittauslaite asennettiin jarruventtiiliin kiinnittyvään jarrulajiasettimen vipuun, joka kääntyy 90 astetta M- ja T-jarrulajien välillä (Kuva 29). Tämä mahdollisti vivun asennon yksinkertaisen mittaamisen anturin kulmasta y-akselin suhteen.



Kuva 29. Jarrulajiasettimen asennon mittaus anturin kulmasta y-akselin suhteen

Jarrulajiasettimen asentoa mitattiin, ensinnäkin siksi, että sen asennon tarkastaminen on osa jarrujentarkastusta, mutta myös siksi, että se vaikuttaa jarrutusominaisuuksiin. Kuten kappaleessa 2.1.4. kerrottiin, M- ja T-asennot vaikuttavat jarrusylinterin paineen nousun nopeuteen. Jarrulajiasettimen asennolla on väliä, sillä nopea jarrutus aiheuttaa painavissa vaunuissa suuria pitkittäisiä voimia junaan. Pitkittäiset voimat voivat pahimmillaan aiheuttaa vaunun suistumisen. (Rakshit et al. 2018)

6.3.5 Ruuvijarrun asento

Ruuvijarrun asentoa mitattiin myös kulmalla y-akselin suhteen. Tätä varten mittauslaite asennettiin ruuvijarrun ja sylinterin männän holkin välissä sijaitsevaan vipuvoimaa tuottavaan niveleen. Nivelessä mittauslaitteen kulma vaihteli noin 0 ja 45 asteen välillä. Ruuvijarrun nivel ja mittauslaite on esitettyinä lepotilassaan Kuvassa 30.



Kuva 30. Ruuvijarrun mittaus

Ruuvijarrun tilaa mitattiin, sillä sen tarkastus on osa jarrujen tarkastusta, jonka lisäksi sen unohtaminen kiristettyyn tilaan on yksi yleisistä inhimillisistä virheistä vaihtotyössä. Päälle jäänyt ruuvijarru aiheuttaa liikkeellelähdön niin, että yksi pyöräkerta on lukossa. Koska tavarajunien massa ja veturin voimat ovat valtavia yhden jumissa olevan pyöräkerran aiheuttamaan kitkaan nähden, ei kuljettaja yleensä havaitse virhetilaa yksin. Päälle jäänyt ruuvijarru voi tuhota pyöräkerran ja jarrukengät ja pahimmassa tapauksessa se voi aiheuttaa teliin ja raiteiden rikkoutumisen.

6.3.6 Pyörän liike ja kiihtyvyys

Pyörän pyörimistä ja kiihtyvyyksiä mitattiin kulma-anturilla, joka mittasi kulmaa x-akselin suhteen. Pyörän pyöriessä mittauslaitteen orientaatio muuttui x-akselin suhteen (Kuva 31), ja kiihtyvyydet muuttuivat akselin pyörinnän aiheuttaman keskipakoisvoiman ja radan epätasaisuuksien mukaan.



Kuva 31. Akselin pyörinnän mittaus kulmalla anturin x-akselin suhteen

Koska jokaisen jarruanturan seuraus ei ole liiketoiminnallisesti järkevää, päädyimme varmistamaan jarrujärjestelmän absoluuttisen toimimisen mittaamalla pyörien pyörimistä. Pyörän pyörimättömyys on varma tapa havaita pyörän lukkiutuminen. Vertaamalla toimilaitteiden ja pyörän mittaustuloksia, pystytään havaitsemaan vikatiloja, kuten jarruanturan jäätyminen pyörän kehälle.

6.4 Toteutettavien kokeiden esittely

Kokeet suunniteltiin mittaustavoitteiden mukaan. Kokeissa haluttiin koetella mittaajärjestelmän kyvykkyyttä havaita jarrutoimilaitteiden liikkeitä jarrutustapahtumien yhteydessä ja löytää korrelaatio mittaustulosten ja jarrujen toiminnan varmistamiseen liittyvien määritelmien välille. Toimilaittekohtaisten mittauskokeiden lisäksi järjestelmää haluttiin koetella myös koko järjestelmän osalta. Koko jarrujärjestelmän kattavat mittauskokeet päädyttiin toteuttamaan kolmessa osassa. Nämä olivat paikallaan tehtävät kokeet, liikkeessä tehtävät kokeet, ja vikatilanteiden simulointi. Tässä kappaleessa on esitelty tärkeimmät kokeet, joiden tulokset esitellään myöhemmin kappaleessa 7. Kaikki toteutetut kokeet on esitelty tarkemmin Liitteessä 3.

6.4.1 Paikallaan tehtävät kokeet

Paikallaan tehtävien kokeiden tarkoitus on tutkia, kuinka mittaajärjestelmään suunniteltu mittaustarkkitekstuuri pystyy kuvaamaan jarrujen toimintaa. Paikallaan tehdyt kokeet on tiivistetty Taulukkoon 11.

Taulukko 11. Paikallaan toteutetut kokeet

Koetapahtuma	Mittauksen tavoite	Vaikuttavat anturit
<i>Porrasjarrutus</i>	Paineen mittauksen toiminta ja koko solmuverkon toiminnan varmistus	Kaikki paineanturit
<i>Jarrutus, kun jarrulaji M</i>	Havaita miten jarrulaji M vaikuttaa jarrusylinterin toimintaan	Jarrusylinterin paineanturi, jarrulajiasettimen kulmaanturi
<i>Jarrutus, kun jarrulaji T</i>	Havaita miten jarrulaji T vaikuttaa jarrusylinterin toimintaan	Jarrusylinterin paineanturi, jarrulajiasettimen kulmaanturi
<i>Jarrutus, kun vaunu taarassa</i>	Kuormaventtiilin tilan havaitseminen	Jarrusylinterin paineanturi, jarrusylinterin männän liikettä mittaava anturi
<i>Jarrutus, kun vaunu kuormassa</i>	Kuormaventtiilin tilan havaitseminen	Jarrusylinterin paineanturi, jarrusylinterin männän liikettä mittaava anturi

6.4.2 Liikkeessä tehtävät kokeet

Liikkeessä tehtävien kokeiden tarkoitus oli tutkia solmuverkon toimintaa kuormituksessa. Junan liikkeessa ja jarrutustilanteissa mittausarkkitehtuurin kaikki mittauslaitteet lähettävät mittausdataa kuormittaen solmuverkkoa. Liikkeessä tehtävien kokeiden tarkoitus oli tarkastella liikkeen vaikutusta solmuverkon tiedonsiirtoon, tutkia millaista kohinaa liike aiheuttaa mittauslaitteisiin, ja tarkastella kuinka hyvin pyörän akseliin asennetut anturit havaitsevat liikkeen kulma- ja kiihtyvyyssmittausten avulla. Liikkeellä tehtäviä kokeita tehtiin useita, mutta Taulukkoon 12 on tiivistetty tutkimuksen kannalta olennaiset kokeet.

Taulukko 12. Liikkeellä tehtävät kokeet

<i>Koetapahtuma</i>	<i>Tavoite</i>	<i>Vaikuttavat anturit</i>
<i>Liikkeelle lähtö 5 km/h</i>	Pyörän pyörinnän havaitseminen	Akselin kulmaa mittaavat anturit
<i>Nopea ajo 10–20 km/h</i>	Tutkia kohinan syntyä kulmaa mittaavissa antureissa	Kaikki kulmaa mittaavat anturit (pl. akselin kulma-anturit)
<i>Jarrutus liikkeessä</i>	Tutkia jarrusylinterin ja jarrumäntien vastetta liikkeessä	Jarrusylinterien painetta ja mäntien liikettä mittaavat anturit

6.4.3 Vikatilanteiden simulointi

Jarrujen toiminnan varmistamisen tehtävänä on havaita jarrujärjestelmässä tapahtuvat vikatilanteet. Vikatilanteet määriteltiin lähtökohtaisesti jarrujen tarkastuksen tavoitetilanteista poikkeavina tilanteina. Vikatilanteiden simulointia rajoitti se, että vaunuja ei haluttu särkeä. Siitä huolimatta vikatilanteita pystyttiin simuloimaan useita. Kokeissa toteutetut vikatilanteet on tiivistetty Taulukkoon 13.

Taulukko 13. Vikatilannesimulaatiot, tavoitteet ja vaikuttavat anturit

<i>Vikasimulaatio</i>	<i>Tavoite</i>	<i>Vaikuttavat anturit</i>
<i>Ruuvijarru päällä</i>	Ruuvijarrun päällä olon vaikutus muihin komponentteihin	Ruuvijarru, sylinterin männän liikettä mittaava anturi, paineanturit
<i>Paineeton vaunu</i>	Viimeisen vaunun paineettomuuden tarkastus	Sylinterinpaineanturit ja jarrujohdon paineanturi
<i>Vivustonsäätäjän vikatila</i>	Vivustonsäätäjän vikatilojen havaitseminen sylinterin männän liikkeestä	Sylinterin männän liikettä mittaava anturi
<i>Liikkeelle lähtö lukkiutuneella pyörällä</i>	Kuinka luotettavasti pyörän lukossa oleminen voidaan havaita pyörän kulmamittarista	Pyörän kulma- ja kiihtyvyyssanturit

7. MITTAUSKOKEIDEN TULOKSET

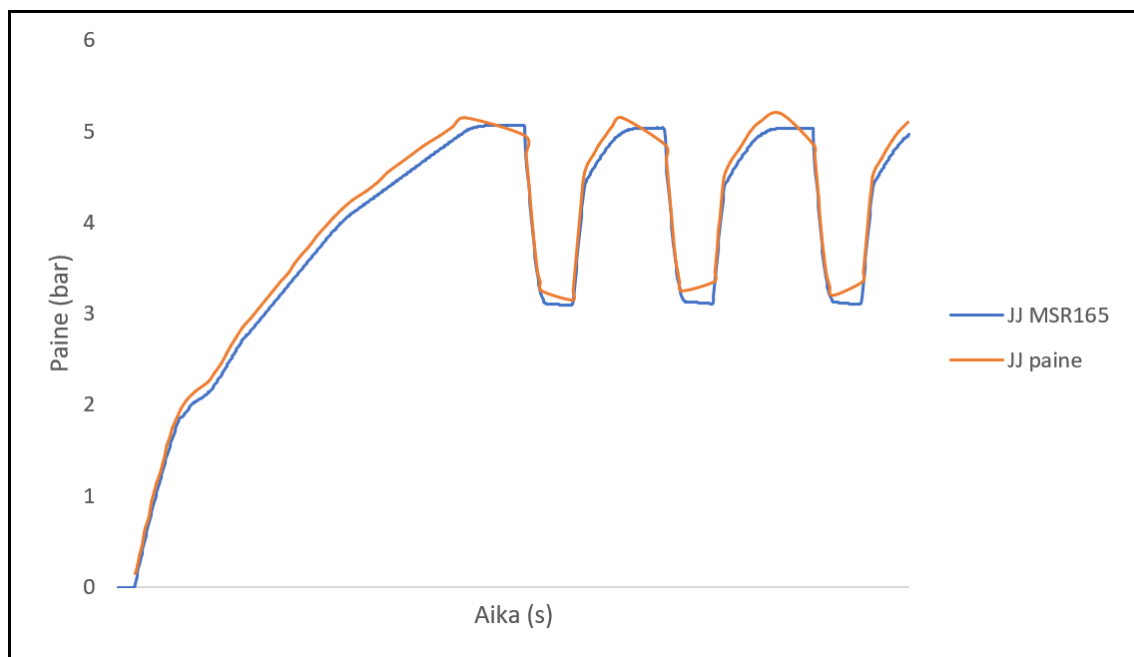
Mittauskokeet toteutettiin Pieksämäen ratapihalla kolmen päivän aikana. Kokeiden aikana asennettiin mittausjärjestelmän prototyyppi koerunkoon ja toteutettiin kappaleessa 6.4 esitellyt mittauskokeet. Tulokset koostuvat neljästä kokonaisuudesta, jotka ovat toimilaitekohtaiset mittaus tulokset, paikallaan tehdyt kokeet, liikkeessä tehdyt kokeet ja vikatilanteiden simulointi ja mittaus. Tuloksia ja tiedonsiirtoa arvioidaan kappaleessa 8.

7.1 Toimilaitekohtaiset mittaustulokset

Toimilaitekohtaisten mittaustulosten läpikäynti havainnollistaa, millaisia mittaustuloksia mikäkin anturi tuotti. Näiden avulla on mahdollista arvioida mittauspisteen ja -menetelmän, sekä valitun pulssisuhteen soveltuvuutta mittausjärjestelmän kokonaisuuden kannalta.

7.1.1 Jarrujohdon paine

Kuvaajassa 32 on esitetty referenssianturin JJ MSR165 ja solmuverkossa toimivan jarrujohdon painetta mittaavan anturin (JJ paine) tuloksia. Kuvaajasta on helposti nähtävissä jarrujohdon paineen nousu 5 baarin tasolle, jonka jälkeen paine käy kolme kertaa täysijarrutusten takia 3 baarin tuntumassa ajan ollessa 9:22:32, 9:25:36 ja 9:28:27.



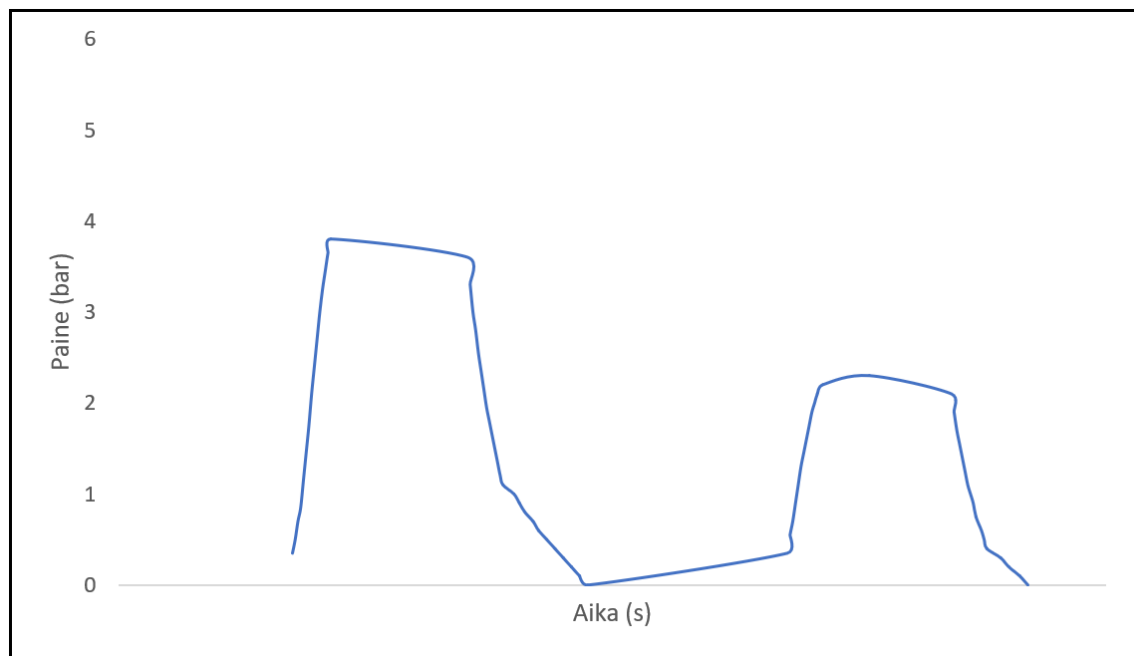
Kuva 32. Jarrujohdon paine

Kuten kuvaajasta voidaan havaita, on referenssianturi huomattavasti tarkempi mittaamaan jarrujohdon painetta, kuin solmuverkossa toimiva JJ paine -anturi. Tämä johtuu kahdesta syystä. Ensinnäkin JJ paineelle on annettu luvussa 6.2.1 jo mainittu asetus, jonka takia sensori ei lähettänyt

pilveen mittaustietoa ollessaan lepoasetuksessa. Lisäksi on otettava huomioon, että referenssianturi JJ MSR165 oli kalibroitu laboratoriossa, kun taas solmusensori JJ paine toimistotiloissa. Näistä lähtökohdista huolimatta, solmusensori suoriutui paineen mittauksesta suhteellisen hyvin. Jarrujärjestelmän kattavien kokeiden kuvaajiin on kuitenkin lähtökohtaisesti piirretty referenssianturin JJ MSR165 mittaustulokset, jotta muutokset jarrujärjestelmää ohjaavassa jarrujohdon paineessa olisi helposti havaittavissa ja verrattavissa toimilaitteiden ja niitä mittaavien antureiden vasteisiin.

7.1.2 Jarrusylinterin paine

Kuvaajasta 33 voidaan nähdä jarrusylinterin paineen normaali käyttäytyminen. Kuten jarrujohtoa mittaavan anturin kohdalla, myös jarrusylinterin mittauksessa oli päällä asetus, jonka takia mitauksia ei tapahtunut sylinterin paineen ollessa muuttumattomana.

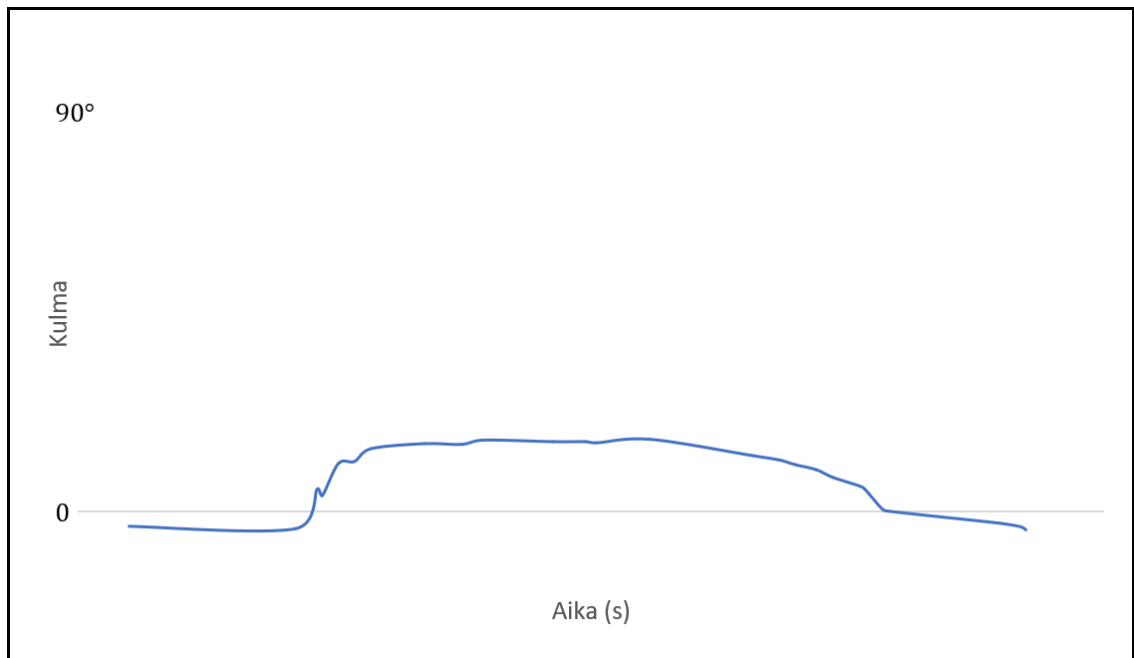


Kuva 33. Jarrusylinterin paine (täysi- ja puolitehoinen jarrutus)

Kuvaaja esittää jarrusylinterin paineen toimintaa, kun toteutetaan täysjarrutus ja puolitehoinen jarrutus. Täysjarrutuksen aikana sylinterin paine nousee 4 baarin paineeseen noin 13 sekunnissa, ja irrotuksen yhteydessä purkaantuu 44 sekunnissa. Puolitehoisessa jarrutuksessa paine nousee sen sijaan vain 2 baariin, mutta nousu tapahtuu 13 sekunnissa ja irtoaminen 28 sekunnissa. Kuvaajasta voidaan todeta, että valitut asetukset tuottavat riittävän tarkan kuvan jarrusylinterin paineen kuvaamiseen.

7.1.3 Sylinterin männän liike

Männän mittaukseen tarkoitettua liike-kulma adapterin tuottama kulman muutos ajan suhteen täysjarrutuksen aikana on esitetty Kuvaajassa 34. Sylinterin männän työntymää kuvastaa anturin asento z-akselin suhteen.

