



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

SILTOJEN MONITOROINTI - SOVELLUKSENA TUIRANVÄYLÄN SILTA

Alexi Mäki-Mantila

RAKENNUS- JA YHDYSKUNTATEKNIikka

Diplomityö

Tammikuu 2023

TIIVISTELMÄ

Siltojen monitorointi – sovelluksena Tuiranväylän silta

Alexi Mäki-Mantila

Oulun yliopisto, Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan tutkinto-ohjelma

Diplomityö 2023, 112 s.

Työn ohjaaja yliopistolla: Antti Niemi

Tässä diplomityössä perehdytään siltojen monitorointiin, eli siltojen tilan, kunnan ja toiminnan seurantaan käyttäen automaattisia mittaus- ja analysointilaitteita. Diplomityö jakautuu kirjallisuusselvitykseen ja käytännön tutkimukseen. Kirjallisuuskatsauksessa selvitetään siltojen monitorointiin liittyviä kansainvälisiä käytäntöjä, standardeja ja käytetyimpiä anturityyppejä. Työssä esitellään erilaisia siltojen monitorointiprojekteja sekä Suomesta että maailmalta. Diplomityössä hyödynnetään aiheeseen liittyviä kansainvälisiä ja kotimaisia julkaisuja.

Kirjallisuuskatsauksessa todettiin, että 2000-luvulla nopea tekniikan kehitys on vauhdittanut ja lisännyt siltojen monitoroinnin käyttö- ja hyödyntämismahdollisuuksia. Selvityksessä painottui monitoroinnin suunnittelun tärkeys. Ennen monitorointiprojektin aloittamista on tärkeä etukäteen määritellä mitä, miten ja miksi monitoroidaan. Kirjallisuusselvityksen perusteella venymän, lämpötilan ja värähtelyn todettiin olevan kolme yleisintä mittaussuureta kansainvälisissä siltojen monitorointiprojekteissa. Tärkeä havainto oli myös siltojen monitorointiin liittyvän yhtenäisen standardisoinnin ja lainsäädännön puuttuminen. Monilla valtioilla on siltojen monitorointiin liittyviä ohjeita ja käsikirjoja, mutta ainoastaan Kiinassa on standardeja, joissa asetetaan suora vaatimus tiettytyyppisten siltojen monitoroinnille.

Diplomityön käytännön tutkimus pohjautuu käynnissä olevaan Oulun kaupungin tilaamaan Tuiranväylän sillan monitorointihankkeeseen. Tuiranväylän sillan mittausdataa hyödyntämällä selvitetään keinoja monitoroinnin kustannusten pienentämiseen anturien lukumäärää vähentämällä. Tavoitteena on selvittää, riittääkö venymäliuska-antureiden kiinnittäminen vain betonin pintaan betoniraudoitteen sijasta. Samalla arvioidaan venymäliuskamittaukseen liittyviä epävarmuustekijöitä. Tämän lisäksi tutkitaan voiko

keskellä siltaa ilmenevän vaurion huomata reunimmaisten silta-aukkojen antureiden mittaustulosten muutoksesta tarpeeksi luotettavasti.

Tutkimus suoritettiin tarkastelemalla Tuiranväylän sillan monitoroinnista saatua mittaustuloksia sekä sillasta laadittua FEM-rakennemallia. Eri antureiden mittaustuloksia verrattiin sillan rakennemalliin, jonka perusteella suoritettiin vertailua venymäliuskojen kiinnitystapojen välillä. Vertailun tuloksena todettiin, että betonipintaan kiinnitetyt venymäliuskat olisivat olleet riittäviä luotettavan mittaustuloksen saamiseen, kun taas betoniraidoiteisiin kiinnitettyjen liuskojen mittaustuloksiin liittyi enemmän vaihtelua ja epävarmuutta.

Venymäantureiden sijoitteluun liittyvä tutkimusosuus toteutettiin simuloimalla keskelle siltaa syntyvää vauriota sillan rakennemallissa. Vauriota simuloitiin pienentämällä rakennemallissa sillan pääpalkin jäykkyyttä oletetussa vauriokohdassa. Tutkimuksen tuloksena todettiin, että sillan keskikohdalla syntyvää vauriota ei pysty luotettavasti havaitsemaan kauempana vauriokohtaa sijaitsevistä venymäantureista ennen kuin vaurio on tapahtunut. Tuloksen perusteella tehtiin johtopäätös, että venymäantureiden asentaminen ainoastaan sillan reuna-aukkoihin ei olisi ollut riittävää vaurion havaitsemiseen muualta sillasta.

Diplomityön tulokset perustavat Tuiranväylän siltaan ja sen mittaustuloksiin, eikä niitä voi suoraan yleistää tai verrata muihin monitorointihankkeisiin. Tulokset antavat kuitenkin hyvin tietoa liittyen eroihin venymäliuskojen kiinnitystavoissa ja sijainneissa.

Asiasanat: monitorointi, silta, anturi, mittaus, venymäliuska

ABSTRACT

Structural health monitoring of bridges – case study Tuiranväylä bridge

Alexi Mäki-Mantila

University of Oulu, Degree Programme of Civil Engineering

Master's thesis 2023, 112 pp.

Supervisor at the university: Antti Niemi

In this thesis the structural health monitoring (SHM) of bridges is explored. SHM means the monitoring of the condition, state, and operation of bridges by using automatic sensing and analyzing technology. The thesis is divided into literature review and practical study. The literature review examines international methods, standards, and the most used types of sensors for bridge SHM. The thesis demonstrates different bridge monitoring projects from Finland and abroad. The thesis draws on international and domestic publications on the subject.

The literature review revealed that rapid advances in technology in the 21st century have accelerated and increased the potential for the application of bridge SHM. The review revealed that pre-designing is important in SHM. Before starting a monitoring project, it is important to define in advance what is to be monitored, how it is done and why it is needed. Based on the literature review, strain, temperature, and vibration were the three most measured variables in international SHM projects of bridges. Another important finding was the lack of uniform standardisation and legislation for bridge SHM. Many countries have guidelines and manuals for bridge monitoring, but only China has standards that require monitoring of certain types of bridges.

The research of this thesis is based on an ongoing monitoring project for the Tuiranväylä bridge commissioned by the City of Oulu. Using the measurement data from the Tuiranväylä bridge, ways to reduce the cost of monitoring by using fewer sensors is explored. The aim is to determine whether it is sufficient to attach strain gauge sensors only to the concrete surface instead of on reinforcing bars. In addition, the uncertainties associated with strain gauge measurement will be assessed. Furthermore, it will be investigated whether the damage in the middle of the bridge can be detected reliably enough from the change in the measurements of the sensors that are placed in the edge bridge openings.

The study was conducted by examining the measurement data obtained from the monitoring of the Tuiranväylä bridge and the finite element method (FEM). The measurement results from the different sensors were compared with the FEM model to evaluate the different ways of attaching the gauges. The result of the comparison was that the strain gages attached to the concrete surface would have been sufficient in obtaining a reliable measurement result, whereas the measurement results of the gauges attached to the reinforcing bars had more variability and uncertainty.

The research section related to the locations of strain gauges was conducted by simulating the damage in the middle of the bridge in the FEM model. The damage was simulated by reducing the stiffness of the main bridge beam at the assumed damage location in the FEM model. As a result of the study, was that the failure at the centre of the bridge cannot be reliably detected by strain gauges further away from the failure location before the failure has occurred. The conclusion is that installing strain gauges only at the edge of the bridge would not have been sufficient in detecting damage elsewhere on the bridge.

The results of the thesis are based on the Tuiranväylä bridge and its sensor data and cannot be generalised or directly compared to other monitoring projects. However, the results provide useful insight to the differences in the locations and ways of attaching strain gauges.

Keywords: monitoring, bridge, sensor, measurement, strain gauge

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty osana Oulun yliopiston rakennus- ja yhdyskuntatekniikan diplomi-insinöörin tutkintoa. Työ tehtiin Insinööritoimisto Ponvia Oy:ssä ja työssä olivat mukana Oulun kaupunki, Väylävirasto ja EHP Environment Oy. Diplomityön teko ajoittui vuoden 2022 jälkimmäiselle puoliskolle.

Osoitan suuret kiitokset hyvistä vinkeistä ja asiantuntevista kommentteista diplomityöni ohjausryhmään kuuluneille. Erityiskiitos Ponvia Oy:n Ville Raudasojalle neuvoista ja tuesta diplomityön tekemisen aikana. Kiitos myös Oulun yliopiston edustajalle Antti Niemelle diplomityöni ohjaamisesta.

Haluan kiittää myös perhettäni ja avopuolisoani Lottaa tuesta diplomityötä tehdessä ja koko opiskelujeni aikana. Kiitos myös mahtavasta ja ikimuistoisesta opiskeluaajasta opiskelukavereilleni.

Oulu, 2.1.2023

Alexi Mäki-Mantila
Aleksi Mäki-Mantila

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

SISÄLLYSLUETTELO

1 JOHDANTO	9
2 SILLAT SUOMESSA.....	11
2.1 Suomen sillat.....	11
2.2 Siltojen kunto	14
2.3 Siltojen liikennekuormat ja kantavuus	16
3 SILTOJEN MONITOROINTI.....	20
3.1 Yleistä monitoroinnista	20
3.2 Monitorointitarve	21
3.3 Monitorointimenetelmät ja laajuus	23
3.3.1 Kertamonitorointi	23
3.3.2 Jaksottainen monitorointi.....	23
3.3.3 Jatkuva monitorointi	24
3.3.4 Monitoroinnin laajuus.....	24
3.4 Siltojen monitoroinnissa käytettävät anturityypit ja mittaussuureet	25
3.4.1 Venymä.....	27
3.4.2 Taipuma ja siirtymä	31
3.4.3 Värähtely.....	32
3.4.4 Lämpötila.....	32
3.4.5 Langaton monitorointi	33
4 JATKUVA MONITOROINTI MAAILMALLA	35
4.1 Yleistä monitoroinnista maailmalla	35
4.2 Siltojen monitorointitutkimukset maailmalla.....	36
4.3 Yleisimmät monitorointiprojekteissa käytetyt anturityypit	40
4.4 Jatkuvasti tai pitkäaikaisesti monitoroidut sillat	43
4.4.1 I-35W Saint Anthony Falls Bridge	44
4.4.2 Humber Bridge	46
4.4.3 Tapiolantien puusilta	47
4.4.4 Kirjalansalmen riippusilta.....	49
4.4.5 Mackinac Bridge.....	51
4.4.6 Ahvenkosken silta.....	53

4.5 Siltojen monitorointiin liittyvät kansainväliset standardit ja ohjeet.....	55
4.5.1 Kiinan monitorointistandardit.....	58
4.5.2 IM-SAFE-projekti.....	61
4.5.3 Pohdintaa monitorointistandardeista ja niiden kansainvälisistä vaikutuksista	62
5 TUIRANVÄYLÄN SILLAN MONITOROINTIHANKE.....	63
5.1 Perustietoa sillasta.....	63
5.2 Sillan rakenne.....	64
5.3 Lähtökohdat monitoroinnille.....	65
5.4 Monitorointijärjestelmä.....	66
5.4.1 Venymäanturit	66
5.4.2 Siirtymäanturit	68
5.4.3 Akselipainopuntari.....	69
5.4.4 Muut mittausjärjestelmän laitteet	69
5.4.5 Antureiden sijainti	70
5.5 Antureiden tuottama mittausdata	72
5.5.1 Monitorointijärjestelmän toiminta	72
5.5.2 Antureiden mittausdata	72
5.6 FEM-rakennemalli	75
5.6.1 Tuiranväylän sillan rakennemalli	75
5.6.2 Rakennemallin kalibrointi ja tulosten vertailu.....	76
5.6.3 Sillan rakenneosien kantavuus.....	78
6 KEVYEMPI MONITOROINTI	81
6.1 Venymäliuska-antureiden kiinnitystapa.....	81
6.1.1 Kiinnitystapojen vertailu mittausdatan perusteella.....	82
6.1.2 Kiinnitystapojen vertailu sillan rakennemallin avulla	86
6.1.3 Mahdollisia syitä mittaustulosten eroille	90
6.1.4 Johtopäätökset.....	92
6.2 Vaurion tunnistaminen antureiden mittaustuloksista	93
6.2.1 Vaurio keskituen kohdalla pääpalkissa.....	94
6.2.2 Vaurio aukon keskellä pääpalkissa	97
6.2.3 Johtopäätökset.....	98
7 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET.....	100

LÄHDELUETTELO

1 JOHDANTO

Sillat ovat tärkeä ja välttämätön osa toimivaa liikenneinfrastruktuuria. Ihmisten lisääntynyt tarve liikkua ja ajoneuvojen määrän voimakas kasvu 1950-luvulta alkaen aiheuttivat kasvavan tarpeen siltojen rakentamiselle ja niiden määrä lisääntyi nopealla tahdilla. Nykypäivänä monet sillat alkavat olla elinkaarensa loppupäässä ja entistä suurempi osa silloista on korjaustarpeessa ja huonokuntoisia. Raskaan liikenteen määrän nouseminen sekä akseli- ja kokonaispainojen kasvaminen aiheuttavat uuden haasteen ikääntyville silloille. Toisaalta myös uusilta silloilta odotetaan pitkää elinikää minkä vuoksi etsitään keinoja sillan kunnon ja toiminnan tehokkaalle seuraamiselle. Tässä diplomityössä perehdytään siltojen monitorointiin, joka voi olla vaihtoehto tai osa ratkaisua siltojen todellisen kantavuuden ja jäljellä olevan käyttöiän määrittämisessä.

Siltojen monitorointi tarkoittaa siltarakenteen lyhyt- tai pitkäaikaista tilan, kunnon ja toiminnan seurantaan käyttäen automaattisia mittaus- ja analysointilaitteita. Monitoroinnilla voidaan saavuttaa tarkkaa ja tarvittaessa pitkäaikaista mittaustietoa sillan rakenteen käyttäytymisestä, rasituksista ja turmeltumisesta. Monitoroinnista saatua dataa analysoimalla voidaan saada tärkeää tietoa sillan vaurioista, jäljellä olevasta käyttöiästä ja rakenteellisesta kantavuudesta.

Tämän diplomityön taustalla on Oulussa käynnissä oleva Tuiranväylän sillan monitorointihanke, joka on aloitettu vuoden 2021 lokakuussa. Hankkeen tilaajana on Oulun kaupunki ja hanke on toteutettu Ramboll Finland Oy:n laatiman monitoroinnin yleissuunnitelman mukaisesti. Monitoroinnin mittausjärjestelmän toimittaja on EHP Environment Oy ja monitoroinnista saadun mittaustiedon analysoinnista vastaa insinööritoimisto Ponvia Oy. Hankkeen tarkoituksena on saada tietoa siltarakenteen toiminnasta, kantavuudesta sekä jäljellä olevasta käyttöiästä, kun sillalle sallitaan nykyisiä painorajoituksia suurempia kuormia.

Diplomityön kirjallisuusselvityksen tarkoituksena on tehdä selvitys siltojen monitorointiin liittyvistä käytännöistä maailmalla ja minkälaista standardisointia ja lainsäädäntöä aiheen ympärille liittyy. Työssä käydään läpi siltojen monitorointiin liittyviä peruskäsitteitä sekä vertaillaan ja selvitetään maailmalla käytetyimpiä mittausantureita. Lisäksi työssä esitellään erilaisia pitkäaikaisia monitorointiprojekteja

Suomesta ja maailmalta. Tavoitteena on muodostaa laajempi käsitys monitoroinnin hyödyntämismahdollisuuksista sekä käytetyistä mittalaitteista.

Siltojen monitoroinnissa käytetään usein suuria anturimääriä, mikä tekee monitorointiprojektit työläiksi ja kustannuksiltaan hintaviksi. Tämä nostaa monitoroinnin aloittamisen kynnystä, jolloin on perustelua etsiä keinoja anturimäärän ja kustannusten pienentämiselle. Diplomityön tutkimusosan keskeisenä tavoitteena on tutkia, miten siltojen monitorointia voidaan toteuttaa pienemmässä mittakaavassa kevyemmin eli miten sillan kunnosta saadaan mahdollisimman luotettavaa tietoa pienemmillä resursseilla. Pienemmät resurssit tarkoittavat käytännössä anturimäärän vähentämistä, joka toisi säästöjä monitorointijärjestelmän asennus- ja ylläpitokuluihin. Tutkimuksessa hyödynnetään Tuiranväylän sillan jatkuvasta monitoroinnista saatua mittaustietoa ja sillasta tehtyä FEM-rakennemallia. Tutkimuksessa verrataan, miten venymäliuska-antureiden kiinnitystapa vaikuttaa mittaustuloksiin ja miten tulokset ovat verrattavissa sillan rakennemalliin. Tarkoituksena on selvittää, riittääkö venymäliuska-antureiden kiinnittäminen vain betonin pintaan betoniraidoitteen sijasta luotettavan mittaustiedon saamiseen. Työssä arvioidaan myös mahdollisia syitä mittaustuloksissa havaituille eroille.

Diplomityössä tutkitaan lisäksi kevyemmän monitoroinnin toteuttamista antureiden sijaintia priorisoimalla. Tarkoituksena on selvittää sillan rakennemallia hyödyntämällä, voiko sillan keskellä ilmenevän vaurion huomata sillan reuna-aukoissa sijaitsevien antureiden mittaustulosten muutoksesta. Vauriota simuloidaan pienentämällä rakennemallissa sillan pääpalkin jäykkyyttä oletetussa vauriokohdassa, jonka jälkeen tutkitaan sillan rasitusten muutoksia. Tutkimuksen perusteella arvioidaan mahdollisuutta venymäantureiden sijoittamisesta ainoastaan sillan reuna-aukkoihin. Diplomityössä tutkimus rajataan Tuiranväylän sillasta tehtyyn rakennemalliin ja vajaan vuoden aikana kerätyn mittaustietojen analysoimiseen ja sen perusteella tehtäviin johtopäätöksiin.

2 SILLAT SUOMESSA

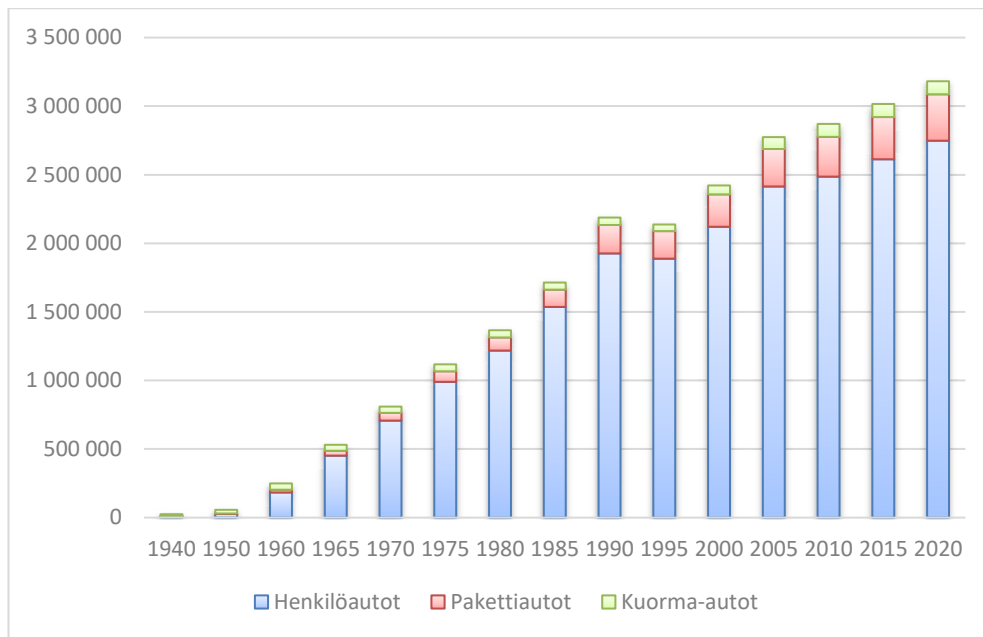
2.1 Suomen sillat

Väyläviraston (Väylävirasto 2021b, s. 11) määritelmän mukaan silta on taitorakenne, joka johtaa ajoneuvo-, juna-, henkilö- tai muun liikenteen esteen yli. Suomessa omaksutun käytännön mukaisesti sillaksi kutsutaan rakennetta, jonka vapaa-aukko on vähintään kaksi metriä. Sillat voidaan jaotella yleisesti tiesiltoihin, rautatiesiltoihin, katusiltoihin ja kevyen liikenteen siltoihin. (Väylävirasto 2021b, s. 11)

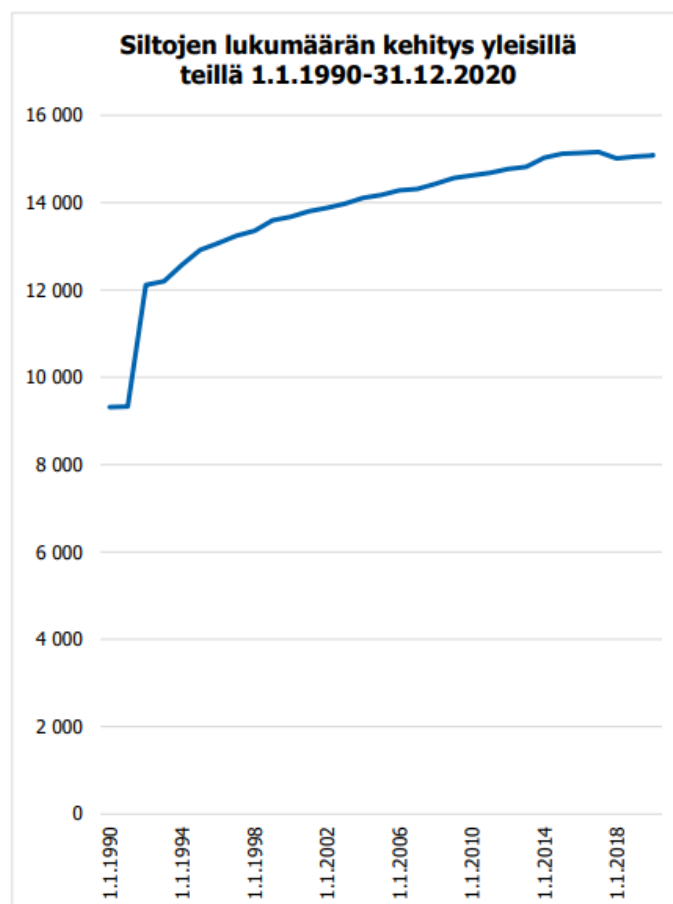
Suomessa valtion tieverkon, rautateiden, vesiväylien ja niihin kuuluvien siltojen kehittämisestä sekä kunnossapidosta vastaa Väylävirasto yhdessä alueellisten ELY-keskusten (Elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus) kanssa. Vuonna 2017 Väylävirasto julkaisi Taitorakennerekisterin, joka on taitorakenteiden perustietovarasto. Taitorakennerekisteri korvasi aiemmin käytössä olleen Siltarekisterin. Järjestelmä sisältää hallinnollista ja rakenteellista sekä vaurio- ja kuntotietoa siltojen ohella myös muista taitorakenteista. (Väylävirasto 2022b)

Vuoden 2020 lopussa Väyläviraston omistuksessa oli 15 093 tiesiltaa ja 2 477 rataverkon siltaa (Väylävirasto 2021b, s. 9). Väyläviraston ohella kaupungit ja kunnat omistavat Suomessa noin 4050 siltaa (Taitorakennerekisteri 2022b). Kaupunkien ja kuntien siltamäärät perustuvat taitorakennerekisterin tietoihin, joissa ei välttämättä ole kaikkia kaupunkien ja kuntien siltoja listattuna.

Autojen lukumäärän kasvaessa nopeasti 1960-luvulta alkaen nousi myös tarve siltojen määrän lisäämiselle (Kuva 1). Väyläviraston (2021b, s. 9) mukaan 1960-luvulla siltoja rakennettiin niiden pinta-alan perusteella lähes kolminkertainen määrä edelliseen vuosikymmeneen verrattuna. Kuten kuvaajasta (Kuva 2) voidaan todeta, on siltojen lukumäärän kasvu jatkunut tasaisesti 2000-luvun aikana. Kuvaajan alkupäässä näkyvä siltojen lukumäärän voimakas kasvu johtuu siitä, että vuodesta 1992 lähtien putkisillat sisällytettiin siltojen lukumäärään.



Kuva 1. Ajoneuvokanta Suomessa vuosina 1940–2020. Vuoteen 2006 asti tilasto kuvaa rekisterissä olevien ajoneuvojen lukumäärää ja vuodesta 2007 alkaen liikennekäytössä olevien autojen määrää (mukaillen Autoalan Tiedotuskeskus 2022).



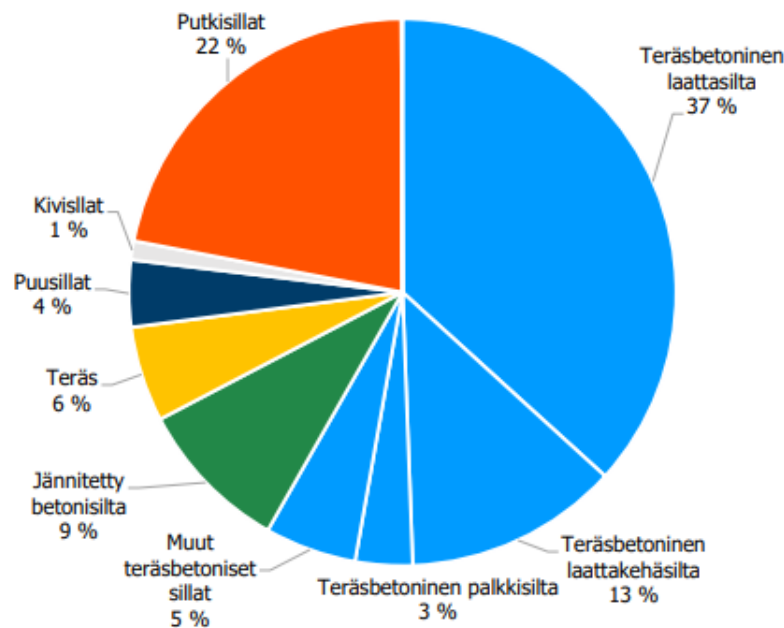
Kuva 2. Väyläviraston omistamien siltojen lukumäärän kehitys yleisillä teillä vuosina 1990–2020 (Väylävirasto 2021b, s. 13).

Sillat voidaan ryhmitellä myös käyttötarkoituksen mukaan. Suomessa varsinaisista silloista yli puolet on vesistösiltoja (Taulukko 1). Varsinaiseksi sillaksi määritellään kaikki sillat, jotka eivät ole putkisilloja. Seuraavaksi yleisimpiä ovat risteyssillat ja alikulkukäytävänä toimivat sillat.

Taulukko 1. Varsinaisten siltojen lukumäärä jaoteltuna käyttötarkoituksen ja tien toiminnallisen luokan mukaan 31.12.2020 (Väylävirasto 2021b, s. 23).

Käyttötarkoitus	Valtatie	Kantatie	Seututie	Yhdystie	Muu tie	Yhteensä
Alikulkukäytävä	1 050	312	503	301	47	2 213
Muu maasilta	15	2	5	7	2	31
Pehmeikkösilta	1					1
Raittisilta				1	301	302
Ramppisilta	95	10	7	1	2	115
Risteyssilta	1 005	167	204	185	206	1 767
Vesistösilta	1 012	448	1 319	3 800	123	6 702
Ylikulkukäytävä	3	1			124	128
Ylikulkusilta	144	43	106	188	14	495
Ylikäytäväsilta			1	2	28	31
Yhteensä	3 325	983	2 145	4 485	847	11 785

Suomessa siltojen käytetyin rakennusmateriaali on teräsbetoni. Kuten alla olevasta kuvaajasta (Kuva 3) huomataan, kaksi kolmasosaa Suomen tiesilloista on betonisilloja. Siltatyypeistä yleisin on teräsbetoninen laattasilta, jota käytetään niin risteys- ja vesistösiltoina kuin alikulkukäytävänä. (Väylävirasto 2021b, s. 31).



Kuva 3. Tiesiltojen lukumäärän jakauma siltatyypeittäin (Väylävirasto 2021b, s. 31).

2.2 Siltojen kunto

Käytännön kokemuksen perusteella on todettu, että silta tulee peruskorjausikänsä 30–40 vuoden iässä. Sillan kestoikänsä vaikuttaa pääosin sillan sijaintiin liittyvät ympäristötekijät, kuten sillan sijainti voimakkaasti suolasumurasitetulla maantiellä. Suuri osa nykyisin käytössä olevista tiesilloista on rakennettu päätieverkon rakentamisen yhteydessä 1960–1970 luvuilla (RIL 2018, s. 25). Merkittävä osa kyseisistä silloista on siis jo elinkaarensa päässä. Lisäksi kuten aikaisemmin esitetystä kuvaajasta (Kuva 2) kävi ilmi, siltojen lukumäärän nopea kasvu aiheuttaa tulevaisuudessa kasvavan tarpeen siltojen peruskorjaukselle. Väyläviraston siltojen kuntoa seurataan yleistarkastuksilla, joita suoritetaan noin viiden vuoden välein. Vuodesta 1990 lähtien yleistarkastusten tiedot on tallennettu entiseen Siltarekisteriin, eli nykyiseen Taitorakennerekisteriin. (Väylävirasto 2021b, s. 9)

Silloille on vuodesta 2004 lähtien määritetty oma viisiportainen (1–5) kuntoluokitus. Kuntoluokituksen tarkoituksena on helpottaa siltojen ylläpito- ja peruskorjaustarpeen määrittämistä. Kuntoisuusluokan määrittelyperusteita on kuvattu tarkemmin sanallisesti taulukossa 2. Yksinkertaistettuna kuntoluokat jaetaan seuraavasti: (Väylävirasto 2021b, s. 52)

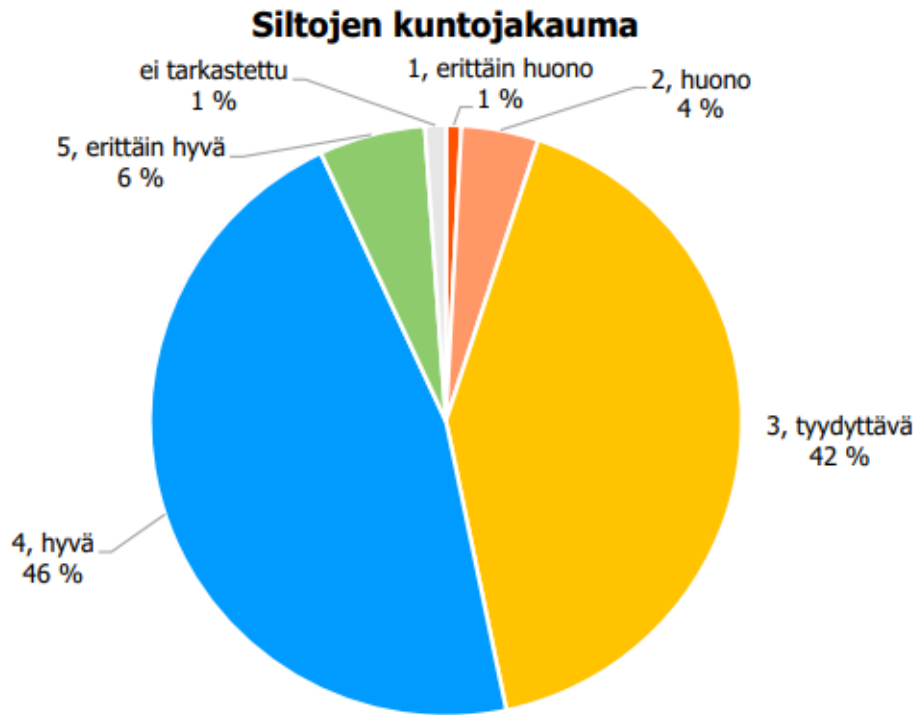
- Erittäin hyvä (5) → Ei ylläpitotarpeita
- Hyvä (4) → Vähäistä kunnostusta
- Tyydyttävä (3) → Peruskorjaus tulossa
- Huono (2) → Peruskorjaus nyt
- Erittäin huono (1) → Peruskorjaus myöhässä

Kuuluessaan kuntoluokkaan yksi (1) tai kaksi (2), silta luokitellaan huonokuntoiseksi.

Taulukko 2. Sillan kuntoluokkien sanallinen kuvaus (mukailten Väylävirasto 2021b, s. 86).

Kuntoluokka:	Kuvaus:
Erittäin hyvä (5)	Uusi tai lähes uudenveroinen silta.
Hyvä (4)	Hyväkuntoinen silta, jossa on normaalia kulumista ja ikääntymistä. Sillan yleiskunto voi olla hyvä, vaikka jonkin rakenneosan kuntoarvio olisikin huono tai erittäin huono.
Tyydyttävä (3)	Sillassa on jo puutteita ja vaurioita kuten rapautumista, mutta korjaamista voidaan vielä siirtää. Yleiskunto voi olla tyydyttävä, vaikka jonkin pää rakenneosan kuntoarvio olisikin huono tai erittäin huono.
Huono (2)	Useita selvästi havaittavia korjausta vaativia vaurioita tai jokin yksittäinen vakava vaurio. Erikoistarkastuksen ja peruskorjauksen tarve on ilmeinen.
Erittäin huono (1)	Silta on täydellisen peruskorjauksen tai jopa uusimisen tarpeessa. Kunto ei ole hyväksyttävissä. Vaurioita on niin paljon, että pelkästään niiden kirjaaminen on työlästä.

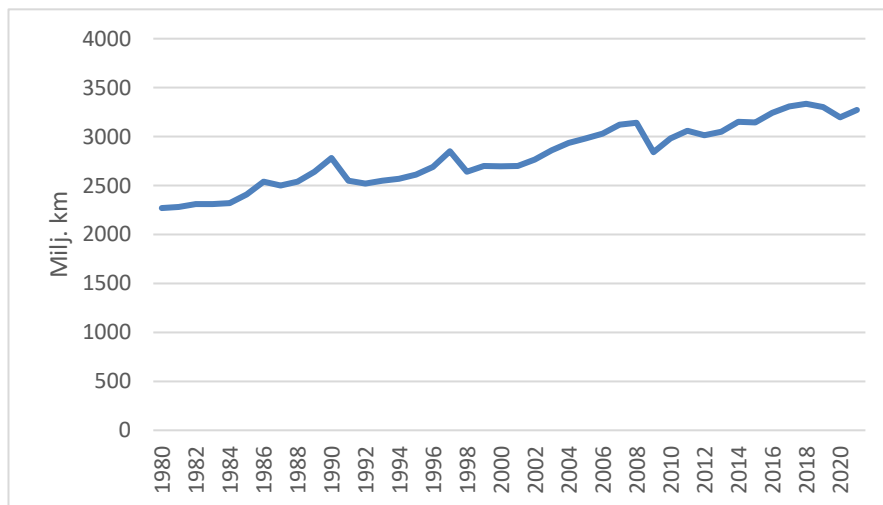
Vuoden 2020 kuntojakautaman (Kuva 4) perusteella vähän vajaa puolet Suomen tiesilloista luokitellaan vähintään kuntoluokkaan ”hyvä”. Tästä huolimatta, joka kahdeskymmenes silta määritellään Suomessa huonokuntoiseksi. Väyläviraston (2021a, s. 17) mukaan väyläomaisuuden korjausvelan määrä oli tie- ja ratasiltojen osalta noin 304 miljoonaa euroa vuoden 2021 alussa. Korjausvelan määrittelyssä summa muodostuu huonokuntoisen, korjaustarpeessa olevan väyläomaisuuden korjauskustannusten yhteenlasketusta summasta (Väylävirasto 2021a, s. 3). Siltojen ikärakenteen takia siltojen korjaustarve ei tule ainakaan vähenemään tulevina vuosina.



Kuva 4. Tiesiltojen kuntojakauma 31.12.2020 (Väylävirasto 2021b, s. 54).

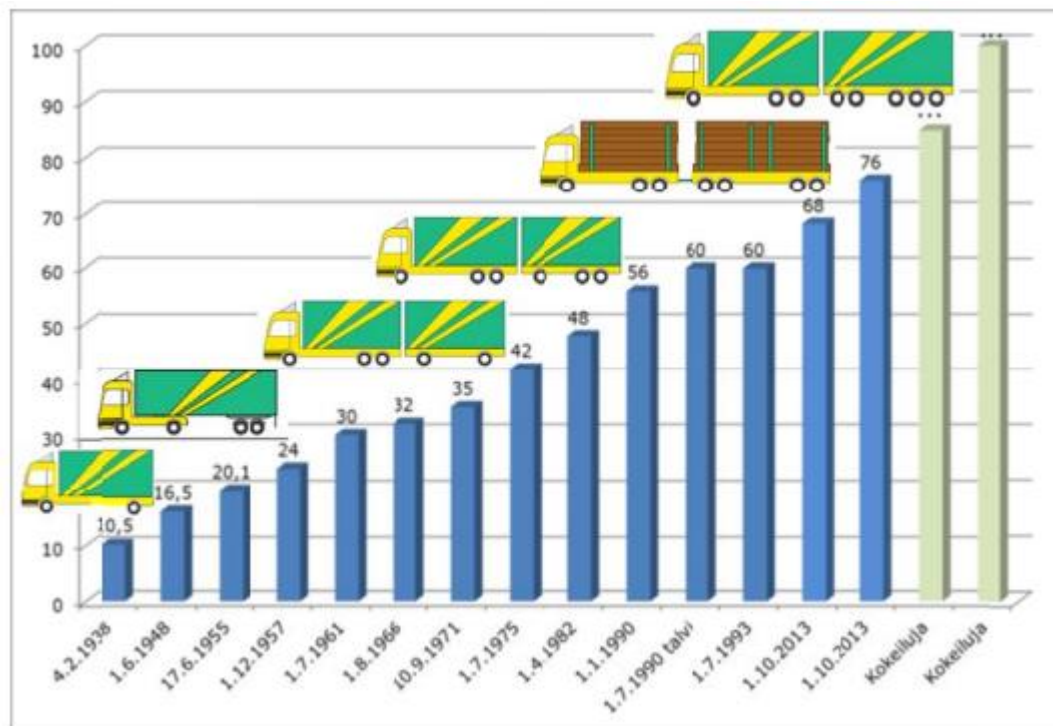
2.3 Siltojen liikennekuormat ja kantavuus

Suomen siltoja kuormittavat myös kasvaneet liikennemäärät ja akselipainot etenkin raskaan liikenteen osalta. Oheinen kuvaaja (Kuva 5) osoittaa, että raskaan liikenteen eli kuorma- ja linja-autojen määrä on tasaisesti kasvanut maanteilla viimeisen 40 vuoden aikana (Traficom 2021).



Kuva 5. Raskaan liikenteen liikennesuorite maanteilla vuosina 1980–2021 (mukailten Traficom 2021).

Raskaan liikenteen suurimmat sallitut mitat sekä akseli- teli ja kokonaismassat on määrätty ajoneuvoasetuksessa. Kuvasta 6 nähdään, että raskaiden ajoneuvojen suurimmat sallitut kokonaismassat ovat kasvaneet jatkuvasti vuosikymmenten aikana. Viimeisin nosto sallittuihin teli- ja kokonaismassoihin tehtiin ajoneuvoasetuksen muuttuessa vuonna 2013. Liikenneviraston (2015a, s. 9) mukaan nousseilla kokonaismassoilla uskotaan olevan vaikutus siltojen kasvavaan kunnossa- ja ylläpitotarpeeseen. Mikäli sillalle ei voida kantavuuden tai kunnan perusteella sallia vuoden 2013 ajoneuvoasetuksen mukaisia kuormia, tulee sillalle asettaa kantavuuslaskentaan perustuva painorajoitus (Liikennevirasto 2015b, s. 67).



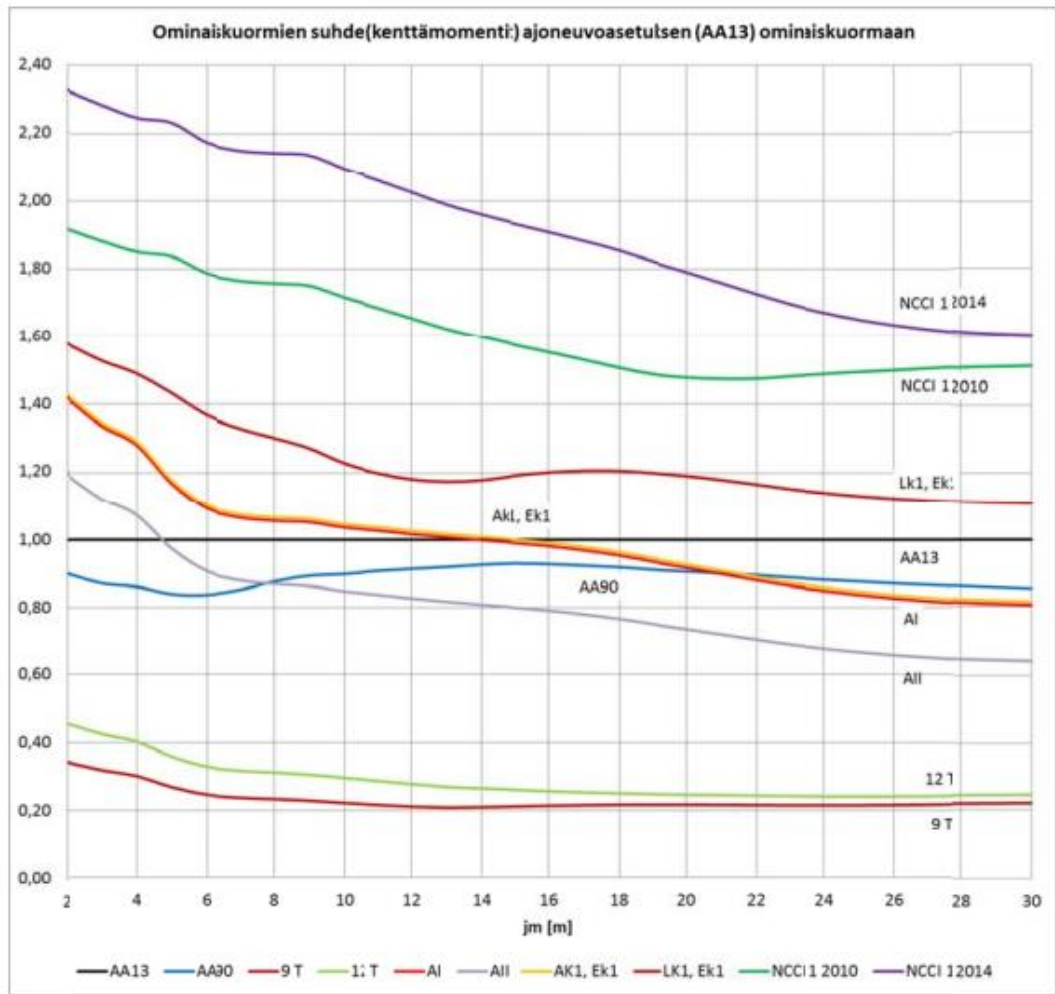
Kuva 6. Raskaiden ajoneuvojen suurimmat sallitut kokonaismassat vuosina 1938–2013 (Liikennevirasto 2015a, s. 9)

Siltojen kantavuutta tarkastellaan Liikenneviraston vuonna 2015 päivittämän siltojen kantavuuslaskentaohjeen mukaan. Ohjetta hyödynnetään olemassa olevien tie-, katu- ja rautatiesiltojen kantavuuden laskennallisessa määrittämisessä tavanomaiselle liikenteelle tai erikoiskuljetuksille. Ohjetta ei ole tarkoitettu käytettäväksi uusien siltojen suunnittelussa. Kantavuuslaskentaohje on laadittu huomioiden eurokoodit ja niiden kansalliset liitteet sekä ajoneuvoasetukseen vuonna 2013 tehdyt muutokset. Kantavuustarkastelussa sillasta luodaan ohjeen perusteella rakennemalli (FEM-malli), pohjautuen rakenteen todellisiin mittoihin ja kuormiin. Mallin avulla sillasta mitoitetaan kaikki kriittiset rakenneosat käyttö- ja murtorajatilassa. (Liikennevirasto 2015b, s. 10)

Rakennemallin teko on myös aina ennen sillan monitoroinnin aloittamista tehtävä toimenpide. Rakennemallin avulla pystytään määrittämään monitoroinnissa käytettävät anturityypit sekä niiden lukumäärä ja sijainti. Rakennemallia voidaan myös edelleen kalibroida ja tarkentaa monitoroinnista saadun datan avulla. Tarkalla rakennemallilla saadaan laskettua sillan rasitukset kaikilla tarpeellisilla liikennekuormilla. Rakennemallin avulla on myös mahdollista määrittää niin sanotut kriittiset arvot monitoroinnissa tarkkailtaville mittaustuloksille. (Liikennevirasto 2016a, s. 63).

Liikennemäärien ja raskaan liikenteen kokonaismassojen kasvaessa ovat nousseet myös siltojen suunnittelukuormat. Kuvan 7 kuvaaja esittää eri aikakausien suunnittelukuormilla laskettujen kenttämomenttien suhteen vuoden 2013 ajoneuvoasetuskuormalla laskettuun kenttämomenttiin verrattuna (Liikennevirasto 2015b). Kuvaajan perusteella laskettaessa kenttämomenttia 12 metrin jännemitan omaavalle sillalle todetaan, että NCC1 2014 mukaisilla ominaiskuormilla momentti on kaksinkertainen vuoden 2013 ajoneuvoasetuksen arvoilla laskettuun momenttiin verrattuna. Vastaavasti vuoden 1940 liikennekuormalla 12 T laskettaessa kenttämomentti on alle puolet AA13 vastaavasta luvusta. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että vanhat sillat ovat usein alimitoitettuja nykypäivän liikennekuormille.

Kun huomioidaan Suomen siltojen ikärakenne, kasvaneet liikennemäärät ja kokonaismassat voidaan todeta, että tarve siltojen kantavuuden määrittämiselle on lisääntynyt ja tulee edelleen lisääntymään tulevaisuudessa. Siltojen kantavuuteen liittyvät ongelmat ovatkin usein sillan monitorointipäätöksen taustalla.



Kuva 7. Eri aikakausien suunnittelukuormilla laskettujen kenttämomenttien suhde vuoden 2013 ajoneuvoasetuskuormalla laskettuun kenttämomenttiin verrattuna (Liikennevirasto 2015b).

3 SILTOJEN MONITOROINTI

3.1 Yleistä monitoroinnista

Liikenneviraston monitorointikäsi kirjan (2016a, s. 7) mukaan monitoroinnilla tarkoitetaan rakenteen lyhyt- tai pitkäaikaista tilan, kunnan ja toiminnan seurantaan käyttäen automaattisia mittaus- ja analysointilaitteita. Sillan monitoroinnilla on mahdollista saavuttaa tarkkaa ja tarvittaessa pitkäaikaista mittaustietoa sillan rakenteen käyttäytymisestä, rasituksista ja turmeltumisesta. Monitoroinnista saatua dataa analysoimalla voidaan saada tärkeää tietoa sillan vaurioista, jäljellä olevasta käyttöiästä ja rakenteellisesta kantavuudesta. Monitorointia voidaan hyödyntää niin vanhojen kuin uusienkin siltojen kuntotarkastelussa. Monitorointi voi siksi olla potentiaalinen keino siltojen käyttöiän turvalliseen pidentämiseen ja korjaustarpeen tarkempaan arvioimiseen.

Suomessa silloille on tehty säännöllisesti koekuormituksia VTT:n (Teknologian tutkimuskeskus) toimesta jo 1980-luvun alkupuolelta alkaen. VTT:n julkaisemassa ”Siltojen koekuormitukset vuosina 1983–1993” -raportissa esitellään silloille tehtyjä koekuormituksia kymmenen vuoden ajalta. Koekuormitukset olivat pääosin lyhyitä mittauksia, joissa tarkasteltiin siltatyypiltään ja materiaaliltaan erilaisia siltoja. Siltoja tutkittiin mittauksin muun muassa niiden käyttöiän, kantavuuden ja vahventamissysteemien toimivuuden määrittämistä varten. Mittaukset olivat pääosin kuormituskokeiden aikana tehtyjä venymä-, siirtymä-, taipuma- ja halkeamaleveysmittauksia. (Tirkkonen & Juntunen 1995)

Vuosina 2003–2007 Suomi osallistui EU-rahoitteiseen ”Sustainable Bridges” -hankkeeseen. Hankkeessa oli mukana yliopistoja, tutkimuslaitoksia, konsultteja ja sillan omistajia useista eri Euroopan maista. Projektin päämäärinä oli rataliikenteen kuljetuskapasiteetin lisääminen nostamalla sallittuja akselipainoja ja junien sallittuja huippunopeuksia, olemassa olevien ratasiltojen eliniän pidentäminen sekä siltojen kunnossapidon ja vahvistamisen parantaminen. Projekti jaettiin eri aihepiirejä tutkiviin tutkimusryhmiin, joista yhden ryhmän tehtävänä oli keskittyä olemassa olevien monitorointitekniikoiden arviointiin. Tutkimuksessa tutkittiin valokuituantureita sekä arvioitiin langattomien anturiverkkojen toimintaa käyttäen MEMS-teknologiaa (Micro-Electro-Mechanical Systems). Tutkimus suoritettiin pitkäaikaisena monitorointina Sveitsissä sijaitsevalle vinoköysiratasillalle. (Elfgrén et al. 2008, s. 3, 5)

Vuosina 2006–2008 VTT tutki siltojen monitorointia SIMO-projektissa (Siltojen monitorointi). Hankkeessa keskityttiin monitorointitekniikan, kuten mittalaitteistojen ja antureiden testaamiseen viidessä erilaisessa siltakohteessa. Projektissa oli tarkoitus selvittää laitteistojen soveltuvuutta etenkin pitkäaikaiseen monitorointiin. (Hakola et al. 2008, s. 1)

SIMO-hanketta seurasi vuodet 2010–2012 kestänyt SITUEL-projekti (Siltojen ja tunneleiden turvallisuus ja elinkaaren hallinta). Projektissa pyrittiin kehittämään siltojen ja tunneleiden monitorointikäytäntöjä yksinkertaisemmiksi, systemaattisiksi ja kustannustehokkaiksi. Kehityksen kohteena oli myös monitorointidatan analysointimenetelmät. Lisäksi SITUEL-projektin aikana laadittiin luonnosversio siltojen monitorointiohjeesta. (Liikennevirasto 2015c, s. 29).

Vuonna 2016 Liikennevirasto julkaisi siltojen monitorointiohjeen ja monitorointikäsi­kirjan. Julkaisut toimivat ohjeina niin tilaajille kuin siltojen suunnittelijoille ja monitorointia suorittaville yrityksille. Monitorointiohjeessa esitellään siltojen monitorointimenetelmiä, monitorointiprojektin kulkua sekä monitoroinnin laadunhallintaa (Liikennevirasto 2016b, s. 4). Monitorointikäsi­kirjassa taas käsitellään monitorointitapoja, antureiden valintaa, mittauslaitteiden ja mittausten vaatimuksia sekä mittaustulosten analysointia ja tallentamista (Liikennevirasto 2016a, s. 4). Liikennevirasto muuttui Väylävirastoksi vuonna 2019.

3.2 Monitorointitarve

Monitorointia voidaan suorittaa niin vanhoille kuin uusille silloille. Päätös sillan monitoroinnin aloittamisesta perustuu aina monitorointitarpeeseen. Siltojen monitorointia voidaan käyttää moniin eri käyttötarkoituksiin ja ennen monitoroinnin aloittamista on tärkeää määritellä, mitkä monitoroinnin tavoitteet ovat. Vardanega et. al (2022, s. 294) on esittänyt tutkimuksessaan, että jos ei ole täysin selkeää syytä miksi monitorointia tarvitaan, on hyvin epätodennäköistä, että odotettuja tuloksia myöskään saadaan.

Liikenneviraston (2016b, s. 11) mukaan monitorointitarve syntyy tilanteessa, jossa sillan nykyisten käytettävissä olevien tietojen perusteella ei voida saavuttaa haluttua tavoitetilaa. Tavoitetila voi olla esimerkiksi sillan rakenteellisen turvallisuuden osoittaminen, elinkaaren optimointi tai akseli- ja kokonaispainojen määrittäminen.

Monitorointitarve syntyy usein vasta sillan käytön aikana ja se voi perustua sillan vaurioihin tai kantavuuden ja jäljellä olevan käyttöiän selvittämiseen. Monitorointitarve voi liittyä myös ei-rakenteelliseen asioihin kuten sillan käyttömukavuuteen tai alan kehittämiseen. Uusien siltojen kohdalla siltoihin voidaan jo rakentamisen aikana asentaa antureita, joilla voidaan tutkia siltaan rakentamisvaiheessa syntyviä rasituksia sekä myöhemmin valvoa sillan toimintaa ja kunnan kehittymistä. Sillan kuntoon liittyvä monitorointitarve ilmenee usein sillalle tehtävien tarkastusten yhteydessä ja kantavuuteen liittyvä monitorointitarve kantavuuslaskelmien yhteydessä. (Liikennevirasto 2016b, s. 11)

Vaurioihin liittyvä monitorointitarve syntyy yleensä tilanteessa, jossa sillan rakenteellista turvallisuutta ei pystytä osoittamaan ilman tarkempia lähtötietoja. Tällainen tilanne voi syntyä, kun sillassa havaitaan vaurio, jonka laajuudesta tai vaikutuksista ei ole tarpeeksi tietoja. Silloin monitoroinnin tavoitteeksi määrätään usein kantavuuden määrittäminen. (Liikennevirasto 2016b, s. 14)

Rakenteelliseen kantavuuteen tähtäävän monitoroinnin tavoitteena on usein sallittujen kuormien määrittäminen. Monitorointiin voidaan päätyä, kun sillan kantavuuslaskennan tueksi tarvitaan lisää tietoa. Kantavuuden määrittämisessä käytetään usein apuna koekuormitusta. (Liikennevirasto 2016b, s. 14)

Käyttöikään perustuvaan monitorointiin päädytään yleensä silloin kun tavoitteena on sillan elinkaaren optimointi. Elinkaaren optimoinnissa yritetään saada tietoa sillan peruskorjaukseen tai loppuun käyttöön liittyen. Tieto voi esimerkiksi liittyä vaadittavan korjauksen ajankohtaan tai korjausmenetelmiin. (Liikennevirasto 2016b, s. 14)

Mukavuuteen liittyvää monitorointia toteutetaan silloin kun tavoitteena on käyttömukavuudelle asetettujen vaatimusten täyttyminen. Käyttömukavuuden monitorointitarve liittyy usein tilanteeseen, kun sillalla havaitaan epätoivottua värähtelyä, joka korostuu etenkin kevyen liikenteen siltojen kohdalla (Liikennevirasto 2016b, s. 14)

Alan kehittämiseen pohjautuva monitorointitarve kattaa tutkimus- ja kehittämistoimintaan liittyvän monitoroinnin. Tämä voi pitää sisällään muun muassa mittaustekniikoihin, poikkeuksellisiin rakennetyyppeihin, sääolosuhteisiin tai liikennevirtoihin liittyvää monitorointia. Tavoitteena on usein alan tai suunnitteluohjeistuksien kehittäminen. (Liikennevirasto 2016b, s. 14)

3.3 Monitorointimenetelmät ja laajuus

Siltojen monitorointi voidaan jaotella monitorointimenetelmän ja monitoroinnin laajuuden mukaan. Menetelmän valinta riippuu monitoroitavasta kohteesta ja kohteen rakenteista tarvittavista tiedoista (Liikennevirasto 2016a, s. 18). Monitorointimenetelmä kuvaa suoritettujen monitoroinnin jatkuvuutta ja kestoja, kun taas laajuus kertoo monitoroinnin suunnitteluun, toteuttamiseen ja tulosten analysointiin käytettävistä resursseista. Menetelmä muodostaa merkittävän osan monitoroinnin kustannuksista sekä vaikuttaa oleellisesti monitoroinnilla tuotettavaan tietoon. Monitorointimenetelmiä on kolme erilaista: kertamonitorointi, jaksottainen monitorointi ja jatkuva monitorointi. (Liikennevirasto 2016b, s. 15–16)

3.3.1 Kertamonitorointi

Kertamonitoroinnissa siltaa mitataan vain yhden kerran. Mittaus voi ajallisesti kestää muutamista tunneista viikkoihin. Mittauslaitteet ja anturit kiinnitetään siltaan vain väliaikaisesti. Tyypillinen esimerkki kertamonitoroinnista on koekuormitus, jossa raskasta ajoneuvoa ajatetaan siltaa pitkin ja sen tuottaman datan perusteella analysoidaan sillan käyttäytymistä. Kertamonitoroinnin taustaoletus on, että sillan kunto tai toiminta pysyy muuttumattomana. (Liikennevirasto 2016a, s. 19)

3.3.2 Jaksottainen monitorointi

Mikäli kertamonitorointi toistetaan, muuttuu se jaksottaiseksi monitoroinniksi. Jaksottaisessa monitoroinnissa mittaus toistetaan suunnitelluin aikavälein ja siten saadaan tietoa sillan rasituksissa tai rakenteissa tapahtuvista muutoksista. Jaksoittaisessa monitoroinnissa mitattavan jakson pituus voi vaihdella muutamasta tunnista vuosiin ja jaksojen väli voi olla säännöllinen tai epäsäännöllinen. Jaksottaiselle monitoroinnille on tyypillistä, että mittauslaitteet poistetaan sillalta aina mittausjakson päätyttyä, mutta myös kiinteät mittausjärjestelmät ovat mahdollisia. Jaksottaisessa monitoroinnissa korostuu erityisesti mittalaitteiston ja antureiden kalibroinnin tärkeys, että peräkkäiset mittaukset olisivat vertailukelpoisia toisiinsa. Tyypillinen esimerkki jaksottaisesta monitoroinnista on siltakohde, jolle on mittausjaksojen välissä tehty korjaustoimenpide, jonka onnistumista halutaan tutkia. (Liikennevirasto 2016a, s. 19)

3.3.3 Jatkuva monitorointi

Liikenneviraston (2016a, s. 18) mukaan jatkuva monitorointi on sillan jatkuvaa mittausta ilman keskeytyksiä. Monitorointi voi kestää useita vuosia ja siinä mittalaitteisto asennetaan siltaan usein pysyvästi. Jatkuvassa monitoroinnissa on tärkeä kiinnittää huomiota mittalaitteiden ja antureiden valintaan. Mittausjärjestelmältä odotetaan hyvää pitkäaikaiskestävyyttä ja tarvittaessa mahdollisuuksia huoltoon. Edellä mainituista monitorointimenetelmistä jatkuva monitorointi tuottaa eniten tietoa mutta on myös usein kustannuksiltaan korkein. (Liikennevirasto 2016b, s. 15)

Uusille silloille voidaan jo rakennusvaiheessa asentaa kiinnikkeitä ja putkia antureita ja kaapelointeja varten. Lisäksi uusia siltoja monitoroitaessa anturit on myös mahdollista asentaa suoraan betonirakenteen sisään, esimerkiksi kiinni betoniraudoitteeseen ennen betonin valamista. (Liikennevirasto 2016a, s. 18)

Vanhojen siltojen osalta jatkuvalla monitoroinnilla voidaan seurata ja mitata sillan kriittisiä kohtia esimerkiksi tulevaan korjaukseen asti. Jatkuvassa monitoroinnissa on tyypillistä asettaa mittalaitteille niin sanotut hälytysrajat, joiden ylittyessä voidaan ryhtyä tarvittaviin korjaustoimenpiteisiin tai liikenteen rajoittamiseen. (Liikennevirasto 2016a, s. 18)

3.3.4 Monitoroinnin laajuus

Monitoroinnin laajuus kuvaa monitoroinnin suunnitteluun, toteuttamiseen ja tulosten analysointiin käytettäviä resursseja. Monitoroinnin laajuus pitää sisällään käytetyn monitorointitekniikan, mittalaitteiden lukumäärän ja monitorointitulosten analysoinnin. Monitorointiprojektit voidaan jakaa laajuuden mukaan: suppeaan, laajaan ja erikoislaajaan monitorointiin. Alla olevassa kuvassa (Kuva 8) monitoroinnin laajuutta on luokiteltu perustuen mittalaitteiden lukumäärään. (Liikennevirasto 2016b, s. 18)

<u>Monitoroinnin laajuus</u>	<u>Anturimäärä (kpl)</u>
Erikoislaaja monitorointi	≥ 100
Laaja monitorointi	20–100
Suppea monitorointi	≤ 20

Kuva 8. Monitoroinnin laajuuden määrittely antureiden kappalemäärän mukaan (mukaillen Liikennevirasto 2016a, s. 21).

Erikoislaaja monitorointi on tyypillinen ratkaisu rakenteeltaan vaativille ja pitkille silloille. Erikoislaajassa monitoroinnissa antureita on käytössä yli 100 kappaletta ja sillan toimintaa sekä rasituksia mitataan kaikista sillan rakenneosista ja jänneistä, jotta saadaan mahdollisimman yksityiskohtaista tietoa analysointia varten. Paremman ja tarkemman mittaustuloksen aikaansaamiseksi samaa mitattavaa suuretta voidaan mitata hyödyntämällä useampaa erilaista mittaustekniikkaa. Erikoislaajassa monitoroinnissa anturit ja niiden kaapeloinnit kiinnitetään pysyvästi rakenteeseen, johtuen antureiden suuresta lukumäärästä ja yleensä pitkistä mittaussajasta. (Liikennevirasto 2016a, s. 21)

Laajassa monitoroinnissa käytettävien antureiden lukumäärä on 20–100 kappaletta. Monitoroitava siltakohde voi olla kohtalaisen vaativa ja pitkä mutta kaikkia sillan rakenteita ei kuitenkaan tarvitse tutkia. Tutkimuksen kohteena voi olla esimerkiksi useampiaukkoisen sillan keskimäinen jänne. (Liikennevirasto 2016a, s. 21)

Suppea monitorointi on laajuudeltaan pienin ja siinä tutkitaan yksittäistä kohtaa sillasta. Tutkimuksen kohde voi olla esimerkiksi vaurioitunut kohta sillassa tai jokin yksittäinen kriittinen osa, kuten pääpalkki. Suppeassa monitoroinnissa käytetään vain yhtä mittaustekniikkaa ja antureita on käytössä enintään 20 kappaletta. (Liikennevirasto 2016b, s. 18)

3.4 Siltojen monitoroinnissa käytettävät anturityypit ja mittaussuureet

Siltojen monitoroinnissa hyödynnetään useita erilaisia antureita ja mittaustekniikoita. Lisäksi monitoroitaessa voidaan mitata lukemattomia erilaisia mittaussuureita. Tämän takia monitoroinnin tavoite on syytä määritellä tarkasti, sillä tällä on vaikutus anturien valintaan. Anturityyppiin, niiden lukumäärään ja sijaintiin vaikuttaa myös sillasta

olemassa olevat lähtötiedot, kuten piirustukset, laskelmat ja tarkastusraportit. Monitorointia suunniteltaessa anturien sijainti pyritään valitsemaan siten, että mittaustulokset ovat luotettavasti vertailtavissa esimerkiksi sillan rakennemallista (FEM-mallista) saatuihin tuloksiin. Siltojen monitoroinnissa käytettävät anturityypit voidaan jaotella sen perusteella, mittaavatko ne sillan mekaanisia ominaisuuksia vai sillan kuntoa ja ympäröiviä olosuhteita. Lisäksi on anturityyppejä, joita ei voida suoraan jaotella kumpaankaan edellä mainittuun ryhmään. Sillan mekaanisia ominaisuuksia mittaavat anturit mittaavat yleensä sillan tai sen osien venymää, taipumaa, siirtymää, värähtelyä tai osien välisiä voimia. Sillan kuntoa ja olosuhteita mittaavat anturit mittaavat tavanomaisesti sillan pitkäaikaisia ominaisuuksia (Väylävirasto 2016a, s. 38). Tällaisia ominaisuuksia ovat esimerkiksi sillan betoniterästen korroosio ja sillan rakenneosien lämpötilat. Muita luokittelemattomia siltojen monitoroinnissa mitattavia suureita ovat esimerkiksi liikenteen ajoneuvojen akselipainot ja ajonopeudet. Seuraavissa kappaleissa käydään tarkemmin läpi yleisimpiä siltojen monitoroinnissa tarkasteltavia mittaussuureita ja näiden mittaamiseen käytettäviä anturityyppejä. Alla olevaan taulukkoon (Taulukko 3) on kerätty tavanomaisimpia anturityyppejä ja mittaussuureita. (Väylävirasto 2016a, s. 23)

Taulukko 3. Tavanomaisimpia mitattavia suureita sekä anturityyppejä (mukaiillen Liikennevirasto 2016a, s. 24).