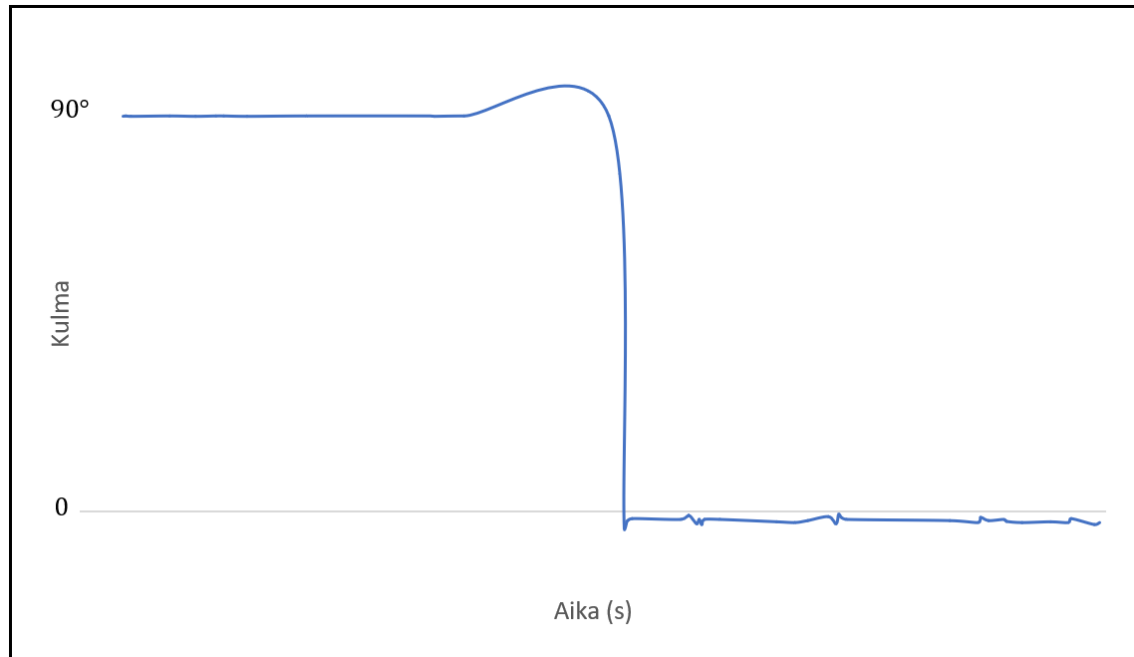


Kuva 34. Jarrusylinterin männän työntymä (täysijarrutus)

Kuvaajasta voidaan havaita, että normaalissa täysijarrutuksessa kulma ei muutu suuresti. Anturi oli kalibroitu niin, että männän ollessa lepoasennossa, anturin kulma saa arvoksi noin 0 astetta (anturin arvo -43), ja täysijarrutuksen aikana (75 mm työntymällä) anturin asento muuttui vain noin 16 astetta (anturin arvo 177). Maksimaalinen työntymä sylinterin männälle mitattiin toisen testin yhteydessä, jolloin sylinterin työntymäksi saatiin 240 mm. Tuolloin anturi mittasi arvon 936, joka on noin 84,24 astetta.

7.1.4 Jarrulajiasettimen ja ruuvijarrun asennot

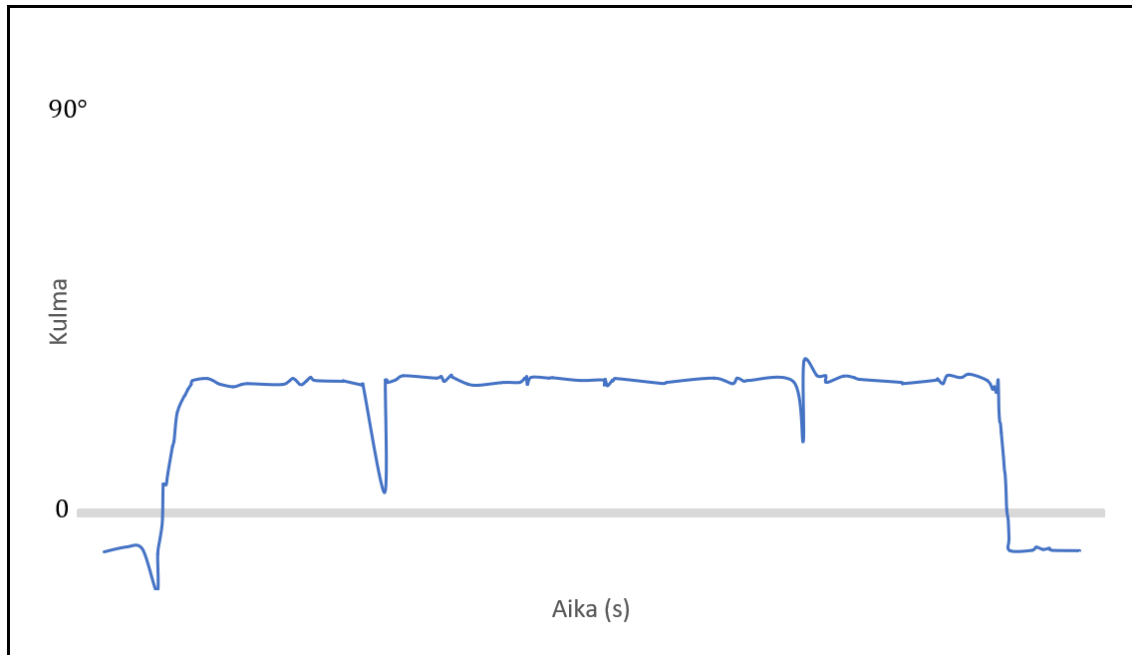
Molemmat; jarrulajiasettimen ja ruuvijarrun asennot mitattiin y-akselin suhteen anturin kulmasta. Jarrulajiasetin pystyi kääntymään 90 astetta, ja ruuvijarru noin 45 astetta. Nämä on esitelty Kuvaajissa 35 ja 36.



Kuva 35. Jarrulajiasettimen tila

Kuvaajassa 35 on esitetty yksiselitteisesti jarrulajiasettimen vivun kääntö tilasta M tilaan T. Kuvaajassa 90 asteen kulma kuvaa M-tilaa ja 0 asteen kulma kuvaa T-tilaa. Asettimien tilaa mitaavilla antureilla oli samat konfiguraatiot kuin paineen ja männän kulman mittauksen antureilla. Tämä tarkoitti, että anturilla oli mittaus- ja lepoasetukset, jotka ohjasivat mitaustulosten lähetystä tukiasemalle. Triviaalin mittauksen takia, tämä ei välttämättä ollut paras asetus, sillä tuloksista pystyttiin havaitsemaan muutaman asteen murto-osan muutosten takia tiheää lähetysväliä jarrujen testausten aikana, mikä puolestaan ruuhkautti turhaan langatonta verkkoa. Jälkiviisaana, mitauslaitteelle olisi järkevää antaa suuremmat raja-arvot mittauksen lähetyskynnykselle, jotta tiedonsiirtoprotokollaa kuormittavasta kohinasta pääsisi eroon, sekä harkita pulssisuhteen reilua pienentämistä. Myös mittausperiaatteen arvioiminen olisi kohdallaan, sillä kulman muutoksen sijaan mitaustuloksesta kiinnostaa nähdä vain vivun ääriasennot (M/T).

Jarrulajiasettimen tilan lisäksi myös ruuvijarrun tilaa mitattiin kulma-anturilla y-akselin suhteen. Ruuvijarrun kiristys ja irrotus on esitetty kuvassa 36.

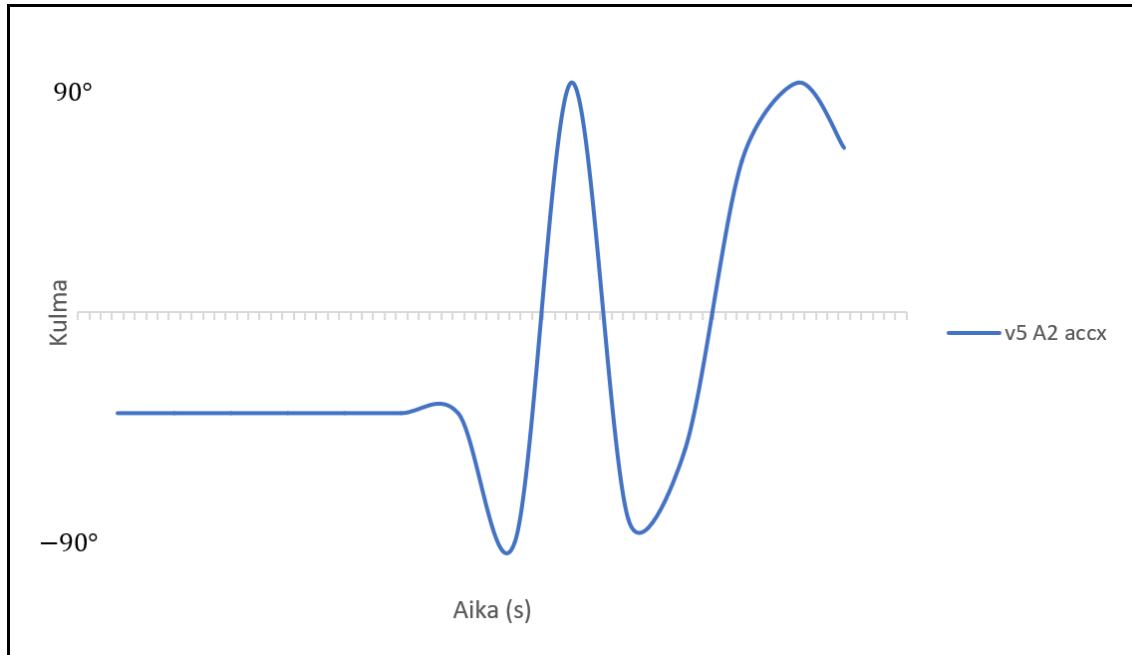


Kuva 36. Ruuvijarrun tilan muutos

Kuvaajasta 36 voidaan nähdä ruuvijarrun kiristys ääriasentoon ja irrottaminen takaisin lepoasentoon. Kuvaajasta voidaan nähdä, että ruuvijarrun kulma oli lepotilassa noin 9 astetta negatiivinen (anturin arvo -100) ja ääriasennossa noin 30 astetta (327). Anturin lepotilan negatiivinen arvo voidaan laskea kalibrointi- tai asennusvirheeksi. Tästä huolimatta 39 asteen muutos lepoasennosta kiristettyyn asentoon kertoo, että ruuvijarru toimii normaalisti, kun ääriasennoksi arvioitiin 45 asteen muutosta. Ruuvijarrun maksimaaliseen liikerataan voi vaikuttaa vivuston säätäjä, sekä anturoiden ja pyörän kehän välinen välilyös. Anturin tuottamista arvoista on mahdollista arvioida ruuvijarrun asento.

7.1.5 Pyörän pyörintä ja kiihtyvyydet

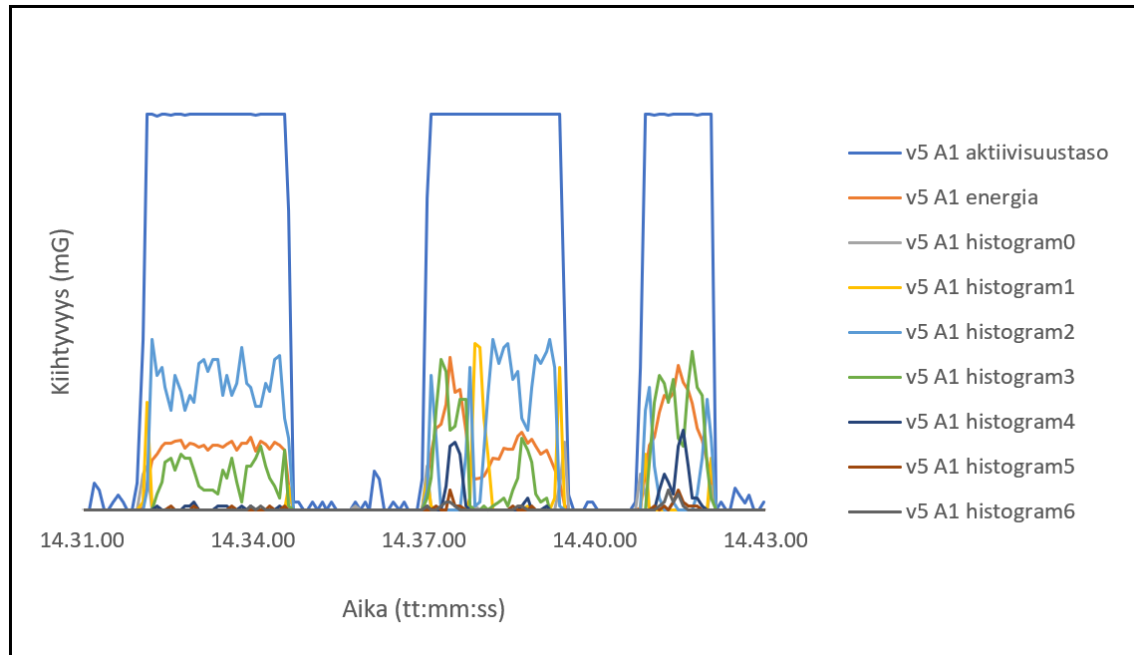
Pyörän akselille asennetut kulma-anturit mittasivat sekä akselin pyörintää, että anturiin kohdistuvia kiihtyvyyksiä. Nämä arvot on esitetty Kuvaajissa 37 ja 38.



Kuva 37. Akselin pyörintä

Kuvaajassa 37 on esitelty akselin pyörintää mittaavan kulma-anturin x-akselin kulman muutos ajan suhteen. Kuvaajassa akseli on alussa lepotilassa, kunnes akseli lähtee pyörimään. Pyörintä tuottaa mittauslaitteen kulmasta aika-akselille siniaallon. Anturin tuottamasta kuvaajasta voidaan todeta mittauslaitteen havaitsevan pyörän liikkeellelähdon.

Kappaleessa 5.3.3 mainittiin, että pyörintää mittaava anturi laskee kulman lisäksi itseensä kohdistuneet kiihtyvyydet. Kuvaajassa 38 esitellään kolme ajotapahtumaa ja niiden aiheuttamat kiihtyvyydet pyörän kulmaa mittaavaan anturiin. Ensimmäisessä ajotapahtumassa koerungolla ajetaan 10 km/h nopeutta. Toisessa ajotapahtumassa koerunko kiihdytetään 20 km/h nopeuteen ja hiljennetään 10 km/h nopeuteen. Kolmannessa ajotapahtumassa juna kiihdyttää 20 km/h nopeuteen ja pysähtyy pikaisesti.



Kuva 38. Kiihtyvyydet pyörän pyörintää mittaavassa anturissa

Kohinan takia kiihtyvyyssanturin histogrammeista on haastavaa tunnistaa mitään selkeämpää korrelaatiota nopeuden suhteen, sillä histogrammit esittävät vain omalle kiihtyvyyalueelle tapahtuneita kiihtyvyyksiä. Sen sijaan kuvaajassa esitetty energia -arvo (v5 A1 energia) seuraa junan nopeuksia hämmästyttävän hyvin.

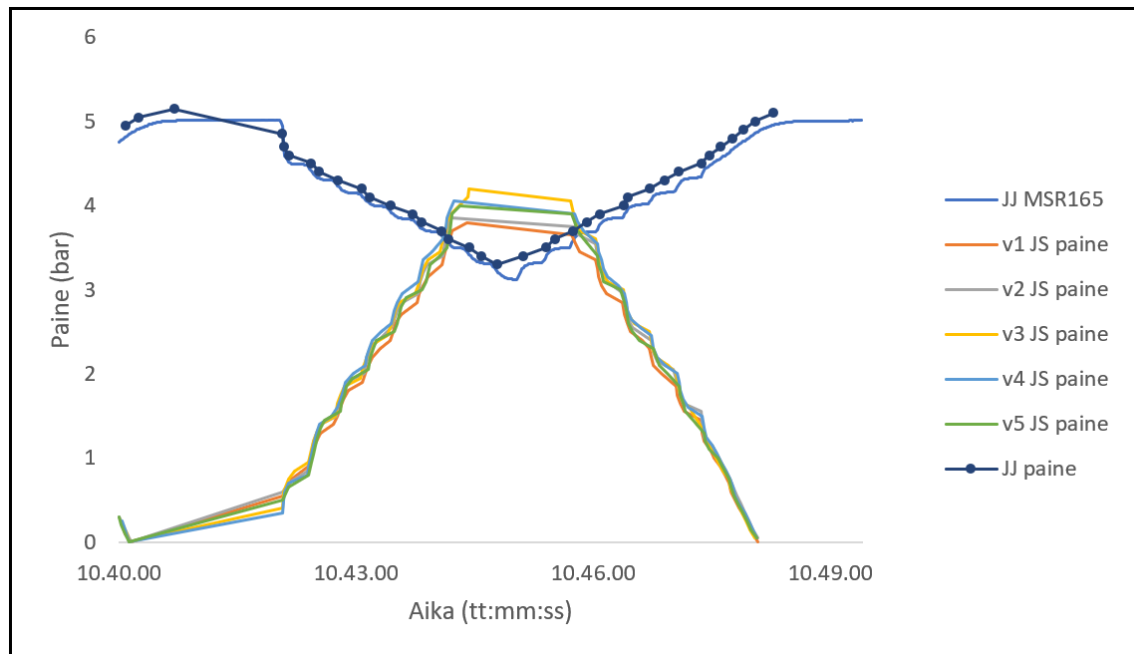
Pyörän pyörinnän ja vikatilanteiden arvioiminen kiihtyvyyksistä vaatisi tarkempia tutkimuksia ja kiihtyvyyksien mittaukselle sopiva pulssisuhde ja histogrammien hyödyllisyys tulisi arvioida kattavammilla kokeilla. Tässä työssä kiihtyvyyssmittauksien energia-arvoa on hyödynnetty havainnollistamaan koerungon vauhtia liikkeessä tehtyjen mittausten kuvaajissa kappaleissa 7.3 ja 7.4.

7.2 Paikallaan tehdyt kokeet

Paikallaan tehtävien mittausten tarkoitus on tarkastella mittausjärjestelmää hallitussa ympäristössä systemaattisesti. Paikallaan toimittaessa järjestelmän rasiutus on hallittavissa sen mukaan, minkä toimilaitteiden tiloja muutetaan. Näin voidaan hahmottaa järjestelmän kyvykkyys ja löytää sen rajat. Kun koerunko ei liiku, ei mittauslaitteisiin synny junan kolinasta ja liikkeestä kohinaa. Näistä huolimatta tärkein syy paikallaan tehtäville mittauksille, on simuloida ja arvioida mittausjärjestelmän soveltuvuutta jarrujen tarkastuksen automatisointiin, joka tapahtuu myös junan ollessa paikallaan. Paikallaan tehtävien kokeiden tavoitteena on havaita paineen vaihtelut järjestelmässä jarrutusten mukaisesti, havaita jarrulajiasettimen säätö, sekä tuottaa selvät tulokset jarrusylinterin männän liikkeestä.

7.2.1 Paine-ilmajärjestelmän mittaus ja asteittainen jarrutus

Ensimmäisenä kokeena toteutettiin jarrujärjestelmän painejärjestelmän toimivuuden varmistaminen asteittaisen jarrutuksen avulla. Kuvaaja 39 esittää porrastettua jarrutustapahtumaa, jossa jarrutus-tasoa nostettiin 15 sekunnin välein pykälittäin aina täysijarrutuksen tasolle asti. Kuskin venttiilistä on mahdollista nostaa jarrutuksen voimakkuutta 9 kertaa ja toteuttaa hätäjarrutus.