<u>Mitattava suure</u>	<u>Anturityyppi</u>	
Taipuma	<ul style="list-style-type: none"> • Kamera (konenäkö) • Laser • Takymetri • Lanka-anturi 	Mekaanisia ominaisuuksia mittaavat anturityypit
Siirtymä	<ul style="list-style-type: none"> • Laser • Liikeanturi • GPS • Kamera (konenäkö) 	
Venymä	<ul style="list-style-type: none"> • Venymäliuska • Optinen kuitu • Värähtelevä lanka 	
Värähtely	<ul style="list-style-type: none"> • Kiihtyvyysanturi • Venymäliuska 	
Lämpötila	<ul style="list-style-type: none"> • Termopari • Optinen kuitu • Termistori 	Kuntoa ja olosuhteita mittaavat anturityypit
Betoniterästen korroosio	<ul style="list-style-type: none"> • Korroosioanturi 	
Säätila (kosteus, lämpötila, tuuli, sademäärä)	<ul style="list-style-type: none"> • Sääasema 	
Särön kasvu teräksessä tai betonissa	<ul style="list-style-type: none"> • Akustinen emissio • Kamera (konenäkö) 	Muut anturityypit
Ajoneuvon tunnistus	<ul style="list-style-type: none"> • Kamera 	
Ajoneuvo- ja akselipainot, ajoneuvon nopeus	<ul style="list-style-type: none"> • WIM, BWIM, LAM 	

3.4.1 Venymä

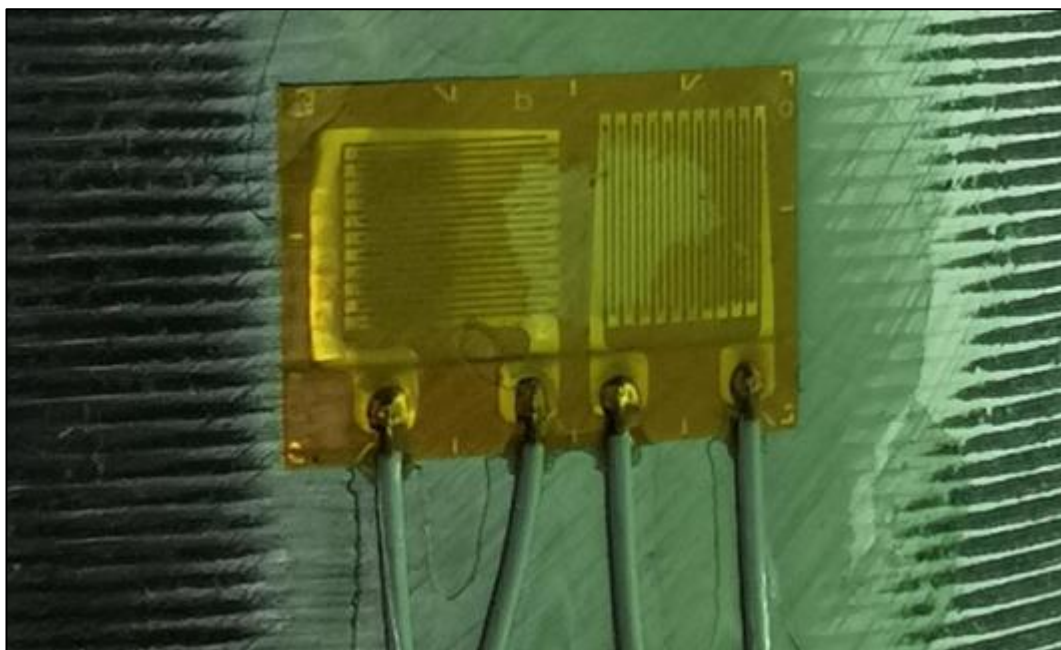
Venymä on yksi yleisimmästä siltojen monitoroinnissa mitattavista mittaussuureista (Vardanega et al. 2022, s. 899). Venymä on dimensioton suure, joka kuvaa kappaleen pituuden muutosta suhteessa sen alkuperäiseen pituuteen. Venymä on tärkeä mittaussuure, sillä sen kautta on laskettavissa rakenteessa vaikuttava normaalijännitys Hooken lain avulla, joka voidaan esittää muodossa:

$$\sigma = \varepsilon \cdot E = \frac{\Delta L}{L} \cdot E, \quad (1)$$

missä σ on normaalijännitys [MPa],
 E on kappaleen materiaalin kimmomoduuli [MPa],
 ε on kappaleen venymä,
 ΔL on kappaleen pituudenmuutos ja
 L on kappaleen alkuperäinen pituus.

Yhtälön (1) perusteella voidaan todeta, että kun rakenteen materiaalin kimmokerroin tiedetään ja materiaali käyttäytyy elastisesti, on rakenteessa vaikuttava normaalijännitys suoraan verrannollinen rakenteen venymään eli suhteelliseen pituudenmuutokseen. Venymää kuvataan tavanomaisesti käyttämällä yksikköä $\mu\varepsilon$ tai μS (mikroStrain), joka tarkoittaa venymäyksikön miljoonasosaa. Esimerkiksi metrin mittaisessa kappaleessa 1000 mikroStrainin (1000 μS) venymä vastaa yhden millimetrin muodonmuutosta. Venymää voidaan mitata muun muassa vastusvenymäliuskalla, valokuituanturilla ja värähtelevään lankaan perustuvalla venymäanturilla.

Vastusvenymäliuska on tavanomaisimpia venymän mittaamiseen käytettäviä antureita. Venymäliuska koostuu ohuesta metallijohteesta, joka on asetettu silmukkamuotoon tukipinnalle (Kuva 9). Venymäliuskan toimintaa perustuu sähkönjohtavuuden muutokseen metallijohteessa, kun siihen kohdistuu venymää tai puristusta. Johteen venyessä sen poikkileikkaus pienenee ja täten sähkönvastus kasvaa. Liuskan puristuessa tapahtuu päinvastoin, eli johteen poikkileikkaus kasvaa ja vastus pienenee. Venymäliuskoja on saatavissa eri mitoissa 5–150 mm väliltä ja niitä valmistetaan eri materiaaleista erityyppisiä mittauksia varten. Venymäliuskoilla voidaan mitata venymiä suoraan rakenteen betoni- ja teräspinoista tai betoniraudotteista. Venymäliuskan kiinnitys tapahtuu tavallisesti liimaamalla liuska puhdistettuun ja hiottuun pintaan, mutta myös kiinnitys hitsaamalla on mahdollista. Vastusvenymäliuskat ovat herkkiä lämpötilamuutoksista johtuvalle lämpölaajenemiselle, joten pidempiaikaisissa mittauksissa täytyy huolehtia lämpötilakompensoinnista. (Liikennevirasto 2016a, s. 28–29)



Kuva 9. Kaksi venymäliuskaa kiinnitettynä Logomon kävelysillan ripustustankoon 90 asteen kulmaan toisiinsa nähden (Lyöri 2020).

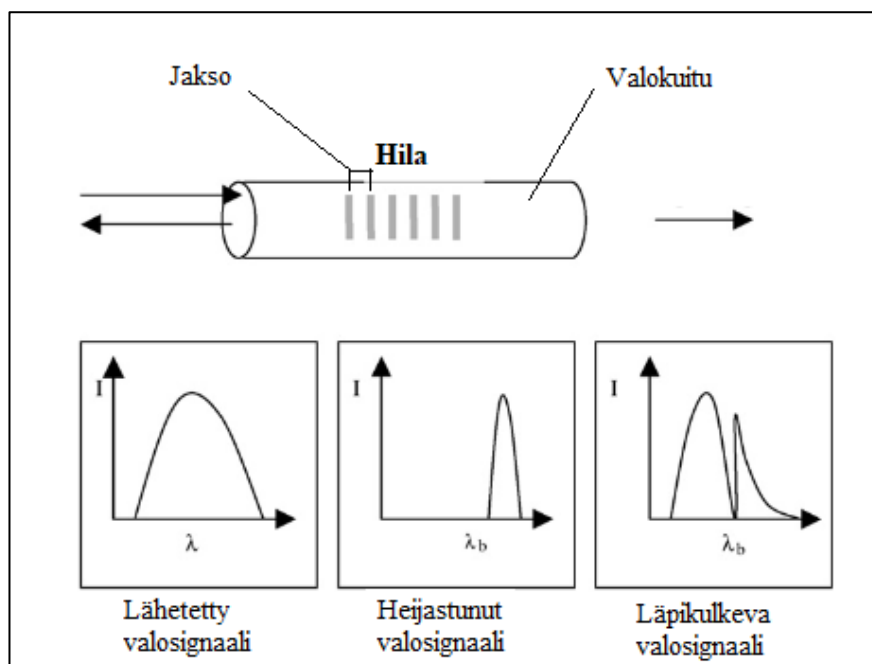
Venymäliuskojen ja muiden sähköisten anturityyppien lisäksi venymää voidaan mitata myös optisesti käyttäen valokuitutekniikkaan perustuvia antureita. Valokuituanturien toimintaperiaate perustuu valosignaalin kulkemiseen valokuidussa. Valokuituun kohdistuvat ulkoiset muuttujat kuten venymä ja lämpötila saavat aikaan muutoksia valosignaalin ominaisuuksissa ja signaalin takaisinheijastumisessa. Valokuituantureiden etuja on, että ne eivät tarvitse sähköä toimiakseen ja eivät täten ole herkkiä sähkömagneettisille häiriöille. Anturit ovat luotettavia ja soveltuvat hyvin pitkäaikaiseen monitorointiin. Yksi valokuituanturien huomattava etu on mahdollisuus kytkeä useita antureita samaan valokuituun, joka vähentää kaapelointien tarvetta. Valokuituanturit voidaan asentaa jo sillan rakennusvaiheessa kiinni betoniraudoitteisiin tai suoraan rakenteen pintaan. (Liikennevirasto 2016a, s. 30)

Optista kuitua hyödyntäviä anturitekniikoita on erilaisia, ja ne perustuvat valon eri ominaisuuksien kuten intensiteetin, vaiheen, aallonpituuden tai polarisaation mittaamiseen (Rodrigues et al. 2010, s. 1994). Eri tekniikoilla on omat hyvät ja huonot puolensa ja ne soveltuvat eri mittauskohteisiin. FBG-tekniikkaan (Fiber-Bragg-Grating) perustuvasta valokuituanturista (Kuva 10) on tullut erityisen suosittu, tarkka ja kustannustehokas työkalu siltojen monitoroinnissa (Majumder et al. 2008, s. 151).



Kuva 10. Ahvenkosken maantiesillan pääkannattajan alalaippaan kiinnitetty FBG-valokuituanturi, tyypiltään Micron Optics 3155 (Lyöri 2014).

FBG-valokuituanturin toiminta perustuu yksimuotoiseen valokuituun muodostettuun hilarakenteeseen. Kun valosignaali johdetaan hilaan läpi se heijastaa takaisin siihen lähetettyä valoa sen ominaisaallonpituudella (Kuva 11). Kun hilaan kohdistuu venymää tai lämpötilan muutosta, heijastuneen valosignaalin aallonpituus muuttuu ja tämän avulla saadaan mitattavan suureen (venymä, lämpötila) arvo tarkasti laskettua. FBG-antureilla suoritetaan pistemäistä mittausta ja niitä voidaan kytkeä useita peräkkäin samaan valokuituun. Peräkkäin kytketyillä antureilla on erilainen hilarakenne, joka mahdollistaa eri antureilta tulevan datan tunnistamisen ja mittaamisen. FBG-anturi voidaan asentaa sillan rakenteiden sisään jo rakennusvaiheessa tai asentaa rakenteen pintaan joko suoraan liimaamalla tai apukiinnikkeiden avulla. (Majumder et al. 2008, s. 151)



Kuva 11. FBG-valokuituanturin toimintaperiaate (mukaiillen Majumder et al. 2008, s. 151).

3.4.2 Taipuma ja siirtymä

Taipuma syntyy, kun rakennetta kuormitetaan sen pituussuuntaan nähden kohtisuoralla voimalla. Taipuman suuruus riippuu useasta tekijästä, kuten rakenteen materiaalista, dimensioista ja tuennan tyypistä. Taipuma on tavanomainen monitorointisuure, joka kertoo hyvin sillan rakenteen kunnosta, sillan toimivuudesta, lämpöliikkeistä sekä materiaalin kunnosta. Taipuman ohella sillan muut liikkeet kuten siltakannen tai palkkien siirtymät päätytuella ovat yleisiä monitoroitavia kohteita. Siltojen taipumien suuruudet voivat olla hyvin erisuuruisia riippuen siltatyypistä. Riippusilloilla taipuma voi olla useita satoja millimetrejä, kun taas lyhyillä betonisilloilla alle yhden millimetrin luokkaa. (Liikennevirasto 2016a, s. 23)

Taipuman mittaamiseen on perinteisesti käytetty takymetriä, jonka toimintaa perustuu etäisyyksien ja kulmien mittaamisen, eli trigonometrian hyödyntämiseen taipuman laskennassa. Nykyään tavanomaisempi tapa taipuman mittaamiseen on hyödyntää erilaisia lasermittalaitteita. Mittaustapa perustuu lasersäteen heijastumiseen suoraan kohteesta tai kohteeseen kiinnitetystä prismasta. Lasermittauksen tarkkuus on riippuvainen mitattavan kohteen ja mittalaitteen etäisyydestä ja on lyhyillä etäisyyksillä parhaimmillaan 0.2..1 mm luokkaa. (Liikennevirasto 2016a, s. 25)

Sillan osien välisiä liikkeitä kuten sillan kannen tai palkkien siirtymää päätytuilla voidaan mitata liikeantureiden avulla. Tavanomainen tapa on kiinnittää anturi toisiinsa nähden liikkuvien osien väliin. Liikeantureiden toiminta perustuu usein resistanssin, induktanssin tai kapasitanssin muuttumiseen anturin karan liikkeessa. Lineaaripotentiometri on esimerkki resistanssin muutoksen perustuvasta liikeanturista. Sillan osien välisten liikkeen ohella siirtymäantureilla voidaan mitata sillan taipumia, halkeilleen betonin halkeamaleveyksiä tai seurata suuria kasvavia säröjä. (Liikennevirasto 2016a, s. 26)

Siltojen taipumia, siirtymiä ja halkeamaleveyksiä voidaan monitoroida myös kameroiden avulla. Viime vuosien nopea tekniikan kehitys on vauhdittanut ja lisännyt kiinnostusta kameroiden ja konenäön hyödyntämiseen siltojen monitoroinnissa. Kuvauslaitteet ovat edullisempia ja tuottavat huomattavasti korkealaatuisempia kuvia kuin kymmenen vuotta sitten. Konenäön hyödyntäminen monitoroinnissa perustuu monitoroitavasta kohteesta otettujen kuvien analysoimiseen. Rakenteeseen ilmaantuvat muutokset kuten siirtymä tai särönkasvu pyritään huomaamaan kuvista automaattisesti konenäön avulla. Konenäön ja kameroiden hyödyntämisen etuina on alhaisten kustannusten lisäksi se, että monitoroitava

kohde voi sijaita pitkänkin matkan päässä eikä siltaan tarvitse olla kosketuksissa tai tehdä antureiden asennuksia. Haasteita konenäön hyödyntämiselle aiheuttaa muun muassa laitteistoon liittyvät tekijät kuten kohina ja linssin vääristymät sekä ympäristön aiheuttamat haasteet, kuten valaistus, sade, tuuli, sumu, ja värähtely. (Dong & Catbas 2020, s. 692, 731)

3.4.3 Värähtely

Sillan värähtelyjen mittaamiseen perustuva monitorointi pyrkii havaitsemaan muutoksia sillan värähtelyominaisuuksissa, ja tekemään tämän kautta johtopäätöksiä rakenteen toiminnasta ja mahdollisista vaurioista. Värähtelyn mittaamisessa yleisin tapa on käyttää kiihtyvyyssanturia, joka perustuu jousi-massa systeemin voiman mittaamiseen (Liikennevirasto 2016a, s. 33). Silloissa esiintyy värähtelyjä tyypillisesti ajoneuvojen, tuulen ja muiden ympäristön aiheuttamien vaikutusten seurauksena. Jokaisella sillalla on sille ominaiset värähtelyominaisuudet, kuten ominaistaajuus ja ominaismuoto. Normaalisissa tilanteissa nämä ominaisuudet pysyvät samoina, kun sillan jäykkyydessä, massassa tai vaimennuksessa ei tapahdu muutoksia. Mikäli sillan rakenteeseen syntyy vaurio, johtaa tämä rakenteen jäykkyyden pienemiseen, joka pyritään huomaamaan sillan värähtelyominaisuuksien muutoksena. Värähtelyjen mittaamiseen perustuvaa siltojen monitorointia on käytetty useissa kohteissa vuosikymmenien ajan. Brownjohn et al. (2011) perehtyi tutkimuksessaan 31 erilaiseen värähtelyjen mittaamiseen perustuvaan monitorointiprojektiin, päämääränään selvittää värähtelymittauksilla saavutettuja hyötyjä. Tutkimuksen lopputuloksena Brownjohn et. al (2011) totesi, että värähtelyjen mittaaminen soveltuu hyvin rakenteen käyttäytymisen tutkimiseen ja arvioimiseen, mutta se ei sovellu suoraan vaurion havaitsemiseen sillassa. Webb et al. (2015, s. 6) mukaan tähän on syynä, että sillan värähtelyominaisuudet eivät ole tarpeeksi herkkiä vaurion havaitsemiseen eikä niiden perusteella saada myöskään tietoa minkä tyyppinen vaurio on kyseessä. (Vardanega et al. 2022, s. 904)

3.4.4 Lämpötila

Materiaalien lämpölaajeneminen on ilmiö, joka vaikeuttaa monitoroinnista saatavien mittaustulosten tulkintaa ja on tärkeä huomioida siltojen monitorointia suunniteltaessa. Lämpötila ja lämpötilaerot aiheuttavat rakenteeseen todellisia rasituksia, mutta myös epätoivottuja mittaustuloksia väärentäviä venymiä. Lämpötilamuutoksista aiheutuvat venymät ovat pääosin peräisin itse monitorointikohteen ja mittausanturin sekä

mittalaitteeseen liitettyjen johtimien lämpölaajenemisesta (Cadence 2022). Mittaustulosten analysoinnin helpottamiseksi tulee lämpölaajenemisen aiheuttamat venymät erottaa rakenteen todellisista venymistä. Venymäliuskamittauksessa lämpötilan aiheuttamien epätoivottujen venymien erottamista rakenteen todellisista venymistä kutsutaan lämpötilakompensoimiseksi. Lämpötilakompensointi voidaan toteuttaa esimerkiksi erilaisilla venymäliuskojen siltakytkennöillä (Cadence 2022). Lämpötilan vaikutukset korostuvat etenkin pitkäaikaisessa ympärivuotisessa monitoroinnissa, jolloin lämpötilavaihtelut voivat olla hyvin suuria. Lämpötilaa voidaan mitata usealla eri tavalla kuten esimerkiksi termoparin tai jo aiemmin mainitun optisen valokuituanturin avulla. Lämpötilan mittauskohdat on hyvä sijoittaa lähelle rakenteen rasituksia mittaavia antureita, jolloin saadaan mahdollisimman tarkkaa tietoa rakenteessa anturin kohdalla olevasta lämpötilasta ja rakenteiden pintojen välisistä lämpötilaeroista.

3.4.5 Langaton monitorointi

Siltojen monitorointia voidaan suorittaa myös langattomasti käyttämällä langattomia antureita. Kiinnostus langattomia antureita kohtaan on noussut viimeisen kymmenen vuoden aikana langattoman teknologian kehittyessä ja tiedonsiirtonopeuksien kasvaessa. Langattoman monitoroinnin tekee houkuttelevaksi vaihtoehdoksi monitorointilaitteiston asentamisen helppous sekä alhaisemmat kustannukset. Etenkin pitkien siltojen kohdalla langaton anturointi on potentiaalinen valinta, jolla voidaan välttyä kalliilta kaapeloinneilta. Langattoman (Wireless Sensor Network) ja langallisen (Wired Sensor Network) anturiverkon olennaisimpia eroavaisuuksia on vertailtu taulukossa 4. Langaton monitorointi on ollut käytössä useissa eri silloissa maailmalla, joista ensimmäisten joukossa oli Golden Gate Bridgen värähtelyjen monitorointi vuonna 2017. (Noel et al. 2017, s. 1403-1404)

Langattomassa monitoroinnissa käytetään laitteita, joissa anturi, prosessori (CPU), vastaanotin, muisti ja virtalähde on integroitu yhteen pienikokoiseen yksikköön. Yksikkö on itsekseen kykenevä mittaamaan, laskemaan, siirtämään ja säilömään dataa. Langattomassa anturiverkossa voi olla useita pieniä yksikköjä, jotka keräävät tietoa eri kohdista rakennetta ja lähettävät datan joko suoraan tai toisten anturiyksikköjen kautta keskusyksikköön. (Rizzo & Enshaeian 2021a, s. 11)

Huolimatta viime vuosikymmenten teknisestä kehityksestä, langaton monitorointi kohtaa silti useita haasteita. Noel et al. (2017) on maininnut julkaisussaan langattomien

anturiverkkojen haasteiksi muun muassa rajalliseen datan siirtoon ja kaistanleveyteen sekä antureiden synkronointiin ja virrankulutukseen liittyvät ongelmat. Synkronointiin liittyvien ongelmien taustalla on, että samassa langattomassa anturiverkossa olevat mittausyksiköt on haastava synkronoida ajallisesti keskenään, joka johtaa virheisiin vaurioiden tunnistamisessa ja paikantamisessa. Sazonov et al. (2010, s. 470) mukaan jo yli 120 mikrosekunnin synkronointivirhe tekee vaurion havaitsemisen ja paikantamisen mahdottomaksi rakenteen värähtelyiden ominaisarvoja analysoimalla.

Langattomien anturiverkkojen energiankulutukseen liittyvät ongelmat korostuvat etenkin pitkäaikaisessa monitoroinnissa. Mitattavat datamäärät ovat suuria, joka voi johtaa ympärivuorokautisessa monitoroinnissa huomattavaan virrankulutukseen. Mittalaitteiden akkujen tai pariston vaihtaminen on usein työlästä ja vaikeaa johtuen mittausyksiköiden sijainnista (Noel et al. 2017, s. 1413). Ratkaisua energiaongelmaan on haettu muun muassa virrankulutuksen ja anturiverkkojen tehostamisesta sekä vaihtoehtoisista energialähteistä kuten aurinkopaneeleista ja liikenteen aiheuttaman värähtelyn muuttamisesta sähköenergiaksi (Noel et al. 2017, s. 1419).

Taulukko 4. Langattoman ja langallisen anturiverkon karkeaa vertailua (mukaiillen Noel et al. 2017, s. 1403)

	Langallinen anturiverkko	Langaton anturiverkko
Hintaluokka	Hintava	Edullinen
Asennusaika	Pitkä (päiviä)	Nopea (tunteja)
Käyttöikä	Pitkä, yleensä riippuu laitteiston kestoästä	Lyhyt, yleensä rajoittava tekijä akun kesto
Antureiden lukumäärä	Yleensä alhainen johtuen antureiden asentamisen vaikeudesta	Yleensä korkea johtuen antureiden asentamisen helppoudesta
Yhteyden kaistanleveys	Suuri kaistanleveys johtuen langallisesta yhteydestä	Rajoitettu kaistanleveys johtuen epäluotettavasta yhteydestä
Tiedonsiirtonopeus	Korkea tiedonsiirtonopeus	Alhaisempi tiedonsiirtonopeus
Antureiden synkronoitavuus	Hyvä johtuen langallisesta yhteydestä	Ongelmallinen johtuen langattomasta yhteydestä

4 JATKUVA MONITOROINTI MAAILMALLA

4.1 Yleistä monitoroinnista maailmalla

Siltojen monitoroinnin yleistymisen taustalla maailmalla on osaltaan hyvin samankaltaiset tekijät kuin Suomessa. Yksi syy vaihtoehtoisten siltojen kunnonvalvontakeinojen etsimiselle on siltojen ikärakenteesta johtuva heikkokuntoisten siltojen suuri määrä. Culbertson (2018) kertoo artikkelissaan Ranskan valtion teettämästä tutkimuksesta, jonka mukaan joka kolmas maan 12 000 valtiollisesti ylläpidetystä sillasta on huonokuntoinen ja vaatii korjausta. Tämän lisäksi 7 % silloista, eli noin 840 kappaletta, on niin vaurioituneita, että ne ovat romahtamisvaaran alla tulevina vuosina. Siltojen kunnan heikkeneminen ja kasvava korjaustarve on maailmanlaajuinen ongelma, sillä esimerkiksi Yhdysvalloissa vuonna 2020 tehdyn kuntoraportin mukaan noin 36 % maan 618 000 sillasta oli korjaustarpeessa. Lisäksi yli 45 000 siltaa, eli noin 7 %, määriteltiin heikko- tai huonokuntoiseksi (ARTBA 2021).

Maailmalla tapahtuneet siltaonnettomuudet ovat myös vauhdittaneet siltojen kunnonvalvonnan tehostamista ja monitoroinnin kehittämistä. Vuonna 2007 Yhdysvalloissa Minnesotan osavaltiossa sijainnut vesistön ylittävä teräsristikkosilta I35-HW romahti ja vaati kolmentoista ihmisen hengen (Minnesota Legislature 2020). Onnettomuus tapahtui varoittamatta ruuhka-aikaan samalla kun sillalla oli rakennustyömaa käynnissä. Tutkimusten jälkeen romahtamisen syyksi selvisi sillan vajavainen rakenteellinen kantavuus, joka johtui suunnitteluvirheestä. Sillan romahtaminen herätti kasvavan huolen huonokuntoisia siltoja kohtaan ympäri Yhdysvaltoja. Romahtaneen sillan tilalle rakennettiin välittömästi uusi silta, johon asennettiin mittava monitorointilaitteisto (Linderman et al. 2020, s. 1). Uutta siltaa on monitoroitu jatkuvana monitorointina sillan liikenteelle avaamisesta eli vuodesta 2008 lähtien.

Vuonna 2018 Morandin silta romahti Genovassa Italiassa. Silta oli yli kilometrin pituinen vinoköysisilta, josta romahti yllättäen noin 250 metrin mittainen osa ukkosmyrskyn aikaan. Onnettomuudessa kuoli 43 ihmistä (Rymsza 2021, s. 16). Vain kaksikymmentä päivää Italian onnettomuuden jälkeen myös Kiinan Sichuanin maakunnassa romahti Minjiang-silta. Romahduksessa vältyttiin henkilövahingoilta, sillä siltaan asennettu

monitorointijärjestelmä oli havainnut suuren siirtymän, jonka perusteella silta oli päätetty sulkea ajoissa (Xi et al. 2021 s. 1).

Siltojen monitorointia käsittelevässä englanninkielisessä kirjallisuudessa ja terminologiassa esiintyy usein monitoroinnista käytettävä lyhenne SHM (Structural Health Monitoring), joka vapaasti suomennettuna tarkoittaa rakenteen kunnan monitorointia. SHM:llä viitataan usein siltojen monitorointiin, mutta se voi tarkoittaa myös muiden infrarakenteiden ja rakennusten kunnan monitorointia. Siltojen monitorointia on suoritettu maailmalla jo useamman vuosikymmenen ajan. Monitoroinnin historian tarkempi määrittäminen tai rajaaminen on haastavaa. Gonzálezin (2011, s. 4) mukaan termin SHM määritelmä ei ole täysin selkeä ja termin merkitys on muuttunut ajan myötä. Monitorointimenetelmät ja siihen liittyvä teknologia ovat myös huomattavasti kehittyneet ensimmäisistä siltojen kunnan monitorointiin tähtäävistä kokeiluista. Näin ollen on siis hankala rajata, mistä lähtien siltojen monitorointi on käsitteenä tarkoittanut sitä, mitä se tänä päivänä tarkoittaa. (González 2011, s. 4)

Xu & Xia (2012) mukaan ensimmäisiä siltojen monitorointiin liittyviä projekteja olivat Bay Bridge ja Golden Gate siltojen rakennusprojektit USA:ssa 1930-luvulla, joissa tarkkailtiin siltojen dynaamista käyttäytymistä. Siltojen järjestelmällinen tarkastaminen alkoi USA:ssa vuonna 1967, Point Pleasantin kaupungissa sijainneen sillan romahdettua. Tästä eteenpäin on myös käytetty antureita tuottamaan informaatiota, jota ei voi paljaalla silmällä nähdä. Sillan rakenteiden värähtelyyn perustuvaa ominaisarvoanalyysia alettiin hyödyntämään sillan vaurioiden havaitsemisessa 1980-luvulla. 1990-luvulta lähtien pitkäaikaisia monitorointijärjestelmiä on asennettu siltoihin Kiinassa, USA:ssa ja Euroopassa. Viimeisen kahden vuosikymmenen aikana teknologian kehitys on mahdollistanut uusien anturitekniikoiden käyttöönoton ja datan tehokkaamman prosessoinnin. (González 2011, s. 5)

4.2 Siltojen monitorointitutkimukset maailmalla

Siltojen monitorointiprojekteista on julkaistu useita tutkimuksia maailmalta. Tutkimuksissa kuvaillaan usein siltaan asennettua monitorointijärjestelmää, käytettyjä antureita sekä mitattavia suureita. Vaikka monitorointiprojekteja kuvaavia tutkimuksia on julkaistu paljon, Vardanega et al. (2022) mukaan sillan rakenteiden kunnosta on hankala tehdä konkreettisia johtopäätöksiä niiden avulla. Helpottaakseen siltojen

monitorointijärjestelmien käyttäjiä ja suunnittelijoita Webb et al. (2015, s. 5) kehitti ja julkaisi luokittelun, jonka avulla monitorointijärjestelmien päämäärät jaotellaan viiteen eri ryhmään (Taulukko 5). Luokittelulla pyritään selittämään, millaiseksi tiedoksi monitoroinnista saatu data voidaan muuntaa. Monitoroinnin päämäärät jaetaan viiteen ryhmään (1–5), joista kerrotaan seuraavassa kappaleessa yksityiskohtaisemmin. Monitoroinnilla saavutettava mahdollinen hyöty ja vaikutus kasvaa kategorioita ylöspäin mentäessä mutta samaan aikaan päämäärän saavuttamisen vaikeus nousee. (Webb et al. 2015, s. 5)

Taulukko 5. Monitoroinnin päämäärien luokittelu (mukaillen Webb et al. 2015, s. 5)

Luokka	Kuvaus
1	Poikkeavuuden havaitseminen
2	Anturin käyttöönottotutkimukset
3	Rakennemallin validointi
4	Hälytysrajojen seuraaminen
5	Vaurion havaitseminen

Poikkeavuuden havaitseminen (engl. anomaly detection) on tavanomainen luokka siltojen monitorointitutkimuksissa. Kaikki monitorointijärjestelmät, jotka pyrkivät havaitsemaan muutoksia mitattavassa suuressa, voidaan luokitella tähän kategoriaan. Muutokset mitatussa suuressa voivat johtua kuormituksen muuttumisesta, muutoksista mittausjärjestelmässä tai itse rakenteesta. Poikkeavuuksien havaitseminen voi auttaa jatkotutkimusten tai kunnossapitotöiden priorisoinnissa. (Webb et al. 2015, s. 5)

Luokka 2, eli anturin käyttöönottotutkimukset (engl. sensor deployment studies), kuvaa tutkimuksia, joiden pääasiallinen tarkoitus on vain esitellä uusia antureita ja anturiteknologiaa eikä välttämättä tuottaa konkreettista rakenteen kuntoon liittyvää informaatiota. Kategorialle on tyypillistä, että monitorointijärjestelmä ja antureiden toiminta kuvataan tarkasti mutta monitorointijärjestelmän tarkoitus tai tieto siitä, mitä monitoroinnilla saavutetaan jää epäselväksi. Monet kirjallisuudesta löytyvät monitorointiprojektit kuuluvat tähän ryhmään. (Webb et al. 2015, s. 5)

Kolmas luokka, eli rakennemallin validointi (engl. model validation), on ensimmäinen kategoria, jossa kerättyä dataa hyödynnetään suoraan rakenteen kunnan arvioinnissa. Monitoroinnilla saatua dataa vertaillaan rakenteesta tehtyyn rakennemalliin, jonka

pohjalta rakennemallia voidaan tarkentaa ja täten ennustaa rakenteen käyttäytymistä. (Webb et al. 2015, s. 5)

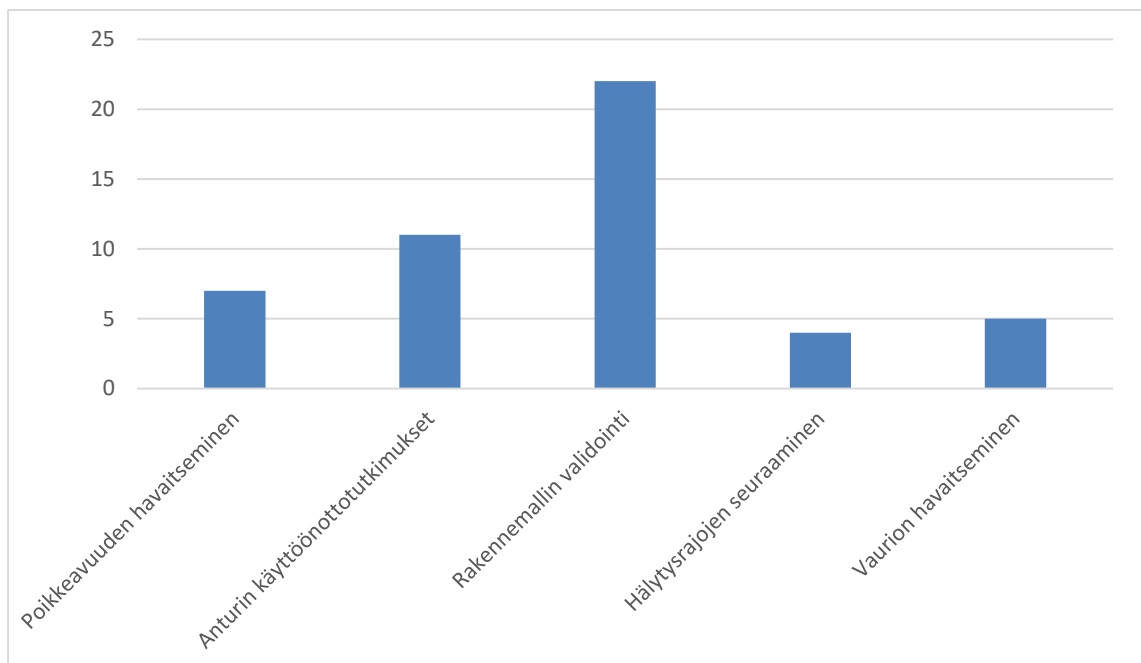
Luokka 4 eli hälytysrajojen seuraaminen (engl. threshold check) on yksinkertainen tapa tulkita mitattua dataa ja havaita mikäli rakenteessa on jokin ongelma, joka vaatii tarkempaa tarkastelua. Hälytysraja on mitattavalle suurelle, kuten esimerkiksi siirtymälle tai venymällä asetettu raja-arvo, jonka ylittäminen johtaa hälytykseen tai ilmoitukseen sillan omistajalle. Raja-arvon määrittäminen voi perustua suunnittelijan tekemään sillan rakenteen toimintaa ennakoivaan rakennemalliin. Webb et al. (2015, s. 6) mukaan hälytysrajojen määrittämisessä tulee käyttää erityistä huolellisuutta, että vältetään vääriltä hälytyksiltä. (Webb et al. 2015, s. 6)

Luokka 5, eli vaurion havaitseminen (eng. damage detection), pyrkii nimensä mukaisesti havaitsemaan rakenteessa olevan vaurion. Vaurion havaitsemiseen perustuva monitorointi pyrkii tunnistamaan jonkun tai kaikki seuraavista vaurion piirteistä: tyyppi, sijainti, laajuus ja laatu. Globaali vaurion havaitseminen tähtää informaation tuottamiseen rakenteesta ilman, että suunnittelijalla on etukäteen tietoa tai arvioita missä mahdollinen vaurio tulee esiintymään. Webb et al. (2015, s. 6) mukaan suurin osa tämäntyyppisistä kirjallisuudessa esiintyvistä monitorointijärjestelmistä perustuu rakenteen värähtelyiden pohjalta tehtäviin ominaisarvoanalyysihin. Rakenteen ominaisarvojen muutoksia analysoimalla on toivottu, että minkä tahansa vaurion sijainti ja laatu voidaan selvittää. Värähtelyanalyysin suosiosta huolimatta Brownjohn et al. (2011) esittää tutkimuksessaan, että rakenteen värähtelyyn perustuvat monitorointimenetelmät eivät sovellu rakenteessa ilmenevän vaurion havaitsemiseen, vaikka voivat tarjota muilta osin hyödyllistä tietoa rakenteen käyttäytymisestä.

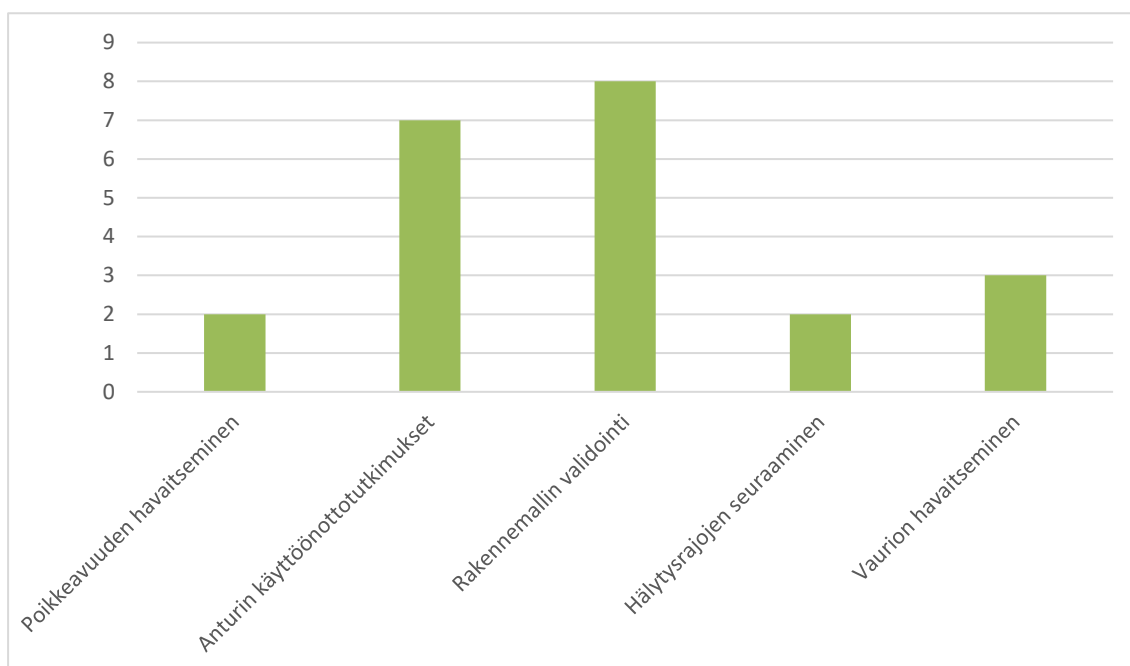
Globaalia vaurion havaitsemista toteuttamiskelpoisempi keino on kohdentaa mahdollinen vaurio tai rakenteen heikkeneminen etukäteen. Tällaisessa tapauksessa monitorointijärjestelmän suunnittelija arvioi millainen vaurio rakenteeseen saattaa syntyä ja millaisia vaikutuksia vauriolla on rakenteen toimintaan. Tämä auttaa niiden mitattavien parametrien tunnistamisessa, joissa todennäköisesti tullaan havaitsemaan vauriosta johtuvia muutoksia. Edellä mainitun kaltaisen vaurion tunnistamisen onnistuminen on hyvin riippuvainen suunnittelijan tiedoista ja kokemuksesta kyseisen rakenteen toimintaan liittyen.

Webb et al. (2015) on tutkimuksessaan luokitellut 30 kirjallisuudesta löytyvää monitorointiprojektia edellä esitellyn luokittelun mukaan (Taulukko 5). Tutkimukseen on valittu siltojen monitorointiprojekteja eri puolilta maailmaa viimeisen parinkymmenen vuoden ajalta vanhimpien monitorointien ollessa 1990-luvun lopulta. Projekteissa on käytetty erilaisia monitorointiteknologioita ja monitoroinnit ovat kestoiltaan sekä lyhyt- että pitkäaikaisia. Monitoroidut sillat on luokiteltu monitoroinnin päämäärään mukaan siten, että jotkut projektit voivat kuulua useampaan kategoriaan.

Kuvasta 12 voidaan todeta, että vain harvat siltojen monitorointitutkimukset tähtäävät suoraan vaurion havaitsemiseen. Suurin osa tutkimuksista pyrkii vain siltarakenteesta tehdyn rakennemallin validoimiseen, jolla saadaan varmistus, että rakennemalli toimii oikean rakenteen tavoin. Kuvassa 13 on eriteltynä Webb et al. (2015) tutkimasta 30 monitorointiprojektista projektit, joissa oli kyse jatkuvasta tai pitkäaikaisesta monitoroinnista. Pitkäaikaiseksi monitoroinniksi on tässä tapauksessa luokiteltu tutkimukset, joissa monitorointi kesti vähintään muutaman kuukauden ajan. Kuvan 13 jakauma on hyvin samankaltainen kuvan 12 kanssa. Tästä voidaan päätellä, ettei monitorointiajalla ollut juurikaan merkitystä monitoroinnin päämäärää ja tarkoitusta tarkastellessa.



Kuva 12. Kirjallisuudessa esiintyneen 30 sillan monitorointiprojektin luokittelu monitoroinnin päämäärän mukaan (mukaillen Webb et al. 2015, s. 11).



Kuva 13. Kirjallisuudessa esiintyneen 13 jatkuvan tai pitkäaikaisen monitorointiprojektin luokittelu monitoroinnin päämäärän mukaan (mukaillen Webb et al. 2015, s. 11).

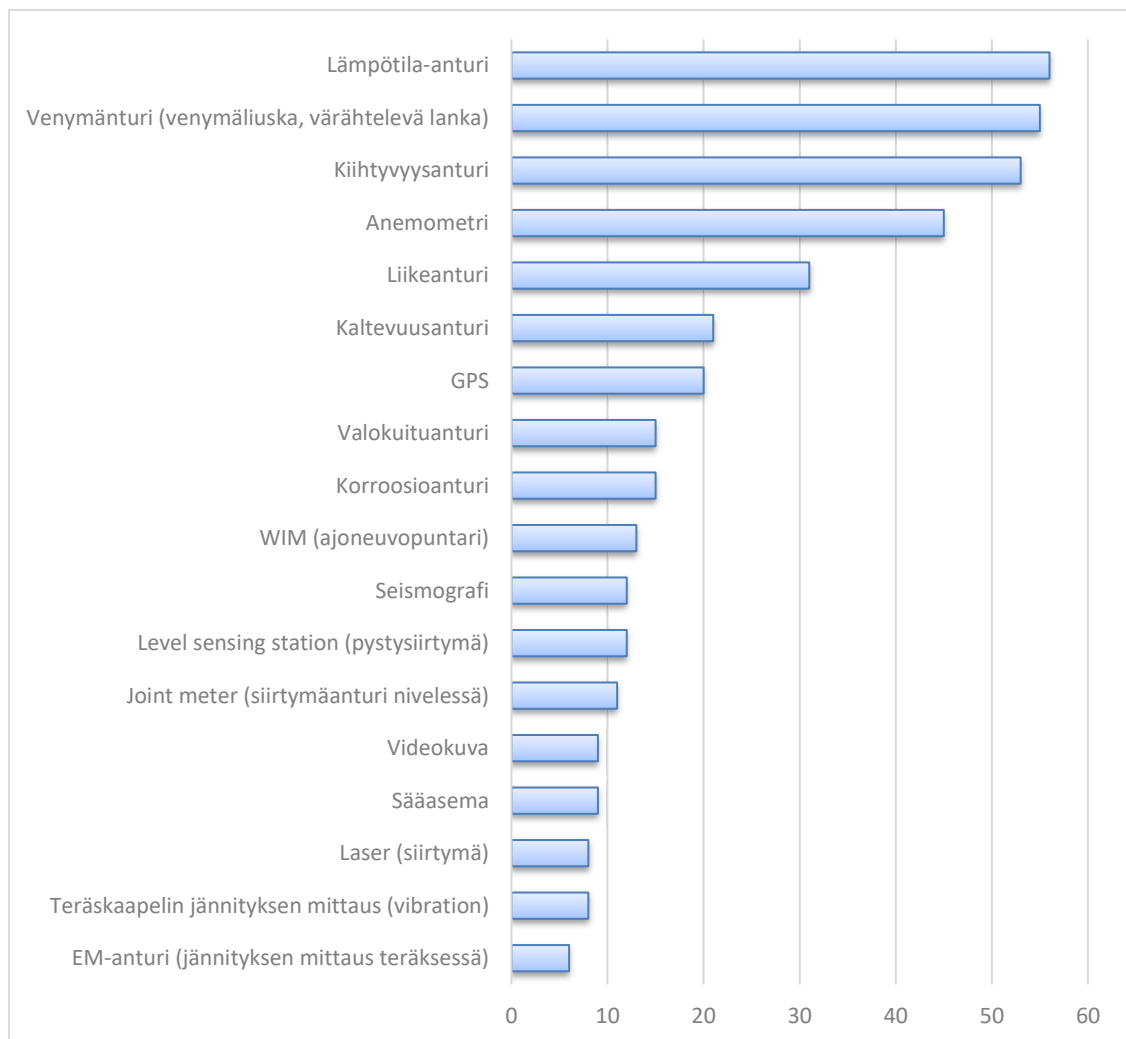
4.3 Yleisimmät monitorointiprojekteissa käytetyt anturityypit

Siltojen monitoroinnissa on sovellettu vuosikymmenien aikana useita erilaisia mittaustekniikoita ja -antureita. Käytetyimpien mittausten menetelmien selvittämiseksi hyödynnetään Xu & Xia (2012) ja Rizzo & Enshaeian (2021b) tekemiä tutkimuksia. Tutkimuksille on yhteistä, että niissä on kerätty tietoa kirjallisuudesta löytyvistä siltojen monitorointiprojekteista ja niissä käytetyistä mittalaitteista. Kuvien 14 ja 15 kuvaajat on koostettu edellä mainittujen tutkimusten pohjalta. Kuvaajissa esitetään jakauma tutkimuksiin valittujen monitorointikohteiden anturityypeistä ja mitattavista suureista. Monitorointikohteissa on voitu käyttää yhtä tai useampaa kuvaajissa esitetyistä menetelmistä. Kuvaajissa on jätetty huomioimatta mittausten menetelmät, jotka esiintyivät tutkimuksissa vain yksittäisten siltojen kohdalla. Kuvaajissa on eritelty myös eri mittaustekniikoita, jolloin on syytä huomioda, että esimerkiksi valokuituanturia voidaan käyttää useamman eri mittaussuureen mittaamiseen. Kuvaajien tarkoituksena on saada käsitys yleisimmistä anturityypeistä ja mittaussuureista.

Xu & Xia (2012) ovat julkaisussaan taulukoineet 63 eri puolilla maailmaa sijaitsevaa pitkäjänteistä siltaa, joita on ennen vuotta 2011 monitoroitu jatkuvana tai pitkäaikaisena monitorointina. Sillat ovat siltatyyppiltään pääosin vinoköysisiltoja (16 kpl) tai riippusiltoja (32 kpl), mutta mukana on myös joitain kaari-, teräsristikko- ja

kotelopalkkisilloja. Silloista suurin osa sijaitsee Aasian mantereella ja lähes puolet (27 kpl) sijaitsee Kiinassa. Alla oleva kuvaaja (Kuva 14) esittää jakauman monitorointiprojekteissa käytetyistä mittausmenetelmistä ja anturityypeistä pohjautuen Xu & Xia (2012) tekemään tutkimukseen.

Jakauman perusteella huomataan, että kolme eniten esiintyvää anturityyppiä ovat lämpötila-anturi, venymäanturi (strain gauge, vibration wire strain gauge) ja kiihtyvyyssanturi. Edellä mainitut anturityypit esiintyvät lähes kaikissa 63:sta sillasta. Suuressa osassa silloista on myös panostettu ympäristön aiheuttamien riskitekijöiden kuten tuulen ja maanjäristysten monitorointiin. Jakaumasta voidaan myös todeta, että valokuitutekniikan käyttö on ollut vielä vähäistä. Tämä voi selittyä sillä, että optista anturitekniikkaa on alettu hyödyntämään siltöjen monitoroinnissa erityisesti viimeisen vuosikymmenen aikana eikä tutkimuksessa ole mukana vuoden 2011 jälkeen aloitettuja monitorointiprojekteja.

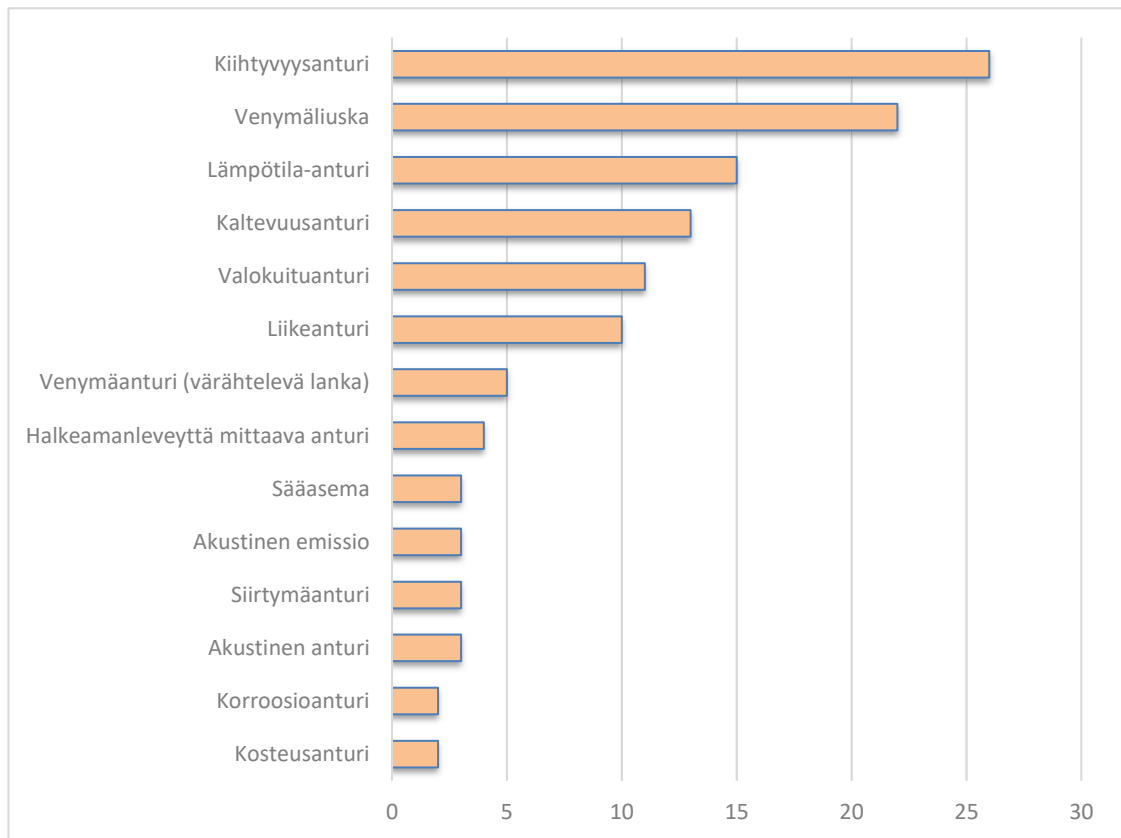


Kuva 14. 63:n jatkuvasti monitoroidun sillan anturityyppien jakauma.

Rizzo & Enshaeian (2021b) tekemässä tutkimuksessa esitellään USA:ssa sijaitsevia siltojen monitorointikohteita 2000-luvun alusta tähän päivään asti. Tutkimuksessa on mukana siltatyypiltään erilaisia siltoja, joiden monitorointiajat vaihtelevat kertamonitoroinnista jatkuvaan monitorointiin. Enemmistö silloista on ollut alle 30 vuotta vanhoja monitoroinnin alkaessa (Rizzo & Enshaeian 2021b, s. 40). Tutkimuksessa esitellään Xu & Xia (2012) julkaisun tapaan siltojen monitorointiprojekteja ja niissä käytettyjä mittalaitteita. Kuva 15 on koostettu samalla periaatteella kuin kuva 14 eli siinä esitellään 53:n USA:ssa sijaitsevan monitoroidun sillan anturityyppien jakauma. Jakaumassa ei huomioida muutamaa siltaa, jotka esiintyvät jo Xu & Xia (2012) tutkimuksen pohjalta tehdyssä kuvaajassa.

Rizzo & Enshaeian (2021b, s. 41) mukaan suurin osa tutkimuksessa mukana olevista silloista sisälsi ainakin kolme eri anturityyppiä: yksi mittamaan ympäristön olosuhteita (lämpötila, sää), toinen mittaamaan rakenteen staattista toimintaa (venymäliuska) ja kolmas keräämään tietoa rakenteen dynaamisesta käyttäytymisestä (kiihtyvyyssanturi). Tutkimuksen perusteella valokuitutekniikan suosio siltojen monitoroinnissa on lisääntynyt viime vuosina, kun taas vanhemmissa projekteissa on käytetty perinteisiä venymäantureita kuten venymäliuskoja. Optisten antureiden ohella langattomien antureiden käyttö on kerännyt suosiota viime vuosina. Langattomien antureiden kohdalla on kuitenkin vielä teknisiä haasteita, jotka hidastavat langattoman monitoroinnin laajamittaista käyttöönottoa. (Rizzo & Enshaeian 2021b, s. 4)

Vertaamalla kuvia 14 ja 15 keskenään voidaan todeta, että kolme yleisintä anturityyppiä (venymäanturi, lämpötila-anturi, kiihtyvyyssanturi) ovat molemmissa samat eli näin ollen siltatyypillä tai monitorointiajalla ei ole tähän vaikutusta. Selkeitä eroja kuvaajissa on ympäristön aiheuttamien tekijöiden kuten tuulen ja maanjäristysten mittaamisen puuttuminen kuvasta 15. Osasyynä tälle voi olla kuvan 14 siltojen sijainti pääosin Aasiassa alueilla, jotka ovat herkkiä maanjäristyksillä ja ankarille myrskytuulille. Lisäksi kuvan 14 sillat ovat kaikki pitkäjänteisiä ja massiivisia siltoja, jolloin myrskytuulien aiheuttamat tuulikuormat ovat siltarakenteille suurempia.



Kuva 15. 53:n USA:ssa sijaitsevan monitoroidun sillan anturityyppien jakauma.

4.4 Jatkuvasti tai pitkäaikaisesti monitoroidut sillat

Tässä osiossa esitellään jatkuvasti tai pitkäaikaisesti monitoroituja siltakohteita Suomesta ja maailmalta. Esimerkkisillat on valittu siten, että ne edustavat siltatyypiltään, rakennusmateriaaliltaan ja monitorointitavaltaan erilaisia siltoja, jolloin saadaan laajempi kuva monitoroinnin hyödyntämismahdollisuuksista. Esimerkkikohteissa on siltoja, joihin monitorointijärjestelmä on asennettu jo sillan rakennusvaiheessa sekä vanhoja siltoja, joissa monitorointi on otettu käyttöön vasta sillan myöhemmällä käyttöiällä. Esimerkkikohteiksi on valittu mahdollisimman uusia siltoja sekä monitorointiprojekteja, havainnollistamaan nykypäivänä käytettyjä monitorointitapoja ja -tekniikoita.

Monitoroiduista siltakohteista kerrotaan aluksi perustietoa kuten siltatyyppi, sijainti ja sillan mittoja sekä taustoitetaan syitä monitoroinnin aloittamiselle. Tämän jälkeen esitellään sillassa käytössä oleva monitorointijärjestelmä ja siihen kuuluvat anturit. Lopuksi esitellään mitä hyötyjä sillan monitoroinnilla on saavutettu tai millaisia havaintoja monitoroinnin pohjalta on voitu tehdä.

4.4.1 I-35W Saint Anthony Falls Bridge

I-35HW St. Anthony Falls Bridge on Minnesotassa sijaitseva 371 metriä pitkä neliaukkoinen jälkijännitetty teräsbetoninen kotelopalkkisilta, joka avautui liikenteelle vuonna 2008 (Kuva 16). Silta rakennettiin edellisen sillan tilalle sen romahdettua äkillisesti vuonna 2007. Uusi silta koostuu kahdesta erillisestä vierekkäin rakennetusta siltarakenteesta, joiden pisin jänne on Mississipin ylittävä keskijänne, pituudeltaan 154 metriä. Uutta siltaa on monitoroitu jatkuvana monitorointina sen rakentamispäivästä alkaen. (Linderman et al. 2020, s. 1–2)



Kuva 16. I-35W Saint Anthony Falls Bridge (SEWilco 2008).

Minnesotan liikenneministeriö päätti edellisen sillan romahdettua varustaa uuden sillan mittavalla monitorointilaitteistolla. Sillan oli tarkoitus toimia testikohteena siltojen monitoroinnin tutkimiselle ja eri monitorointitapojen tehokkuuden arvioimiselle. Tämän tavoitteen saavuttamiseksi silta varustettiin yli 500 anturilla, joilla seurataan jatkuvasti sillan rakenteellista käyttäytymistä. Antureina käytettiin värähtelevään lankaan perustuvia venymäantureita, valokuituantureita, venymäliuskoja, lineaarisia liikeantureita, kiihtyvyyssantureita sekä betoniteräksen korroosiota ja lämpötilaa mittaavia antureita. Anturit jaoteltiin neljään eri mittausjärjestelmään datan hankintatavan perusteella: staattinen-, dynaaminen-, valokuitu- sekä korroosiota mittaava järjestelmä. Staattiseen systeemiin kuuluivat pääosin betonirakenteen sisään asennetut venymäanturit ja lämpötilaa mittaavat termistorit. Korkeamman datamäärän dynaamista mittausta suorittivat venymäliuskat ja liikeanturit sekä päällysrakenteeseen asennetut kiihtyvyyssanturit. Neljän metrin pituiset valokuituanturit toimivat omana järjestelmänään

staatillisella mittauksella ja ne kiinnitettiin betonin ulkopintoihin (Linderman et al. 2020, s. 9). Korroosiota mittaavat anturit asennettiin sillan kannen betoniteräksiin. (Linderman et al. 2020, s. 3)

Siltaa on monitoroitu tauotta sen rakentamisesta lähtien. Linderman et al. (2020) on tutkimusraportissaan tehnyt yhteenvedon sillan monitoroinnin tuloksista kymmenen ensimmäisen monitorointivuoden ajalta. Monitorointilaitteiston osalta Linderman et al. (2020, s. 11) raportoi, että 90 % antureista ja mittalaitteista oli toiminnassa vielä kymmenen vuoden käytön jälkeen. Tätä voi pitää merkittävänä lukuna, kun huomioidaan pitkä monitorointiaika ja erilaisten antureiden suuri määrä. Siltaan asennetuista antureista betoniterästen korroosiota mittaavaa järjestelmää ei saatu missään vaiheessa toimimaan kunnolla eikä siten betoniterästen korroosiosta saatu tietoa. Myöskään sillan pilareihin kiinnitetyt venymäliuskat eivät toimineet toivotulla tavalla, joten niiden mittaaminen päätettiin lopettaa. (Linderman et al. 2020, s. 7,11)

Saatujen mittaustulosten osalta Linderman et al. (2020, s. 78) mainitsee, että pitkäaikaisessa monitoroinnissa lämpötilan mittaus termometrillä ja siirtymän mittaus liikeanturilla tuottivat hyödyllisintä tietoa betonirakenteen ajasta riippuvien muodonmuutosten eli betonin viruman ja kutistuman vaikutuksista. Venymien osalta tavallisten venymäantureiden ja valokuituanturien mittaustuloksia vertailtiin yli kymmenen vuoden ajan. Tarkoituksena oli kiinnittää huomiota antureiden herkkyyteen lämpötilamuutoksista sekä betonin virumasta ja kutistumasta johtuviin venymiin liittyen. Tutkimuksessa havaittiin, että värähtelevään lankaan perustuviin venymäantureihin verrattuna valokuituanturit tuottivat suuremman virheen. Virheen syyksi löytyi se, että lämpötilamittaus ei tapahtunut suoraan valokuituanturissa, jolloin lämpötila ei täysin vastannut anturin kohdalla olevan betonin lämpötilaa. Tämä johti virheeseen lämpötilakompensaatiota laskettaessa. (Linderman et al. 2020, s. 78)

Venymien luotettava ja tehokas lämpötilakompensointi on tärkeää myös siksi, että viruman ja kutistuman aiheuttamien vaikutuksien hidastuessa lämpötilakäyttäytyminen alkaa enenevässä määrin hallita rakenteessa tapahtuvia muutoksia. Linderman et al. (2020, s. 79) mainitseekin raportissaan, että lämpötilamuutosten aiheuttaman kuormituksen ja vasteen ymmärtäminen on ensiarvoisen tärkeää, kun halutaan saada käsitys rakenteen käyttäytymisestä.

4.4.2 Humber Bridge

Englannissa sijaitseva Humber Bridge on yli 2000 metriä pitkä riippusilta (Kuva 17). Silta otettiin käyttöön vuonna 1981 ja se oli avautuessaan maailman pisimmän pääjanteen omaava riippusilta (ITV 2012). Siltaan on asennettu monitorointijärjestelmiä ja sitä on monitoroitu vuosien aikana useiden tutkijoiden toimesta. Vuonna 2007 sillan pääkaapeleiden ankkurointialueelle asennettiin langaton monitorointijärjestelmä mittaamaan parametreja, jotka voivat vaikuttaa kaapeleiden kuntoon ja kestoikään. Projektin tarkoituksena oli myös tutustua langattomien anturiverkkojen toimintaan ja potentiaaliin siltojen monitoroinnissa. Monitoroinnin oli alun perin tarkoitus kestää vain kuuden kuukauden ajan mutta monitorointia jatkettiin ja järjestelmä on edelleen käytössä. (Fidler et al. 2021, s. 1779)



Kuva 17. Humber Bridge (43 Click North 2020).

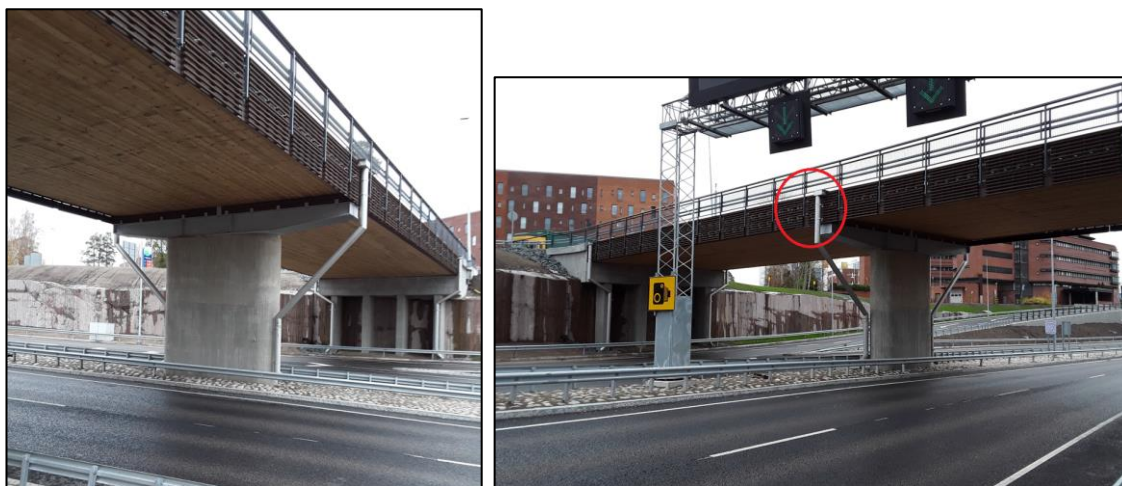
Humber Bridgen langaton monitorointijärjestelmä sisältää lämpötila-antureita sekä suhteellista kosteutta mittaavia anturia, jotka on sijoitettu pääkaapelin ankkurialueen läheisyyteen. Anturit on ohjelmoitu lähettämään mittausdataa kolmen minuutin välein. Lisäksi mittausyksiköt lähettävät 20 minuutin välein tiedon niiden virtalähteen varauksen tasosta sekä onnistuneesti lähetettyjen datapakettien määrästä. Järjestelmä on ollut

käytössä ja laitteisto pysynyt pääosin muuttumattomana vuodesta 2007 asti. Järjestelmän tietoliikenteeseen on tehty joitain muutoksia kuten uusittu yhdyskäytävä (engl. gateway) sekä vaihdettu vanhentunut ADSL-yhteys Ethernet-yhteyteen vuonna 2013. Langattomat anturien mittaussyksiköt ovat alkuperäisiä, ja niihin on tehty vain tarvittavat paristojen vaihdot monitoroinnin aikana. (Fidler et al. 2021, s. 1780–1781)

Monitorointilaitteiston asentamista seuranneina kuukausina havaittiin paljon antureiden sijainteihin liittyviä yhteysongelmia. Kun yhteysongelmat saatiin korjattua, on kosteus- ja lämpötiladataa ollut tasaisesti saatavilla. Vuonna 2013 langattomaan yhteyteen tehtyjen päivitysten jälkeen järjestelmällä on saavutettu tasaisesti lähes 90 % käyttöaste lähetettyjen datapakettien lukumäärällä mitattuna. Suhteellista kosteutta mittaamalla on pystytty tarkkailemaan ankkurialueella toimivien kosteudenpoistajien toimintaa sekä hälytysrajojen ylittymistä, ja täten ehkäisemään sillan pääkaapeleiden korroosioriskiä. Fidler et al. (2021, s. 1785) on tehnyt Humber Bridgen langattoman monitorointiprojektin pohjalta seuraavia havaintoja: (1) Paristojen vaihto keskimäärin vuoden välein on välttämätöntä monitorointijärjestelmän toimivuuden kannalta, (2) Monitorointijärjestelmä on hyvin joustava järjestelmään tehtäville muutoksilla vaikuttamatta kuitenkaan sen toimintaan ja (3) Anturien ja antennien oikean paikan valinta ja sijoittelu on erityisen tärkeää. (Fidler et al. 2021, s. 1782)

4.4.3 Tapiolantien puusilta

Siltojen monitorointi ei rajoitu ainoastaan materiaaliltaan betonisiin ja teräksisiin siltoihin. Tapiolantien risteysilta on puukantinen silta, jota on monitoroitu pitkäaikaisella mittausjärjestelmällä VTT:n toimesta vuodesta 2019 alkaen. Tapiolantien puusilta sijaitsee Espoossa ja on siltatyypiltään poikittain jännitetty liimapuulaattasilta (Kuva 18). Silta ei ole täysin puinen, sillä yksi sillan kolmesta jänteestä on teräsbetoninen ja kaksi muuta jännettä (13,5 m + 22,5 m) koostuvat liimapuulaatasta. (Puuinfo 2021)



Kuva 18. Tapiolantien puusilta, jossa korostettuna mittauspisteiden sijainti (mukailen Taitorakennerekisteri 2019a).