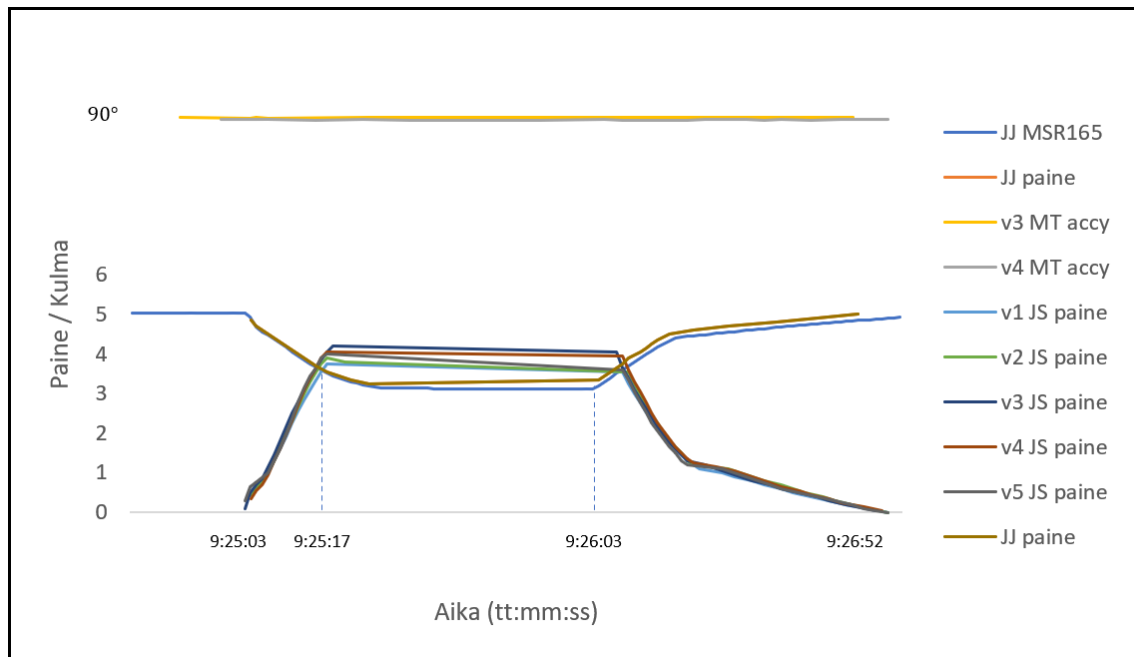


Kuva 39. Porrastettu jarrutus ja irrotus

Jarrutusten tasot 1–9 on helposti havaittavissa kuvaajassa esitetyn JJ MSR165 anturin arvoista. Kuvaajasta näkee myös, että jarrujohtoon asennettu solmuverkossa toimiva paineanturi seuraa heikosti jarrujohdon paineen vaihteluita. Sen sijaan jarrusylintereissä kiinni olevat paineanturit (v1-v5 JS paine) seuraavat paineen muutoksia lähes yhtä hyvin kuin referenssisensori. Kuvaajasta on selkeästi erotettavissa eri jarrutustasot, sekä havaittavissa hyväksyttävällä tarkkuudella jarrusylinterin normaali toiminta.

7.2.2 Jarrujärjestelmän toiminta, jarrulaji M

Toisena kokeena toteutettiin painejärjestelmän mittaus jarrutuksen aikana, kun jarrulajiasetin oli asetettuna M-asentoon (Kuvaaja 40). Jarrutus kesti noin 2 minuuttia, jonka aikana toteutettiin täysjarrutus.



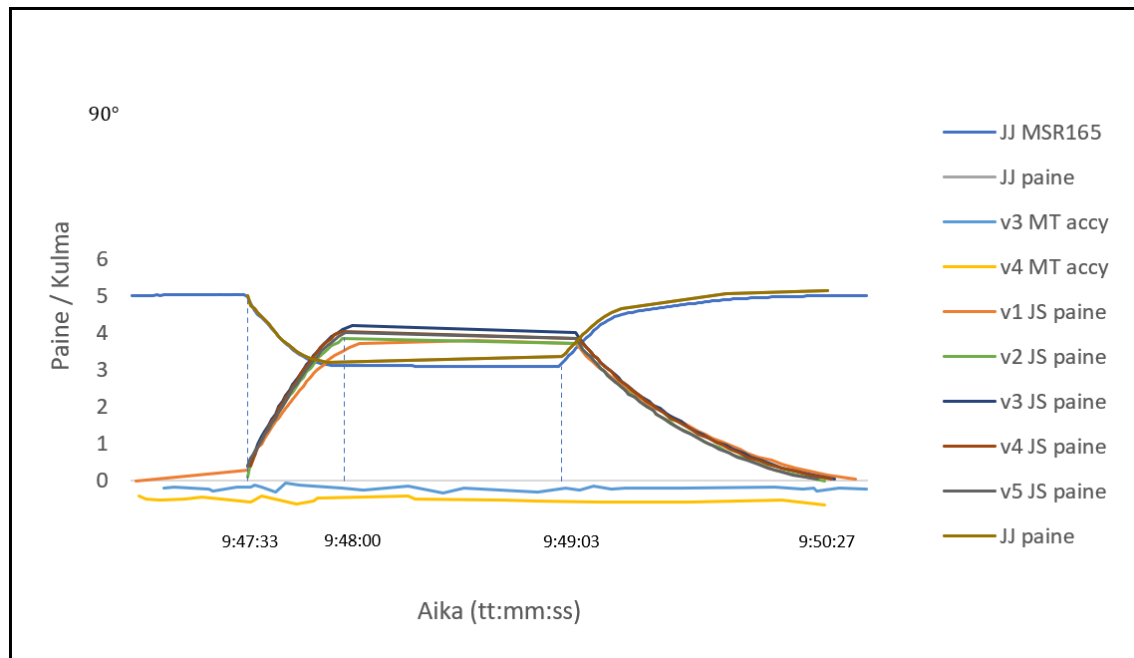
Kuva 40. Jarrujärjestelmän toiminta jarrulaji M

Kuvaajasta voidaan nähdä, että jarrulajiasettimet v3 MT accy ja v4 MT accy ovat M-asennossa (90 asteen kulmassa) koko kokeen ajan. Jarrutus alkaa ajan ollessa 9:25:03, kun jarrujohdon paine (MSR165) lähtee tippumaan kohti täysjarrutuksen mukaista 3,5 baaria. Samaan aikaan kaikkien vaunujen sylintereiden paineet lähtevät nousemaan ja saavuttavat täyden jarrutuksen 3,8 baarissa ajan ollessa 9:25:17. Kellon ollessa 9:26:03 alkaa jarrujen irrotus ja sylintereiden laskevat paineet tavoittavat 0 baaria kello 9:26:52.

Kappaleessa 2.1.4 mainittiin, että täysjarrutuksen pitäisi kestää M-asennossa vain 3–5 sekuntia ja irrotus 15–20 sekuntia. Kokeiden aikana tämä ei kuitenkaan pitänyt paikkaansa, vaan kuten kuvaajasta voidaan nähdä, täysjarrutuksen painetasoon pääsy kesti 15 sekuntia ja irrotus 49 sekuntia. Poikkeama johtui luultavasti siitä, että kokeiden aikana koerungon paineita ohjattiin mobiilijarrujenkoettelulaitteella, jonka kompressori ja venttiilit ovat pienempiä kuin oikealla veturilla.

7.2.3 Jarrujärjestelmän toiminta, jarrulaji T

Kolmantena kokeena toteutettiin painejärjestelmän mittaus jarrutuksen aikana, kun jarrulajiasetin oli edellisestä kokeesta poiketen T-asennossa (Kuvaaja 41). Jarrutus kesti hieman pidempään, noin 3 minuuttia, jonka aikana toteutettiin koerungon kattava täysjarrutus.

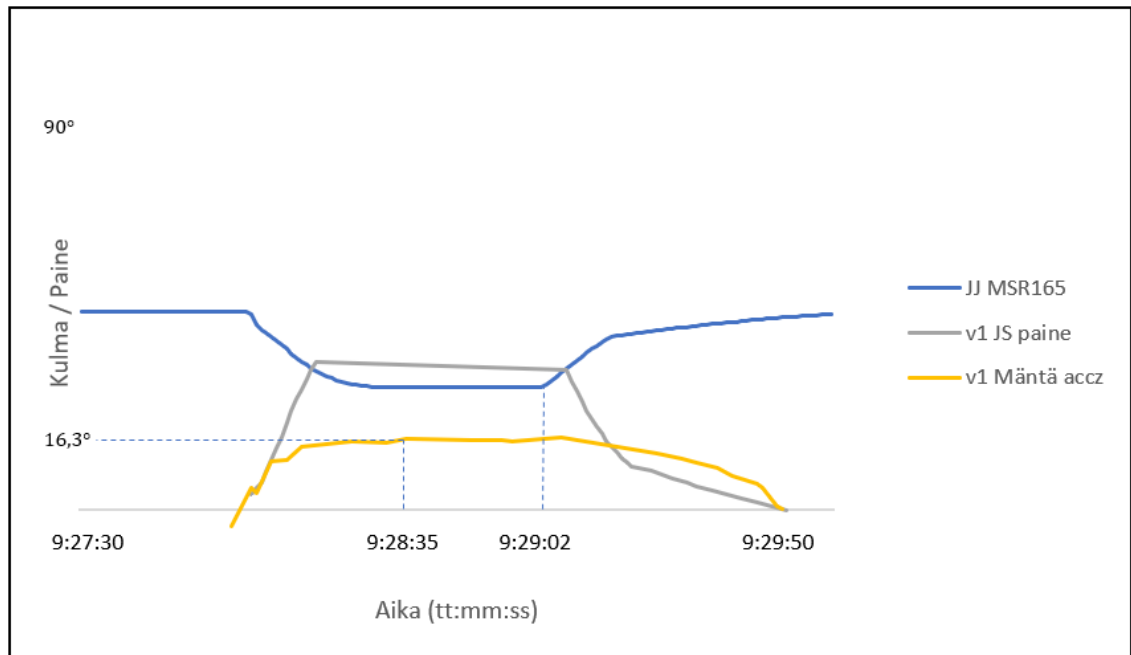


Kuva 41. Jarrujärjestelmän toiminta jarrulaji T

Kuvaajasta 41 voidaan nähdä, että jarrulajiasettimet v3 MT accy ja v4 MT accy ovat ääriasennon sijaan nollan tuntumassa. Jarrutus alkaa, kun MSR165 aloittaa jarrutuksen kellon ollessa 9:47:33 ja saavuttaa täysijarrutuksen mukaisen 3,5 baarin paineen kello 9:47:47. Jarrulajiasettimen T-asennon takia sylinterinpainet eivät kuitenkaan nouse yhtä nopeasti, kuin M-asennossa. Tämän takia jarrusylinterit saavuttavat huippuarvonsa n. 3,8 baaria kellon ollessa vasta 9:48:00. Paineen nousu kesti täten T-asennolla odotetusti M-asentoa pidempään, eli noin 30 sekuntia. Jarrujen irrotus taas alkoi 9:49:03, ja päättyi 9:50:27, eli noin 90 sekunnissa. Kuten teoriassa mainittiin, aiheutti jarrulajiasetus selkeän eron jarrusylinterien paineen nousuajalle. Täten voidaan todeta, että mittaamalla jarrusylinterin painetta, voidaan siitä todeta jarrusylinterin paineellisuuden lisäksi myös jarrulajiasettimen tila.

7.2.4 Jarrusylinterin männän liike, kun vaunu on taarassa

Osana paikallaan tehtäviä kokeita haluttiin myös selvittää sylinterin männän liike verrattuna jarrujohdon ja jarrusylinterin paineisiin. Kuvassa 42 on esitetty koe, jossa toteutettiin täysjarrutus vauunun kuormaventtiilin ollessa taarassa.

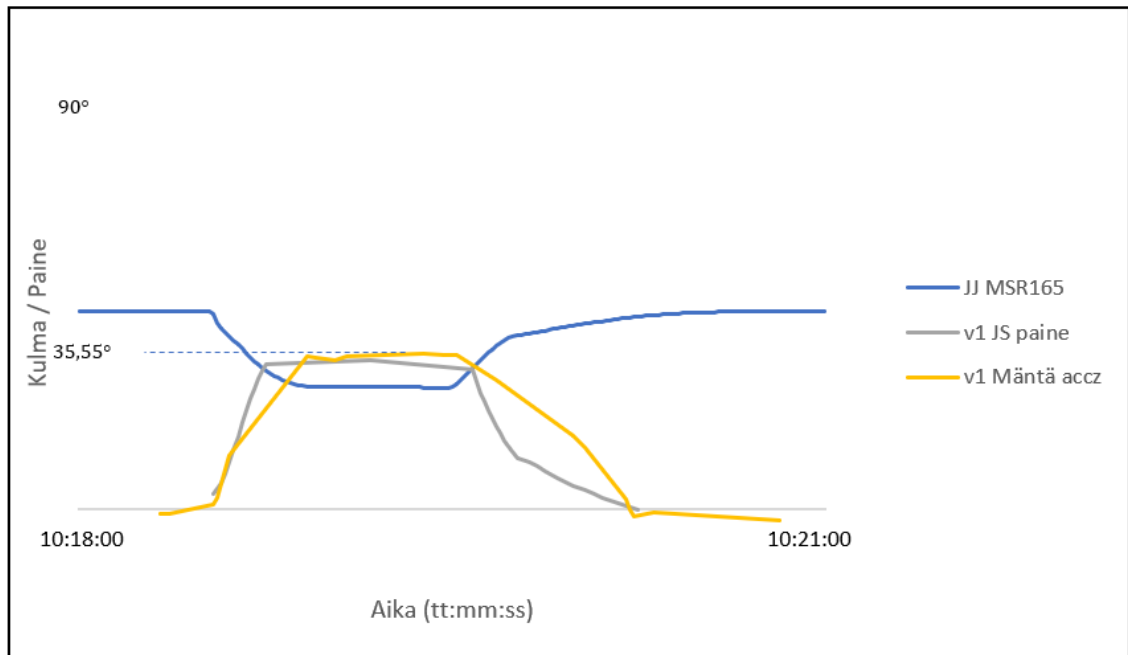


Kuva 42. Jarrusylinterin männän liike vaunun ollessa taarassa

Kuten edellisissä kokeissa, jarrutuksen alku voidaan havaita jarrujohdon (JJ MSR165) paineen muutoksesta alle 5 baariin. Jarrujohdon paineen laskiessa jarrusylinterin paine nousee ja jarrusylinterin mäntä lähtee työntymään ulospäin. Männän ulospäin työntyminen mitattiin männässä kiinni olevan liike-kulma adapterin ja kulma-anturin avulla (v1 Mäntä accz). Mäntä saavuttaa ääri-asennon kello ollessa 9:28:35, kun kulman muutos on noin 16,3 astetta. Männän työntymä oli tuolloin noin 75 mm. Kun jarrutus alkaa kello ollessa 9:29:02, alkaa mäntäkin vetäytymään ääri-asennostaan. Mäntä palautuu lähtöpisteeseen jarrutuksen päätyttyä kello 9:29:50.

7.2.5 Jarrusylinterin männän liike, kun vaunu on kuormassa

Paikallaan tehtävien kokeiden viimeinen testi oli jarrumännän toiminnan seuraaminen, kun vaunun kuormaventtiili oli asetettu manuaalisesti päälle (Kuva 43). Kuten kappaleessa 2.1.6 esitettiin, vaunun ollessa kuormassa, kuormaventtiili avaa vivuston liikettä estävän karan, joka vastaavasti mahdollistaa vivuston suuremmat liikeradan ja suuremman vipuvoiman jarrusylinterin männälle. Kokeessa oli odotettavissa, että mäntä työntyisi pidemmälle täysijarrutuksen aikana edelliseen kokeeseen verrattuna, jolloin vaunu oli taarassa.



Kuva 43. Jarrusylinterin männän liike vaunun ollessa kuormassa

Kuten oletettiin, Kuvasta 43 voidaan havaita sylinterin männän pidempi työntymä vertaamalla sitä Kuvaan 42. Männän varren suurempi työntymä johtaa adapterin kautta isompaan kulman muutokseen, ja saavuttaa täysjarrituksen huipussa noin 35,55 asteen kulman alkutilaan verrattuna. Tässä kokeessa sylinteri mitattiin työntyneeksi noin 140 mm. Täten voidaan todeta, että vaunun kuormaventtiilin tila voidaan havaita sylinterin männän liikkeestä täysijarrituksessa.

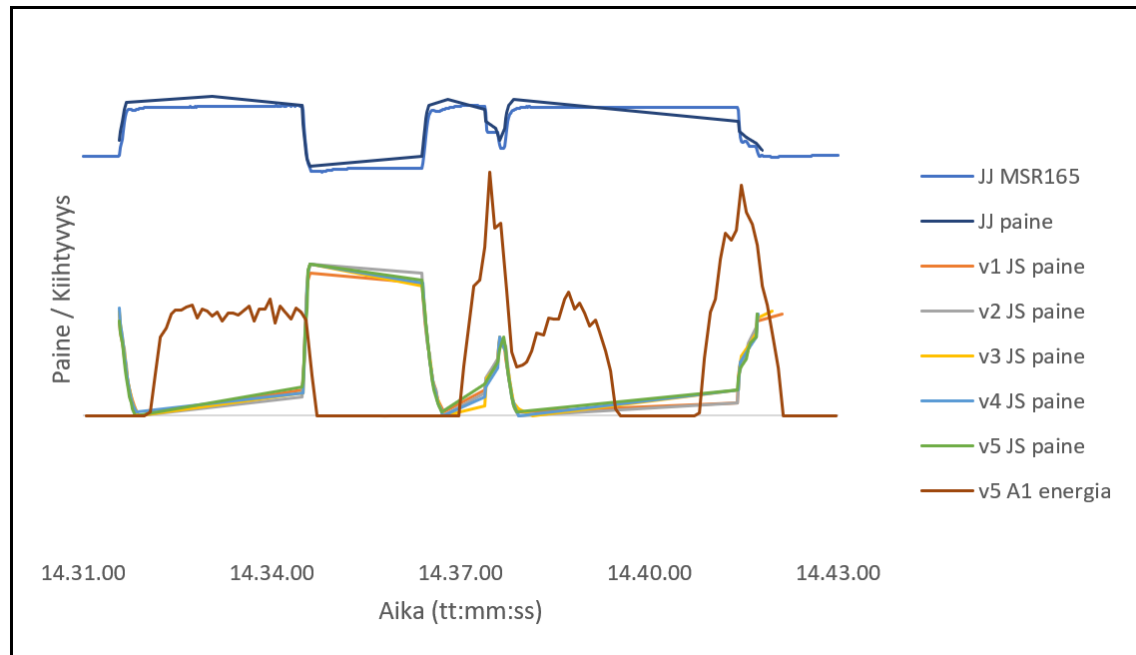
7.3 Liikkeessä tehdyt kokeet

Kokeiden toinen osuus, eli liikkeellä tehtävät kokeet toteutettiin vaihtamalla paineilmajärjestelmä mobiilista jarrujenkoettelulaitteesta vaihtotyöveturiin. Kokeet suoritettiin Pieksämäen konepajan ratapihalla, jossa pystyttiin toteuttamaan kokeita 2 km/h nopeudesta aina 25 km/h nopeuteen asti. Kokeiden tarkoitus oli selvittää, kuinka järjestelmä pystyy havaitsemaan jarrujärjestelmien toimintaa liikkeessä, millaisia häiriöitä liike synnyttää järjestelmään, ja kuinka järjestelmä kuormittuu jokaisen anturin lähettäessä mittausdataa jarrutustilanteissa. Kokeissa seurattiin paineilmajärjestelmää, jarrusylinterin männän toimintaa, vipujen (jarrulajiasetin ja ruuvijarru) häiriöherkkyttä ja akselien pyörintää. Koerungon nopeutta on esitetty kuvaajissa vaunun 5 akselissa olevan kulma-anturin kiihtyvyyksien summaa kuvaavalla v5 A1 energia -muuttujalla.

7.3.1 Jarrujärjestelmän paineet koerungon liikkuessa

Kuvaajaan 44 on esitelty kaikkien vaunujen jarrusylinterien paineet, jarrujohdon paine ja junan nopeutta kuvaava kiihtyvyyksien kumulatiivinen summa v5 A1 energia. Liikettä kuvaava ote mitaustuloksista on sama, mikä esiteltiin toimilaittekohtaisissa tuloksissa kappaleessa 7.1.5 (Kuva 38). Kuvaajassa juna kulkee siis kolme eri kulkua eri nopeuksilla: alkuun 10 km/h, sitten 20 km/h–

10 km/h ja lopulta 20 km/h. Kuvaajasta voidaan nähdä jarrutusten yhteydessä paikallaan tehtyjen kokeiden mukaisia vasteita jarrusylintereiden paineissa.