Siltaan on asennettu pitkäaikaismittausjärjestelmä, jolla mitataan kahden poikittaisen vetotangon esikivistysvoiman muutosta, kannen suhteellisia siirtymiä kahdesta mittauspisteestä sekä puulaatan lämpötilaa ja kosteutta viidestä eri mittauspisteestä. Vetotankojen esikivistysvoiman muutosta mitataan kahden voima-anturin avulla ja kannen siirtymää pysty- ja vaakasuunnassa kahden lineaaripotentiometrin avulla. Kosteuden ja lämpötilan mittaus on integroitu samaan anturiin ja anturit on porattu sillan puukanteen eri syvyyksille. Antureiden mittauspiste sijaitsee kannen eteläreunalla kolmannen tuen kohdalla (Kuva 18). Mittauskohdan valintaan on vaikuttanut antureiden kiinnittämisen helppouden lisäksi se, että kyseisen kohta on parhaiten suojassa auringon paisteelta. (Puuinfo 2021)

Tapiolantien puusillan monitoroinnin tuloksia tarkasteltaessa havaittiin lämpötilanmuutoksesta johtuva puulaatan pituussuuntainen kutistuminen kylmien talvikuukausien aikana. Vetotankojen suhteellisten kiristysvoimien todettiin myös ajan kuluessa pienenevän. Tapiolantien puusillan mittaustuloksia on hyödynnetty kansainvälisessä Click Design – projektissa vuosina 2019–2022. (Puuinfo 2021)

Click Design oli monikansallinen projekti, jonka rahoittajana Suomessa toimi ympäristöministeriö ja yhteistyökumppanina VTT, Väylävirasto, Puutuoteteollisuus ja Stora Enso. Projektin pääaiheena oli puurakentamisen digitalisaatio. Hankkeessa luotiin työkalu, jota arkkitehdit, suunnittelijat, tutkijat ja insinöörit voivat hyödyntää puurakenteiden vaurioiden ja riskitekijöiden havaitsemisessa ja ennustamisessa. Suurinta riskitekijää eli kosteuden vaikutusta tutkittiin ja simuloitiin numeeristen rakennemallien avulla. Rakennemalleja verrattiin ympäri Eurooppaa tehtyjen Case-tutkimusten tuloksiin,

joihin esimerkiksi Tapiolantien puusillan monitorointi kuuluu. Tapiolantien puusillan kosteuden ja lämpötilan mittaustulosten todettiin vastaavan hyvin numeeristen rakennemallien tuloksia. Click Design -projektin loputtua Tapiolantien puusillan monitorointi on jatkunut ja sen tuloksista toivotaan olevan hyötyä myös tulevissa hankkeissa. (Puuinfo 2021)

4.4.4 Kirjalansalmen riippusilta

Kirjalansalmen silta on ollut osana työn alkupuolella mainittua suomalaista SIMO-projektia, jossa tutkittiin siltojen monitorointia. Kirjalansalmen silta on Kaarinan ja Paraisten välillä oleva teräksinen riippusilta, joka on valmistunut vuonna 1963 (Kuva 19). Kirjalansalmen silta on Suomen pisin riippusilta, sen pääjännevälin ollessa 220 metriä ja sillan kokonaispituuden 287 metriä. Siltaa on jouduttu vuosien kuluessa kunnostamaan useaan otteeseen, eikä sitä ole alun perin suunniteltu nykyisen ajoneuvoasetuksen sallimille raskaammille ajoneuvopainoille ja kasvaneille liikennemäärille. (Tieyhdistys 2009, s. 7)



Kuva 19. Kirjalansalmen riippusilta (mukaiillen Taitorakennerekisteri 2019b).

Kirjalansalmen siltaan asennettiin keväällä 2007 jatkuva monitorointijärjestelmä sen pitkäaikaisen kunnan ja toiminnan seuraamiseksi sekä rakennemallien kehittämiseksi. Monitorointijärjestelmä sisälsi venymäliuskoja sekä lämpötila-, liike- ja kiihtyvyyssantureita (Hakola et al. 2008, s. 10). Lisäksi monitorointilaitteistoon kuului sillan läheisyyteen asennettu sääasema, liikennekamera sekä tien päällysteen alle asennettu tunnistin ajoneuvojen luokitteluun ja nopeuksien seuraamiseksi. Monitoroinnin yhteydessä testattiin myös langattomia antureita (Hakola et al. 2008, s.

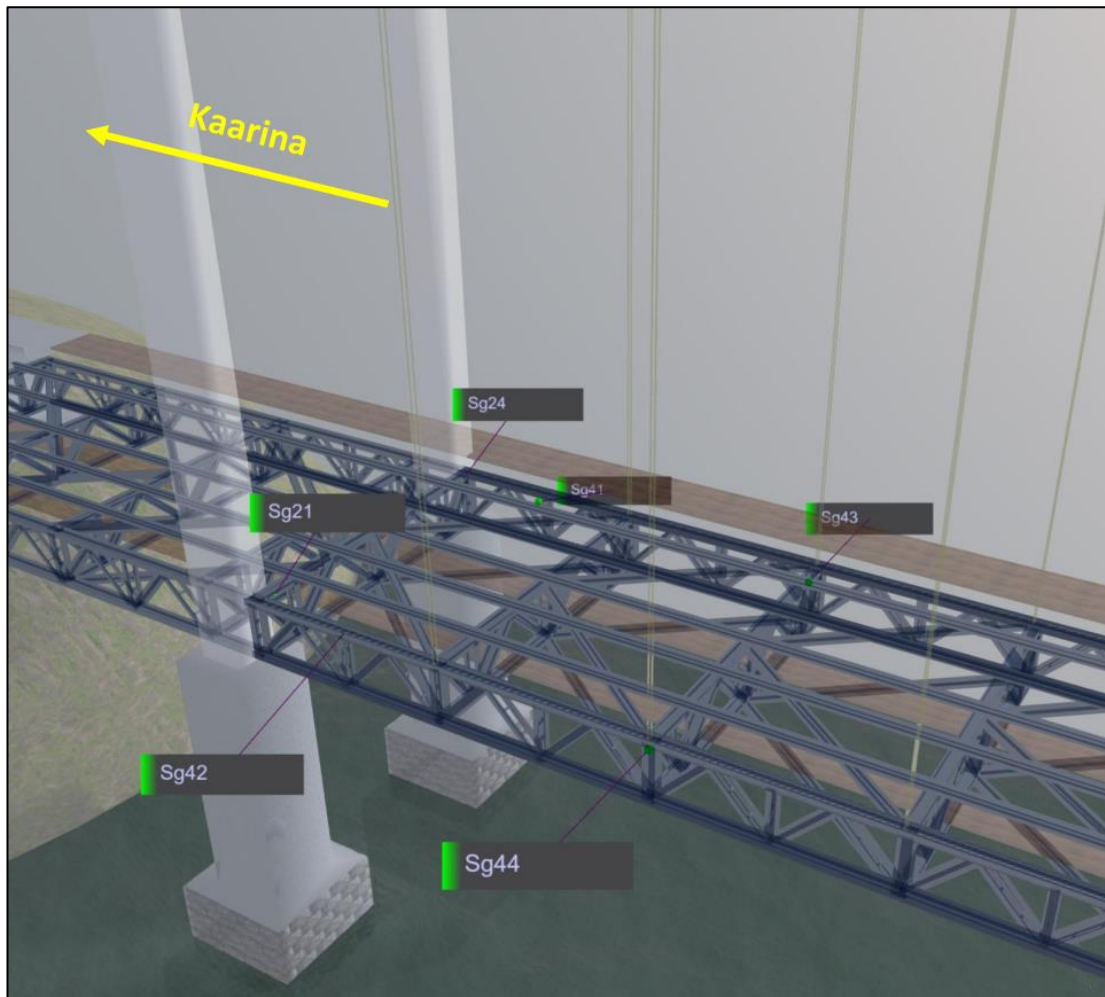
11). Mittausantureilla mitataan muun muassa sillan teräsristikoiden jännityksiä, sillan taipumia, betonikannen liikkeitä sekä sillan värähtelyitä. (Tieyhdistys 2009, s. 7)



Kuva 20. Lineaarinen liikeanturi mittaamassa Kirjalansalmen sillan kannen ja poikkiristikon välistä liikettä (Tieyhdistys 2009, s. 7).

Ennen monitoroinnin aloittamista mittalaitteet kalibroitiin ja sillan kantavuutta kokeiltiin koekuormitusten avulla, joissa käytettiin raskaita yhdistelmäajoneuvoja. Tämän jälkeen Kirjalansalmen siltaa on monitoroitu jatkuvasti ja mittaustuloksia on kerätty tietokantaan analysoimista varten. Monitorointia on voitu hyödyntää sillan kunnan ja rakenteen käyttäytymisen seurannassa. Lisäksi osalle antureista oli asetettu hälytysrajoja, joiden avulla selkeästi poikkeavat arvot mittaustuloksissa voitiin havaita automaattisesti. (Tieyhdistys 2009, s. 7–8)

Kirjalansalmen sillan monitorointijärjestelmää ja siihen kuuluvia mittalaitteita on päivitetty ja uusittu vuosien aikana. Nykyään sillassa on kiinni Savcor Oy:n mittalaitteet. Nykyinen monitorointijärjestelmä koostuu 23 venymäanturista, joista suurin osa sijaitsee sillan jäykistys- ja poikkiristikoissa. Kuvassa 21 näkyy osa sillasta tehtyä 3D-tietomallia, johon on merkattu venymäantureiden sijainteja. Venymäantureista neljä kappaletta on kiinnitetty sillan riipputankoihin. Järjestelmään kuuluu lisäksi kahdeksan kiihtyvyyssanturia sekä yksi siirtymäanturi, joka mittaa sekä pysty- että vaakasiirtymää. Ympäristöolosuhteiden mittaamiseen sillassa käytetään kahta lämpötila-anturia sekä sääasemaa, joka mittaa tuulennopeutta ja -suuntaa, ilmankosteutta sekä sateen määrää. (Savcor 2022)



Kuva 21. Kuuden venymäanturin sijainnit Kirjalansalmen sillasta tehdyssä tietomallissa (Savcor 2022).

Nykyisellään Kirjalansalmen riippusilta alkaa olla elinkaarensa lopussa. Sillan erittäin huonon kunnan takia sillalle on asetettu alennettu nopeusrajoitus, raskaan liikenteen etäisyysrajoitus sekä rajoitettu painavia erikoiskuljetuksia. Silta on päätetty korvata uudella yli 600 metriä pitkällä vinoköysisillalla, jonka rakentaminen on käynnistynyt vuoden 2022 lopulla ja jonka on määrä valmistua vuoden 2025 loppuun mennessä. Uuden sillan valmistumisen jälkeen vanha silta on tarkoitus purkaa. Vanha silta on kuitenkin uuden sillan valmistumiseen asti käytössä ja jatkuvan tarkkailun alla. Sillalle asennettu monitorointijärjestelmä helpottaa sillan rakenteiden kunnan seuraamista ja sillan hallittua sekä turvallista loppuun käyttämistä. (Väylävirasto 2022a)

4.4.5 Mackinac Bridge

Mackinac Bridge on Michiganin osavaltiossa USA:ssa sijaitseva riippusilta (Kuva 22), joka on Michiganin yliopiston professorin mukaan maan ensimmäinen silta, jossa käytetään edistynyttä langatonta ja itselataavaa (eng. self-powered)

monitorointitekniologiaa (Mackinac Bridge Authority 2019). Vuonna 1957 avautuneen Mackinacin sillan kokonaispituus on yli 8 kilometriä ja sen pisin jänne on noin 1100 metriä.



Kuva 22. Mackinac Bridge (Mackinac Bridge Authority 2008).

Vuonna 2016 siltaan asennettiin testattavaksi 20 langatonta PFG-anturia (Piezo-floating-gate) sillan pääjanteen poikkipalkkeihin. Antureiden asentamisen taustalla oli FHWA:n (Federal Highway Administration) rahoittama tutkimus, jonka tavoitteena oli kehittää uusi ainutlaatuinen anturityyppi terässiltojen pitkäaikaiseen väsymismurtumien monitorointiin. PFG-anturit ovat ainutlaatuisia siitä syystä, että ne eivät tarvitse toimiakseen erillistä virtalähdettä. Antureiden toiminta perustuu pietsosähköiseen ilmiöön, jossa pietsosähköiseen materiaaliin kohdistuva mekaaninen energia kuten värähtely muutetaan sähköenergiaksi. Edellä mainittuun perustuen sillalla liikkuvan liikenteen aiheuttama värähtely saa PFG-anturin aktivoitumaan ja mittaamaan haluttua suuretta. Antureiden energiaomavaraisuus ja pieni koko mahdollistavat niiden asentamisen ympäri teräsrakenteita tai betonirakenteen sisään jo sillan rakentamisvaiheessa. (Faridazar 2019)

Vuonna 2016 asennetut PFG-anturit osoittautuivat monitoroinnin aikana kestäviksi ja luotettaviksi. Michiganin yliopiston tutkijat ilmoittivat vuonna 2019 käynnistävänsä seuraavan testausvaiheen, jossa tarkoituksena on asentaa siltaan 2000 uutta mittausyksikköä. Toisen testausvaiheen tavoitteena on tutkia ison mittakaavan anturiasennusten vaatimia huolto- ja logistiikkatoimenpiteitä sekä tuottaa hyödyllistä

mittausdataa Mackinacin sillan ylläpidosta vastaaville viranomaisille. (Mackinac Bridge Authority 2019)

4.4.6 Ahvenkosken silta

Ahvenkosken silta on Pyhtäällä sijaitseva vuonna 2014 valmistunut teräksinen yksikaarinen langerpalkkisilta, jossa on teräsbetoninen kansi (Kuva 23). Langerpalkkisilta on kaarisiltatyypin, joka on toiminnaltaan ulkoisesti staattisesti määrätty ja jossa pääpalkisto ottaa vastaan kaarelta tulevan horisontaalivoiman. Langerpalkkisillalle ominainen massiivinen teräskaari on jännemitaltaan 90 metriä. Ahvenkosken silta toimii Kymijoen läntisimmän suuhaaran eli Ahvenkoskenhaaran ylityskohtana ja on kokonaispituudeltaan 143,5 metriä pitkä. Ahvenkosken siltaa monitoroitiin valokuituantureilla jatkuvana monitorointina sen rakentamisvaiheista eli vuodesta 2013 vuoteen 2021 asti. (Dimense 2014). (Taitorakennerekisteri 2022a)



Kuva 23. Ahvenkosken langerpalkkisilta (Dimense 2014).

Ahvenkosken sillan monitoroinnin tavoitteena oli selvittää vastaako teräskaarella kannatetun silta-aukon rakenneosien toiminta rakennussuunnitelmia. Tämän lisäksi tavoitteena oli seurata betonin kutistumisen ja lämpötilakuormien aiheuttamia rasituksia siltarakenteelle. Edellä mainittujen ohella monitoroinnin avulla pyrittiin valvomaan ajoneuvoliikenteen ylikuormia ja erikoiskuljetuksia. Ahvenkosken sillan monitorointi aloitettiin vuonna 2013 ja se päättyi vuonna 2021, kun siltarakenteen toiminnan todettiin vastaavan riittävän hyvin rakennelaskelmia. Jatkuvan monitoroinnin lisäksi sillalle tehtiin kaksi koekuormitusta vuosina 2014 ja 2019. (Dimense 2014)

Ahvenkosken sillan monitorointi toteutettiin valokuitutekniikkaan perustuvilla FBG-valokuituantureilla. Dimense Oy:n toimittamaan monitorointijärjestelmään kuului 23 venymäänturia, 12 lämpötila-anturia, liikennettä kuvaava kamera sekä muut tarvittavat mittalaitteet. Monitorointijärjestelmän toimintaa ja mittausdataa pystyi seuraamaan reaaliajassa Web-portaalin kautta. FBG-venymäänturit sijoiteltiin sillan eri rakenneosiin (Kuva 24). Venymääntureista 19 kappaletta kiinnitettiin sillan teräsosiin kuten pääkannattajiin, poikkipalkkeihin, vääntöristikoihin sekä kaaren vetotankoon ja puristussauvaan. Loput neljä anturia mittasivat betonikannen venymää, ja niistä kaksi asennettiin betonirakenteen sisään jo sillan rakennusvaiheessa. FBG-anturit olivat sisäisesti lämpötilakompensoituja, jolloin anturi kompensoi itse anturissa tapahtuvan lämpötilan aiheuttaman venymän. (Dimense 2014)



Kuva 24. FBG-venymäänturien asennuksia. Vasemmalla betonirakenteen sisään reunapalkkiin asennettu anturi, keskellä vetotankoon ja oikealla betonikanteen asennettu venymäänturi (Dimense 2014).

Erkkilä (2021) käsitteli diplomityössään Ahvenkosken sillan monitorointia ja vertaili vuosina 2014 ja 2019 suoritetun koekuormitusten tuloksia. Erkkilä kertoi työssään, että Ahvenkosken sillan monitorointijärjestelmä toimi pääosin kiitettävästi ja luotettavasti viiden vuoden (2014–2019) tarkastelujakson aikana. Erkkilän mukaan monitoroinnin laajuus oli hieman ylimitoitettu ja mittauksista saadun datan määrä oli huomattava sen käyttöön ja hyödyntämiseen verrattuna. (Erkkilä 2021, s. 92)

Ahvenkosken sillalle suoritettiin vuosina 2014 ja 2019 koekuormitukset, joilla pyrittiin saamaan vertailukelpoisia tuloksia siltarakenteessa mahdollisesti tapahtuneista muutoksista (Erkkilä 2021, s. 38). Sillan jännityksiä vertaillaessa todettiin, että voimien jakaantumisessa sillan rakenteessa oli tapahtunut muutoksia, mutta ne eivät kuitenkaan olleet rakenteen mitoituksen kannalta kriittisiä. Erkkilän (2021, s. 92) mukaan suurimmat muutokset olivat ilmenneet sillan tuuliristikoiden diagonaaleissa, pääpalkeissa ja kaaren kantojen kotelopalkeissa. Syynä sillan rakenteellisen toiminnan muutoksille on Erkkilän diplomityössä esitetty betonikannen normaalia halkeilua ja koekuormitusten välillä ollutta huomattavaa lämpötilaeroa.

Koekuormitusten vertailun ohella Erkkilä vertaili työssään vuoden 2019 koekuormituksen tuloksia sillasta tehdyn rakennemallin tuloksiin. Jännitysten osalta koekuormituksen ja laskennan tulosten todettiin olevan linjassa toisiinsa nähden vaikkakin laskennasta oli saatu suurempia arvoja sillan mittaustuloksiin verrattuna. Sillan mitoitus todettiin olevan varmallalla puolella sillan todelliseen rakenteelliseen toimintaan verrattuna. (Erkkilä 2021, s. 92)

4.5 Siltojen monitorointiin liittyvät kansainväliset standardit ja ohjeet

Valtiot, viranomaiset ja eri organisaatiot kirjoittavat ja julkaisevat jatkuvasti rakentamiseen liittyviä ohjeita ja standardeja. Standardit ja ohjeet pyrkivät määrittelemään miten jokin asia tulisi tehdä. Ne pyrkivät yhtenäistämään käytäntöjä ja parantamaan turvallisuutta. Moreu et al. (2018, s. 1) mukaan siltojen anturointia vaativilla säädöksillä voidaan parantaa olemassa olevien rakenteiden turvallisuutta ja pidentää siltojen jäljellä olevaa käyttöikää.

Viime vuosikymmenten aikana on kehitetty ja julkaistu useita siltojen monitorointiin liittyviä ohjeita, normeja ja standardeja. Yksi ensimmäisistä julkaisuista oli kanadalaisen tutkimuskeskus ISIS:n vuonna 2001 julkaisema monitoroinnin suunnittelukäsikirja: ”Guidelines for Structural Health Monitoring” (Mufti 2001). Ohje keskittyy pääosin siltojen monitorointiin, mutta julkaisun sisältöä voidaan hyödyntää myös muiden infrakohteiden kohdalla. Julkaisussa esitellään mitä monitorointi ja sen tavoitteet ovat sekä mitä etuja monitoroinnilla voidaan saavuttaa. Käsikirjassa kuvataan myös erilaisia monitorointimenetelmiä kuten jaksottaista ja jatkuvaa monitorointia sekä staattisia ja dynaamisia kuormituskokeita. Julkaisussa kerrotaan myös monitoroinnissa käytettävistä

mittalaitteistosta, antureista ja mitattavista suureista. Lisäksi julkaisussa esitellään useita eri siltojen monitorointihankkeita, niissä käytettyä laitteistoa sekä mittauksista saatuja tuloksia. (Mufti 2001)

ISIS:n monitoroinnin käsikirjan jälkeen on lukuisia vastaavia ohjeita julkaistu eri valtioiden ja organisaatioiden toimesta ympäri maailman. Oheiseen taulukkoon (Taulukko 6) on kerätty yhteenvetona joitain keskeisimpiä siltojen monitorointiin liittyviä ohjeita ja standardeja, jotka on jaoteltu valtion, julkaisun nimen, organisaation ja julkaisuvuoden mukaan.

Vuonna 2006 Euroopan Unioni perusti SAMCO-yhdistyksen (Structural Assessment, Monitoring and Control) vastaamaan infrastruktuurin ylläpidosta ja onnettomuuksien ehkäisystä (SAMCO 2006). SAMCO:n julkaisut ja tietokanta keskittyvät pääosin infrastruktuurin kunnossapitoon ja erityisesti siltoihin sekä muihin rakenteisiin, jotka ovat seismisen ja ympäristön aiheuttamien kuormitusten alaisia. (SAMCO 2006). SAMCO:lla on useita monitorointiin liittyviä julkaisuja, joista esimerkkinä vuonna 2006 julkaistu ”Guideline for Structural Health Monitoring”, joka on sisällöltään samansuuntainen ISIS:n monitoroinnin käsikirjan kanssa. (Rücker et al. 2006)

Myös muissa valtioissa on perustettu edellä mainitun kaltaisia yhteisöjä. Australiassa vuonna 2009 perustettu ANSHM (The Australian Network of Structural Health Monitoring) pyrkii tehostamaan monitoroinnin ja monitorointimenetelmien kehitystä, parantamaan kansallista ja kansainvälistä tutkimustyötä sekä nostamaan yleistä monitoroinnin tunnettavuutta (ANSHM 2022). ANSHM on julkaissut siltojen monitorointiin liittyviä tutkimuksia ja projekteja, joista ensimmäinen oli vuonna 2011 julkaistu kirja ”Structural Health Monitoring in Australia” (ANSHM 2022).

Vaikka siltoihin asennetaan jatkuvasti uusia monitorointijärjestelmiä ja siltojen monitorointia on tehty jo useamman vuosikymmenen ajan on Moreu et. al (2018, s. 3) mukaan monitorointijärjestelmien kehityksen ja monitorointiin liittyvien säädösten välillä selkeä katkos. Suurin osa olemassa olevista ohjeista ja standardeista pyrkii vain kuvailemaan tällä hetkellä käytössä olevaa monitorointiteknologiaa ja käsittelee monitorointia vain yleisellä tasolla, mutta ei kuitenkaan aseta tarkempia teknisiä vaatimuksia monitorointijärjestelmille (Moreu et al. 2018, s. 3). Tämän lisäksi monitoroinnin kehitys on Yhdysvalloissa sekä muissa valtioissa edelleen pääosin yksittäisten yliopistojen, organisaatioiden ja teknillisten komiteoiden vastuulla. Moreu et

al. (2018, s. 3) esittää näkemyksen, että mikäli monitorointiin ja mittauslaitteisiin liittyvä lainsäädäntö voitaisiin yhtenäistää maailmanlaajuisesti kuten muilla tekniikan osa-alueilla, voisi monitoroinnin kehitys ja säädösten määrittely olla huomattavasti tehokkaampaa.

Taulukko 6. Yhteenvedo siltojen monitorointiin liittyvistä kansainvälisistä standardeista ja ohjeista (mukailleen Gatti, M. 2019, s. 201; Zhou et al. 2020, s. 13).

Valtio	Standardin/ohjeen nimi	Organisaatio	Vuosi
Kanada	Guidelines for Structural Health Monitoring (ISIS Canada 2001)	Intelligent Sensing for Innovative Structures (ISIS)	2001
USA	Development of a Model Health Monitoring Guide for Major Bridges	Federal Highway Administration Research and Development (FHWA)	2002
EU	Guideline for Structural Health Monitoring	Structural Assessment, Monitoring and Control (SAMCO)	2006
Iso-Britannia	Structural Health Monitoring of Civil Infrastructure	Philosophical transactions of the royal society of London	2006
Venäjä	GOST R 53778 Building and Structures, Technical Inspections and Monitoring Regulations	National Standard of the Russian Federation (GOST)	2010
Australia	Structural Health Monitoring in Australia	Australian network of SHM (ANSHM)	2011
Kiina	DB/T29-208-2011 Structural Health monitoring system technical specification for bridge of Tianjin	Tianjin Municipal Government (TMG)	2011
Kiina	GB 50982-2014 Technical code for monitoring of building and bridge structures	Chinese National Standards (CNS)	2014
Kiina	JT/T 1037-2016 Technical specification of safety monitoring system for highway bridge structure	China Building Industry Standard (CBIS)	2016

	Siltojen monitorointikäsikirja		
Suomi	Siltojen monitorointiohje	Väylävirasto	2016
USA	Long-term bridge performance (LTBP) Program Protocols	Federal Highway Administration Research and Development (FHWA)	2016
Kiina	T/CECS 529 Early Warning Threshold Standard for Structural Health Monitoring System of Long-Span Bridge	China Association of Engineering and Construction Standardization (CAEC)	2018
Kiina	Technical Regulation on Sensor Selection and Placement for Bridge Health Monitoring	-	-

4.5.1 Kiinan monitorointistandardit

Edellä lyhyesti esitellyistä ja mainituista ohjeista poiketen, Kiinassa on viimeisen vuosikymmenen aikana julkaistu useampia siltojen monitorointiin velvoittavia standardeja. Taustalla on Kiinassa tapahtunut nopea infrarakentamisen kasvu, joka on ollut omiaan kiihdyttämään monitoroinnin käyttöönottoa ja kehitystä. Ensimmäinen siltojen monitorointia koskeva julkaisu Kiinassa oli vuonna 2011 Tianjin itsehallintoalueen julkaisema standardi ”Structural health monitoring system technical specification for bridge of Tianjin”, joka sisälsi ohjeita ja suosituksia siltojen monitorointiin Tianjin alueella (Yang et al. 2017, s. 2). Seuraava merkittävä askel kohti monitoroinnin standardisointia otettiin vuonna 2014, kun uusi kansallinen standardi ”Technical Code for Monitoring of Building and Bridge Structures” astui voimaan. Standardi asetti pakollisia vaatimuksia liittyen korkeiden kerrostalojen ja mastojen monitorointiin mutta ei kuitenkaan vielä sisältänyt tarkempia teknisiä vaatimuksia valtatesiltojen monitorointiin liittyen (Moreu et al. 2018, s. 3). Tämän puutteen paikkaamiseksi Kiinan Liikenneministeriö julkaisi vuonna 2016 standardin ”Technical specification of safety monitoring system for highway bridge structures”, jonka sisältöä esitellään seuraavissa kappaleissa pääpiirteittäin (Yang et al. 2017, s. 3).

Kiinan uusi siltojen monitorointia koskeva standardi pitää sisällään alakohtaisen ohjeistuksen valtatie siltojen monitorointiin. Standardi määrittelee mitä antureita monitorointiin tarvitaan, mitä niiden avulla tulee mitata ja mitä päätöksiä mittausten perusteella tulisi tehdä. Uusi standardi tarjoaa tarkat menettelytavat, joista voivat hyötyä niin suunnittelijat, urakoitsijat kuin sillan omistajat (Moreu et al. 2018, s. 9). Standardin laatijat ovat pyrkineet sisällyttämään standardiin tärkeimpiä siltojen monitorointia koskevia tietoja sekä teknisiä parametrejä, joita muut tahot voivat hyödyntää omien standardien kehittämisessä. Standardin sisältö on jaoteltu eri lukuihin, jotka käsittelevät muun muassa: terminologian määrittelyä, antureiden ominaisuuksia ja sijainteja, hälytysrajoja sekä datanhankintaa, -siirtoa, -käsittelyä ja -hallintaa. (Moreu et al. 2018, s. 5–6)

Uusi standardi asettaa suoran vaatimuksen anturoinnin asentamisesta tietyille siltatyypeille. Standardin mukaan anturit tulee asentaa oheisen taulukon (Taulukko 7) mukaisesti siltoihin. Standardin antamia vaatimuksia voidaan käyttää referenssinä ja hyödyntää myös taulukon ulkopuolelle jääville siltatyypeille. Standardi esittää myös, että rakenteen sisälle asennettavalla monitorointilaitteistolla tulisi käyttöiän olla vähintään 20 vuotta ja ulkoisilla laitteistoilla 5 vuotta. (Moreu et al. 2018, s. 6)

Taulukko 7. Siltatyypit, joita Kiinan uuden siltojen monitorointistandardin mukaan tulee monitoroida (mukaillen Moreu et al. 2018, s. 6).

Siltatyyppi	Jänneväli (metriä)
Teräsbetoninen palkkisilta	>150 m
Kaarisilta	>200 m
Vinoköysisilta	>300 m
Riippusilta	>500 m
Muu vaativa/tärkeä silta	-

Anturityypeille ja antureiden ominaisuuksille uusi standardi asettaa tietyntyyppisiä edellytyksiä. Anturityypit listataan muun muassa liikenne- tai ympäristökuormia sekä rakennetta paikallisesti ja globaalisti mittaaviin anturityyppeihin. Antureiden ominaisuuksille kuten tarkkuudelle, herkkyydelle, näytteenottotaajuudelle ja mittausalueelle määritellään myös tarkat rajat. Moreu et al. (2018, s. 6) esittelee julkaisussaan muun muassa seuraavia standardissa antureilta vaadittavia ominaisuuksia: Ajoneuvokuormia monitoroitaessa anturin mittausalueen tulee olla ≥ 200 % sillalla

sallitusta akselikuormasta. Rakenteen lämpötilaa mitattaessa lämpötila-anturin mittaustarkkuus tulee olla $\geq \pm 0.2^{\circ}\text{C}$. Rakenteen paikallisessa dynamisessa venymämittauksessa venymäliuskan mittausalueen täytyy olla kaksinkertainen arvioituun venymän maksimiarvoon verrattuna.