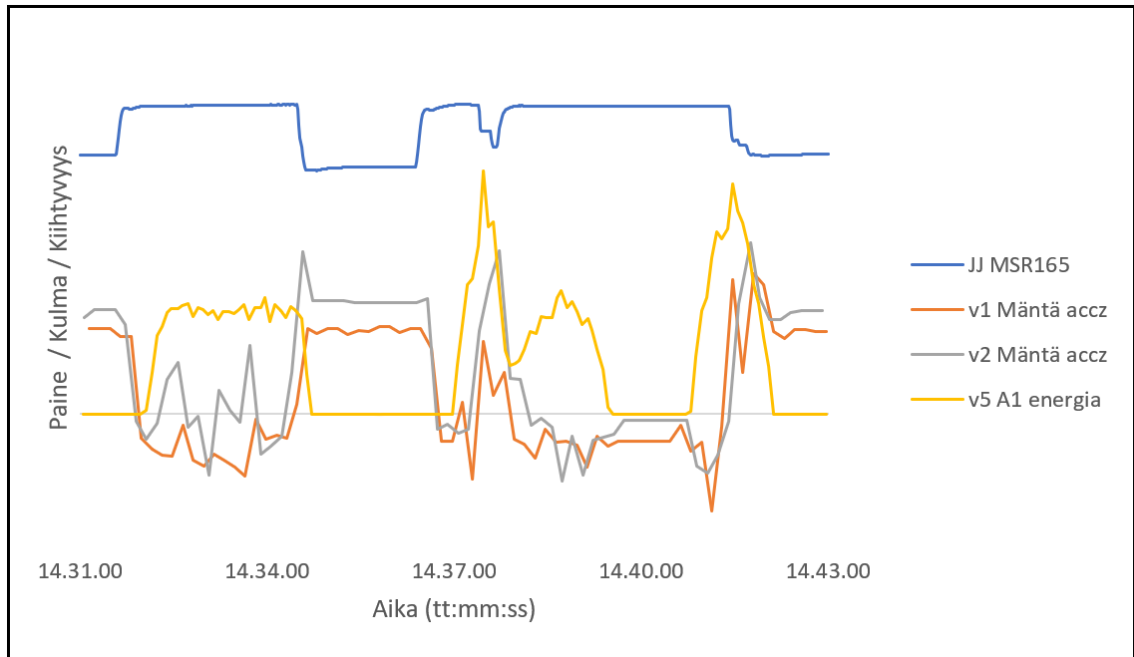
Kuva 44. Jarrujärjestelmän paineiden mittaus liikkeessä

Liikkeessä toteutetuissa kokeissa oli mahdollisuus havaita jarrituksen vaikutus junan nopeuteen. Kuvaajasta voi esimerkiksi havaita asteittaisen kevyen jarrituksen, kun junaa hidastettiin 20 km/h nopeudesta 10 km/h nopeuteen ajan ollessa 14:37:34. Nopeuden muutoksen voi havaita vaunun 5 akselin pyörän kulmaa mittaavan anturin kiihtyvyyksiä mittaavasta energia -arvosta (v5 A1 energia).

Kuvaajasta voidaan havaita myös se, että junan ollessa liikkeessä, täysijarrutukset ovat harvinaisia ja kevyempi jarrutus riittää usein hidastukseen ja pysähtymiseen. Jarrujohdon paine käy alimmillaan vain 3,9 baarissa (14:34:36), kun täysijarrutus vaatisi paineen pudotuksen aina 3,5 baariin asti. Kuvaajasta voidaan todeta paineiden mittauksen onnistuneen erittäin hyvin ja tarkasti riippumatta junan nopeudesta.

7.3.2 Jarrusylinterin männän työntymä koerungon liikkeessa

Kuvassa 45 on esitetty samat junan kulut kuin Kuvassa 44. Paineiden sijaan kuvaajassa on männien työntymiä mittaavien antureiden kulmien arvot (v1 ja v2 mäntä accz). Samoin kuin edellisessä kuvaajassa, jarrutussignaaleita on esitetty jarrujohdon painetta mittaavan sensorin MSR165 avulla, ja junan nopeutta on esitetty jälleen kiihtyvyyksien summaa kuvaavalla energia -suureella (v5 A1 energia).

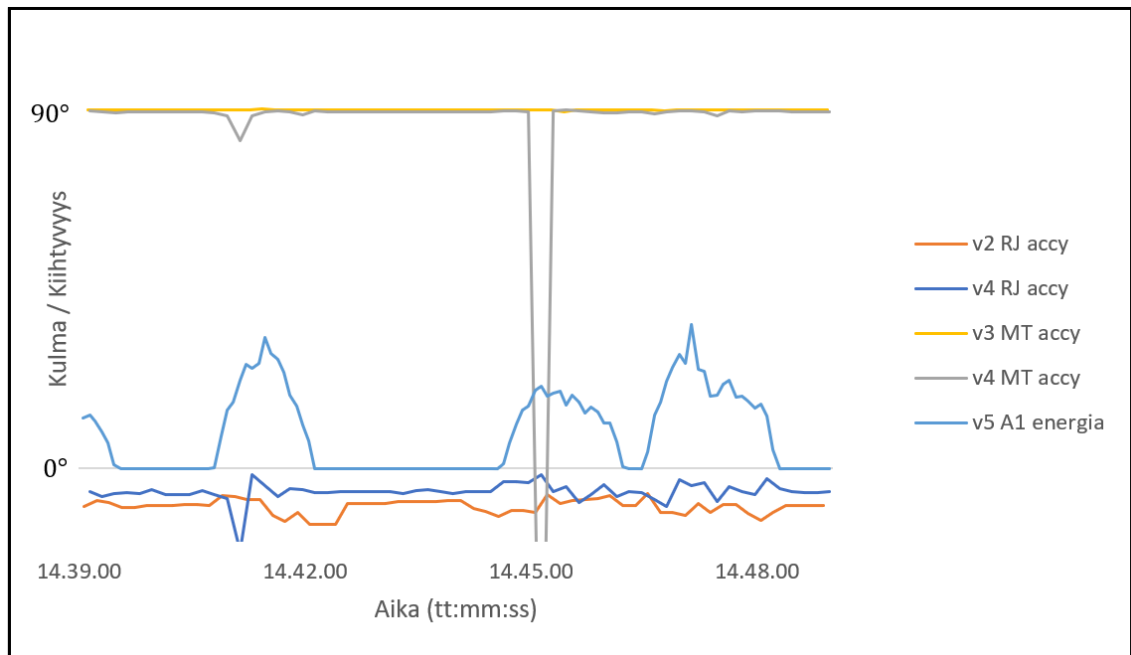


Kuva 45. Jarrusylinterien mäntien mittaus liikkeessä

Kuvaajasta voidaan nopeasti havaita kaksi asiaa: Ensinnäkin vaunussa 2 sijaitsevan männän työntymä (v2 Mäntä accz) on lähtökohtaisesti aina suurempi, kuin vaunun 1 männän työntymä (v1 Mäntä accz). Toisaalta kuvaajasta voidaan myös nähdä, että molemmissa antureissa on huomattavasti häiriötä, ja vaunun 2 sylinterin männän kulma-anturi heittelee vapaana ollessaan (14:32–14:34) jopa 16 astetta. Koska häiriötä ei syntynyt paikallaan tehtävissä kokeissa, eikä vaunukalustoa ole vaihdettu kokeiden välissä, voidaan päätellä poikkeamien johtuvan todennäköisesti liike-kulma adapterin huonosta kiinnityksestä, mikä saattoi mahdollistaa adapterin ja siten anturin ylimääräisen heilunnan liikkeessä. Kuvaajasta voidaan todeta jarrusylinterin männän liikkeen mittauksen olevan jokseenkin epäluotettavaa liikkeen aikana.

7.3.3 Liikkeen aiheuttamat häiriöt ruuvijarrun ja jarrulajiasettimen kulma-anturissa

Vaikka kukaan ei koskisi jarrulajiasettimeen tai ruuvijarruun junan ollessa liikkeessä, halusimme tutkia, millaisia häiriötä niihin kohdistuu liikkeessä. Jarrulajiasettimien ja ruuvijarrujen kulma-antureiden suuret on esitetty Kuvassa 46, jossa junan nopeutta kuvaa jälleen akselin pyörintää mittaavan anturin kiihtyvyyksien energia arvo. Kuvaajan ote ei ole sama kuin edellisissä kuvaajissa, vaan ote on valikoitu ajalta, jolloin jarrulajiasettimen asennon mittauksessa tai lähetyksessä (v4 MT accy) tapahtui häiriö.



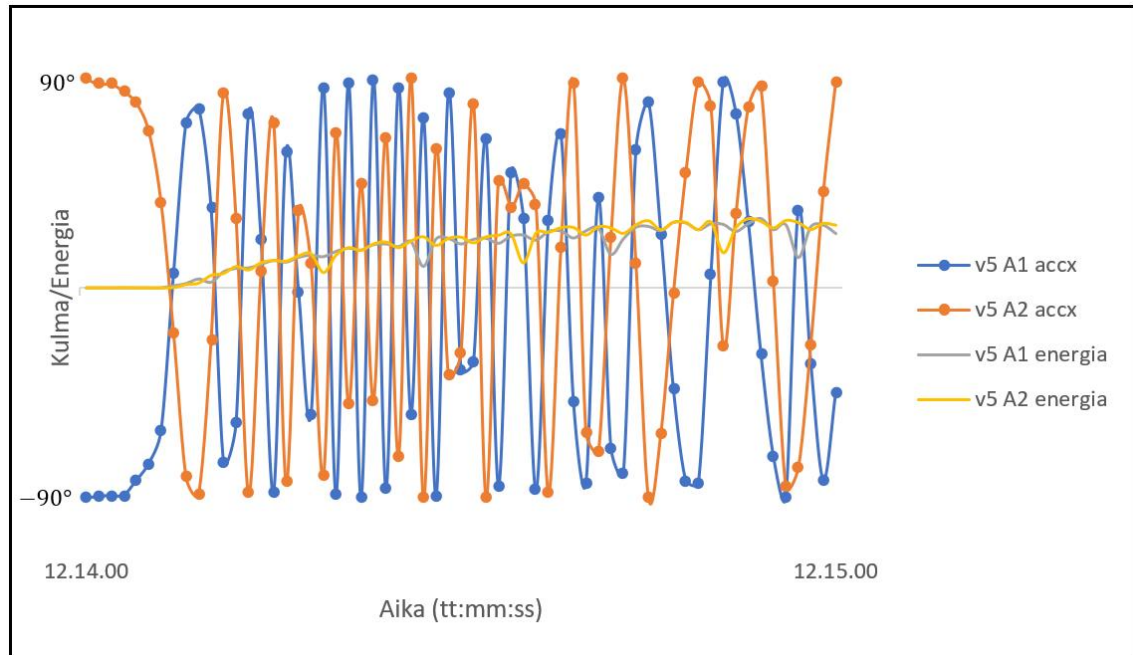
Kuva 46. Ruuvijarrujen ja jarrulajiasettimien mittaus liikkeessä

Lähtökohtaisesti kulma-anturit ylläpitävät toimilaitteen tilan luotettavasti, mutta kuten kuvaajasta voidaan havaita, antureissa on paljon kohinaa. Lisäksi ajan ollessa 14:45:18 tapahtuu vaunun 4 jarrulajiasettimen kulma-anturiin (v4 Mt accy) vakava häiriö, kun yhden mitatun arvon etumerkki muuttui negatiiviseksi. Vaikka havainto on pieni poikkeus mittausjärjestelmän tuhansissa mittaus-tapahtumissa, on se otettava huomioon järjestelmää suunniteltaessa. Etumerkin muuttuminen positiivisesta negatiiviseksi on otettava huomioon, mikäli järjestelmälle suunnitellaan raja-arvoja erinäisille hälytyksille.

Kuvaajasta nähdään myös näiden asettimien kulman mittauksen hyödyttömyys liikkuvassa junassa. Kun jokainen pilveen lähetetty mittaus rasittaa mittaustietoja välittävää solmuverkkoa, ei kuvaajan mukaista pulssisuhdetta tarvita. Siksi olisikin syytä harkita näiden kulma-antureiden osalta pulssisuhteen madaltamista tai jopa mittauksen totaalista poistoa.

7.3.4 Pyörän pyörinnän mittaus

Liikkeessä tehtävät kokeet mahdollistivat akselien pyörinnän seuraamisen vaunun 5 akseleihin asennettujen kulma-antureiden avulla (v5 A1 accx ja v5 A2 accx). Kuvaan 47 on piirretty kulma-antureiden kulman muutos x-akselin suhteen liikkeellelähdistä 5 km/h nopeuteen asti. Junan nopeutta kuvaavat tässä kuvaajassa molempien akselien kulma-antureiden kiihtyvyyksien kumulatiivista summaa kuvaavat energia arvot (v5 A1 ja A2 energia).



Kuva 47. Akselin pyörintä liikkeessä

Kuvaajasta 47 voidaan havaita, että molemmat pyörät lähtevät vastakkaisista asennoista liikkeelle, jonka jälkeen anturin kulma alkaa tuottamaan sinikäyrää akselin pyöriessä. Tämä kuvaaja haluttiin nostaa esille liikkeellä tehtävistä kokeista sen vuoksi, että se havainnollistaa erinomaisesti langattoman kulmamittauksen heikkouden kiihtyvässä junassa. Kuten kuvasta voidaan nähdä, antureiden mittaustiheys (tässä kokeessa 1Hz) pystyy mittaamaan kokonaisen pyörähdyksen vain ensimmäisen pyörähdyksen osalta. Tämän jälkeen mittauslaitteen tarkkuus alkaa tippumaan roimasti, kunnes kuvaajasta on mahdotonta havaita pyörän pyörintä.

Tämän epätarkkuuden takia pyörän akselin asennon mittaus liikkeellelähdön jälkeen ei ole järkevää. Sen sijaan pyörän pyörimättömyyden havaitseminen olisi edelleen kiinnostava ilmiö. Mikäli anturi saadaan havaitsemaan ja ilmoittamaan pyörän lukkiutumiset liikkeessä, voisi sitä hyödyntää rataturvallisuuden huomattavaan parantamiseen.

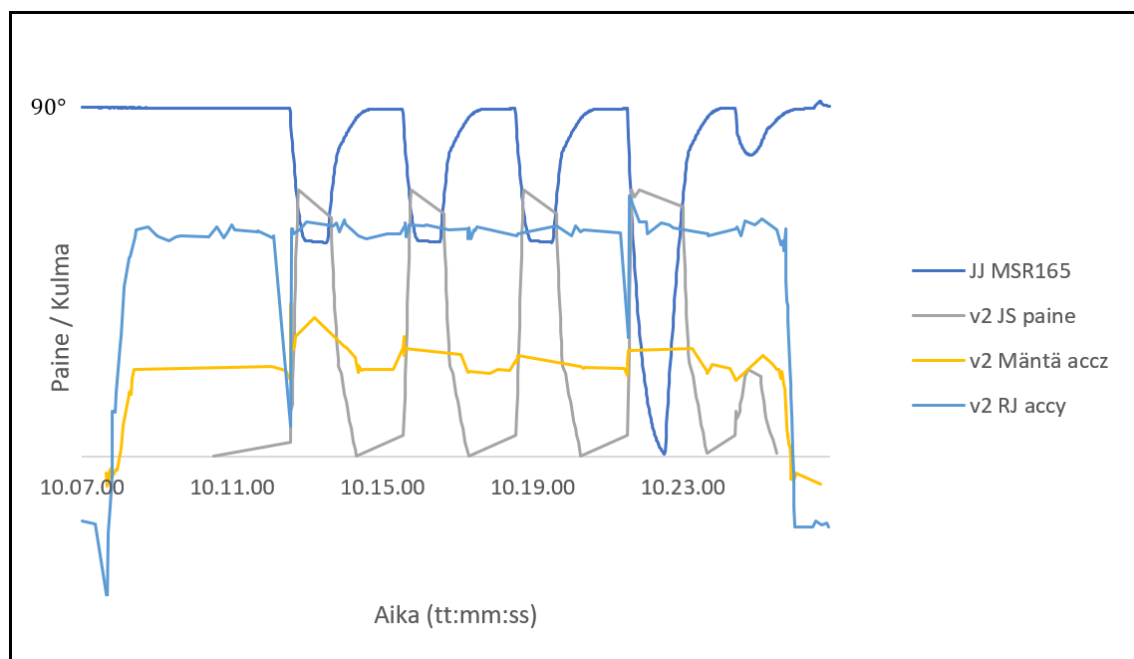
7.4 Vikatilanteiden simulointi ja mittaus

Kokeiden aikana toteutimme viisi yleistä tavaravaunujen jarrujärjestelmissä ilmenevää vikaa. Nämä ovat ruuvijarrun unohtaminen päälle, jarrulajiasettimen virheellinen asetus, vaunun jarruttomuus, vivuston säätäjän virheellinen tila, ja pyörän lukittuminen. Vikatilanteiden simuloiminen ja mittaaminen on erinomainen tapa tutkia järjestelmän kyvykkyyttä havaita poikkeamia normaaliin toimintaan nähden. Luonnollisesti poikkeamien tapahtuessa mittauksista olisi kyettävä luomaan hälytys epäonnistuneesta jarrujentarkastuksesta ja osoitettava häiriön sijainti ja mahdollinen syy tarkastajalle. Tässä kappaleessa on esitetty simuloitua poikkeustilanteita ja kuhunkin poikkeustilanteeseen liitännäisten antureiden vasteet.

7.4.1 Ruuvijarrun päälle jääminen

Ensimmäiseksi simuloituksi vikatilanteeksi valittiin ruuvijarrun päälle jääminen. Ruuvijarrujen käyttöä on vähennetty niiden päälle-jäämistä takia huomattavasti, ja sitä saa käyttää enää vain kolmessa eri tilanteessa: asiakkaan kuormaus- ja/tai purkausraiteella käytettäessä trukkiuor- mausta tai vaunusiirtolaitetta, junan muodostamisen yhteydessä, sekä vajaa- ja poikkeustilan- teissa (VR Group 2020). Ruuvijarrun päälle-jääminen tarkoittaa aina junan liikkumista niin, että yhden vaunun kaikki pyörät ovat lukossa. Tämä johtaa esimerkiksi raakapuuvaunuissa vähintään lovipyörien syntymiseen ja siten pyörien sorvaukseen, ja pahimmillaan vaunun telien tuhoutumi- seen, vaunun raivaukseen raiteelta ja valtaviin viivästyksiin runkolinjalla.

Ruuvijarrun päälle-jäämistä simuloitiin koerungon 2. vaunussa (Kuva 48). Ruuvijarrun päälle-jää- misen havaitsemiseen valittiin neljän anturin vaste. Nämä anturit olivat vaunun 2 jarrusylinterin paine (v2 JS paine), jarrusylinterin männän liike (v2 Mäntä accz), ja ruuvijarrun tila (v2 RJ accy), sekä lisäksi veturin jarrutussignaaleja kuvaava jarrujohdon paine (JJ MSR165). Vikatilasimulaati- ossa ruuvijarru kiristettiin päälle, jonka jälkeen koerungossa toteutettiin kolme täysijarrutusta ja yksi kappale hätäjarrutuksia.



Kuva 48. Ruuvijarru päällä

Kuvaajasta 48 voidaan havaita ensimmäiseksi ruuvijarrun kiristäminen, kun v2 RJ accy muuttaa tilaansa levosta ääriasentoon. Kuvaajasta nähdään, kuinka jarrusylinterin mäntä työntyy ulos ruu- vijarrutuksen mukana. Tämä johtuu jarrusylinterin ja ruuvijarrun yhdistävästä mekaniikasta, missä ruuvijarru on sylinterin varressa kiinni holkillä, joka muuttaa sylinterin männän lepoasentoa, mutta mahdollistaa männän liikkeen holkin kohdalla ulospäin. Ruuvijarrun holkki on lepoasennossa sy- linterin kauluksen kohdalla, mutta kiristettäessä ruuvijarrua se lähtee siirtymään kohti ruuvijarrua, jolloin myös sylinterin mäntä lähtee siirtymään kuvaajan mukaisesti ulos. Holkin mekaniikan takia

kuvaajasta voidaan nähdä, kuinka sylinterin mäntä työntyy uudesta lepoasennosta ulospäin ensimmäisen jarrutuksen aikana. Myöhemmissä jarrutuksissa liike on pienempää, sillä vivuston säätäjä on selvästi reagoinut jarrusylinterin männän uuteen leposijaintiin.

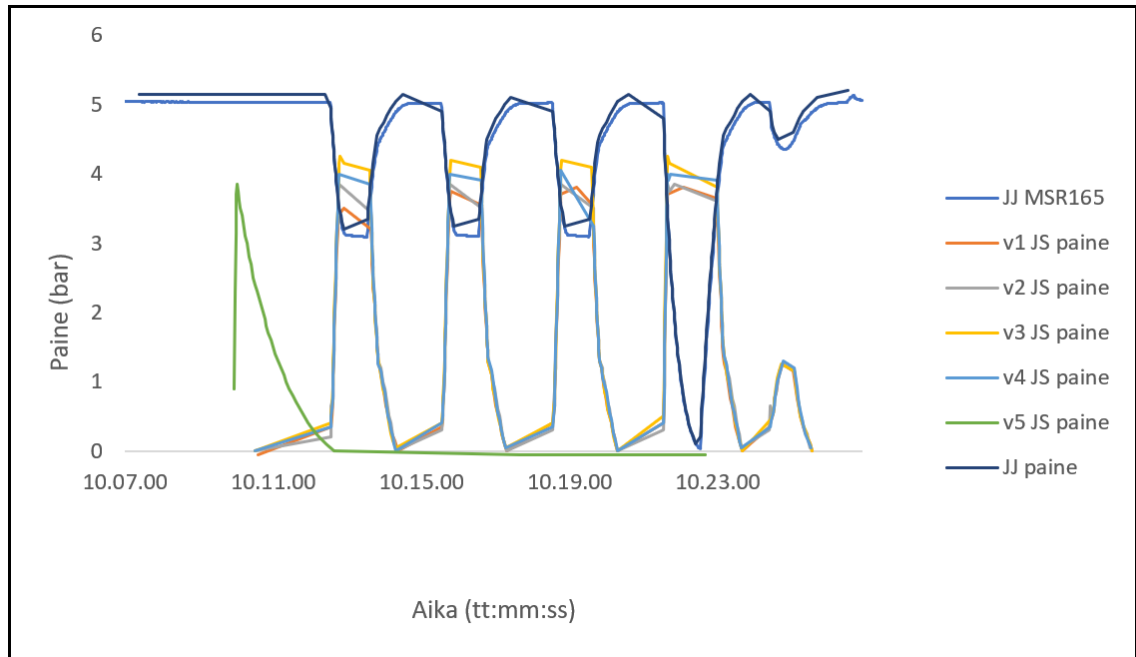
Tämä havainto on vikatilanteen havaitsemisen kannalta erinomainen tulos. Kuvaajasta on helpposti havaittavissa ruuvijarrun päällä-oleminen jarrutustilanteessa ruuvijarrun tilan lisäksi myös männän varren työntymästä. Tämä mahdollistaa mittausjärjestelmän kannalta kaksi positiivista mahdollisuutta: Voimme joko parantaa järjestelmän kannattavuutta poistamalla ruuvijarrun anturointi kokonaan, tai varmistaa luotettava ruuvijarrun tilan havainnointi mittaamalla toteuttamalla se kaksinkertaisesti mittaamalla ruuvijarrun tilan lisäksi sylinterin männän työntymää.

Kuvaajasta voidaan myös tehdä negatiivinen havainto: vaunun ruuvijarrun ääriasennon tuottama jarrutusvoima on epäselvä. Tämä on havaittavissa siitä, että jarrutusten yhteydessä jarrusylinterin männällä on ilmeisesti vielä tilaa liikkua. Tämä voi johtua vivuston joustamisesta tai vääntymisestä, mutta aivan yhtä hyvin se voi tarkoittaa sitä, että ruuvijarrua kiristäneen henkilön voimat eivät riittäneet riittävän jarruvoiman toteuttamiseen. Ainoa tapa varmistaa ruuvijarrulla tuotettu jarruvoima, olisi mitata jarrusylinterin männän holkin ja vivuston nivelen väliin syntyvä voima.

7.4.2 Vaunun paineettomuus

Toisena kokeena toteutettiin vikatila, jossa viimeisen vaunun sylinteri oli paineeton (Kuva 49). Tämä on vaarallinen tilanne, joka voi tapahtua vikatilanteen lisäksi myös inhimillisen virheen takia. Inhimillisesti virhe voi syntyä esimerkiksi tilanteessa, jossa rungon välissä olevan vaunun jarrut on poistettu vikatilasta käytöstä ja jostain syystä runko puolitetaan juuri jarruttoman vaunun kohdalta. Aina on mahdollista, että jarrujentarkastaja ei huomaa tilannetta, jolloin uudessa rungossa jarruton vaunu on siten viimeisenä. Vaihtoehtoisesti vikatila voi syntyä vaunun jarrujärjestelmän vuotojen tai jarruventtiilin rikkoutumisen takia. Jos viimeinen vaunu on jarruton, voi se kiivetä raiteelta muun junan jarruttaessa ja aiheuttaa esimerkiksi kurvissa koko junan kaatumisen.

Viimeisen vaunun jarrusylinterin paineettomuutta simuloitiin poistamalla viimeisen vaunun jarrusylinteri käytöstä ja purkamalla sen apuilmasäiliön paine. Vaikutuksen havaitsemiseen valittiin koerungon kaikkien vaunujen sylinteripaineanturit (v1-v5 JS paine) ja jarrujohtoa mittaavat paineanturit (JJ MSR165 ja JJ paine).



Kuva 49. Vaunun jarrusylinterin paineettomuus ja hätäjarrutus

Kuvaajasta voidaan havaita, kuinka ajan ollessa 10:10 vaunun 5 (v5 JS paine) jarrut poistettiin käytöstä. Jarrut voidaan poistaa käytöstä jarruventtiilissä olevalla "on/off" -kytkimellä, joka erottaa vaunun jarrujärjestelmän jarrujohdosta. Kun venttiili oli asetettu "off" asentoon, apuilmasäiliön paineet vapautettiin jarruventtiilissä olevalla tyhjennysventtiilillä, joka yhdistää apuilmasäiliön jarrujohdon sijasta ympäröivään ilmatilaan. Tämä aiheuttaa jarruventtiilin logiikan takia paineen siirtymisen apuilmasäiliöltä jarrusylinterille, joka näkyy Kuvaajassa 49 vaunun 5 jarrusylinterin paineen nousupiikkinä (v5 JS paine) ajan ollessa 10:10:00. Kun jarrusylinterin paine tavoittaa apuilmasäiliön jatkuvasti alenevan paineen, alkaa myös jarrusylinterin paine pudota, joka näkyy kuvaajasta jarrusylinterin loivana laskuna ajan ollessa 10:10:00 – 10:12:30.

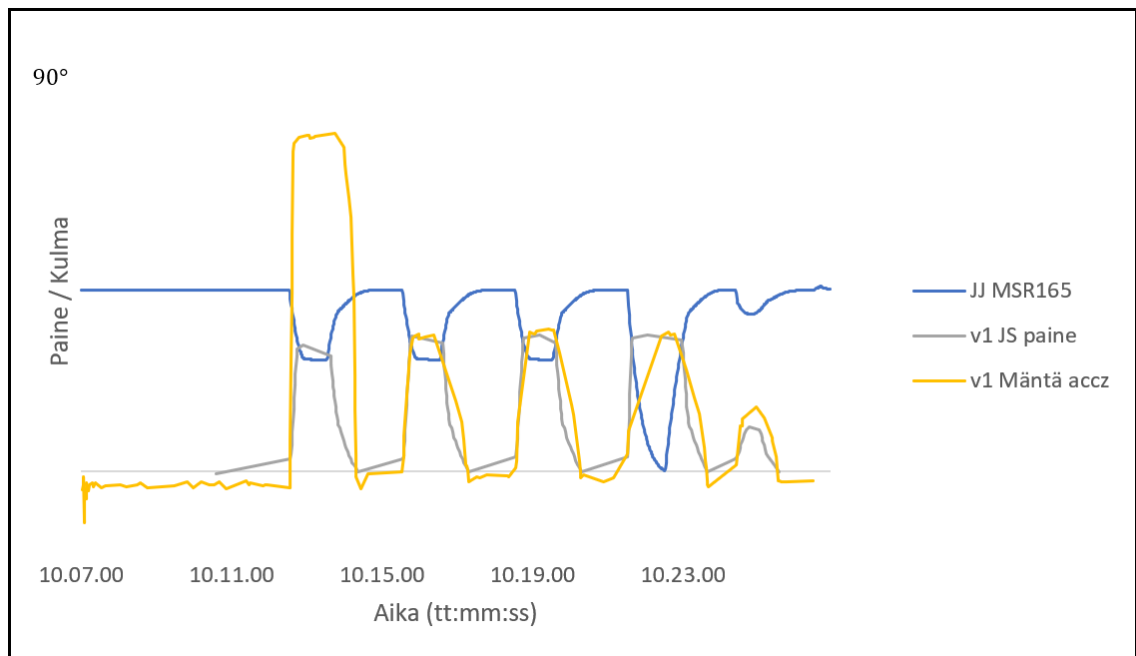
Kuvaajasta voidaan havaita, että jarrusylinterin paineen pudotus ei tuota vastetta jarrujohdon paineessa. Tämä johtuu siitä, että vaunun jarrujärjestelmä on erotettu jarrujohdosta (on/off) kytkimellä. Vastaavasti kuvaajasta voidaan havaita, kuinka 10:23:38 jarrujohdon paine putoaa hetkellisesti. Tilanteessa vaunun 5 jarruventtiili siirrettiin takaisin "on" -asentoon, mikä aloittaa vaunun apuilmasäiliön täyttämisen ja synnyttää hetkellisen painehäviön junan jarrujärjestelmässä.

Vikatilannesimulaatio oli onnistunut. Paineettoman jarrun havaitseminen junarungosta on mahdollista, kun vertaa vaunujen paineita toisiinsa tai jarrujohdon paineeseen. Lähtökohtaisesti paineen mittaus mahdollistaa jarrujärjestelmän normaalin toiminnan havaitsemisen, mutta millaisia vuotoja jarrusylinteristä voidaan havaita ja kuinka ne vaikuttavat paineen käyttäytymiseen normaalissa ja epänormaalissa tilanteessa, on mahdotonta sanoa.

7.4.3 Vivuston säätäjän vikatila

Kolmannessa vikatilasimulaatiossa haluttiin tutkia, kuinka sylinterin männän liikettä mittaamalla voidaan havaita häiriöitä vivuston säätäjän toiminnassa. Vivuston säätäjä vastaa siitä, että vaunujen jarruanturoissa on sopivat välykset pyörän kehään nähden. Mikäli vivuston säätäjä rikkoutuu, voivat vaunun jarruanturoiden välykset joko pienentyä tai kasvaa. Mikäli välykset pienenevät tarpeeksi, voivat jarrut alkaa laahaamaan tai jopa pahimmassa tapauksessa lukittua. Vastakohtaisesti välysten kasvaessa voi jarrutusteho heiketä, mikä voi aina pahimmillaan johtaa erittäin vakaviin raideliikenneonnettomuuksiin.

Vivustonsäätäjän vikatilaa simuloitiin säätämällä vivuston säätäjä väärin vaunussa 1. Vikatilasimulaation tapahtumat on piirretty Kuvaan 50, jossa tilanne voidaan havaita vaunun 1 jarrusylinterin paineesta (v1 JS paine) ja jarrusylinterin männän liikkeestä (v1 Mäntä accz), sekä jarrutapahtumia ohjaavasta jarrujohdon paineesta (JJ MSR165).



Kuva 50. Vivustonsäätäjän vikatila ja korjaantuminen

Kuvaajasta voidaan havaita, että ensimmäisen jarrutuksen kohdalla jarrusylinterin männän liike on huomattavasti normaalia liikettä suurempi. Tämä suurempi liike johtuu siitä, että vivuston säätäjän ollessa väärin, jarruanturoiden etäisyys pyörän kehään oli erittäin suuri. Kun jarrutus tapahtui, joutui vivusto liikkumaan huomattavasti pidemmän matkan, jotta jarruanturat painuivat pyörien kehää vasten. Suurempi jarruanturoiden välyys johtaa vivuston kautta siten siihen, että myös jarrusylinterin mäntä joutuu työntymään huomattavasti pidemmälle.

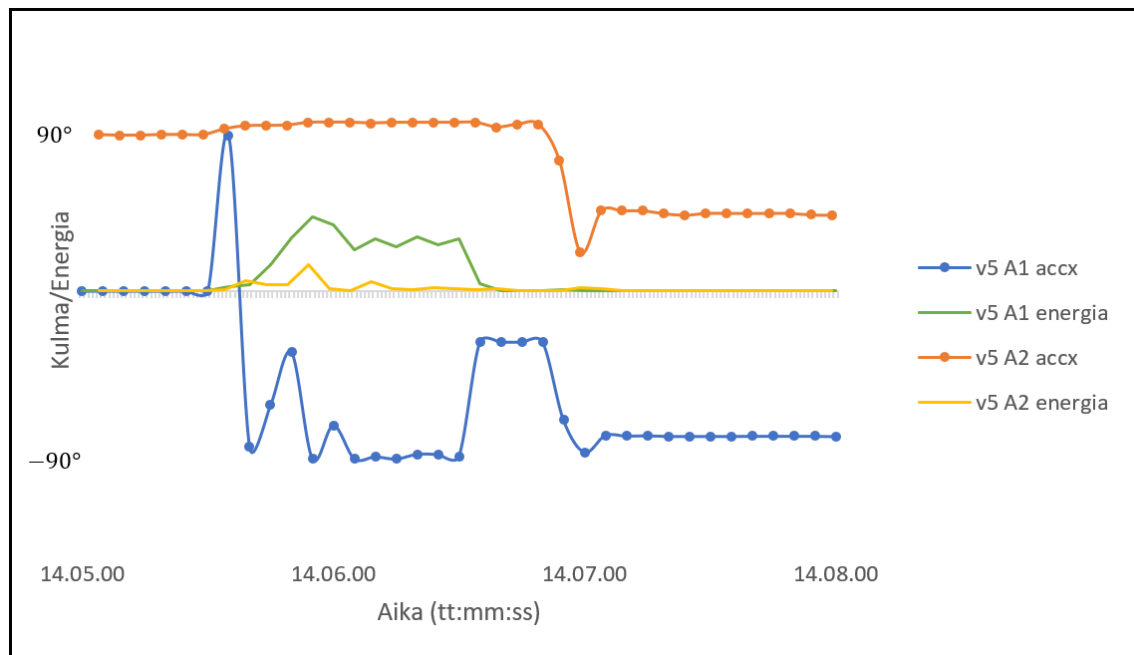
Tämä oli havaittavissa männän työntymää mittaavasta kulma-anturista (v1 Mäntä accz), joka päätyi 84,24 asteen kulmaan lähtötilanteeseen nähden. Männän työntymäksi mitattiin kokeen aikana jopa 240 mm. Seuraavilla jarrutuksilla vivuston säätäjä korjasi välykset kuntoon, ja mäntä palasi kuormavaihteen ollessa päällä normaaliin 33–34 asteen kulman tuottaviin jarrusylinterin männän työntymiin (140 mm).

Kokeen tulokset olivat hyviä. Männän työntymästä voidaan havaita muutos vivuston säätäjän säätöihin nähden. Mikäli mäntä päätyy koskaan ääriasentoonsa, on vivusto lähtökohtaisesti viikaantunut. Toisaalta, mikäli mäntä ei vetäydy lähtöpisteeseensä, estää jokin sen liikettä.

7.4.4 Pyörän lukkiutuminen

Tärkein vikatilasimulaatio jätettiin luonnollisesti viimeiseksi. Vikatilanteeksi valittiin tapahtuma, jossa kaikki mittaukset pettävät ja pyörät ovat tästä huolimatta lukossa junan liikkeelle lähtiessä. Tämä voi tapahtua esimerkiksi jarruanturoiden jäätyessä pyörän kehälle nopeiden lämpötilamuu-
tosten takia, mikä on yleinen vaiva Suomen tavaraliikenteessä. Suunnitelman mukaan vaunun ajoturvallisuus voidaan todeta viimekädessä pyörien pyörimisestä.

Viimeinen vikatilasimulaatio toteutettiin asentamalla vaunun 5 sisemmän akselin (v5 A2 accx) alle pysäytyskenkä, jonka päällä tutkittavan akselin pyörät luistivat raiteella. Kokeessa oli varustettuna kulma- ja kiihtyvyyssanturilla sekä sisempi akseli v5 A2, että vaunun toisessa päässä oleva ulompi akseli v5 A1. Lisäksi Kuvaan 51 on liitetty molempien antureiden kiihtyvyyksiä kuvaavat energia-arvot, jotka havainnollistavat junan liikettä. Kokeen tarkoituksena oli havaita, että pystyykö hitaalla 0,2 Hz mittaustaajuudella havaita pyörän liikkeelle lähtö ja toisen pyörän lukossa oleminen. Koe oli erittäin lyhyt, sillä emme halunneet särkeä Pieksämäen konepajan ratapihan rataa, mikä on aina vaarana, jos junan pyöräkerta on lukossa.



Kuva 51. Liikkeellelähtö lukkiutuneella pyörällä

Kuvaajasta voidaan havaita, kuinka ulompi akseli (v5 A1 accx) lähtee kellon ollessa 14:05:24 pyörimään liikkeellelähdön yhteydessä. Samalla voidaan havaita kuinka pyörivän pyörän kiihtyvyyden arvot (v5 A1 energia) nousee lukossa olevaa akselia v5 A2 mittaavan anturin kiihtyvyyss-
tasojen (v5 A2 energia) korkeammalle. Koe päättyy kellon ollessa 14:06:34, joka voidaan havaita kiihtyvyyksien (v5 A1-A2 energia) arvojen päättyessä nolliin. Kuvaajasta voidaan lisäksi havaita

rungon peruutus, 14:06:49 – 14:07:04, jolloin lukossa ollut akseli (v5 A2 accx) pyöräytetään pysäytyskengän päältä pois.

Koe oli onnistunut, sillä pyörän liikkeelle lähtö ja lukossa oleminen on selkeästi havaittavissa kulma-antureiden antamista arvoista. Koska kuvaajasta on havaittavissa anturiin kohdistuvien kiihtyvyyksien kasvu, vaikkei pyörä pyöri, on mittaukselle mahdollista jopa rakentaa sääntö: ”Mikäli kulma ei muutu, mutta pyörä kokee kiihtyvyyksiä, on pyörä todennäköisesti lukossa ja liikkeessä”. Havainto on erittäin arvokas, sillä se tarkoittaa sitä, että edellä mainittu sääntö voidaan asentaa anturiin sisään ja siten määritellä anturi lähettämään solmuverkon kautta vain tilatietoja liittyen lukkiutumiseen.

8. TULOSTEN ANALYSOINTI

Langattoman mittausjärjestelmän prototyypin mittaustuloksia analysoitiin sen toiminnallisuuden ja tiedonsiirron suorituskyvyn osalta. Mittausjärjestelmän toiminnallisuuden arvioimiseksi hyödynnettiin kappaleessa 2 esiteltyjä jarrujen toiminnan varmistamiseen liittyviä tarkistuslistoja, ja tiedonsiirron suorituskyvyn arvioimiseen kappaleessa 3 esiteltyjä suorituskyvyn termistöä.

8.1 Mittausjärjestelmän toiminnallisuus

Mittausjärjestelmän tavoitteena on havaita jarrujen toiminnan varmistamiseen liittyvät tapahtumat tarkastettavasta vaunurungosta. Tätä varten mittausjärjestelmän toiminnallisuutta arvioidaan analysoimalla saatuja mittaustuloksia kappaleessa 2.3 esiteltyjen täydellisen jarrujen tarkastuksen ja osittaisen jarrujen tarkastuksen tarkistuslistoihin (Taulukot 14 ja 15).

8.1.1 Täydellinen jarrujen tarkastus

Kokeiden mittaustuloksista havaittiin, että jarrujen täydellinen tarkastus voidaan pääosin toteuttaa langattomalla mittausjärjestelmällä tarkistuslistan (Taulukko 14) mukaisesti. Jarruanturoiden kiinnittyminen ja irtoaminen voitiin havaita jarrusylinterin paineen noususta ja laskusta, sekä jarrusylinterin männän liikkeestä. Ruuvijarrujen tila nähtiin ruuvijarrua mittaavasta kulma-anturista, ja jarrusylinterin männän liikettä mittaavasta kulma-anturista. Jarrulajiasettimien oikea asento taas voitiin havaita jarrulajiasetinta mittaavan kulma-anturin kulmasta ja jarrusylinterin paineen nousu- ja laskuajasta. Kuormajarrun tila voitiin havaita jarrusylinterin männän kasvaneesta liikemäärästä ja viimeisen vaunun jarruttomuus taas jarrusylinterin paineettomuudesta.