Antureiden ominaisuuksien ohella myös datanhankinnalle, -siirrolle, -käsittelylle ja -hallinnalle standardi asettaa sekä numeerisia että sanallisia vaatimuksia. Standardi asettaa muun muassa minimiarvot mitattavien suureiden näytteenottotaajuuksille. Esimerkiksi lämpötilaa mitattaessa näytteenottotaajuus tulee olla vähintään 1/600 Herziä ja dynamisessa venymämittauksessa minimitaajuus on 20 Herziä. Datansiirron osalta standardi edellyttää analogisen signaalin käyttöä lyhyillä etäisyyksillä, joissa ei esiinny radiotaajuushäiriötä. Pitkillä datansiirtoetäisyyksillä tai voimakkailla radiotaajuushäiriöalueilla edellytetään digitaalisen siirtosignaalin käyttöä. Kun siirtoetäisyys kasvaa useampaan kilometriin tulee standardin mukaan datansiirtoon käyttää valokuitua. (Moreu et al. 2018, s. 7)

Standardi määrittelee myös hälytysrajavaatimukset eri mittaussuureiden kohdalle. Hälytysrajat on määritelty siten, että tietynsuuruinen ylitys monitoroitavan suureen kohdalla saa aikaan ylityksen vakavuutta kuvaavan varoituksen. Esimerkiksi ajoneuvojen akselipainoja monitoroitaessa 150 % ylitys ohjearvoon verrattuna tuottaa pienemmän tason varoituksen ja kaksinkertainen ylitys vakavamman varoituksen. Standardi esittää myös, että pienemmän varoituksen suuri ilmaantuvuus voi saada aikaan vakavamman varoituksen. Esimerkiksi mikäli sillan siirtymää monitoroitaessa matalamman tason varoitus toistuu yli 10 kertaa kuukaudessa, tulee monitorointijärjestelmän laukaista vakava varoitus. (Moreu et al. 2018, s. 7)

Vuonna 2016 julkaistun ”Technical specification of safety monitoring system for highway bridge structures” jälkeen on Kiinassa julkaistu useita maakunnallisia ja alakohtaisia standardeja. Maakunnallisia eli paikallisesti voimassa olevia standardeja ja ohjeita ei ole listattu taulukkoon 6 mutta ne keskittyvät muun muassa betonirakenteisten siltojen monitorointiin sekä valokuituantureiden hyödyntämiseen siltojen monitoroinnissa. Alakohtainen standardi ”Early Warning Threshold Standard for Structural Health Monitoring System of Long-Span Bridge” julkaistiin vuonna 2018 ja se sisältää ohjeita hälytysrajojen määrittelyyn. (Zhou et al. 2020, s. 15).

Kiinassa on myös tekeillä vielä julkaisematon antureiden ja niiden sijainnin valintaan ohjaava standardi “Technical Regulation on Sensor Selection and Placement for Bridge Health Monitoring”. Zhou et al. (2020, s. 16) mukaan alakohtainen standardi on neliosainen ja tulee pitämään sisällään vaatimukset antureiden teknisille parametreille sekä ohjeita antureiden valintaan, asentamiseen ja sijoittamiseen. Standardi esittää antureiden valinnan erilaisille mitattaville suureille ja siltarakenteen eri kohtiin kuten pilareihin, palkkeihin tai perustuksiin. Zhou et al. (2020, s. 16) mukaan julkaistavan standardin perusteella antureiden oikeanlainen valinta ja asennus onnistuu myös käyttäjiltä, joilla ei ole siltojen monitorointiin liittyvää ammatillista osaamista tai kokemusta.

4.5.2 IM-SAFE-projekti

IM-SAFE on Euroopan Unionin rahoittama marraskuussa 2020 käynnistynyt kolmivuotinen projekti, jonka tavoitteena on tukea Euroopan komissiota ja CEN:ää (The European Committee for Standardization) uuden yhdenmukaisen monitorointistandardin kehittämisessä. Uudella standardisoinnilla pyritään parantamaan liikenteen turvallisuutta ja optimoimaan liikenneinfran kuten siltojen sekä tunnelien kunnossapitoa. Projektissa on mukana 10 monitieteellistä tahoja ympäri Eurooppaa, kahdeksasta eri maasta (Norja, Saksa, Hollanti, Itävalta, Italia, Puola, Sveitsi, Espanja). Osallistujien joukossa on muun muassa yliopistoja sekä muita alan yrityksiä ja tutkimuslaitoksia. (IM-SAFE 2022)

IM-SAFE hankkeen taustalla ovat pitkälti samat tekijät, jotka ovat ajaneet monitoroinnin kehitystä eteenpäin viime vuosina. Siltojen ikääntyminen, nopea liikennekuormien kasvu ja sekä luonnon että ihmisten aiheuttamat uhkat ovat liikenneinfran kohtaamia haasteita. Projektin taustalla on myös tarve yhtenäistää monitorointiin liittyviä kansallisia käytäntöjä sekä olemassa olevia ohjeita ja standardeja. (IM-SAFE 2022)

IM-SAFE visioi ajatusmallin muutosta korjaavasta ja tietyin aikavälein tehtävästä kunnossapidosta, riskejä tunnistavaan ja ennakoivaan kunnossapitoon monitoroinnin standardisoinnin avulla. Projektiin osallistuvat osapuolet pyrkivät muodostamaan kokonaisvaltaisen kuvan monitorointiin liittyvistä kehityssuunnista, käytännöistä, haasteista ja teknologian kehityksestä sekä digitaalisista ratkaisuista. Selvitystyön on tarkoitus toimia pohjana uuden monitorointistandardin valmistelussa ja kehityksessä. IM-SAFE (2021) mukaan uusi monitorointistandardi määritteli monitoroinnin päämäärät, keskeisimmät monitorointilaitteistojen vaatimukset sekä menetelmät mittausdatan

käsittelyyn ja hyödyntämiseen. Pidemmän aikavälin tavoitteena on tehdä muutoksia ja lisäyksiä olemassa oleviin eurokoodeihin monitoroinnin hyödyntämisestä infrastruktuurin turvallisuuden takaamisessa. Projektin tarkoituksena on lisäksi saavuttaa laaja sosiaalinen hyväksyntä uudelle standardisoinnille eri julkisten viranomaistahojen ja toimialojen puolesta. (IM-SAFE 2022)

4.5.3 Pohdintaa monitorointistandardeista ja niiden kansainvälisistä vaikutuksista

Täydellisen standardointijärjestelmän kehittäminen siltojen monitorointiin on vaikea tehtävä. Sillat ovat tyypiltään, kooltaan sekä käyttöolosuhteiltaan erilaisia. Näin ollen myös niiden staattinen ja dynaaminen käyttäytyminen on erilaista, jolloin mittauslaitteistoilta vaadittavat ominaisuudet voivat vaihdella huomattavasti. Zhou et al. (2020, s. 11) esittää tutkimuksessaan, että siltojen monitoroinnin standardisointia lähestyttäisiin osa-alueittain. Tämä tarkoittaisi monitoroinnin standardointia esimerkiksi siltatyypin: palkkisilta, vinoköysisilta tai kaarisilta mukaan. Lisäksi standardisointia voitaisiin tehdä monitoroinnissa käytettävien mittausteknologioiden mukaan. Aikaisemmin esiteltyt Kiinan monitorointistandardit toimivat hyvänä esimerkkinä ja osoittavat, että edellä mainitun kaltaiseen suuntaan ollaan menossa siltojen monitoroinnin standardisoinnissa.

Moreu et al. (2018, s. 10) mukaan Kiinan monitorointistandardeja voidaan hyödyntää uusia ohjeita ja standardeja kehittäessä muiden valtioiden toimesta. Standardit voivat toimia valtioille ja muille alan toimijoille ensimmäisinä siltojen monitorointiin liittyvinä referensseinä, mikäli aiempaa kokemusta tai ohjeistusta ei aihepiiriin liittyen ole. Moreu et al. (2018, s. 10) painottaa julkaisussaan, että uusia monitorointistandardeja kehittäessä tulee huomioida muun muassa väestölliset, maantieteelliset, sosioekonomiset sekä hallinnolliset erot eri valtioiden välillä.

Antureiden ja niiden ominaisuuksien valintaan ohjaavat standardit ovat hyödyllisiä, sillä niiden avulla on tulevaisuudessa mahdollista yhtenäistää käytössä olevia sekä uusia monitorointijärjestelmiä. Tarkasti määritellyt monitorointijärjestelmien vaatimukset parantavat yhteyttä tilaajien, suunnittelijoiden ja monitorointijärjestelmien toimittajien välillä. Tämän kautta riski virheellisten antureiden valinnasta ja turhan datan keräämisestä pienenee, joka johtaa resurssien tehokkaampaan käyttöön.

5 TUIRANVÄYLÄN SILLAN MONITOROINTIHANKE

5.1 Perustietoa sillasta

Tuiranväylän silta (Kuva 25) on Oulussa Pohjois-Pohjanmaalla sijaitseva vuonna 1948 rakennettu silta. Tuiranväylän silta kuuluu neljän muun sillan ohella Merikosken siltoihin, jotka toimivat liikenteelle merkittävänä Oulujoen ylityskohtana Oulun keskustan ja Tuiran kaupunginosan välillä. Tiellä on sillan kohdalla neljakaistainen ajorata ja 50 km/h nopeusrajoitus. Sillan keskimääräinen vuorokausiliikenne (KVL) on ollut vuonna 2021 noin 20 900 ajoneuvoa vuorokaudessa (Vanhatalo 2022). Siltatyypiltään Tuiranväylän silta on teräsbetoninen jatkuva palkkisilta (Bjp). Sillan jännemitat ovat 18,0 + 22,8 + 22,8 + 18,0 metriä ja hyödyllinen leveys on 2,7 + 14,0 + 2,7 metriä. Tuiranväylän siltaa on monitoroitu jatkuvana monitorointina vuoden 2021 lokakuusta lähtien.



Kuva 25. Tuiranväylän silta (Raudasoja 2022a).

5.2 Sillan rakenne

Vuonna 1948 rakentuneen neliaukkoisen Tuiranväylän sillan alusrakenne koostuu maatuista ja kolmesta välituesta. Välitukina toimivat kehärakenteet on sijoitettu pareittain tukilinjoille ja ne ovat keskimmäistä välitukea (T3) lukuun ottamatta nivelöityjä molemmista päistään (Kuva 26). Nivelöinti mahdollistaa sillan päällysrakenteen liikkeen tukien päällä muun muassa lämpöliikkeen seurauksena. Maatuilla on teräksiset rullalaakerit, jotka sallivat päällysrakenteen pituussuuntaisen liikkeen. Väli- ja maatuet kannattelevat kuvan 26 osoittamalla tavalla neljää pääkannatinpalkkia. Sillan päällysrakenteen betonikansi ja reunimmaisten pääkannattimien välissä olevat betoniset poikkipalkit kiinnittyvät kiinteästi pääkannatinpalkkeihin.



Kuva 26. Tuiranväylän sillan rakenne alhaalta päin katsottuna (Raudasoja 2021).

5.3 Lähtökohdat monitoroinnille

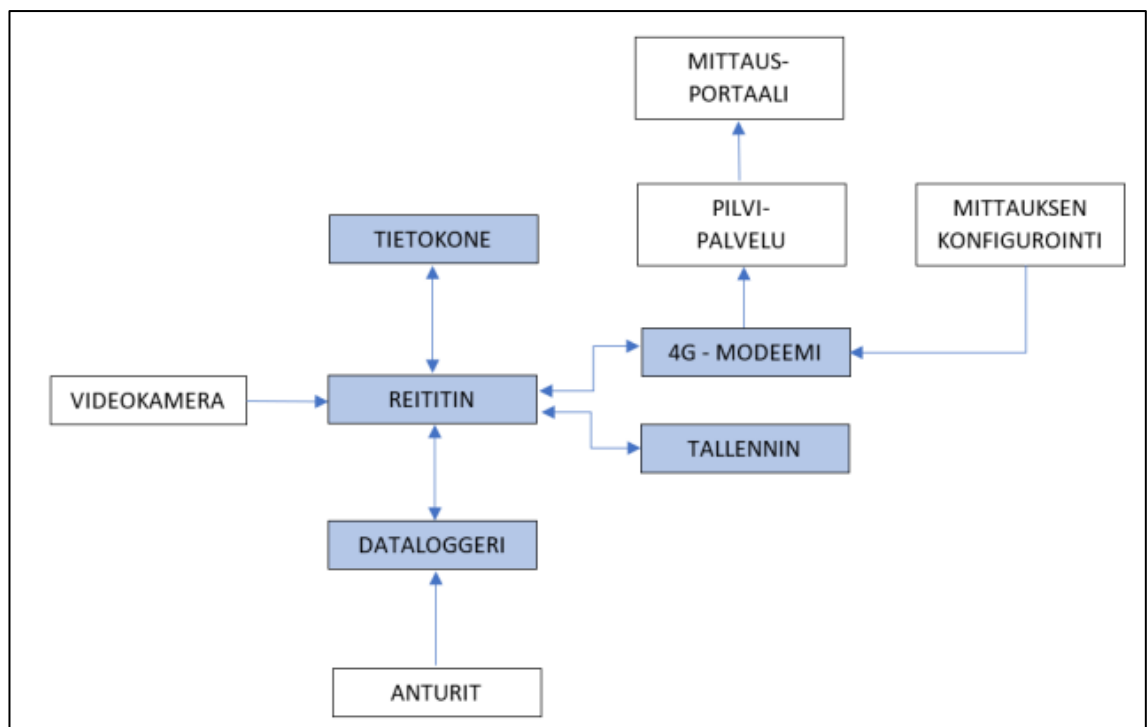
Tuiranväylän sillan monitoroinnin taustalla on ollut Oulun kaupungin tarve saada mittaustietoa siltarakenteen toiminnasta kantavuuden arvioimiseksi, kun sillalle sallitaan painorajoituksia suurempia kuormia. Samalla on pyritty selvittämään, kuinka paljon sillalla on käyttöikä ja kantokapasiteettia jäljellä sekä miten silta pystytään turvallisesti käyttämään loppuun. Tuiranväylän sillan monitorointihankkeen tilaajana on toiminut Oulun kaupunki, monitorointilaitteiston toimittajana EHP Environment Oy ja monitoroinnin ja mittaustulosten analysoinnista on vastannut insinööritoimisto Ponvia Oy.

Tuiranväylän silta on alun perin suunniteltu vuonna 1947 voimassa olleiden suunnittelukuormien mukaan, jotka ovat huomattavasti pienemmät kuin nykypäivänä käytettävät suunnittelukuormat. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että Tuiranväylän silta on alimitoitettu nykypäivän kasvaneille ajoneuvo- ja akselipainoille. Tuiranväylän sillan kantavuutta on tarkasteltu kantavuustarkastelujen avulla. Kantavuuslaskennoissa on selvinnyt, että sillan kansilaatan tukimomentti on rajoittavin tekijä sillan kantokapasiteetin kannalta (Åman 2008). Kantavuuslaskentojen pohjalta sillalle on asetettu painorajoitus. Painorajoitus (8t/12t/26t) sallii maksimissaan 8 tonnin akseli-, 12 tonnin teli- ja 26 tonnin kokonaiskuorman sillan ylittävälle ajoneuvoille (Åman 2008).

Tuiranväylän sillalle on tehty peruskorjaus vuonna 1996, jolloin muun muassa sillan pintarakenteet uusittiin ja päällysrakenteen betonipinnat ruiskubetonoitiin kauttaaltaan. Peruskorjauksen jälkeen sillalle on tehty laajennettu yleistarkistus Ramboll Oy:n toimesta vuonna 2014. Laajennetussa yleistarkistuksessa tehtiin useampia huomioita, joita olivat muun muassa välituissa ilmenneet halkeamat sekä maatuilla laakereiden asentovirhe ja kannen nojaaminen maatukea vasten (Kjellman 2014). Ennen monitoroinnin aloittamista Tuiranväylän sillalle suoritettiin vielä yleistarkistus insinööritoimisto Ponvia Oy:n toimesta vuonna 2021. Yleistarkistuksen perusteella sillan kestävyyskannalta olennaisimmat huomioidut olivat välitukien vakava halkeilu ja lohkeilu sekä pääpalkeissa olevat törmäysvauriot. Lisäksi havaittiin pohjoispuolen maatuen (T5) laakereiden olevan ääriasennossa ja sillan kannen puskevan maatuen otsamuuriin. Tarkastuksen yhteenvedona todettiin, että sillassa on puutteita ja vaurioita, mutta sillan peruskorjausta voidaan vielä siirtää. (Paakkunainen 2021)

5.4 Monitorointijärjestelmä

Tuiranväylän sillassa on EHP Environment Oy:n toimittama pitkäaikainen monitorointijärjestelmä, jolla monitoroidaan sillan päällysrakennetta. Monitorointijärjestelmä on otettu käyttöön lokakuussa vuonna 2021 ja monitoroinnin on alustavasti tarkoitus jatkua keskeytyksettömänä 2023 heinäkuuhun asti. Tuiranväylän sillan monitorointi on jatkuvaa ja vastaa laajuudeltaan Liikenneviraston monitorointikäsi­kirjan (2016b, s. 21) määritelmää *laaja monitorointi*. Monitorointijärjestelmän periaatekaavio on esitetty alla olevassa kuvassa (Kuva 27). Sillan monitorointijärjestelmä koostuu mittauslaitteista, kuten venymä-, siirtymä- ja lämpötila-antureista sekä akselipainopuntarista ja videokamerasta. Lisäksi järjestelmään kuuluu dataloggeri, mittaustietokone, verkkotallennin, 4G-reititin sekä säänkestävä laitekaappi. Mittaustulokset ja videokuva tallennetaan siltapaikalla sijaitsevaan verkkotallentimeen sekä pilvipalveluun, josta ne ovat tarkasteltavissa verkkoselaimessa toimivan mittausportaalin kautta. (EHP Environment 2021)



Kuva 27. Monitorointijärjestelmän periaatekaavio (EHP Environment 2021).

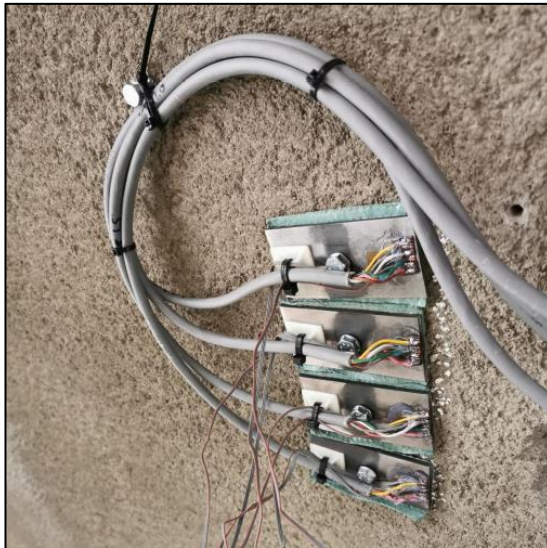
5.4.1 Venymäanturit

Tuiranväylän monitorointijärjestelmässä venymän mittaamiseen käytetään venymäliuska-antureita, joita on yhteensä 48 kappaletta. Venymäliuskoista 26 on kiinnitetty betoniraudoitteisiin ja 22 kappaletta betonin ulkopintaan. Esiin piikattuihin

betoniraidoitteisiin kiinnitettyinä liuskoina käytetään ulkomitoiltaan 10 x 8 mm venymäliuskoja ja betonin pinnassa pidempiä 100 mm pitkiä liuskoja (Kuva 28). Venymämittauksessa käytetään siltakytkentää, jossa kaksi aktiiviliuskaa on liimattu peräkkäin kiinni mittauskohtaan. Aktiiviliuskojen lisäksi kytkennässä on kaksi erilliseen lattarautaan kiinnitettyä lämpökompensointiliuskaa, joiden tarkoituksena on eliminoida mittauksesta lämpötilan aiheuttama venymä (Kuva 29).



Kuva 28. Vasemmalla betonin pintaan ja oikealla betoniraidoitteeseen kiinnitetyt venymäliuskat (Lyöri 2021).



Kuva 29. Kahden venymäanturin erillisiin lattarautoihin kiinnitetty lämpökompensointiliuskat lämpötilan aiheuttaman venymän eliminoinemiseksi (Lyöri 2021).

Venymäantureita on sijoitettu sillan pääkannattimiin, poikki-palkkeihin sekä kansilaattaan. Antureiden tarkempi sijoittelu esitetään myöhemmin. Betonin pintaan

asetettavat venymäliuskat on kiinnitetty epoksiliiman avulla. Raudoitteisiin ja lattarautoihin venymäliuskat on sen sijaan kiinnitetty liuskojen valmistajan toimittaman pikaliiman avulla. Valmiit kytkennät on suojattu suojamassalla ja muovikannella. Kuvassa 30 näkyy valmis anturipaikka, jossa sijaitsee betonipintaan ja betoniraudoitteeseen kiinnitetyt anturit.



Kuva 30. Valmis anturipaikka. Muovikannen alla sijaitsee betonipintaan ja betoniraudoitteeseen kiinnitetyt venymäanturit (Lyöri 2021).

5.4.2 Siirtymäanturit

Tuiranväylän sillan pääkannattajan taipumaa mitataan kahdesta eri kohdasta SISGEO:n valmistamien kuvan 31 mukaisten Wire crackmeter -siirtymäantureiden avulla (EHP Environment 2021). Mittauskohdat sijaitsevat sillan itäreunan pääpalkissa ensimmäisessä ja toisessa aukossa (Kuva 32). Antureiden toiminta perustuu kahden ankkurointipisteen väliin asennetun teräsvaijerin liikkeeseen, joka saa aikaan resistanssin muutoksen vaijerin toiseen päähän kytketyssä potentiometrissä. Tuiranväylän sillassa siirtymäanturit on asennettu siten, että anturin aktiiviosa on kiinnitetty sillan pääkannattajan alaosaan ja vaijerin toinen pää sillan alla sijaitsevaan patoelementtiin. Siirtymäanturin vaijeri on suojattu kuvassa 31 näkyvällä teräsputkella, etteivät ulkoiset tekijät kuten ilkivalta tai jään liikkeet aiheuta virhettä mittaustulokseen. Siirtymäanturit sijaitsevat sillan ensimmäisessä ja toisessa aukossa ja niiden mittaustarkkuus on +/- 0.1 mm.



Kuva 31. SISGEO:n valmistama Wire crackmeter- siirtymäanturi kiinnitettynä Tuiranväylän sillan pääkannattimeen.

5.4.3 Akselipainopuntari

Kuten Tuiranväylän sillan monitoroinnin lähtökohtia tarkasteltaessa kappaleessa 5.3 esitettiin, on kansilaatta sillan heikoin rakenneosa. Kansilaattaan kohdistuu suurimmat kuormitukset silloin, kun kuorma kerääntyy pienelle pinta-alalle laatan keskelle. Tämän takia akseli- ja telikuormien tarkka seuraaminen oli ensisijaisen tärkeä vaatimus sillan monitorointijärjestelmälle. Sillassa käytetään KISTLER:n valmistamaa WIM (Weigh in Motion) akselipainopuntaria, joka on upotettuna ajorataan sillan eteläpäässä (EHP Environment 2021). Puntari sijaitsee pohjoissuuntaan katsottuna sillan itäisimmällä ajokaistalla (Kuva 32). Akselipainopuntarilla saadaan akselipainojen lisäksi tietoa ajoneuvojen nopeuksista, akseliväleistä ja ajoneuvojen kokonaispainoista (EHP Environment 2021). Akselipainopuntarin tuottamaa mittausdataa pystytään myös hyödyntämään sillasta tehdyn rakennemallin kalibroinnissa.

5.4.4 Muut mittausjärjestelmän laitteet

Sillan lämpötilojen mittaamisessa käytetään neljää Pt100-lämpötila-anturia (EHP Environment 2021). Anturit on kiinnitetty sillan pääpalkkien kylkiin porattuihin reikiin, joista saadaan mitattua rakenteen tarkka lämpötila. Lämpötilan mittauspisteitä on neljä kappaletta ja ne sijaitsevat sillan itä- ja länsireunoilla ensimmäisessä ja viimeisessä silta-aukossa (Kuva 32).

Monitorointijärjestelmään kuuluu lisäksi videokamera, jolla saadaan videokuvaa sillalla kulkevista ajoneuvoista. Kuvamateriaali siirtyy verkkotallentimen kautta pilvipalveluun, josta se on tarkasteltavissa. (EHP Environment 2021)

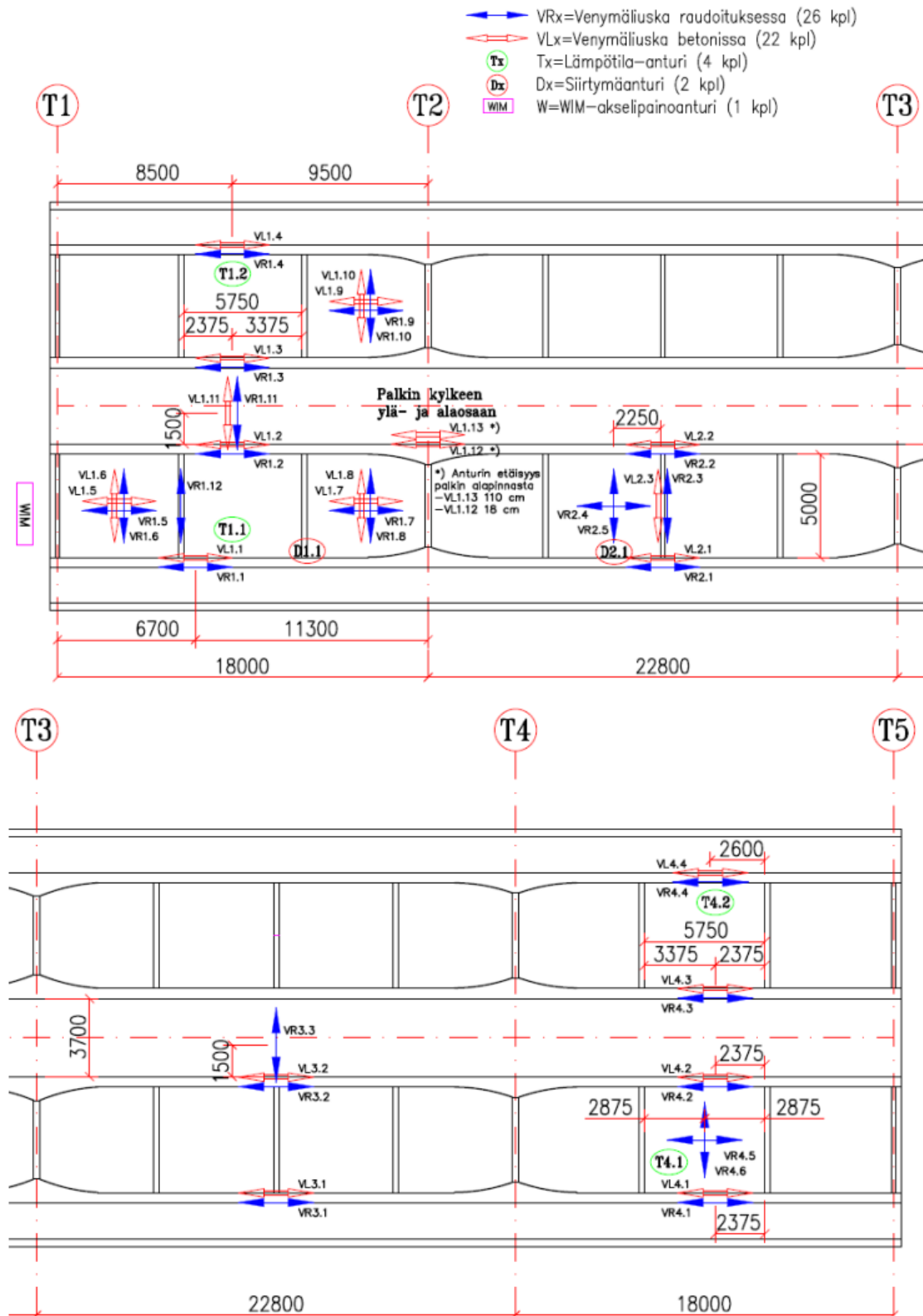
Anturidatan lukemiseen monitorointijärjestelmä käyttää Gantner Instrumentsin 24 bittistä dataloggeria, jossa on erilliset mittausmoduulit venymän, lämpötilan ja siirtymän mittaamiseen. Dataloggeri tallentaa mittauksen raakadatan verkkotallentimelle ja pilvipalveluun. (EHP Environment 2021)

5.4.5 Antureiden sijainti

Antureiden sijainnit on esitelty tarkemmin alla olevassa Tuiranväylän sillan tasokuvassa (Kuva 32). Kuvassa antureista käytetään lyhenteitä, jotka on selitetty kuvan yhteydessä. Venymäliuskojen sijainti ja nimeäminen on eritelty tarkemmin taulukossa 8. Venymäanturit on sijoitettu pääosin sillan ensimmäiseen ja viimeiseen aukkoon (Taulukko 8; Kuva 32). Betoniraidoiteisiin kiinnitettyjä venymäliuskoja on neljä kappaletta enemmän kuin betonipintaan kiinnitettyjä liuskoja.

Taulukko 8. Venymäliuskojen kiinnitystapa, sijainti ja nimeäminen.

<i>Rakenneosat:</i>	<i>Sijainti:</i>	<i>Betonipinta (yht. 22 kpl)</i>	<i>Raidoite (yht. 26 kpl)</i>
<i>Pääpalkki</i>	Aukko 1	VL1.1, VL1.2, VL1.3, VL1.4	VR1.1, VR1.2, VR1.3, VR1.4
	Aukko 2	VL2.1, VL2.2	VR2.1, VR2.2
	Aukko 3	VL3.1, VL3.2	VR3.1, VR3.2
	Aukko 4	VL4.1, VL4.2, VL4.3, VL4.4	VR4.1, VR4.2, VR4.3, VR4.4
<i>Laatta</i>	Aukko 1	VL1.5, VL1.6, VL1.7, VL1.8, VL1.9, VL1.10, VL1.11	VR1.5, VR1.6, VR1.7, VR1.8, VR1.9, VR1.10, VR1.11
	Aukko 2	-	VR2.4, VR2.5
	Aukko 3	-	VR3.3
	Aukko 4	-	VR4.4, VR4.5
<i>Poikkipalkki</i>	Aukko 1	-	VR1.12
	Aukko 2	VL2.3	VR2.3
<i>Pääpalkin kyljessä</i>	Tuki T1	VL1.12, VL1.13	-



Kuva 32. Antureiden sijainnit sillan tasokuvassa.

5.5 Antureiden tuottama mittausdata

5.5.1 Monitorointijärjestelmän toiminta

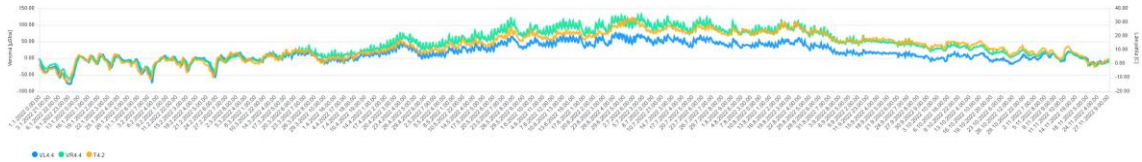
Tuiranväylän sillan jatkuva monitorointijärjestelmä on ollut diplomityön kirjoitushetkellä toiminnassa lähes vuoden ajan. Anturit ovat tuottaneet mittausdataa keskeytyksettä ja anturien toimivuudelle on saavutettu hyvä käyttöaste. Monitorointijärjestelmään kuuluva liikennekamera on uusittu kertaalleen monitoroinnin aikana. Muilta osin monitorointijärjestelmän laitteilla ei ole ollut toimintahäiriöitä tai ylläpidollisia ongelmia. Verkkoselaimen kautta käytettävä mittausportaali on ollut myös toiminnassa koko monitoroinnin ajan. Mittausportaalista on voinut tarkastella antureiden mittausdataa ja ajoneuvopuntarin tuloksia reaaliajassa tai halutulta ajanjaksolta.

5.5.2 Antureiden mittausdata

Tuiranväylän sillan monitorointijärjestelmään kuuluvat anturit tuottavat verkkoselaimessa toimivaan mittausportaaliiin jatkuvasti mittausdataa. Anturit toimivat 20 Hz näytteenottotaajuudella, eli ne tekevät 20 mittausta yhden sekunnin aikana. Mittaustuloksia voi tarkastella mittausportaalista itse määrittämältään ajanjaksolta. Mittausdata on luettavissa kuvaajan muodossa, jossa jokaisen anturin mittaustulos esitetään tunnin keskiarvona, eli niin sanottuna staattisena mittausdatana (Kuva 33 ja 34). Tämän lisäksi mittausportaaliiin tallentuu jokaiselta vuorokaudelta venymän ja taipuman minimi- ja maksimi-arvot (Kuva 35). Arvoista on vähennetty kyseiseltä mittaushetkeltä tunnin keskiarvo, jolloin jäljelle jää pelkästään ajoneuvon aiheuttama venymä. Edellä mainittua mittaustapaa kutsutaan tässä tapauksessa dynaamiseksi mittaamiseksi. Mittausportaaliiin tallentuu lisäksi ajoneuvopuntarin tuottama mittausdata, eli tiedot sillan ylittävien ajoneuvojen akseliväleistä sekä akseli- ja kokonaispainoista.