Taulukko 14. Täydellisen jarrujen tarkastuksen tarkistuslista

Tarkastuksessa on todettava	Havaitseva anturi
<i>Jarruanturoiden kiinnittyminen ja irtoaminen</i>	Jarrusylinterin paine, jarrusylinterin männän liike, akselin pyörintä
<i>Ruuvijarrut ovat irti</i>	Ruuvijarrun kulma, jarrusylinterin männän liike, akselin pyörintä
<i>Jarruanturat eivät ole kuluneet käyttörajamittaansa</i>	Ei
<i>Jarrulajiasettimet ovat oikeissa asennoissaan (M / T)</i>	Jarrulajiasettimen asento ja jarrusylinterin paine
<i>Mikäli vaunussa on kuormajarruasetin, niin se on oikeassa asennossa</i>	Jarrusylinterin männän liike
<i>Vaunuissa ei ole vapaina roikkuvia letkukytkimiä ja ovat ripustettuna lepovidikkeisiinsä kytkinhanat suljettuina.</i>	Kytkinhanat: Jarrujohdon paine, Jarrusylinterin paine. Roikkuvat letkukytkimet: ei
<i>Jarrujen tarkastuksessa kuunnellaan vuotoja</i>	Jarrujohdon paineanturit, jarrusylinterin paineanturit
<i>Tarkastetaan että viimeinen vaunu ei ole jarruton</i>	Jarrusylinterin paine
<i>Suljetaan vikaantuneet jarrut ja tehdään niistä, sekä muista havainnoista ilmoitus ohjausjärjestelmään</i>	Ei

Taulukosta 14 voidaan havaita, että jarrujärjestelmän toiminnan varmistus olisi mahdollista toteuttaa vain alkuperäistä arkkitehtuuria vähemmällä anturimäärällä. Jarrulajiasettimen ja ruuvijarrun asennon mittausta ei tarvita, kun molempien asennot ovat mitattavissa jarrusylinterin paineesta ja jarrusylinterin männän liikkeestä. Koska mittausjärjestelmän luotettavuutta on vaikea arvioida, ja mitattavan jarrusylinterin männän ja jarruanturan välissä on epävarmuustekijöitä aiheuttava vivusto, haluttiin mittausjärjestelmään asentaa varmuuden vuoksi akselin pyörintää mittaava anturi. Akselin pyörinnästä pystyttiin havaitsemaan sekä pyörän pyörintään lähtö, että liikkeelle lähtö pyörän ollessa lukossa. Kulma-anturit akseleihin lisäämällä voidaan varmistaa, ettei lukittuneella pyöräkerralla ajeta tilanteissa, joissa muut mittauslaitteet ja -menetelmät pettävät. Näin lopulliseksi mittausarkkitehtuurin kooksi muodostui 6 anturin kokonaisuus, jossa mitataan yhdellä anturilla jarrusylinterin painetta, yhdellä anturilla jarrusylinterin männän liikettä ja 4 anturilla vaunun jokaisen akselin pyörintää.

Tästä huolimatta tarkistuslistan kaikkia kohtia ei ollut mahdollista havaita tai toteuttaa mittausjärjestelmällä. Nämä puutteet ovat nähtävissä Taulukosta 14, ja ne olivat jarruanturoiden kuluneisuuden ja letkukytkimien riipunnan havaitseminen, sekä vikaantuneiden jarrujen sulkeminen.

Jarruanturoiden kuluneisuuden ja letkukytkinten riipunnan mittaaminen koettiin liiketoiminnallisesti kannattamattomaksi ja tehottomaksi. Mittausjärjestelmän sijaan ulkopuolinen mittausjärjestelmä, kuten kuvantaminen ja konenäön hyödyntäminen, olisi näihin tarpeisiin huomattavasti kustannustehokkaampi ratkaisu. Vikaantuneiden jarrujen automaattinen sulkeminen taas vaatisi mittausjärjestelmän muutoksen ohjausjärjestelmäksi, joka vaatisi omat tutkimuksensa. Tässä työssä tämä on siten jätetty vielä kuljettajan tehtäväksi, vaikka teknologia siihen muuten kykenisi.

8.1.2 Osittainen jarrujen tarkastus

Osittaisia jarrujen tarkastuksia toteutetaan vain erikoistilanteissa, jotka käsiteltiin kappaleessa 2.3.3. Osittaisessa jarrujen tarkastuksessa tarkastetaan vain viimeisen vaunun jarrujen kiinnittyminen ja irtoaminen, sekä kaikkien paineilmajarrujen irtoaminen (Taulukko 15).

Taulukko 15. Osittaisen jarrujen tarkastuksen tarkistuslista

Tarkastuksessa on todettava	Havaitseva anturi
<i>Tarkastetaan että viimeisen vaunun jarrujen kiinnittyminen ja irtoaminen</i>	Jarrusylinterin paine
<i>Kaikkien paineilmajarrujen irtoaminen</i>	Jarrusylinterien paine, pyörien pyörintä

Kuten taulukosta voidaan huomata, on sen vaatimukset huomattavasti täydellistä jarrujen tarkastusta kevyemmät. Osittaisen jarrujen tarkastuksen tarkoitus on lähtökohtaisesti havaita, että viimeinen vaunu ei ole jarruton, ja että lyhyen pysähdyksen aikana anturat eivät ole jäätyneet pyörien kehälle, eikä vaunun jarrujärjestelmään ole jäänyt ylilatauksen takia jarrutus päälle.

Viimeisen vaunun paineettomuus ja ylilataus voidaan havaita jarrusylinterien paineesta, ja jäätyminen taas pyörien pyörinnästä. Pyörän pyörinnän mittaaminen takaa myös sen, että päälle jääneet ruuvijarrut voidaan havaita ilman erillistä anturia.

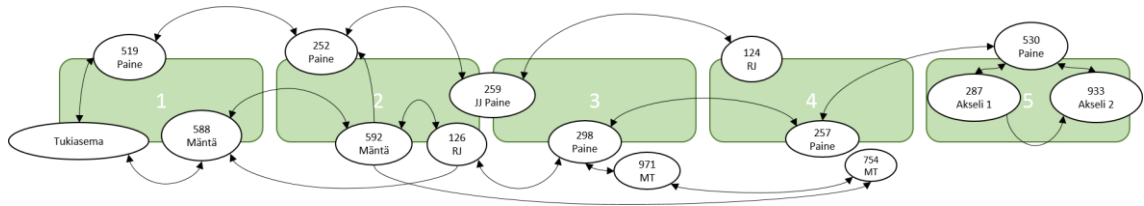
On kuitenkin arvioitava, onko vähäisempi mittausmäärä liiketoiminnallisesti hyödyllistä. Mikäli junan täydellisen ja osittaisen jarrujen tarkastuksen toteuttaminen automaattisesti on yhtä nopeaa, häviää tarve erilliselle osittaisen jarrujen tarkastuksen prosessille.

8.2 Mittausjärjestelmän tiedonsiirtomenetelmän arviointi

Mittausjärjestelmän tiedonsiirtoa arvioitiin usealta kantilta, kuten sen topologian, yhteyden toimivuuden, viiveiden ja verkon muodostumiseen kuluneen ajan osalta. Näiden osakokonaisuuksien avulla pystyttiin luomaan kokonaisvaltainen käsitys solmuverkon soveltumisesta mittausjärjestelmän tiedonsiirtomenetelmäksi.

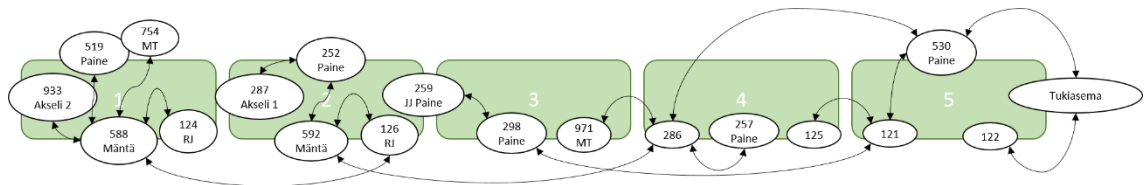
8.2.1 Mittausjärjestelmän topologia ja mukautuminen muuttuvaan junakokoonpanoon

Solmuverkon eduksi mainitaan usein yhteyksien autonominen verkottuminen ja korjaantuminen muuttuvissa tilanteissa. Tämä mahdollistaa luotettavan yhteyden pitkienkin matkojen päähän. Jotta tätä verkottumista voidaan tarkastella, on syytä tutkia kokeissa muodostuneita topologioita. Topologiat selvitettiin paikallaan ja liikkeellä tehtyjen kokeiden aikana, jolloin mittausarkkitehtuuria oli muutettu kappaleessa 6.1 esitetyn mukaisesti. Muodostuneita topologioita tarkastelemalla voimme arvioida solmuverkon rakennetta ja pohtia sen vahvuuksia ja heikkouksia. Tässä kappaleessa on mallinnettu mittauslaitteiden sijainnit koerungossa ja piirretty nuolilla niiden väliset tiedonsiirtoyhteydet. Paikallaan tehtyjen kokeiden topologia on piirretty Kuvaan 52 ja liikkeellä tehtyjen kokeiden topologia taas Kuvaan 53.



Kuva 52. Topologia, kun koerunko oli paikallaan

Kuten Kuvasta 52 voidaan havaita, oli tukiasema paikallaan tehtävien kokeiden aikana vaunun 1 kulmalla, ja antureita oli sijoitettu suunnitelman mukaisesti pitkin koerunkoa vaunuihin 1–5. Tukiasemassa olivat ensimmäisenä yhteydessä vaunun 1 sylinteripaineanturi 519 ja sylinterin männän työntymää mittaava kulma-anturi 588. Näiden solmujen kautta verkko jatkui aina vaunuun 5 asti solmuille 287 ja 933, jotka mittasivat akselin pyörintää. Kuvasta voidaan todeta, että verkottuminen oli onnistunut ja risteäviä yhteyksiä on useita. Kuvasta on kuitenkin huomioitava se, että mitä kauempana tukiasemasta anturit sijaitsivat, sitä puurakenteisemmaksi topologiakuvaaja muuttuu.



Kuva 53. Topologia, liikkeellä tehtävien kokeiden aikaan

Topologia muuttui kolmantena koepäivänä, kun antureiden sijainteja vaihdettiin. Tavoitteena oli tutkia, kuinka solmuverkko kykenee reagoimaan muuttuvaan topologiaan. Tukiasema siirrettiin kokeiden aikana veturiin, joka oli vaunun 5 edessä. Sen lisäksi koerunkoon lisättiin 4 reitittävää lisäänturia (122, 121, 125, 286), sekä anturijärjestystä muutettiin Kuvan 53 mukaiseksi.

Uudesta järjestyksestä ja lisätyistä reitittävistä antureista huolimatta verkosta tuli jälleen puurakenteinen. Tämä aiheuttaa tukiaseman lähimmille antureille huomattavan suuren kuorman ja pullonkaulan verkon tiedonsiirrolle.

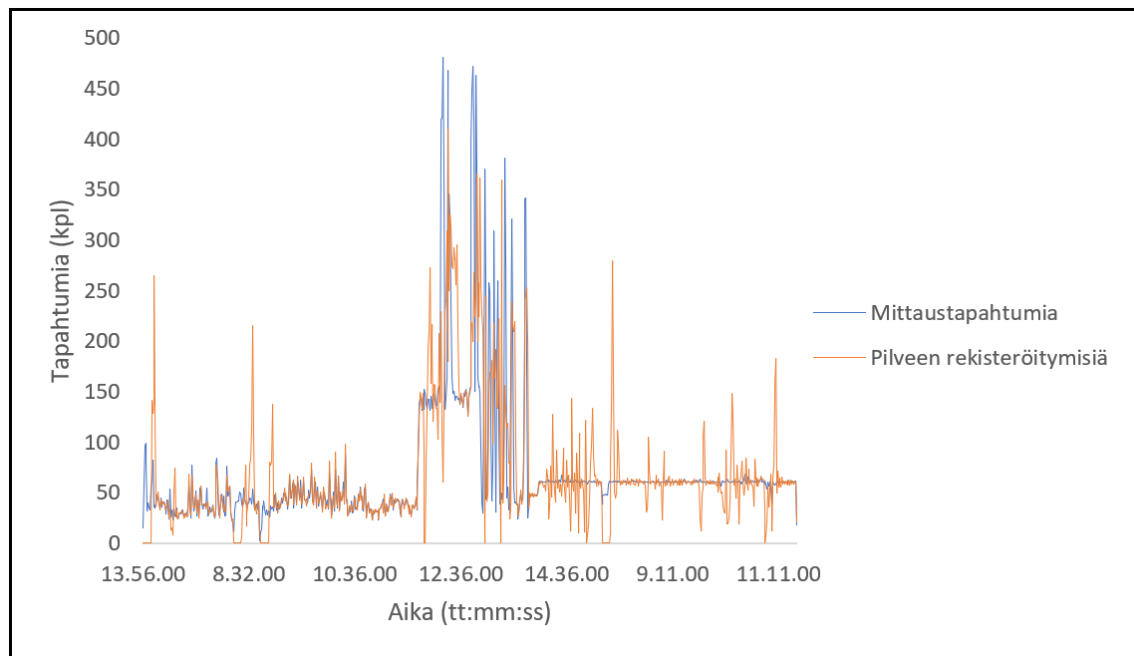
Molemmat topologiat (Kuva 52 ja Kuva 53) havainnollistavat yhtä aikaa solmuverkon parhaat ja heikoimmat puolet. Kuten kuvista voidaan nähdä, on tukiasemasta riippumatta jokainen vaunun anturi saanut yhteyden tukiasemalle, mikä on positiivinen tulos. Kuten kappaleessa 4 käsiteltiin, mittaustopologian on oltava adaptiivinen muuttuviin vaunujärjestyksiin. Mittaustulosten perusteella voidaan todeta, että solmuverkkoon pohjautuva mittausjärjestelmä pystyy siihen.

Toisaalta topologiakuvaajista voidaan havaita solmuverkon heikkous junakokoonpanossa, joka on sen ilmeinen taipumus luoda puurakenteinen verkko. Puumainen topologia on ongelmallinen verkossa, jossa solmujen viestintä tukiaseman kanssa tapahtuu välissä olevien solmujen avulla. Kuten kuvista voidaan nähdä, se aiheuttaa useita pullonkauloja verkon tietoliikenteelle. Pullonkaula solmuverkossa tarkoittaa sitä, että yksi anturi joutuu reitittämään kaikkien sen takana olevien mittaussolmujen informaation eteenpäin kohti tukiasemaa. Tämä taas johtaa viiveisiin ja pa-

himmillaan datan häviämiseen, mikäli pullonkaulasolmun läpisyöttö ei riitä mittaustietojen reititykseen. Lisäksi yhden solmun kuormittaminen suurella määrällä reitittämispyyntöjä johtaa suurempaan energian kulutukseen, mikä voi johtaa pahimmassa tapauksessa solmun akun ennenaikaiseen tyhjenemiseen ja koko järjestelmän tiedonsiirron halvaantumiseen.

8.2.2 Yhteyden katkeamiset ja datan purkautuminen

Järjestelmän tiedonsiirron toimintaa voidaan havainnollistaa vertaamalla mittaustapahtumien ja pilveen rekisteröityneiden JSON-tiedostojen määrää Kuvan 54 mukaisesti. Kuvaajassa on laskettu mittaussysteemin mittaustapahtumat ja mittaustapahtumien pilveen rekisteröitymiset jokaista minuuttia kohden kokeiden ajalta. Tämä muodostaa kuvaajan, jossa mittaustapahtumat kuvaavat koepäivien tapahtumia totuuden mukaisesti, ja jossa pilveen rekisteröitymiset kuvaavat sitä, kuinka järjestelmä on purkanut näitä mittaustapahtumia pilveen.



Kuva 54. Mittaustapahtumien määrä ja pilveen rekisteröityneiden tapahtumien määrä per minuutti

Kuvaaja havainnollistaa mittausjärjestelmän kuormitusta erinomaisesti. Mitä enemmän tapahtumia syntyy mittausjärjestelmässä, sitä enemmän niitä tallentuu pilveen minuutin aikana. Tämä on havaittavissa kuvaajan keskellä olevasta tapahtumien kovasta noususta, jolloin järjestelmää kuormitettiin tahallisesti liikkeellä tehtävien kokeiden avulla.

Tiedonsiirrossa on havaittavissa selvää taipumusta purkautumisille, kun pilveen rekisteröitymisten määrä tekee piikkejä molempiin suuntiin. Vertaamalla purkauksien tapahtuma-aikoja koepäiväkirjan kirjauksiin (Liite 3), on mahdollista luoda kolme purkautumisiin johtanutta syytä:

1. Tukiaseman liittäminen solmuverkkoon tai sen paikan vaihtaminen verkossa
2. Tukiaseman datayhteyden katkeaminen
3. Tukiaseman sijainti veturissa

Tukiaseman liittäminen solmuverkkoon tai sen paikan vaihtaminen verkossa on selkein syy datan purkautumiselle. Se on havaittavissa tilanteissa, joissa pilveen rekisteröitymiset ovat olleet nollassa, mutta mittaustapahtumia on silti tallentunut kyseenomaiselle aikayksikölle (minuutti). Tämä kuvaa sitä, että solmuverkossa ei ole ollut hetkeen tukiasemaa, ja anturit ovat tallentaneet siltä ajalta mittauksensa sisäiseen muistiinsa. Tukiaseman liittyessä takaisin solmuverkkoon, ovat anturit purkaneet muistissa olleet mittaustietonsa tukiasemalle ja se on johtanut hetkellisesti suureen määrään pilveen rekisteröityneitä mittaustapahtumia.

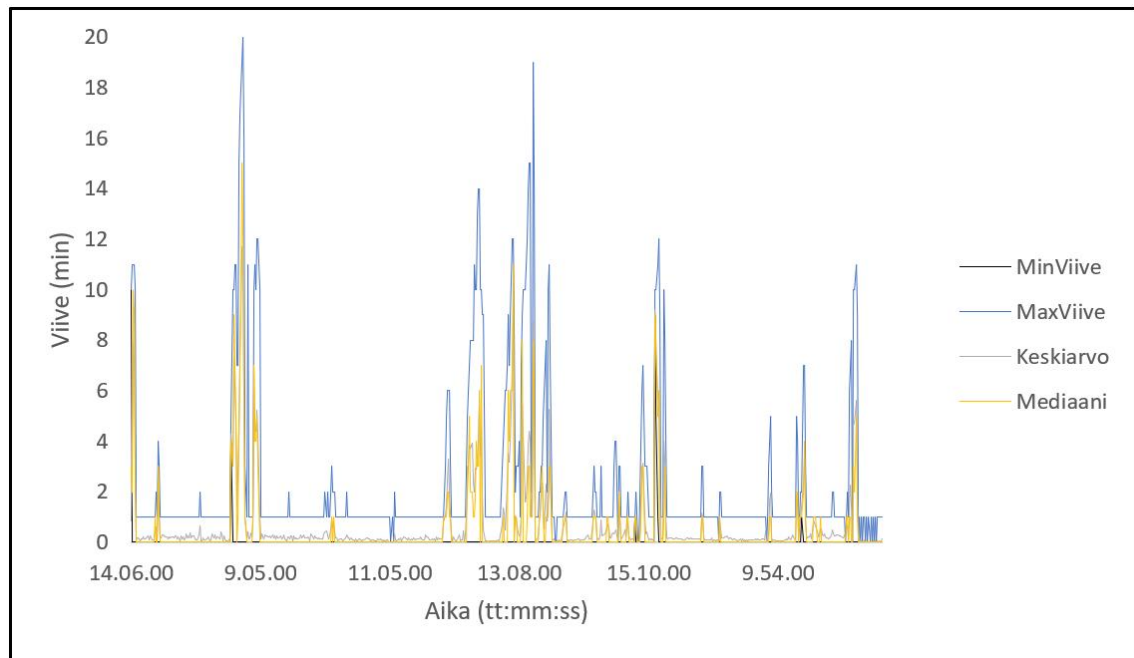
Toinen syy on kokeissa useasti tapahtunut tukiaseman 3G yhteyden katkeaminen. Näissä tilanteissa tukiasema puskuroi kaiken solmuverkolta saapuneen tiedon omaan muistiinsa, kunnes yhteys palautui ja tukiasema pystyi purkamaan muistinsa pilveen. Nämä tilanteet voivat olla lyhyitä tai pitkiäkin ajan jaksoja, ja siten niiden erotteleminen kuvaajasta on haastavaa.