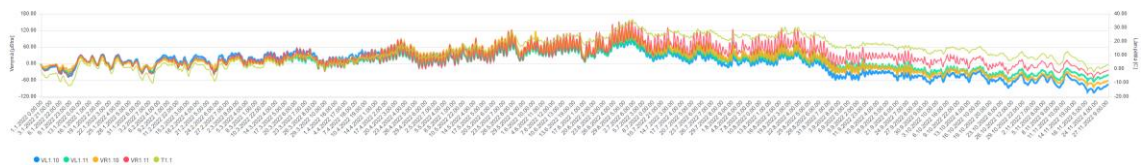
Alla olevissa kuvissa 33 ja 34 on esitetty pääpalkissa ja laatassa sijaitsevien antureiden venymän ja lämpötilan mittaustulokset tunnin keskiarvona vuoden 2022 tammikuusta marraskuuhun. Kuvaajat eivät näytä absoluuttista venymän arvoa, vaan kuvaajissa näkyy pystyakselilla venymän tunnin keskiarvon vertailuarvo ja vaaka-akselilla päivämäärä ja kellonaika. Käyrät on skaalattu siten, että ne lähtevät kuvaajan alusta (1.1.2022) samasta pisteestä, jolloin käyrissä ilmenevät erot on silmämääräisesti helpompi havaita. Kuvassa 33 on esitetty sinisellä ja vihreällä pääpalkkiin kiinnitettyjen venymäliuskojen VL4.4 ja VR4.4 venymäkäyrät, jotka kulkevat päällekkäin oranssin lämpötilakäyrän kanssa.

Kuvaajassa näkyy miten käyrät kulkevat ensimmäiset kuukaudet päällekkäin, mutta lähtevät erkanemaan kesäkuukausien aikana, jonka jälkeen loppuvuodesta palaavat takaisin yhteen. Tämän perusteella voidaan todeta, että venymä korreloi suoraan lämpötilamuutoksen kanssa.



Kuva 33. Venymän ja lämpötilan tunnin keskiarvo antureille VL/VR4.4 ja T4.2 aikavälillä tammikuu-marraskuu 2022.

Kuvassa 34 on esitetty vastaava mittausdata laatassa sijaitseville neljälle venymäanturille (VL/VR1.10 ja VL/VR1.11) sekä ensimmäisessä aukossa sijaitsevalle lämpötila-anturille T1.1. Kuvaaja vastaa hyvin edellistä kuvaajaa, vaikka lämpötilan suuresta vuorokausivaihtelusta aiheutuva sahakuvio on voimakkaampi laatan antureiden kohdalla. Käyrät tasoittuvat kuitenkin selvästi syksyn edetessä ja ovat palaamassa yhteen vuoden loppua kohti mentäessä.



Kuva 34. Venymän ja lämpötilan tunnin keskiarvo antureille VL/VR1.10, VL/VR1.11 ja T1.1 aikavälillä tammikuu-marraskuu 2022.

Tuiranväylän sillan monitorointijärjestelmään kuuluvat venymäliuskojen kanssa samaan virtapiiriin kytketyt lämpökompensointiliuskat, joiden tarkoituksena on eliminoida lämpötilan muutoksesta aiheutuva venymä. Lämpökompensointiliuskat eivät toimi täysin toivotulla tavalla, mahdollisesti kytkennän epäsymmetrisyyden vuoksi. Tämän takia lämpötilakompensointi toimii vain osittain ja kuvaajissa (Kuva 33 ja 34) on nähtävissä antureiden venymäarvojen korreloivan lämpötilamuutoksen kanssa. Teoriassa täydellinen lämpötilakompensointi tarkoittaa sitä, että staattisten kuvaajien venymäkäyrät kulkisivat suoraan vaakatasossa ja käyrien poikkeamat johtuisivat ainoastaan siltarakenteeseen tulleista vaurioista tai sillan rakenneosien välisistä pakkovoimista. Lämpölaajenemisen aiheuttaman venymän erottamista todellisesta venymästä voidaan kuvata kaavalla 2. Todellisen venymän laskenta voidaan esittää muodossa

$$\varepsilon_{tod} = \varepsilon_{kok} - \varepsilon_T, \quad (2)$$

missä ε_{tod} on rakenneosan todellinen venymä,
 ε_{kok} on venymäliuskan mittaama kokonaisvenymä ja
 ε_T on lämpölaajenemisen aiheuttama venymä.

Lämpötilakompensoinnin lisäksi lopulliseen venymäärään vaikuttavat rakenteen ala- ja yläpintojen välisistä lämpötilaeroista aiheutuvat pakkovoimat. Pakkovoimia syntyy kun rakenne ei pääse laajenemaan vapaasti tai sen pinnat lämpenevät epätasaisesti (Zangeneh et al. 2013, s. 12). Esimerkiksi kannen yläpinta voi kesäaikaan auringon lämmittäessä olla palkkien alapintaa lämpimämpi ja taas talvella toisin päin, kun jokivesi lämmittää palkkien alapintaa. Lämpötilaerojen vaikutusta on mahdollista arvioida FEM-rakennemallin avulla silloin, kun rakenteen pystysuuntainen lämpötilajakauma on tiedossa. Tuiranväylän sillan monitoroinnin kohdalla lämpötila-anturit sijaitsevat pääpalkkien kyljissä, jolloin todellista kuvaa sillan lämpötilajakaumasta ei saada. Pakkovoimien ja vajaan lämpötilakompensoinnin aiheuttamien venymien suuruuden arviointi on haastavaa ja se hankaloittaa huomattavasti staattisten kuvaajien tulkintaa.

Sillasta saatava dynaaminen mittausdata antaa staattista mittaustapaa paremman kuvan sillan rasituksista. Kuvassa 35 on kuvakaappaus mittausportaalista, jossa näkyvät venymän yhden vuorokauden minimi- ja maksimiarvot seitsemältä venymäliuska-anturilta. Mittaustuloksista on vähennetty venymän keskiarvo tunnin ajalta, millä pyritään eliminoimaan muut kuin itse ajoneuvon aiheuttamat rasitukset mitatusta arvosta.

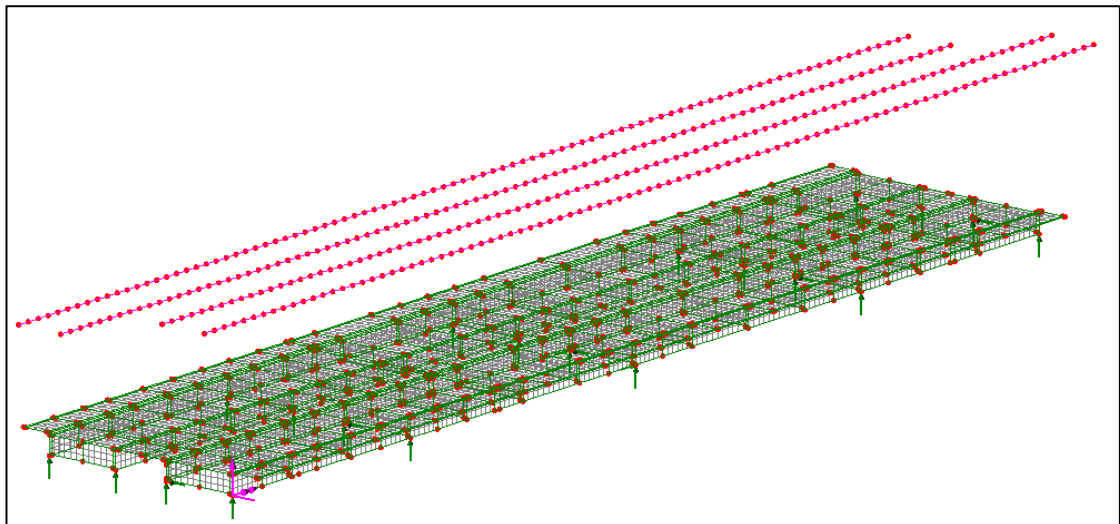
TUIRANVÄYLÄN SILTA: ANTURIT							
Jakauma	Ajoneuvopuntari	Kuvaajat	Kokonaispainon jakauma				
24.06.2022 - 25.06.2022							
	VL1.1	VR1.1	VL4.1	VR4.1	VL1.4	VR1.4	VL4.4
Venymä Max [μStra]	28	23.4	18.3	28.8	16.5	23.3	21.1
Venymä Min [μStra]	-7	-6.2	-6.7	-10.1	-6.8	-8.9	-6.9

Kuva 35. Kuvakaappaus mittausportaalista, jossa näkyvät halutulta ajanjaksolta venymäliuska-anturien minimi- ja maksimiarvot.

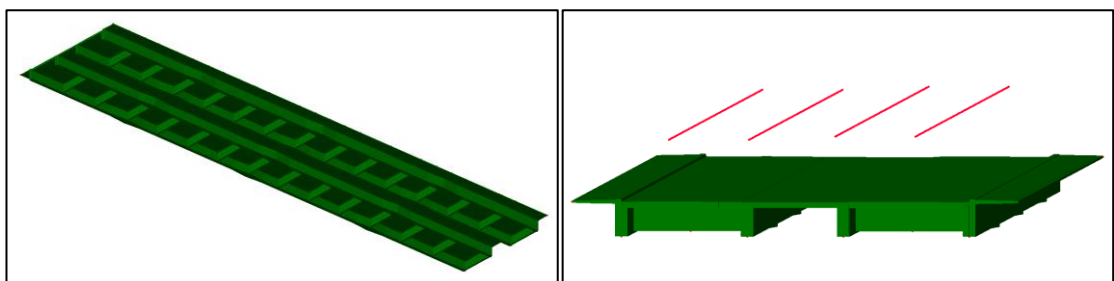
5.6 FEM-rakennemalli

5.6.1 Tuiranväylän sillan rakennemalli

Tuiranväylän sillasta on tehty FEM-rakennemalli (Finite Element Method) monitorointitulosten analysoinnin tueksi. Rakennemallin tekoon on käytetty LUSAS Bridge – ohjelmistoa, joka on erikoistunut siltojen rakenneanalyysiin ja suunnittelun tueksi. Tuiranväylän sillasta kuorielementeillä tehty rakennemalli näkyy kuvissa 36 ja 37. Kuvan punaiset pisteet sillan yläpuolella kuvaavat neljää ajokaistaa, joita pitkin ajoneuvo ajatetaan. Rakennemalli on luotu vanhojen sillan suunnitelma-asiakirjojen perusteella. Mallin tarkentamista on hankaloittanut siltaan vuoden 1996 peruskorjauksessa tehdyt muutokset sekä muut puutteet vanhoissa suunnitelmapiirustuksissa. FEM-mallia on kalibroitu ja siltaan asennettuja venymäantureita on testattu lokakuussa 2021 ajattamalla sillalla 25 tonnin kalibrointiajoneuvoa.



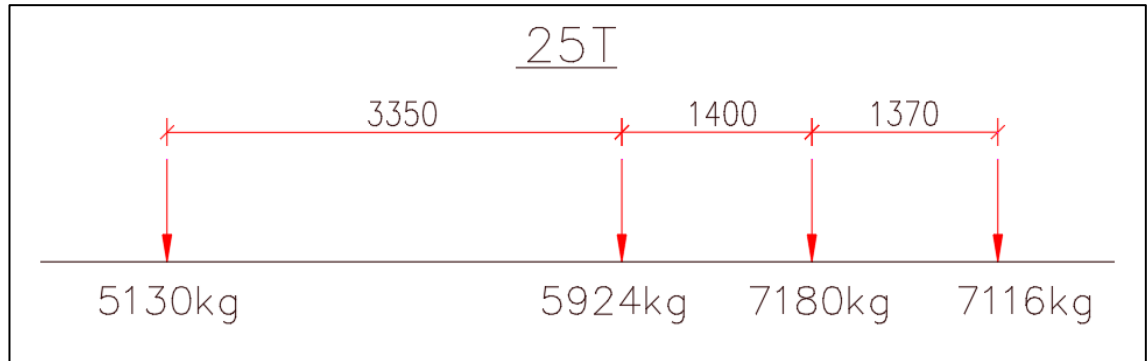
Kuva 36. Lusas Bridge- ohjelmistolla tehty Tuiranväylän sillan rakennemalli.



Kuva 37. Tuiranväylän sillan rakennemalli sillan alapuolelta ja päädyistä katsottuna.

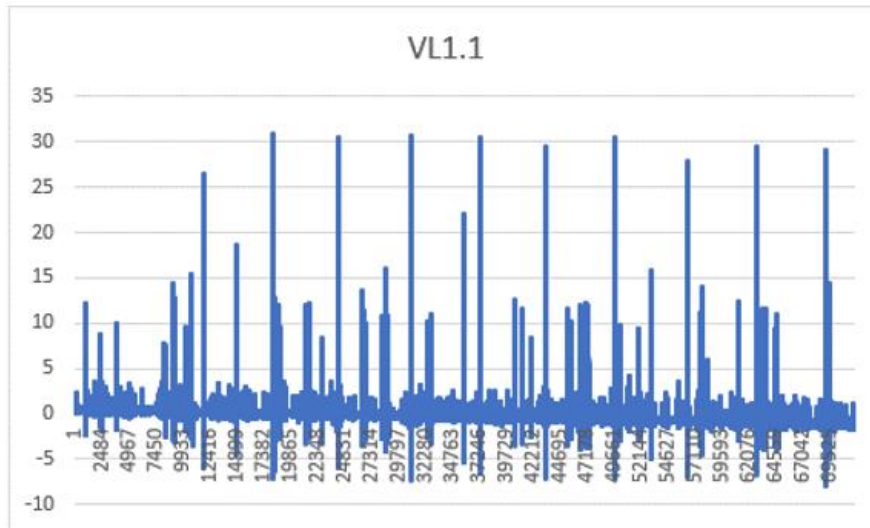
5.6.2 Rakennemallin kalibrointi ja tulosten vertailu

Antureiden ja rakennemallin testaus suoritettiin vuoden 2021 lokakuussa aamupäivällä ajattamalla sillalla 4-akselista 25 tonnin kuorma-autoa kahden tunnin ajan. Kalibrointiajoneuvon akselikuormien jakautumista ja akselivälejä on havainnollistettu kuvassa 38. Ajattaminen suoritettiin siten, että kalibrointiajoneuvo ehti ylittää sillan eri ajokaistoja pitkin useita kertoja mittausjakson aikana.



Kuva 38. Kalibrointiajoneuvon akselikuormat ja -välit havainnollistettuna.

Kyseiseltä mittausjaksolta kerättiin antureiden tuottama loggeridata yhden tunnin datapaketteina. Tämän jälkeen tunnin mittausdatasta vähennettiin kyseisen tunnin venymien keskiarvo jokaisen anturin kohdalta, jolloin jäljelle jäi vain kalibrointiajoneuvon aiheuttama venymä. Alla olevassa kuvaajassa (Kuva 39) on esimerkkinä suodatettu mittausdata pääpalkin betonipintaan kiinnitetyltä anturilta VL1.1. Kuvaajassa on pystyakselilla pääpalkin venymä ($\mu\epsilon$) ja vaaka-akselilla tunnin mittausjakso. Kuvaajasta erottuu selkeästi kalibrointiajoneuvon aiheuttamat venymäpiikit, joita on yhdeksän kappaletta ja jotka ovat suuruudeltaan $\sim 31 \mu\epsilon$ luokkaa.

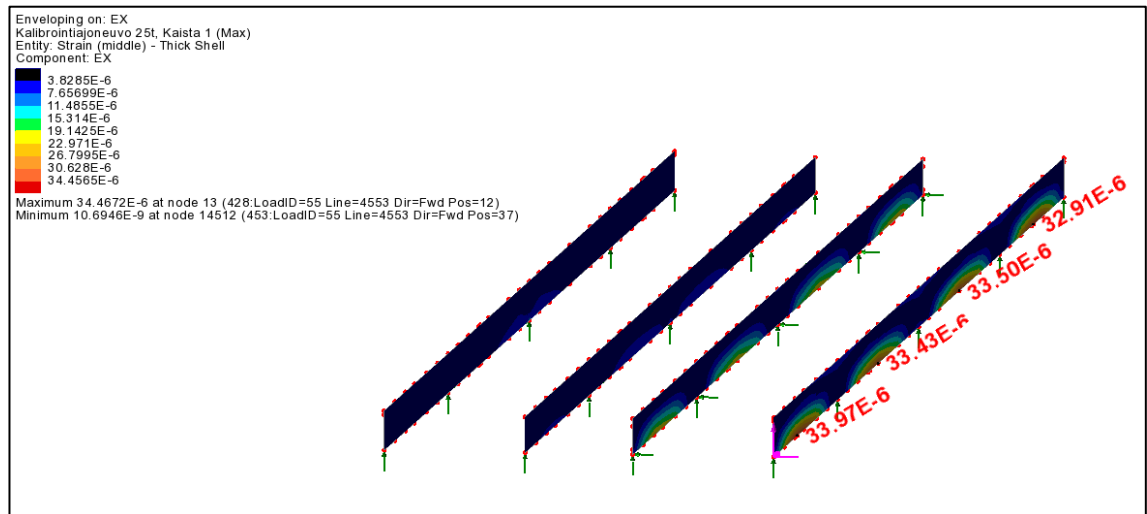


Kuva 39. Pääpalkkiin kiinnitetyn venymäliuskan VL1.1 tunnin mittausdata kalibrointiajoneuvon ajattamisen ajalta.

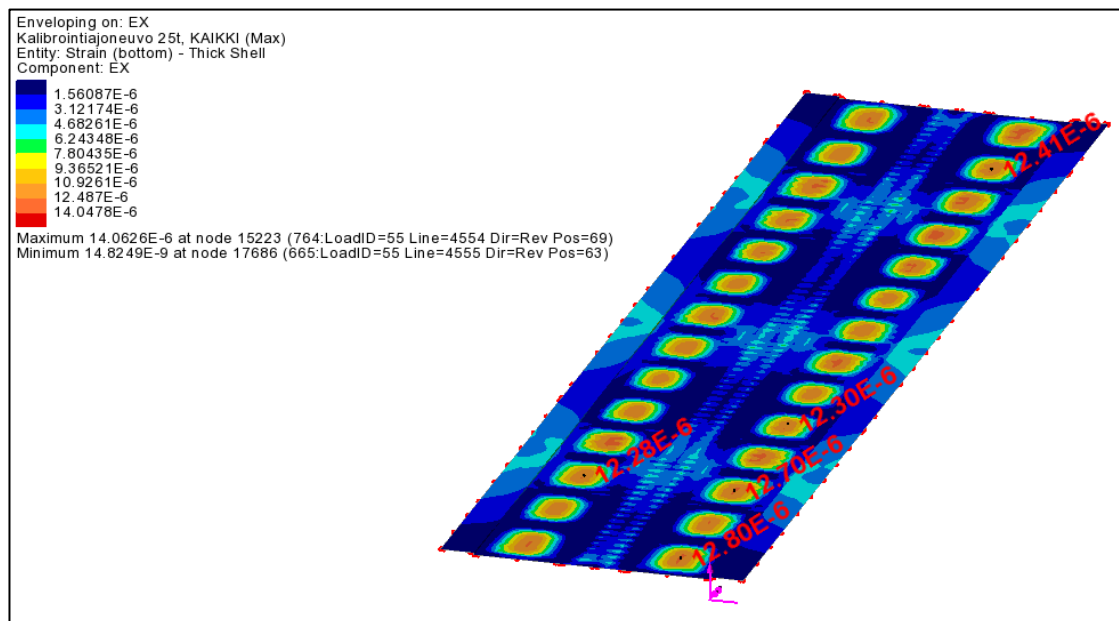
Antureiden toiminnan ja mittaustulosten luotettavuuden arvioimiseksi, tulee rakennemallin vastata mahdollisimman hyvin siltarakenteen todellista toimintaa. Rakennemallia tarkentaessa on pyritty huomioimaan betonin lujittuminen sekä esimerkiksi ruiskubetonoinnin vaikutukset sillan rakenneosien jäykkyyteen. Testiajoneuvoa simuloidaan rakennemallissa hyödyntämällä akselipainopuntarin tuottamaa mittausdataa, joka sisältää tiedon ajoneuvon akselipainoista ja -väleistä. Rengaskuormat on mallinnettu rakennemalliin pistekuormina ja ajoneuvoa ajatetaan keskellä ajokaistaa eri ajokaistoja pitkin kuten todellisessa testitilanteessa. Rakennemallissa siltaan on lisätty erillisiä solmupisteitä kohtiin, jotka vastaavat antureiden sijainteja todellisessa siltarakenteessa. Solmupisteitä hyödyntämällä rakennemallista voidaan poimia tarkasti antureita vastaavia arvoja.

Kuvassa 40 on esitetty rakennemallin vertailutulokset ensimmäisen pääpalkin venymälle. Kuvassa näkyvät venymäarvot vastaavat pääpalkin aukkoihin 1–4 kiinnitettyjen venymäliuskojen (VL/VR1.1 – VL/VR4.1) sijainteja. Voidaan todeta, että rakennemallin antama arvo 33,97 $\mu\epsilon$ vastaa hyvin anturilta VL1.1 saatua mittaustulosta $\sim 31 \mu\epsilon$ (Kuva 39). Sillan kansilaatalle saadaan haettua rakennemallista venymäarvot vastaavalla tavalla. Kuvassa 41 on esitetty esimerkkinä kansilaatan pitkittäissuuntaiset venymät. Vastaavalla tavalla rakennemallista on haettavissa myös muiden sillan rakenneosien venymät sekä pääpalkin 1 taipumat. Sillan rakennemallin ja anturidatan vertailua käsitellään yksityiskohtaisemmin kappaleessa 6.1.2, jossa tutkitaan miten venymäliuskojen kiinnitystapa vaikuttaa mittaustuloksiin. Kalibrointiajoneuvon lisäksi tutkitaan akseli- ja

kokonaispainoiltaan suurien ajoneuvojen vaikutusta mittaustatan ja rakennemallin välisiin eroihin.



Kuva 40. Kalibrointiajoneuvon aiheuttamat venymät sillan ensimmäisessä pääpalkissa antureiden VL/VR1.1, VL/VR2.1, VL/VR3.1 ja VL/VR4.1 kohdalla.



Kuva 41. Kalibrointiajoneuvon aiheuttamat pitkittäissuuntaiset venymät sillan kansilaatassa antureiden VL/VR1.5, VL/VR1.7, VL/VR1.9, VL/VR2.4 ja VL/VR4.5 kohdalla.

5.6.3 Sillan rakenneosien kantavuus

Tuiranväylän sillalle on suoritettu Ramboll Oy:n toimesta kantavuustarkastelu vuonna 2008. Kantavuustarkastelussa laskentaohjeena käytettiin nykyään vanhentunutta Tielaitoksen Siltojen kantavuuden laskentaohjetta TIEL 2170005. Kantavuustarkastelu suoritettiin sillan päällysrakenteelle, sillä alusrakenteiden kantavuus ei ollut tässä tapauksessa rajoittava tekijä. Sillan kantavuutta on tarkasteltu ensimmäisen kerran VTT:n

toimesta vuosina 1973 ja 1975, jonka pohjalta sillalle asetettiin nykyinen (8t/12t/26t) painorajoitus. (Åman 2008)

Ramboll Oy:n kantavuustarkastelussa pääpalkkien kantokapasiteetit laskettiin suorakaidepoikkileikkaukselle, kansilaatan vähäisen poikittaisen raudoituksen vuoksi. Pääpalkin kapasiteetti tuli määrääväksi valvotulla kuljetuksella pitkien telien kuormakaaviossa, eli pidemmällä akseliryhmillä. Tällöin määräävänä suurena oli pääpalkkien taivutusmomentti aukossa. Poikkipalkkien osalta kantavuutta ei tarkasteltu, sillä aiemmassa VTT:n tutkimuksessa todettiin, etteivät poikkipalkkien rasitukset tule määrääviksi. (Åman 2008)

Sillan kansilaatat mitoitettiin reunakaistojen osalta ristiin kantavina laattoina. Sillan keskikaistalla ei ole poikkisuuntaisia palkkeja, eikä sen raudoituksesta ollut tietoja käytettävissä. Tarkastelun tuloksena määrääväksi tekijäksi tuli selvästi kansilaatan tukimomentti sekä yleis- että valvotun kuljetuksen osalta. Ramboll Oy:n kantavuustarkastelun lopputuloksena todettiin, että painorajoituksen mukainen liikenne voidaan edelleen sallia sillalla. (Åman 2008)

Tuiranväylän sillan monitorointihankkeen yhteydessä on seurattu sillan rakenneosien kantokapasiteetin käyttöasteen kehittymistä. Kantavuuslaskennan pohjalta jokaiselle anturille on määritelty hälytysraja, joka pohjautuu rakenteen kantokestävyyteen kyseisessä anturin sijainnissa. Jokaiselta anturilta poimitaan kuukausittain kuukauden suurin venymä, joka muunnetaan normaali-jännitykseksi, ja jota verrataan kyseisen anturin hälytysrajaan. Kuvassa 42 on poiminta Tuiranväylän sillan monitorointihankkeen kuukausiraportista, jossa näkyy antureiden kuukausittaisia maksimijännityksiä ja ajanjakson suurinta jännitystä vastaava käyttöaste (Raudasoja 2022). Käyttöasteita tarkastelemalla voidaan todeta, että tulokset vastaavat hyvin kantavuustarkasteluissa tehtyjä havaintoja. Pääpalkeilla on kapasiteettia vielä hyvin jäljellä, mutta kansilaatan pituussuunnassa käyttöaste on lähes sata prosenttia.

Jännitykset [MPa]		Käyttöaste	Hälytysraja	marras.21	joulu.21	tammi.22	helmi.22	maalis.22	huhti.22	touko.22	kesä.22	heinä.22	elo.22	syys.22	loka.22	marras.22
Pääpalkit, laitimaiset palkit																
Aukot 1 ja 4																
VL1.1	50 %	24.5	8.8	8.3	7.6	7.5	8.2	10.5	11.5	12.2	11.1	10.9	10.6	11.3	8.7	
VR1.1	41 %	24.5	7.4	7.1	6.7	7.0	7.3	8.8	9.7	10.0	9.1	9.0	8.7	9.3	7.4	
VL4.1	31 %	24.9	6.4	7.3	6.3	6.7	6.4	7.7	7.1	7.0	6.6	6.5	6.2	7.1	5.8	
VR4.1	49 %	24.9	9.5	10.8	9.2	9.6	9.3	11.7	11.2	12.1	12.0	11.6	10.9	11.5	9.0	
VL1.4	37 %	25.1	6.6	5.7	6.2	5.9	6.5	7.3	8.5	7.5	6.6	7.6	9.4	7.5	6.4	
VR1.4	54 %	25.1	8.9	7.4	8.0	7.7	8.9	10.0	11.3	10.1	9.5	10.9	13.6	10.8	8.9	
VL4.4	56 %	24.3	10.7	7.8	8.9	8.8	7.8	10.5	11.3	10.3	10.1	10.9	13.6	10.1	8.7	
VR4.4	50 %	24.3	10.5	8.5	9.9	9.9	8.6	11.7	11.6	10.2	9.4	9.9	12.3	9.9	8.6	
Aukot 2 ja 3																
VL2.1	48 %	25.1	11.4	10.0	9.1	8.7	8.3	12.2	11.2	11.9	11.3	11.5	10.2	11.0	8.3	
VR2.1	74 %	25.1	14.2	12.1	10.9	11.0	10.9	16.2	15.8	18.6	16.5	15.7	14.9	14.7	10.9	
VL3.1	34 %	25.1	7.2	7.7	7.5	7.1	7.4	8.4	8.1	8.6	7.8	7.6	7.3	7.7	5.9	
VR3.1	52 %	25.1	9.9	10.2	9.3	9.4	9.1	12.2	12.1	13.1	12.4	12.1	11.8	11.7	8.9	
Pääpalkit, keskimäiset palkit																
Aukot 1 ja 4																
VL1.2	31 %	24.7	4.6	7.5	5.1	6.5	5.0	7.8	5.6	6.1	4.9	5.0	3.8	3.8	6.0	
VR1.2	55 %	24.7	8.5	11.2	7.4	8.2	8.8	13.6	10.4	11.7	9.9	10.1	8.4	9.2	12.0	
VL4.2	36 %	25.0	5.4	9.1	5.1	5.3	5.1	5.9	8.6	8.8	6.6	6.7	5.9	5.8	7.5	
VR4.2	45 %	25.0	6.6	10.8	5.9	6.3	5.9	7.1	10.7	11.2	8.7	8.6	7.3	7.1	9.4	
VL1.3	51 %	25.0	7.0	7.6	7.3	6.5	6.9	8.4	8.1	12.7	9.3	11.2	9.2	8.4	11.3	
VR1.3	15 %	25.0	2.4	2.8	2.5	2.3	2.4	2.7	2.5	3.8	2.6	3.1	2.7	2.3	3.0	
VL4.3	65 %	24.5	8.6	8.4	6.6	9.3	9.4	10.1	15.9	11.6	12.8	10.5	9.6	13.7		
VR4.3	52 %	24.5	8.1	7.5	8.0	6.0	8.5	8.4	8.7	12.7	9.9	9.9	8.8	8.1	11.0	
Aukot 2 ja 3																
VL2.2	27 %	25.1	5.2	6.8	4.7	4.4	4.4	5.5	5.4	5.7	4.6	4.5	3.7	4.3	5.1	
VR2.2	50 %	25.1	7.9	12.4	8.2	7.3	7.9	10.8	11.7	12.5	9.5	10.0	8.1	8.6	10.5	
VL3.2	32 %	25.1	4.6	7.9	5.1	4.9	5.1	6.3	6.9	8.1	6.5	6.2	5.4	5.7	5.8	
VR3.2	45 %	25.1	6.5	9.5	7.1	6.6	7.2	8.8	9.0	11.2	9.0	8.4	7.7	8.2	7.6	
Jännitykset [MPa]																
Kansilaatta, pituussuunta																
VL1.5	49 %	9.3	3.9	3.2	3.6	3.2	4.0	4.5	4.5	4.5	4.6	4.3	4.3	4.2	4.1	
VR1.5	48 %	9.3	3.6	3.0	3.5	3.3	3.8	4.0	4.5	4.4	4.1	4.2	4.1	3.8	3.4	
VL1.7	76 %	9.3	6.0	4.3	5.5	4.4	5.5	6.2	5.3	6.5	6.4	7.1	7.0	5.9	5.5	
VR1.7	98 %	9.3	7.1	4.7	5.8	4.8	6.1	7.2	6.7	7.3	7.5	9.1	9.1	7.3	7.1	
VL1.9	73 %	9.3	6.1	5.0	4.8	4.0	5.2	6.2	6.8	6.4	5.9	6.3	5.6	5.6	5.0	
VR1.9	88 %	9.3	6.5	6.5	5.5	6.1	7.5	6.8	7.8	8.2	7.4	7.7	6.7	6.5	6.3	
VR2.4	85 %	9.3	6.4	4.5	5.0	4.8	4.8	5.8	7.2	7.9	6.5	7.6	6.3	5.7	5.3	
VR4.5	82 %	9.3	5.5	5.6	7.6	6.4	7.1	5.9	6.0	7.6	6.8	7.0	6.4	7.5	5.4	
Kansilaatta, poikkisuunta																
Reunakaista																
VL1.6	45 %	13.0	5.2	4.5	4.1	4.5	4.6	5.5	5.6	5.8	4.8	4.7	4.5	4.5	4.3	
VR1.6	39 %	13.0	3.9	3.2	3.0	3.2	3.5	5.0	4.8	5.1	4.7	4.1	4.3	3.7	3.7	
VL1.8	47 %	13.2	4.5	4.1	4.1	4.6	4.5	4.9	5.2	6.2	4.6	5.3	5.5	5.4	3.4	
VR1.8	63 %	13.2	6.7	4.9	5.4	5.0	6.0	6.9	7.2	7.9	8.0	8.1	8.3	7.6	6.6	
VL1.10	43 %	13.1	3.9	3.8	3.9	3.5	4.1	4.6	5.6	4.5	4.3	5.0	4.6	4.4	4.6	
VR1.10	41 %	13.1	3.6	3.6	3.6	3.5	3.6	4.3	5.3	5.3	5.4	5.3	5.4	4.8	4.4	
VR2.5	77 %	12.3	7.1	5.5	8.3	6.0	7.7	6.5	7.5	8.6	8.2	9.5	8.2	8.2	6.4	
VR4.6	43 %	12.9	3.2	4.6	3.6	4.2	4.4	5.1	5.5	4.9	4.4	5.0	4.5	4.2	4.2	
Keskikaista																
VL1.11	73 %	10.6	5.1	5.2	5.3	6.4	4.7	6.8	6.7	5.8	7.8	6.8	5.4	4.6	6.4	
VR1.11	81 %	10.6	5.0	5.2	5.5	7.4	4.7	7.1	7.5	6.7	8.6	7.1	6.1	5.5	7.1	
VR3.3	72 %	10.1	6.9	7.2	5.3	5.8	4.6	6.4	7.3	6.2	6.7	6.6	5.4	4.8	5.8	

Kuva 42. Anturikohtaiset kuukausittaiset maksimijännitykset ja niitä vastaavat käyttöasteet (Raudasoja 2022b).