Viimeinen selkeä syy oli tukiaseman sijainti veturin kopissa, joka johti yhteysongelmiin solmuverkon ja tukiaseman välillä. Tämä pystyttiin havaita, kun tietokoneelta saatiin yhteys tukiasemalle, mutta jostain syystä tukiasemalla ei ollut yhteyttä solmuverkkoon. Tämä tilanne luonnollisesti tuotti yhtä lailla mittaustietojen purkautumista tukiasemalle yhteyden jälleen synnyttyä. Yhteys tukiaseman ja solmuverkon kanssa voi katkeilla lyhyiksi ajoiksi, joka voidaan havaita kuvaajasta nopeina pieninä purkauksina. Tutkimuksen pohjalta voidaan todeta solmuverkon tiedonsiirron purkautumistaipumuksen johtuvan yhteyden katkeamisesta solmuverkon ja pilven välillä.

Mittauspäiväkirjan mukaan näitä tilanteita tapahtui useasti koepäivien aikana, ja siksi muitakin syitä voi olla - mutta niitä on mahdotonta havaita ilman erillisiä kokeita hallitussa ympäristössä. On kuitenkin selvää, että identtiset tilanteet tulevat tapahtumaan operatiivisessa ympäristössä. Suomen rataverkolla on katvealueita, järjestelmän yhteydet voivat takkuilla, ja tukiaseman sijainti vaihtuisi operatiivisen toiminnan takia päivittäin. Mikäli tiedonsiirron purkauksellisuus aiheuttaa ongelmia järjestelmän toiminnalle, olisikin syytä pohtia vaihtoehtoja esimerkiksi järjestelmän muistien kokoon ja purkautumisen hallintaan liittyen. Purkauksellisuus voi aiheuttaa ongelmia mittausjärjestelmän toiminnalle, jos se aiheuttaa tiedonsiirrolle liian suuria viiveitä.

8.2.3 Viiveet mittausjärjestelmän tiedonsiirrossa

Mittausjärjestelmässä syntyneiden viiveiden laskemista varten tallennettiin jokaiseen pilveen rekisteröityyn mittaustapahtumaan aikaleimat itse mittauksesta, ja mittaustapahtuman luoman JSON-tiedoston pilveen rekisteröitymisestä. Tämä mahdollisti viiveen laskemisen yksilökohtaisesti kullekin mittaustapahtumalle ja siten kaikkien pilveen rekisteröityneiden tapahtumien viiveiden tilastoimisen Kuvaajaan 55. Koska tutkimuksessa arvioitiin koko järjestelmän suorituskykyä, ei viiveitä tarvitse mallintaa solmukohtaisiksi. Kuvaajaan tilastoitiin täten kaikkien mittauslaitteiden osalta pilveen rekisteröitymisajan suhteen minimiviive (MinViive), maksimiviive (MaxViive), viiveen keskiarvo (Keskiarvo), sekä viiveiden mediaani (Mediaani).



Kuva 55. Viive mittauksen ja pilveen saapumisen osalta

Koepäivien suurimmat viiveet syntyivät tilanteissa, jolloin solmuverkko koki kovan kuormituksen. Nämä tilanteet syntyivät joko yhteyden katkeamisen (purkausten) takia tai mittaustapahtumien kasvaneen määrän takia. Suurin rekisteröitynyt viive syntyi toisen koepäivän aamuna, kun solmuverkko purki mittaustuloksia viimeisen 20 minuutin osalta tukiasemalle, joka liittyi ensimmäistä kertaa päivän aikana solmuverkkoon. Toiseksi suurin viive (19 minuuttia) syntyi liikkeellä tehtävien kokeiden aikana kellon ollessa 13:22:00. Kuvasta 54 oli nähtävissä, että juuri ennen tätä (13:21:00), pilveen rekisteröityneiden määrä on käynyt nollassa tarkoittaen yhteyden hetkellistä katkeamista. Yhteyden katkeaminen alle minuutiksi ei kuitenkaan selitä solmuverkosta saapunutta 19 minuuttia vanhaa viestiä, joten syyksi voidaan olettaa kuormituksen ja yhteyden katkeamisen yhteisvaikutusta.

Kuormitus on selkeästi aiheuttanut viiveitä järjestelmälle, kun katsotaan viiveiden mediaania (Mediaani) kuormitustilanteissa. Viiveiden mediaanilla voidaan kuvata tilastollisesti sitä, kuinka suurin osa mittausalkioista on käyttäytynyt mittausjärjestelmässä tietynä ajan hetkenä tai laajemmassa aikaikkunassa. Mikäli mediaani pysyy korkealla, kertoo se siitä, että kyseisessä aikaikkunassa suurin osa pilveen rekisteröityneistä mittaustapahtumista on ollut tasaisesti viiveellisiä läpi kyseisen aikaikkunan. Tämä indikoi sitä, että järjestelmässä on syntynyt kuormituksen takia pullonkauloja, jotka ovat johtaneet tukiasemasta kauimpien mittauslaitteiden mittaustulosten hitaaseen siirtymiseen tukiasemalle.

8.2.4 Verkon muodostamiseen kuluva aika

Viimeinen osuus, jota tarkasteltiin ja mitattiin tiedonsiirtojärjestelmän osalta, oli verkon muodostamiseen menevä aika. Sen suuruus on mittausjärjestelmän liiketoiminnallisuuden näkökannalta olennainen tieto, sillä se määrittelee, kuinka kauan tukiaseman on oltava mittausjärjestelmään

liitettynä, ennen kuin jarrujen toiminnan varmistamisen voi aloittaa. Verkon muodostumiseen kulunutta aikaa pystytään tarkastelemaan jälkikäteen tutkimalla pilveen rekisteröitymisaikoja (Kuva 54) ja laskemalla ensimmäisen ja viimeisen anturin liittymisajan erotus. Verkon muodostumiseen kuluneet ajat on laskettu Taulukkoon 16.

Taulukko 16. Verkon muodostumiseen kulunut aika

Tukiaseman tapah- tuma ja kellon aika	Ensimmäisen antu- rin liittymisaika	Viimeisen antu- rin liittymisaika	Verkon muodostumi- seen kulunut aika
<i>Käynnistys (1. päivä)</i> <i>klo 14:06</i>	14:06 (588, 592, 126)	14:09 (933, 287)	3 min
<i>Käynnistys (2.päivä)</i> <i>klo 8:24</i>	8:24 (588)	8:31 (287)	7 min
<i>Katko 10min (2.päivä)</i> <i>klo 8:49 - 8:59</i>	8:59 (588, 592, 126)	9:03 (287)	4 min
<i>Katko 3min (2.päivä)</i> <i>klo 11:55 - 11:57</i>	11:57 (287, 592, 124, 933)	11:58 (588, 971, 754, 126)	2 min
<i>Käynnistys (3.päivä)</i> <i>klo 8:00</i>	8:00 (933)	8:08 (287)	8 min

Taulukkoon 16 on lueteltu viisi kappaletta merkittäviä tukiaseman katkoksia. Nämä olivat jokaisen koepäivän ensimmäiset käynnistykset ja toisen koepäivän kaksi hieman pidempää katkosta. Taulukosta voidaan huomata, että käynnistysten yhteydessä verkon muodostumiseen kulunut aika on katkojen aikaisia tuloksia suurempi. Lisäksi taulukosta voidaan havaita, että hitain liittyjä oli yleensä akselianturi 287.

Katkojen jälkeen mittauslaitteet saivat yhteyden tukiasemaan huomattavan nopeasti. Tämä voi johtua siitä, että mittauslaitteet olivat katkojen aikaan aktiivisina meneillään olevien kokeiden takia. Aktiivisuuden takia useat mittauslaitteet saattoivat olla valmiiksi mittaasetuksessa lepoasetuksen sijaan, jolloin pulssisuhde oli nopeampi. Toisaalta voi olla myös mahdollista, että viestit olivat lähteneet liikkeelle, ennen kuin tukiaseman yhteys katkesi.

Tukiaseman käynnistysten yhteydessä sen sijaan havaittu verkon hidastuminen johtunee siitä, että yön yli levossa olleet anturit olivat kaikki lepoasetuksissaan. Koska lepoasetuksissa antureiden pulssisuhde on matalampi, kulkee viesti tukiasemasta solmuilta solmuille sen mukaisesti. Verkon muodostumisen nopeuteen vaikuttaa silloin lepoasetuksen pulssisuhde ja topologian mukainen etäisyys tukiasemasta. Tästä esimerkkinä tutkimuksissa usein verkkoon viimeisenä liittynyt akselianturi 287, joka omasi erittäin matalan pulssisuhteen lepoasetuksissaan ja sijaisi topologioissa (Kuva 52 ja 53) aivan perällä.

Näistä johtopäätöksistä poiketen, mittauslaitteet saivat yhteyden tukiasemaan erittäin nopeasti ensimmäisenä päivänä käynnistyksen jälkeen. Toisaalta tämä poikkeavan nopea yhteyden muodostus voi johtua siitä, että tukiaseman käynnistyksen yhteydessä toteutettiin mittauslaitteiden asennuksia. Asennukset johtivat mahdollisesti mittauslaitteiden siirtymiseen mittausasetukseen, joka vaikutti pulssisuhteeseen. Tämä tukisi johtopäätöksiä, joiden mukaan antureiden lepoasetus johtaisi hitaampaan verkon muodostukseen, ja että verkon muodostusta voisi parantaa fyysisellä herätteellä pulssisuhteen optimoinnin ohella.

9. KEHYS OPTIMOIDUN JARRUJEN TOIMINNAN VARMISTAMISEN MITTAUSJÄRJESTELMÄLLE

Tuloksista havaittiin, että mittausjärjestelmän viiveet nousivat liian korkeiksi rasituksessa. Tämän takia mittausjärjestelmän alustava malli, jossa jokainen mittaustapahtuma lähetetään pilveen analysoitavaksi, ei sovellu jarrujen toiminnan varmistamiseen liiketoiminnalliselta näkökannalta. Tutkimuksessa havaittujen viiveiden takia mittausjärjestelmän kehittämiseen on muutama vaihtoehto:

1. Jarrujentarkastusalueelle sijoitetaan ylimääräisiä tukiasemia jakamaan järjestelmän kuormitusta ja poistamaan pullonkauloja
2. Jarrujen tarkastuksen mittaukset ja toiminta optimoidaan niin, että yksittäisten mittaustapahtumien sijaan mittauslaitteet lähettäisivät tilatietoja ja vikakoodeja
3. Mittausjärjestelmän tiedonsiirto toteutetaan hitaan ja nopean tiedonsiirron hybridinä, jossa yhdistetään matalaenerginen ja pieniviiveinen protokolla, kuten Wirepas ja 5G

Vaihtoehtoista 1. ja 3. ovat kustannustehottomia, ja siten eivät sovellu ensisijaiseksi tavaksi parantaa mittausjärjestelmän suorituskykyä. Vaihtoehto 2 sen sijaan mahdollistaa jarrujen toiminnan varmistamisen ilman järjestelmän laitteiston määrän kasvattamista - vaikkakin kunnonvalvontasovellusten kustannuksella. Vaikka se ei olisi optimaalinen järjestelmä kunnossapidäjän näkökulmasta, mahdollistaisi se kunnossapidon optimoinnin esimerkiksi mahdollistamalla siirtymisen jarrutoimilaitteiden kilometriperusteisesta kunnossapitosuunnitelmasta käyttöön perustuvaan kunnossapitoon. Tässä kappaleessa esitellään, millaisia tuloksia vaihtoehto 2 teoreettisesti voisi tuottaa jarrujen tarkastuksen automatisoinnissa.

9.1 Langattoman mittausjärjestelmän optimointi

Mittausjärjestelmää voitaisiin optimoida niin, että sen mittauslaitteet lähettäisivät jarrujen koetteluissa tapahtuvista jarrujen kiinnittymisestä ja irrottamisesta vain koosteen yhden paketin kokoisena. Tällöin järjestelmän viiveet saataisiin jarrujen koettelun osalta minimaaliseksi. Wirepas-protokolla lupaa uusimmalle 5. sukupolven protokollalleen 1,5 pkt/s läpisyöttöä, mikäli eliniäksi halutaan esimerkiksi 5 vuotta (Wirepas 2020). Tämä olisi soveltuvaa rautatieliikenteeseen, sillä kunnossapitovälejä pyritään pidentämään jatkuvasti. Jarrujen toiminnan varmistaminen voitaisiinkin parhaimmillaan toteuttaa kovan optimoinnin avulla kahdessa osassa, jarrujen sylinteripaineen ja sylinterien mäntien liikkeen mittauksella, ja junarungon lyhyellä 5 metrin siirtymällä. Kokeen ensimmäisessä vaiheessa varmistettaisiin jarrujen sylinterien ja vivuston liikkuminen ja toisessa vaiheessa varmistettaisiin, että anturat eivät ole jostain syystä lukinneet pyöriä.

Teoreettisesti jarrujärjestelmän toiminnan varmistaminen ensimmäisen vaiheen osalta voitaisiin laskea jarrujen kiinnittymisen ja jarrujen irrottamiseen menevän ajan summasta, lisäämällä siihen

koeteltavan junakokoonpanon antureiden määrän ja solmuverkon läpisyötön osamäärä molempien tilojen mittauksen osalta. Tämä voidaan kuvata funktiona:

$$T_{koettelu} = T_{jarrujen\ kiinnittyminen} + \frac{(Vaunumäärä * Anturit_{sylinterit})}{Solmuverkon\ läpisyöttö} + T_{jarrujen\ irrottaminen}$$

$$+ \frac{(Vaunumäärä * Anturit_{sylinterit})}{Solmuverkon\ läpisyöttö}$$

$$T_{koettelu} = T_{jarrujen\ kiinnittyminen+irrottaminen} + 2 * \frac{(Vaunumäärä * Anturit_{sylinterit})}{Solmuverkon\ läpisyöttö}$$

Mittaustulosten mukaan vaunujen jarrujen kiinnittymiseen ja irrottamiseen menevä aika riippuu jarrulajiasettimien asennosta. Knorr-Bremzen KE-GP jarrujärjestelmäohjekirjan mukaan M asennossa kiinnittymiseen menisi maksimissaan 5 sekuntia ja irtoamiseen 20 sekuntia, eli yhteensä 25 sekuntia. T-asennossa taas kiinnittymiseen menisi 30 sekuntia ja irrottamiseen 60 sekuntia, jolloin kokonaisuudessaan aikaa kuluisi 90 sekuntia. Mittaustuloksissa saimme eri tulokset, mutta päätelimme sen johtuvan koetinlaitteen pienestä liitäntäletkusta. Tästä syystä näissä laskuissa käytetään Knorr-Bremzen esittelemiä teoreettisia lukuja. Vaunujen maksimaalinen sallittu mitta Suomen rataverkolla on 40 vaunua ja karsitussa mittausarkkitehtuurissa vaunuun asennettaisiin vain 2 anturia, eli jarrusylinterin paineanturi ja sylinterin männän liikettä mittaava anturi. Tällöin jarrujen täydelliseen koetteluun menevä aika olisi:

$$T_{koettelu\ M} = 25s + 2 * \frac{(40 * 2)}{\frac{1,5}{s}} = \sim 131s$$

$$T_{koettelu\ T} = 90s + 2 * \frac{(40 * 2)}{\frac{1,5}{s}} = \sim 197s$$

Onnistuneen jarrujen koettelun lisäksi toiminnan varmistamisessa olisi tärkeää todentaa, ettei pyörät olisi jostain syystä lukkiutuneet. Tämä voi tapahtua esimerkiksi vivuston mekaanisissa vaurioissa ja jarruanturoiden jäätymistilanteissa. Tästä syystä toiminnan varmistamisessa olisi tehtävä sopiva, noin 5–10 metrin liike ratapihalla, jolloin akseleissa kiinni olevat anturit mittaisivat pyörän pyörintää. Tähän menisi arviolta noin 20 sekuntia. 2. kokeen funktioksi saataisiin siten:

$$T_{liike} = T_{ajo} + \frac{(Vaunumäärä * Anturit_{akselit})}{Solmuverkon\ läpisyöttö}$$

$$T_{liike} = 20s + \frac{(40 * 4)}{1,5/s} = \sim 127s$$

Mikäli molemmat kokeet toteutettaisiin yhtenä kokonaisuutena, saataisiin jarrujen toiminnan todentamiselle kokonaisfunktio:

$$T_{jarrujen\ toiminnan\ varmistaminen}$$

$$= T_{jarrujen\ kiinnittyminen+irrottaminen} + 2 * \frac{(Vaunumäärä * Anturit_{sylinterit})}{Solmuverkon\ läpisyöttö}$$

$$+ T_{ajo} + \frac{(Vaunumäärä * Anturit_{akselit})}{Solmuverkon\ läpisyöttö}$$

$$\begin{aligned}
T_{\text{jarrujen toiminnan varmistaminen}} &= T_{\text{jarrujen kiinnittyminen+irrottaminen+ajo}} \\
&+ \frac{\text{Vaunumäärä} * (2 * \text{Anturit}_{\text{sylinterit}} + \text{Anturit}_{\text{akselit}})}{\text{Solmuverkon läpisyöttö}}
\end{aligned}$$

Eli loppujen lopuksi saataisiin M ja T jarrulajeille 40 vaunun mittaisen tavarajunan täydelliselle jarrujärjestelmän toiminnan varmistamiselle tulokseksi:

$$T_{\text{täydellinenM}} = 45s + \frac{40 * (2 * 2 + 4)}{1,5/s} = \sim 268s$$

$$T_{\text{täydellinenT}} = 110s + \frac{40 * (2 * 2 + 4)}{1,5/s} = \sim 333s$$

Teoreettisesti järjestelmällä olisi siis mahdollista toteuttaa jarrujärjestelmän toiminnan varmistaminen jarrulajilla M 4 minuutissa 28 sekunnissa ja jarrulajilla T 5 minuutissa 33 sekunnissa. Tämä tarkoittaisi jarrujen täydellistä tarkastusta M asennossa 6,7 sekuntia/vaunu ja T asennossa 8,3 sekuntia/vaunu.

Vertailuksi, diplomityön aikana toteutettiin jarrujen tarkastukseen menevän ajan mittaus ammattilaisen toimesta (Liite 2). Jossa ammattilaiselta kului 24 vaunun tarkastukseen, pois lukien jarrujärjestelmän lataus, tiiveystesti ja jarrujen kiinnittymiseen ja irtoamiseen mennyt aika, noin 15 minuuttia 30 sekuntia, eli n. 39 sekuntia per vaunu. Saadaksemme alkuperäisestä funktiostamme vertailukelpoisen, voimme vähentää funktiosta jarrujen kiinnittymiseen ja irtoamiseen kuluva aika, jolloin jäljelle jää vain liikkeen vaatima aika ja antureiden tiedonsiirtoon liittyvät kokonaisuudet. Tällöin funktio olisi:

$$T_{\text{vertailu}} = T_{\text{ajo}} + \frac{\text{Vaunumäärä} * (2 * \text{Anturit}_{\text{sylinterit}} + \text{Anturit}_{\text{akselit}})}{\text{Solmuverkon läpisyöttö}}$$

$$T_{\text{vertailu}} = 20s + \frac{24 * (2 * 2 + 4)}{1,5/s} = \sim 148s$$

24 vaunun täydelliseen tarkastukseen menisi siten langattomalla mittausjärjestelmällä vain 2 minuuttia 28 sekuntia, eli n. 6,1 sekuntia/vaunu. Tämä on yli 84 % vähemmän työaika, kuin mitä jarrujen varmistamiseen menee nykyisellä toiminnalla. Luonnollisesti funktiot ovat vain teoreettisia, ja mittausjärjestelmän arvoihin voi vaikuttaa tässäkin työssä havaitut solmuverkon kuormittamisen aiheuttamat viiveet ja solmuverkon muodostumiseen kuluva aika. Toisaalta solmuverkon muodostuminen voisi olla mahdollista toteuttaa jarrujärjestelmän täyden ja tiiveystestin aikana.

10. YHTEENVETO

Tämän diplomityön tavoitteena oli tutkia, kuinka jarrujen toiminnan varmistaminen voitaisiin toteuttaa tavarajunissa langattomalla mittausjärjestelmällä. Työssä esiteltiin tavaravaunun jarrujärjestelmää, langattomia mittausjärjestelmiä ja tavaraliikenteen asettamia haasteita mittausjärjestelmälle. Tämän jälkeen suunniteltiin jarrujen toiminnan varmistamiseen soveltuva mittausjärjestelmä, jota testattiin prototyypin ja mittauskokeiden avulla. Mittauskokeiden tuloksia analysoitiin laadullisesti toiminnallisuuden ja mittausjärjestelmässä käytettävän tiedonsiirtomenetelmän suorituskyvyn osalta. Lopulta tuloksien pohjalta muodostettiin kehys tuotannolliseen käyttöön soveltuvalle mittausjärjestelmälle, sekä muodostettiin sen toiminnasta teoreettinen malli.

10.1 Työn tulokset

Työn tuloksena voidaan todeta, että jarrujärjestelmän toiminnan varmistaminen langattomalla mittausjärjestelmällä on mahdollista. Tämä vaatii mittausjärjestelmän tiedonsiirron kovaa optimointia ja sen, että jarrujen tarkastuksissa todettavat jarrujohdon kytkimen riipunta ja jarruanturoiden kuluman mittauksen vaatimukset siirrettäisiin ulkoisen mittausjärjestelmän vastuulle.

Tarve mittausjärjestelmän tiedonsiirron kovalle optimoinnille todettiin prototyypin mittauksissa havaituista viiveistä, kun maksimi viive käytön aikana oli pahimmillaan jopa 19 minuuttia. Vaikka suuret viiveet saatiin pääosin aikaan jarrujärjestelmän kuormituskokeissa, on se viiden vaunun kokoiselle koerungolle liian suuri. Suuret viiveet johtuivat solmuverkon taipumuksesta muodostaa junarungon antureiden välille puumainen topologia, joka johti useisiin pullonkauloihin mittausjärjestelmän tiedonsiirrossa. Tämä tulos tukee Rakshit et al. (2016) esittämää havaintoa solmuverkkojen viiveisiin liittyvistä haasteista.

Tästä huolimatta, diplomityön tulokset olivat hyvät, sillä suunnitellun mittausjärjestelmän avulla pystyttiin todistetuksi varmistamaan jarrujen toiminta. Haasteeksi muodostui vain mittausjärjestelmän tiedonsiirron toteuttaminen niin, että se soveltuu tavaraliikenteen tarpeisiin. Rakshit et al. (2017) tiedonsiirtoteknologioita yhdistävästä HTN järjestelmästä poiketen, diplomityössä esitettiin mittausjärjestelmän seuraavalle iteraatiolle tiedonsiirtoteknologian vaihtamisen sijaan tiedonsiirron optimoimista. Optimoinnin tarkoitus olisi hyödyntää reunalaskentaa ja omistaa tiedonsiirtoverkko vain tila- ja vikatiedoille. Näin tiedonsiirron kuormitusta voitaisiin vähentää huomattavasti. Esitellylle järjestelmälle laskettiin jopa 84 % ajansäästö visuaaliseen tarkastukseen verrattuna.

10.2 Tutkimuksen akateeminen merkitys

Mittauksissa havaitut ongelmat olivat hyvin identtisiä niiden ongelmien kanssa, jotka USA:n valtiollinen rautatievirasto (Federal Railway Administration, FRA) havaitsi omissa Zigbee pohjaisissa tutkimuksissaan (Mahasukhon et al. 2010, 2011, Rakshit et al. 2012a, 2012b, 2016). Erona FRA:n tekemiin tutkimuksiin oli se, että kokeessa oli käytössä suomalainen Wirepas protokolla. FRA:n

tutkimuksista poiketen tässä työssä dokumentoitiin tiedonsiirron tulosten ohella myös mittausarkkitehtuuri ja mittauslaitekohtaiset tulokset, joten tämä työ voitaisiin siten nähdä myös ensimmäisenä jarrujen tarkastuksen vaatiman mittausarkkitehtuurin dokumentoivana tieteellisenä tutkimuksena.

Tutkimuksessa luotiin myös koko tavarajunan kattavan viiveettömän jarrujärjestelmän malli, sekä esiteltiin, kuinka jarrujen toiminta voidaan varmistaa koejarrutuksen ja lyhyen liikkeen avulla. Luotu malli jarrujen toiminnan varmistamisesta mittauslaitteiden ehdoin on ennenkuulumaton ja avaa siten uuden suunnan akateemiselle tutkimukselle liittyen jarrujen varmistuksen automatisoinnin optimointiin.

Jos palaamme johdannossa esiteltyyn GoA -taulukoon (Taulukko 1), voimme havaita, että tason 4 vaatimuksena on junayksikön itsenäinen reagointi häiriöön. Mikäli ongelmaksi osoittautuu vaunun jarrujärjestelmän häiriötila, pitäisi junan pystyä havaitsemaan ja poistamaan häiriö ilman ihmisen apua. Tämä tarkoittaa tavarajunien osalta usein sitä, että tavaravaunun toimiventtiin kytkeä suljetaan ja apuilmasäiliön paineet vapautetaan, jolloin vaunun jarrut poistuvat käytöstä. Tämä on mahdollista vain, mikäli vaunujen toimilaitteita voidaan ohjata etänä. Työssä esitetty viiveetön tiedonsiirtojärjestelmä luo pohjan tarvittavalle etäohjaukselle, sillä tiedonsiirron optimoinnin takia vapautunutta kaistaa voidaan hyödyntää tiedonsiirron suunnasta piittaamatta. Täten tässä diplomityössä ei onnistuttu luomaan vain jarrujen tarkastukseen soveltuvaa mittausjärjestelmää, vaan samalla onnistuttiin luomaan pohja tavaraliikenteen täydelle automatisoinnille. Koska automaation asteen määrittelevää GoA-taulukkoa ei vielä ole esitetty kirjallisuudessa tavaraliikenteelle, käytän mahdollisuuden hyväksi, ja päätän tämän diplomityön esittelemällä oman näkemyksen tavaraliikenteen automaatioasteita kuvaavasta GoA-taulukosta Taulukossa 17.

Taulukko 17. GoA-taulukko tavaraliikenteelle (Mukaiilu, Pylvänäinen et al. 2020)

GoA-taso	Junan ohjaus	Kuvaus
0	Kuljettajalla kaikki vastuu	Automatisaatiota ei ole. Kuljettaja on vastuussa kaikesta. Juna ei ole liitettyä kulunvalvontaan.
1	Manuaalinen	Kuljettaja on vastuussa liikkeellelähtötarkastuksesta, liikkeellelähdistä, pysähtymisestä ja hätätilanteissa reagoinnista. Junan kulunvalvonta automaattista.
2	Avustettu	Kuljettaja on vastuussa liikkeellelähdistä, pysähtymisestä ja hätätilanteissa reagoinnista, mutta liikkeellelähtötarkastukset ja junan kulunvalvonta on automaattista.
3	Valvottu	Junan kulunvalvonta, liikkeellelähtö ja pysähtyminen, sekä liikkeellelähtötarkastukset ovat automaattisia. Kuljettaja valvoo ja puuttuu ohjaukseen poikkeama- ja hätätilanteissa.
4	Valvoton	Kulunvalvonta, liikkeellelähtötarkastukset, liikkeellelähtö, pysähtyminen, poikkeamat, ja hätätiloihin reagointi automaattista veturin ja vaunujen osalta. Ei junan kyydissä olevaa henkilökuntaa.

LÄHTEET

Aimar, M. & Soma, A. (2017), Study and results of an onboard brake monitoring system for freight wagons. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. Vol. 232.

Akyildiz, I. F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y. & Cayirci, E. (2002). Wireless sensor networks: a survey. Elsevier Computer Networks, Vol. 38, pp. 393-422.

Anon (2020), Locomotive Components – Air Brake Systems, Saatavilla (viitattu: 15.10.2020): <http://files.companywebsite.org/COMPANY-FILES.html>.

Balog, M. & Knapčíková, L. (2018), Smart techniques for technical conditions monitoring of railway wagons.

Bernal, E., Spiryagin, M., & Cole, C. (2019a). Onboard Condition Monitoring Sensors, Systems and Techniques for Freight Railway Vehicles: A Review. IEEE Sensors Journal, Vol. 19, pp. 4-24.

Bernal, E., Spiryagin, M. & Cole, C. (2019b), Innovative sensor-node hardware architecture for on-board heavy haul wagon monitoring.

Bernal, E., Spiryagin, M. & Cole, C. (2020), Ultra-low power sensor node for on-board railway wagon monitoring, IEEE Sensors Journal, PP.

Bicsi, B. (2002), Network Design Basics for Cabling Professionals. McGraw-Hill Professional.

Bosso, N., Gugliotta, A. & Zampieri, N. (2016). Design and testing of an innovative monitoring system for railway vehicles. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, Vol. 232.

Butterfield, A. & Szymanski, J. (2018), A Dictionary of Electronics and Electrical Engineering 5th Edition, Great Britain, Oxford: Oxford University Press.

Chong, S. Y., Lee, J. & Shin, H. (2010). A review of health and operation monitoring technologies for trains. SMART STRUCTURES AND SYSTEMS, 6. pp. 1079-1105.

Connected Finland (2020), Peittoalue, Saatavilla (viitattu: 15.8.2020): <https://www.connected-finland.fi/peittoalue/>.

Crompton, T. R. (2000), Battery Reference Book. 3. ed. Oxford, England: Newnes Books.

Dargie, W. & Poellabauer, C. (2010), Fundamentals of Wireless Sensor Networks: Theory and practice. West Sussex, United Kingdom: John Wiley & Sons, Inc.

Digita (2020), IoT:n kartta (viitattu: 15.8.2020): <https://www.digita.fi/iotn-kartta/>.

Drebushchak, V. A. (2020), Thermal expansion of solids: review on theories. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry.

Edwards, M. C., Donelson, J., Zavis, W. M., Prabhakaran, A., Brabb, D. C., & Jackson, A. S. (2005), Improving freight rail safety with on-board monitoring and control systems, Proceedings of the 2005 ASME/IEEE Joint Rail Conference, Pueblo, CO, pp. 117-122.

Elisa (2020), Kuuluvuuskartta, Saatavilla (viitattu: 15.8.2020): <https://elisa.fi/kuuluvuus/>.

European Commission (2020), Environment, Saatavilla (viitattu 15.8.2020): https://ec.europa.eu/transport/modes/rail/environment_en.

European Communications Office (2020), ECO Frequency Information System, Denmark, Copenhagen, Saatavilla (viitattu: 17.11.2020): <https://efis.cept.org/>.

Hunan Firstrate Sensor Co (2020), FST800-211A Universal Industrial Pressure Transmitter, Saatavilla (viitattu: 17.11.2020): http://www.firstsensor.com.cn/products_detail/productId=77.html.

Gabriel K, Jarvis J & Trimmer W (1988), Small Machines, Large Opportunities: A Report on the Emerging Field of Microdynamics : Report of the Workshop on Microelectromechanical Systems Research, sponsored by the National Science Foundation. Murray Hill, NJ: AT&T Bell Laboratories.

Global Railway Review (2019), Nexxiot to showcase its digital rail freight solution to the U.S. market, Saatavilla (viitattu: 12.12.2019): <https://www.globalrailwayreview.com/news/88347/nexxiot-digital-rail-freight-usa-market/>.

Haltian (2020), ThingseeENVIRONMENT firmware specifications, Saatavissa (viitattu: 16.6.2020): http://139.59.148.143/firmware/thingseeenvironment_firmware_specification.

Ilmatieteen laitos (2020), Lämpötilaennätyksiä, Saatavilla (viitattu: 18.11.2020): <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/lampotilaennatyksia>.

International Association of Public Transport (2019), World Report On Metro Automation 2018, Belgium, Brussels: Mohamed Mezghani.

IRJ (2019), SBB Cargo pioneers automatic couplers, Saatavilla (viitattu: 9.12.2019): <https://www.railjournal.com/freight/sbb-cargo-pioneers-automatic-couplers/>.

International Organization for Standardization (1994), ISO/IEC 7498-1:1994, Information technology — Open Systems Interconnection — Basic Reference Model: The Basic Model, 1st Ed. Geneva, Switzerland: ISO.

Jo, O., Kim, Y. & Kim, J. (2017), Internet of Things for Smart Railway: Feasibility and Applications. IEEE Internet of Things Journal, PP.

Le Trung, N. (2014), A new approach for collecting data in wireless sensor network (Master of Science Thesis), Tampere: Tampere University of Technology.

Ludvigsen, J. & Klæboe, R. (2014), Extreme weather impacts on freight railways in Europe, Natural Hazards, 70.

Kangas, T. (2018), RATA 2018: Teknisen sääntelyn vaikeus – case komposiittianturat, Saatavilla (viitattu: 12.12.2019): https://vayla.fi/documents/20485/417832/Kangas_Tomi_RATA+2018+Teknisen+sääntelyn+vaikeus+23.1.pdf/d394d4df-6cae-47ed-b242-efaa7202a5af.

Karl, H. & Willig, A. (2005), Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks. West Sussex, Chichester: John Wiley & Sons.

Knorr-Bremse (2002), Brake Systems for Freight Cars, Germany, München.

Kuorilehto M. (2008), System Level Design Issues in Low-Power Wireless Sensor Networks, Doctoral Thesis, Tampere, Tampere University of Technology.

Mahasukhon, P., Sharif, H., Hempel, M., Zhou, T., Ma, T. & Shrestha, P. L. (2010), Multi-tier multi-hop routing in large-scale wireless sensor networks for real-time monitoring, *SENSORS, 2010 IEEE*, Kona, HI, pp. 678-681.

Mahasukhon, P., Sharif, H., Hempel, M., Zhou, T., Ma, T. & Shrestha, P. L. (2011), A study on energy efficient multi-tier multi-hop wireless sensor networks for freight-train monitoring, 2011 7th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference, Istanbul, pp. 297-301.

Mahmoud, M. & Mohamad, A. (2016). A Study of Efficient Power Consumption Wireless Communication Techniques/ Modules for Internet of Things (IoT) Applications. *Advances in Internet of Things*. Vol. 06. pp. 19-29.

Matsumoto, A., Sato, Y., Ohno, H., Tomeoka, M., Matsumoto, K., Kurihara, J., Ogino, T., Tanimoto, M., Kishimoto, Y., Sato, Y. & Nakai, T. (2008). A new measuring method of wheel-rail contact forces and related considerations, *Wear*, Vol. 265. Iss. 9-10, pp.1518-1525.

Monje, P., Aranguren, G., Martínez, B., & Casado, L. (2012). Using bogie-mounted sensors to measure wheel rolling and sliding on railway tracks. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, Vol. 226, Iss. 4, pp. 371–380.

MSR Electronics GmbH (2010), Datasheet for MSR165 - Datalogger for shock and vibration, Henggart, Switzerland.

Palo, M. (2012), Condition monitoring of railway vehicles : a study on wheel condition for heavy haul rolling stock (Licentiate dissertation), Luleå, Saatavilla (viitattu: 4.4.2020): <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ltu:diva-18639>.

Pylvänäinen J. et al. (2020), Kohti digitaalista ja älykästä rautatieliikennettä – Digirata-selvityksen loppuraportti, Liikenne- ja viestintäministeriö, Saatavissa (viitattu: 16.11.2020): <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-243-589-7>.

Rahemi, R. & Li, D. (2015), Variation in electron work function with temperature and its effect on the Young's modulus of metals, *Scripta Materialia*, Vol. 99, pp. 41-44.

Railwaygazette, 2019, SBB Cargo makes progress in wagonload automation, Saatavissa (viitattu: 9.12.2019): <https://www.railwaygazette.com/technology/sbb-cargo-makes-progress-in-wagonload-automation/48658.article>.

Rakshit, S., Hempel, M., Sharif, H., Punwani, J., Stewart, M. & Mehrvarzi, S. (2012a). Challenges in Current Wireless Sensor Technology for Railcar Status Monitoring for North America's Freight Railroad Industry. 2012 ASME/ASCE/IEEE Joint Rail Conference.

Rakshit, S., Hempel, M., Sharif, H., Punwani, J. & Stewart, M. (2012b), Hybrid Technology Networking: A Novel Wireless Networking Approach for Real-Time Railcar Status Monitoring, 2012 ASME Rail Transportation Division Fall Technical Conference.

Rakshit, S., Hempel, M. & Sharif, H. (2016), Study of a dual radio sensor platform for effective on-board real-time monitoring of freight trains, 2016 International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), Paphos, pp. 812-817.

Rakshit, S., Hempel, M. & Sharif, H. (2017). A Modular Energy Model for the Low Power Radio Domain in Linear-Topology Hybrid Technology Networking.

Rakshit, U., Malakar, B. & Roy, B. K. (2018), Study on Longitudinal Forces of a Freight Train for Different Types of Wagon Connectors, *IFAC-PapersOnLine*, Vol. 51, Iss. 1, pp. 283-288.

RFID Journal (2019), IoT Automates Rail Brake Testing for Logistics Firm, Saatavissa (viitattu: 16.11.2020): <https://www.rfidjournal.com/articles/pdf?4986>.

Lo Schiavo, A. (2016). Fully Autonomous Wireless Sensor Network for Freight Wagon Monitoring. IEEE Sensors Journal. PP.

Shift2Rail.org (2020), Euroopan Unioni, Saatavissa (viitattu: 16.11.2020): <https://projects.shift2rail.org/>.

Sohraby, K., Minoli, D., & Znati, T. (2007), Wireless Sensor Networks: Technology, Protocols and Applications, Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.

Statista (2020), Forecast end-user spending on IoT solutions worldwide from 2017 to 2025, Saatavilla (viitattu: 11.8.2020): <https://www.statista.com/statistics/976313/global-iot-market-size/>.

Suhonen, J., Kohvakka, M., Kaseva, V., Hämäläinen, T. D. & Hännikäinen, M. (2012) Low-Power Wireless Sensor Networks: Protocols, Services and Applications, SpringerBriefs in Electrical and Computer Engineering.

Telia (2020), Kuuluvuuskartta, Saatavilla (viitattu: 15.8.2020): <https://www.telia.fi/asiakas-tuki/verkko/kuuluvuuskartta>.

Valtion Rautatiet (1971), Vaunujen uudet jarrulaitteet: Käyttöohjeita, Helsinki, Suomi.

VR Group (2010), SPS - Vaunun Rakenneseloste ja käyttöohje, Helsinki, Suomi.

VR Group (2014), Menettelyohje: Dr16 Huoltokäsikirja, Helsinki, Suomi.

VR Group (2019), Menettelyohje: Yksikön jarrutuskyky, Helsinki, Suomi.

VR Group (2020), Menettelyohje: Kaluston paikallaan pysymisen varmistamisen yleisohje, Helsinki, Suomi.

VR Transpoint (2020), Yleistä rautatieliikenteestä, Saatavilla (viitattu: 15.7.2020): <https://www.vrtranspoint.fi/fi/vr-transpoint/asiakkaan-opas/yleista-rautatieliikenteesta/>.

Väylävirasto (2018), Valtion rataverkko 1.1.2018, Saatavissa (viitattu: 16.11.2020): https://vayla.fi/documents/25230764/35413979/Rataverkko2018_web.pdf/afb63fc3-22cb-4a6b-a503-db3dd90b7ea1/Rataverkko2018_web.pdf?t=1516354583402.

Väylävirasto (2019), Rautatietoimintojen turvallisuuspoikkeamat 2018, Saatavilla: https://julkaisut.vayla.fi/pdf12/vj_2019-24_rautatietoimintojen_2018_web.pdf.

Wabtec Corporation (2003), Student Workbook: Freight Car Brake Rigging Arrangements, Pennsylvania, USA, Wabtec Corporation.

Warneke, B. A. & Pister, K. S. J. (2002), MEMS for distributed wireless sensor networks, 9th International Conference on Electronics, Circuits and Systems, Dubrovnik, Croatia, Vol 1, pp. 291-294.

Wirepas (2020), What is Wirepas Mesh, Saatavilla (viitattu: 10.9.2020): <https://wirepas.com/what-is-wirepas-mesh/>.

LIITEET

LIITE 1 – JSON-TIEDOSTOJEN MALLIT

LIITE 2 – JARRUJEN TESTAUKSEN KELLOTUS TAMPEREELLA 19-3-2019

LIITE 3 – MITTAUSTAPAHTUMAT PIEKSÄMÄEN KONEPAJA

LIITE 4 – JARRUJÄRJESTELMÄN DATA JA KUVAAJAT

LIITE 5 – JARRUJÄRJESTELMÄN VIIVETARKASTELU JA KUVAAJAT