6 KEVYEMPI MONITOROINTI

Yksi diplomityön tutkimuskysymyksistä oli selvittää, miten siltojen monitorointia voitaisiin suorittaa kevyemmin tai pienemmässä mittakaavassa, mutta silti edelleen saada luotettavia mittaustuloksia. Käytännössä kevyempi monitorointi tarkoittaa käytettävien mittalaitteiden lukumäärän vähentämistä, joka johtaa säästöihin sillan monitorointijärjestelmän asennus- ja ylläpitokustannuksissa. Seuraavissa kappaleissa tutkitaan mahdollisuutta antureiden lukumäärän vähentämiselle perustuen Tuiranväylän sillan monitorointidatasta tehtyihin havaintoihin. Tarkoituksena on vertailla mittaustuloksia betonin pintaan ja betoniraudoitteeseen kiinnitettyjen venymäliuskojen välillä ja tutkia, onko venymäliuskojen kiinnittäminen vain betonin pintaan riittävää luotettavan mittaustuloksen saamiseen.

Antureiden kiinnitystavan lisäksi tarkastellaan ja arvioidaan mahdollisen sillan vaurion tunnistamista ja ilmenemistä mittaustuloksista. Vaurion tunnistamisessa hyödynnetään sillasta tehtyä FEM-rakennemallia, jonka avulla tutkitaan, miten vaurio näkyy eri kohdissa siltaa, eri antureiden mittaustuloksissa. Edellä mainitulla pyritään selvittämään, mitkä anturit ovat kriittisimpiä ja riittäisikö antureiden sijoittaminen vain reuna-aukkoihin. Tästä olisi hyötyä antureiden sijoittelun priorisoinnissa ja siten antureiden asennuskulujen vähentämisessä.

6.1 Venymäliuska-antureiden kiinnitystapa

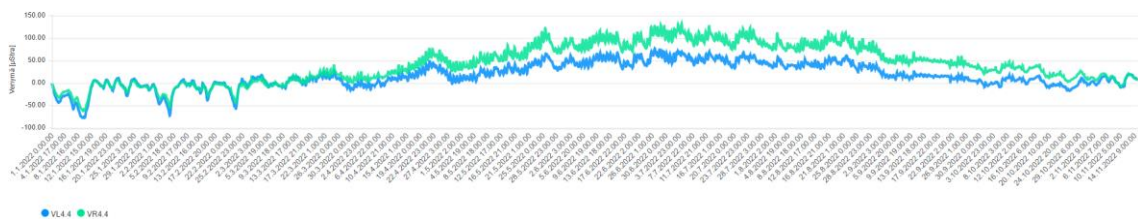
Tuiranväylän sillan monitorointihankkeen kohdalla on tehty päätös, että venymäliuska-antureita kiinnitetään sekä betonipintaan että betoniraudoitteeseen. Asentamalla venymäliuskat eri pintoihin, mutta samaan mittauskohtaan rakenteessa, voidaan varmistua siitä, että anturit toimivat toivotulla tavalla antaessaan samansuuntaisia tuloksia. Tuiranväylän sillan betonipinnat on kauttaaltaan ruiskubetonoitu peruskorjauksen yhteydessä vuonna 1996. Tämä aiheutti epävarmuutta betonipintaan kiinnitettävien venymäliuskojen toimivuudesta, jolloin tarvittiin vertailutulos betoniraudoitteisiin kiinnitetystä anturista. Seuraavissa kappaleissa vertaillaan betonipintaan ja raudoitukseen kiinnitettyjen venymäliuskojen mittaustuloksia pohjautuen Tuiranväylän sillan mittausdataan. Lisäksi esitellään haasteita ja ongelmia, joita eri kiinnitystapoihin liittyy sekä pohditaan mistä mahdolliset erot mittaustuloksissa johtuvat.

6.1.1 Kiinnitystapojen vertailu mittausdatan perusteella

Tuiranväylän sillan mittausdataa tutkiessa on havaittu, että ensimmäisessä silta-aukossa raudoitteessa sijaitseva kolmannen pääpalkin venymää mittaava anturi (VR1.3) ei toimi toivotulla tavalla. Anturi näyttää keskimäärin vain kolmasosan betonipintaan kiinnitetyn anturin mittaustuloksesta, joten sen mittausdata jätetään huomioimatta tulevassa vertailussa. Lisäksi joidenkin yksittäisten antureiden kohdalla on ollut havaittavissa mittaustulosten heikkenemistä. Näiden antureiden mittaustuloksia ei ole myöskään huomioitu keskimääräisiä eroja laskettaessa. Vertailussa ei arvioida antureiden näyttämää absoluuttista venymäarvoa, vaan keskitytään antureiden keskinäisiin eroihin mittaustuloksissa.

Tarkastelujakso ajoittuu vuoden 2022 tammikuusta saman vuoden marraskuun loppupuolelle eli diplomityön kirjoitusajankohtaan. Tarkoituksena on tarkastella eri kiinnitystavoilla toteutettujen venymäliuskojen mittaustulosten eroavaisuutta ja miten siihen vaikuttaa vuodenaikojen vaihtelu. Vertailun jälkeen selvitetään ja pohditaan syitä saaduille tuloksille.

Alla olevissa kuvissa (Kuva 43 ja 44) näkyy esimerkkinä kahden eri kohdassa siltaa (pääpalkki, laatta) sijaitsevan anturiparin staattinen mittausdata aikaväliltä tammikuu-marraskuu. Esimerkkeiksi valitut anturiparit edustavat venymäliuskojen keskimääräistä toimintaa kyseisissä rakenneosissa. Käyrät on skaalattu alkamaan kuvaajan alusta samasta pisteestä.



Kuva 43. Venymän tunnin keskiarvo skaalattuna pääpalkin antureissa VL4.4 ja VR4.4.



Kuva 44. Venymän tunnin keskiarvo skaalattuna laatan antureissa VL1.10 ja VR1.10.

Kuvaajista on havaittavissa, että venymäkäyrät käyttävät alkuvuodesta lähes identtisesti, mutta lähtevät selkeästi erkanemaan toisistaan huhti- ja toukokuun aikana. Raudoitteeseen kiinnitetyt anturit (vihreät käyrät) alkavat tuottaa keskimäärin suurempia venymäarvoja. Molempien antureiden venymäkäyrillä havaitaan myös tihentyvää sahakuviota kesäkuukausien aikana, joka johtuu lämpötilan nopeasta vuorokausivaihtelusta. Kuvaajien loppupäässä nähdään lämpötilan viilentymistä aiheutuvaa käyrien tasaantumista ja että käyrät palaavat yhteen lämpötilan laskiessa kohti kuvaajien alun lukemia.

Staattisten kuvaajien tueksi tarkastellaan dynaamista mittausdataa. Dynaaminen mittausdata koostuu vuorokausikohtaisista venymän maksimiarvoista, joista on vähennetty maksimivenymän ajankohdan tunnin keskiarvo. Tunnin keskiarvon vähentämällä saadaan eliminoitua lämpötilavaihtelun aiheuttama venymä ja jäljelle jää niin sanottu dynaaminen venymä. Vertailussa verrataan betonipintaan ja betoniraudoitteeseen kiinnitettyjen venymäliuskojen venymäsuhdetta. Taulukoihin 9 ja 10 on kerätty jokaisen venymäliuskaparin venymäsuhteen kuukauden keskiarvo pääpalkkien ja laatan osalta. Kuukauden keskiarvo on laskettu erikseen jokaiselta kuukaudelta vuorokautisten maksimivenymien perusteella. Venymäsuhde kuvaa betonipintaan ja betoniraudoitteeseen kiinnitettyjen venymäliuskojen mittaustulosten suhdetta ja se voidaan esittää muodossa:

$$n = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_s} \cdot 100\%, \quad (3)$$

missä n on venymäsuhde,
 ε_c on betonipintaan kiinnitetyn venymäliuskan venymä ja
 ε_s on raudoitteeseen kiinnitetyn venymäliuskan venymä.

Taulukoissa alle 100 % prosenttilukema tarkoittaa sitä, että betonipintaan kiinnitetty venymäliuska näyttää pienempää arvoa kuin betoniteräksen kiinnitetty liuska.

Taulukko 9. Pääpalkin betonipintaan ja betoniraudoitteeseen kiinnitettyjen venymäliuskaparien kuukausittainen keskimääräinen venymäsuhde.

Pääpalkkien venymäliuskaparien venymäsuhde *												
	VL/VR1.1	VL/VR1.2	VL/VR1.4	VL/VR2.1	VL/VR2.2	VL/VR3.1	VL/VR3.2	VL/VR4.1	VL/VR4.2	VL/VR4.3	VL/VR4.4	Keskiarvo
Tammikuu	106 %	74 %	77 %	72 %	62 %	79 %	81 %	68 %	86 %	107 %	80 %	84 %
Helmikuu	105 %	75 %	76 %	75 %	60 %	80 %	81 %	68 %	86 %	105 %	79 %	84 %
Maaliskuu	113 %	60 %	74 %	78 %	58 %	78 %	73 %	68 %	84 %	107 %	87 %	85 %
Huhtikuu	116 %	56 %	76 %	76 %	54 %	72 %	72 %	66 %	83 %	111 %	90 %	84 %
Toukokuu	118 %	54 %	75 %	71 %	50 %	69 %	72 %	62 %	80 %	113 %	93 %	84 %
Kesäkuu	120 %	51 %	71 %	70 %	49 %	66 %	71 %	57 %	78 %	119 %	96 %	83 %
Heinäkuu	120 %	49 %	69 %	68 %	48 %	64 %	71 %	54 %	77 %	121 %	103 %	83 %
Elokuu	121 %	48 %	68 %	70 %	49 %	63 %	71 %	55 %	78 %	122 %	106 %	84 %
Syyskuu	119 %	43 %	68 %	72 %	48 %	63 %	71 %	58 %	82 %	122 %	108 %	85 %
Lokakuu	118 %	45 %	70 %	75 %	51 %	66 %	73 %	63 %	81 %	119 %	103 %	85 %
Marraskuu	116 %	48 %	73 %	79 %	53 %	68 %	74 %	66 %	82 %	119 %	96 %	86 %

* Keskiarvossa ei ole huomioitu värillä korostettujen venymäliuskaparien venymäsuhteita

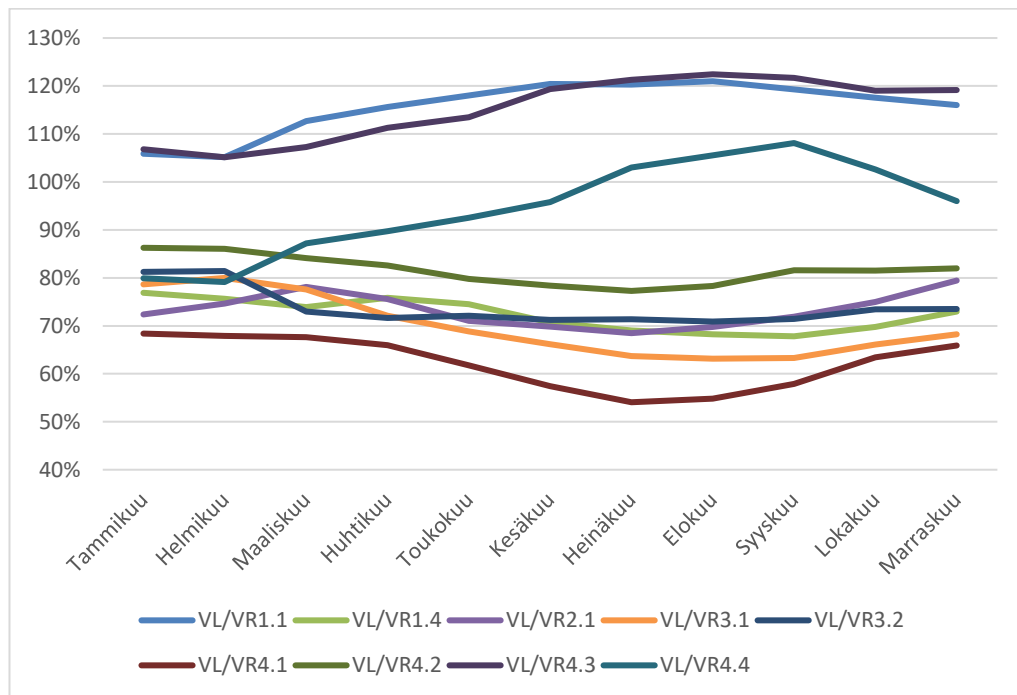
Taulukko 10. Kansilaatan betonipintaan ja betoniraudoitteeseen kiinnitettyjen venymäliuskaparien kuukausittainen keskimääräinen venymäsuhde.

Kansilaatan venymäliuskaparien venymäsuhde								
	VL/VR1.5	VL/VR1.6	VL/VR1.7	VL/VR1.8	VL/VR1.9	VL/VR1.10	VL/VR1.11	Keskiarvo
Tammikuu	109 %	124 %	87 %	76 %	71 %	109 %	96 %	96 %
Helmikuu	101 %	146 %	89 %	88 %	70 %	101 %	97 %	99 %
Maaliskuu	102 %	121 %	85 %	73 %	80 %	108 %	94 %	95 %
Huhtikuu	104 %	111 %	82 %	69 %	86 %	105 %	92 %	93 %
Toukokuu	104 %	107 %	83 %	70 %	80 %	103 %	87 %	91 %
Kesäkuu	103 %	114 %	82 %	70 %	82 %	89 %	87 %	89 %
Heinäkuu	103 %	107 %	81 %	64 %	79 %	84 %	87 %	87 %
Elokuu	102 %	111 %	83 %	65 %	80 %	84 %	89 %	88 %
Syyskuu	110 %	104 %	80 %	65 %	82 %	88 %	91 %	89 %
Lokakuu	111 %	107 %	83 %	65 %	84 %	94 %	91 %	91 %
Marraskuu	113 %	111 %	82 %	60 %	86 %	100 %	91 %	92 %

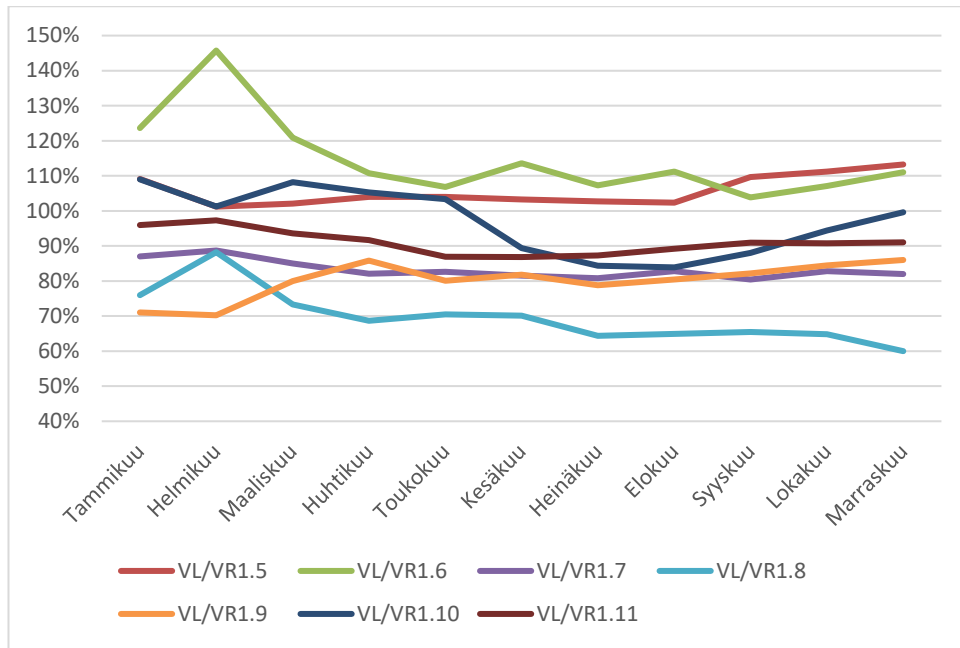
Taulukossa 9 nähdään, että pääpalkeilla vain kahdessa yhdestätöistä anturiparista betonipintaan kiinnitetty venymäliuska näyttää keskimäärin isompaa arvoa kuin raudoitteeseen kiinnitetty liuska. Sen sijaan kansilaatan antureiden kohdalla tilanne on tasaisempi (Taulukko 10). Lisäksi voidaan todeta, että kansilaatassa kiinni olevat venymäliuskaparit antavat keskimäärin paremmin toisiaan vastaavia arvoja pääpalkkeihin verrattuna. Pääpalkeilla anturiparien venymäsuhteen kuukauden keskiarvo on keskimäärin 84 %, kun taas laatan anturipareilla vastaava lukema on yli 90 %. Anturiparien keskiarvoja tulkittaessa on huomioitava, että keskiarvoon vaikuttaa korjaavasti se, että osalla anturipareista venymäsuhde on yli 100 %. Taulukossa 9 nähdään punaisella korostetun anturiparin VL/VR1.2 venymäsuhteen selkeä heikentyminen vuoden edetessä. Tämä viittaa siihen, että betonipintaan kiinnitetty venymäliuska on alkanut näyttää liian pieniä arvoja, johon saattaa olla syynä esimerkiksi kiinnityksen pettäminen. Lisäksi anturiparin VL/VR2.2 venymäsuhde on ollut vertailun

alusta asti heikko. Tähän on syynä betonipintaan kiinnitetyn liuskan VL2.2 antamat poikkeuksellisen pienet venymäarvot. Punaisella korostettujen anturiparien venymäsuhdetta ei ole huomioitu kuukauden keskiarvon laskennassa.

Venymäsuhteiden kehittymistä vuoden aikana on havainnollistettu kuvien 45 ja 46 kuvaajissa. Kesäkuukausien aikana suurimmalle osalle venymäliuskapareista tulee pieni notkahdus venymäsuhteeseen, jonka jälkeen suhde lähtee taas nousemaan kohti alkuvuoden lukemia. Ilmiö on voimakkaampi ja selkeämmin huomattavissa pääpalkkeihin kiinnitettyjen venymäliuskojen kohdalla. Sama ilmiö oli havaittavissa jo staattista mittausdataa tarkasteltaessa (Kuva 43 ja Kuva 44). Tämä viittaa siihen, että betoniraidoitteeseen kiinnitetty venymäliuska reagoi voimakkaammin yleiseen lämpötilan nousemiseen.



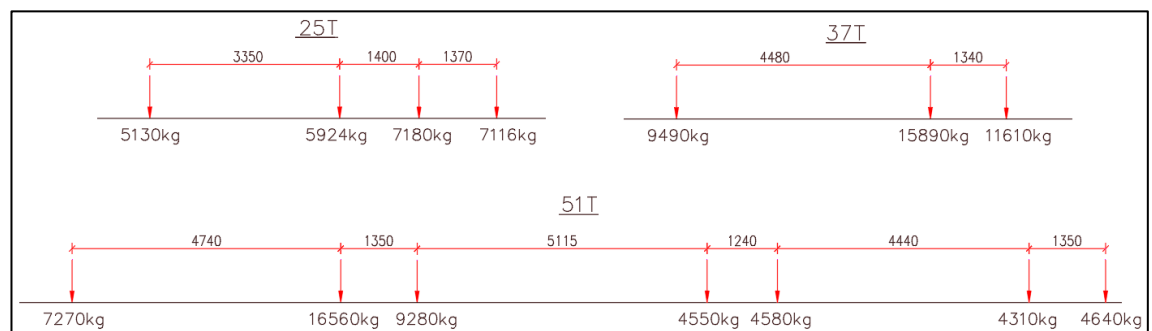
Kuva 45. Pääpalkkeihin kiinnitettyjen venymäliuskaparien venymäsuhteen kehittyminen vuoden aikana.



Kuva 46. Kansilaattaan kiinnitettyjen venymäliuskaparien venymäsuhteen kehittyminen vuoden aikana.

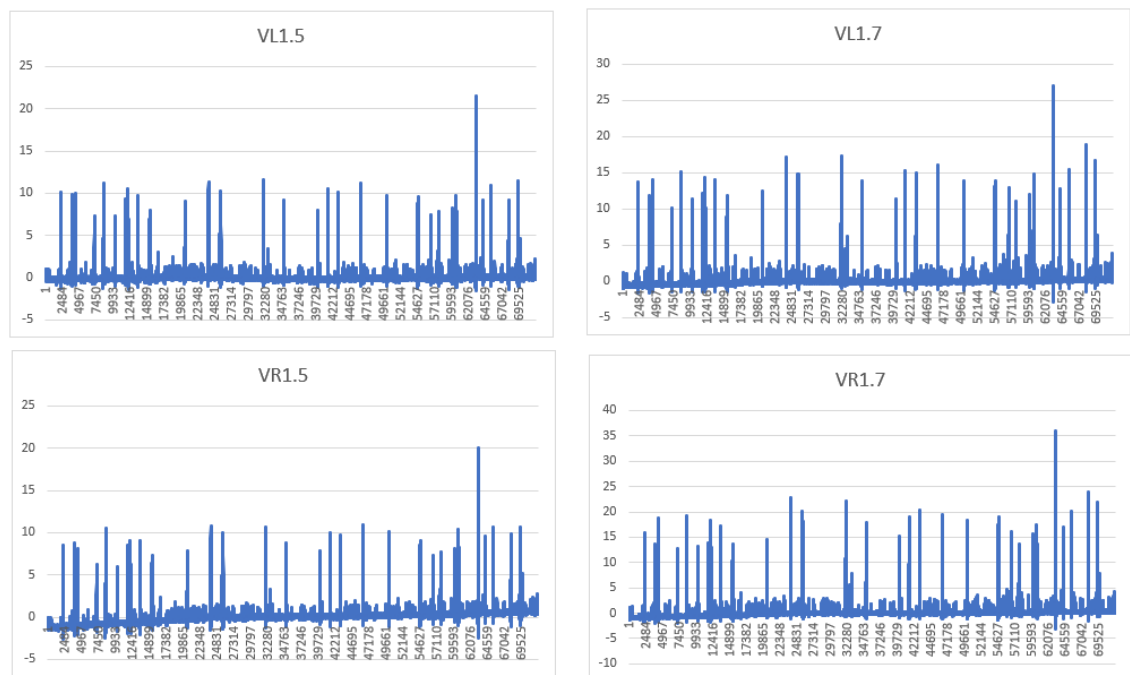
6.1.2 Kiinnitystapojen vertailu sillan rakennemallin avulla

Kiinnitystapojen vertailussa hyödynnetään sillasta tehtyä rakennemallia. Kuten aikaisemmin todettiin, sillan rakennemallia ja antureita on testattu ajattamalla sillalla 25 tonnin kalibrointiajoneuvoa. Kalibrointiajoneuvon ajattamisen ohella vertailudataa on kerätty myös muutamista yksittäisistä ajoneuvoista, jotka ovat selvästi ylittäneet sillalle asetetut painorajoitukset. Vertailuun on valittu kokonaispainoiltaan 37 ja 51 tonnin ajoneuvot, joiden akselipainojen jakautumista on havainnollistettu kuvassa 47. Kokonaispainoiltaan pienempi 37 tonnin ajoneuvo on kolmiakselinen kuorma-auto, jonka teli- ja akselikuormat ovat huomattavat sillan painorajoitukseen verrattuna. Toinen ajoneuvoista on 51 tonnin perävaunullinen 7-akselinen rekka, jonka kuorma on jakaantunut tasaisemmin suuremman akselimäärän ansiosta. Siitä huolimatta rekan kokonaispaino ylittää sillalle asetetun painorajoituksen lähes kaksinkertaisesti.



Kuva 47. Vertailuajoneuvojen akselipainot ja -välit havainnollistettuna.

Ajoneuvoja simuloidaan ja antureiden mittausdataa verrataan sillan rakennemalliin samalla tavalla kuin 25 tonnin kalibrointiajoneuvon kohdalla. Ainoa ero on, että raskaammat ajoneuvot ovat ylittäneet sillan vain kerran ja ajaneet pohjoiseen katsottuna sillan oikeanpuolimmaisinta ajokaistaa pitkin. Edellä mainitun takia mittaus tulosten vertailuun on valikoitu vain pääpalkkiin 1 kiinnitetyt anturit sekä kyseisen ajokaistan kohdalle laattaan kiinnitetyt anturit. Vertailussa ei huomioida sillan poikkipalkkeja, sillä poikkipalkin betonipintaan on kiinnitetty vain yksi venymäliuska, joka ei siten mahdollista luotettavaa vertailua. Kuvassa 48 on esitetty esimerkkinä kansilaatan pitkittäistä venymää mittaavien venymäliuskaparien tunnin mittausdata, jossa erottuu selvästi 37 tonnin kuorma-auton ylityshetki.



Kuva 48. Kansilaatan pitkittäissuuntaan kiinnitettyjen venymäliuskojen VL/VR1.5 ja VL/VR1.7 tunnin mittausdata 37 tonnin ajoneuvon ylityshetkeltä.

Venymäliuskaparien mittaus tulokset ja vastaavat rakennemallin antamat arvot on kerätty taulukoihin 11, 12 ja 13. Taulukoissa on eritelty omat sarakkeet 25, 37 ja 51 tonnin ajoneuvoille. Taulukoissa näkyy vihreällä värillä korostettuna betonipintaan kiinnitetyt venymäanturit ja sinisellä betoniraidoitteeseen kiinnitetyt anturit. Pääpalkin taipuman vertailu on esitetty taulukossa 12. Taulukoissa esiintyvä *suhde* tarkoittaa anturilukeman suhdetta rakennemallin vastaavaan arvoon.

Taulukko 11. Pääpalkkiin 1 kiinnitettyjen anturiparien mittaustulosten vertailu sillan rakennemalliin nähden eri suuruisilla ajoneuvoilla.

Pääpalkin 1 venymä [$\mu\epsilon$]									
	25 T (24.10.2021)			37 T (01.06.2022)			51 T (29.09.2022)		
	Anturi	Lusas	Suhde	Anturi	Lusas	Suhde	Anturi	Lusas	Suhde
VL1.1	31.4	33.97	92 %	50.3	48.66	103 %	40.9	45.42	90 %
VR1.1	26.3		77 %	42.3		87 %	34.5		76 %
VL2.1	34.5	33.43	103 %	51.6	48.26	107 %	48.5	46.75	104 %
VR2.1	43.4		130 %	72.1		149 %	63.3		135 %
VL3.1	25.8	33.5	77 %	38.3	48.11	80 %	32.8	47.18	70 %
VR3.1	34.3		102 %	56.7		118 %	53.2		113 %
VL4.1	23.4	32.91	71 %	33.9	47.21	72 %	29	43.82	66 %
VR4.1	36.7		112 %	59.7		126 %	48.7		111 %

Kun tarkastellaan pääpalkin venymiä ja venymäsuhteita (Taulukko 11) voidaan todeta, että ajoneuvon painolla ei ole juurikaan vaikutusta venymäsuhteeseen, vaan suhde pysyy kymmenen prosenttiyksikön sisällä eri ajoneuvojen välillä. Lisäksi on havaittavissa, että ensimmäisen ja toisen aukon betonipintaan kiinnitetyt venymäliuskat (VL1.1 ja VL2.1) antavat hyvin samansuuruisia tuloksia rakennemalliin verrattuna. Sen sijaan kolmannen ja neljännen aukon betonipinnan liuskat (VL3.1 ja VL4.1) näyttävät vain 70–80 % rakennemallin tuloksista. Ero voi johtua siltakannen jumittumisesta maatuokea vasten tuella viisi, joka saa sillan käyttäytymään jäykemmin aukoissa kolme ja neljä. Raudoitteisiin kiinnitetyissä venymäliuskoissa on sen sijaan suurempaa vaihtelua keskenään, ja ne näyttävät keskimäärin korkeampia lukemia kuin rakennemallissa. Mahdollisia syitä kiinnitystapojen eroavaisuudelle on käsitelty tarkemmin kappaleessa 6.1.3.

Kansilaatan osalta venymäsuhteissa on jonkin verran isompia eroja verrattuna pääpalkkiin (Taulukko 12). Pitkittäistä venymää mittaavien venymäliuskojen kohdalla betonipintaan kiinnitettyjen liuskojen venymäsuhde on noin 80 % kun taas raudoitteisiin kiinnitetyissä liuskoissa on enemmän vaihtelua. Laatan poikittaisessa suunnassa venymäsuhteet ovat hyvin samankaltaisia kuin pitkittäisessä suunnassa. Eri ajoneuvojen välillä parhaat venymäsuhteet ovat 37 tonnin ajoneuvon kohdalla. Tälle voi olla syynä se, että lyhyellä 3-akselisella ajoneuvolla suuri massa on kerääntynyt hyvin pienelle alueelle ja saa siten todellisen laattarakenteen toimimaan lähes teoreettisen rakennemallin tavoin. Suurin osa laatan antureista kuitenkin näyttää pienempiä venymiä kuin rakennemalli. Mahdollinen syy rakennemallin suurempiin venymiin on erot kansilaatan jäykkyydessä verrattuna todelliseen rakenteeseen. Laatan jäykkyyttä on ollut vaikea arvioida, sillä kansilaatalle tehdyn tasausvalun ja ruiskubetonoinnin paksuudesta ei ole tarkkaa tietoa.

Myös koko poikkileikkauksen todellisen neutraaliakselin sijainti vaikuttaa suhteellisesti enemmän kansilaatan tuloksiin kuin palkkien alapinnan tuloksiin. Edellä mainitun lisäksi pyöräkuormien syöttäminen rakennemalliin pistekuormina ei täysin vastaa todellista tilannetta, vaan kasvattaa hieman rakennemallin venymiä. Itse antureiden ja niiden mittaustulosten epävarmuuteen liittyviä tekijöitä käydään läpi seuraavassa kappaleessa.

Taulukko 12. Laattaan kiinnitettyjen anturiparien mittaustulosten vertailu sillan rakennemalliin nähden erikokoisilla ajoneuvoilla.

Laatan pitkittäinen venymä [$\mu\epsilon$]									
	25 T (24.10.2021)			37 T (01.06.2022)			51 T (29.09.2022)		
	Anturi	Lusas	Suhde	Anturi	Lusas	Suhde	Anturi	Lusas	Suhde
VL1.5	10.5	12.80	82 %	21.6	26.36	82 %	17.3	25.85	67 %
VR1.5	7.9		62 %	20.0		76 %	15.9		62 %
VL1.7	10.7	12.70	84 %	27.0	26.12	103 %	20.3	25.37	80 %
VR1.7	14.5		114 %	35.9		137 %	24.8		98 %

Laatan poikittainen venymä [$\mu\epsilon$]									
	25 T (24.10.2021)			37 T (01.06.2022)			51 T (29.09.2022)		
	Anturi	Lusas	Suhde	Anturi	Lusas	Suhde	Anturi	Lusas	Suhde
VL1.6	14.5	18.85	77 %	26.9	29.58	91 %	18.1	27.27	66 %
VR1.6	13.0		69 %	25.3		86 %	18.1		66 %
VL1.8	10.6	17.71	60 %	25.7	27.97	92 %	16.7	25.8	65 %
VR1.8	16.8		95 %	39.3		141 %	27.5		107 %

Pääpalkin taipumia tarkasteltaessa (Taulukko 13) voidaan todeta taipumasuhteen vaihtelevan pääosin 60–75 % välillä. Taipumasuhteen voi havaita nousevan sen mukaan mitä painavampi ajoneuvo on. Taipumat ovat hyvin pieniä, jopa alle yhden millimetrin luokkaa, jolloin jo anturin mittausrvirheellä ($\pm 0,1$ mm) on suuri vaikutus taipumasuhteeseen. Tulee myös huomioida, että todellisessa siltarakenteessa reunapalkit ja sillan kaiteet jäykistävät hieman rakennetta, mikä voi selittää miksi anturit näyttävät jonkin verran pienempiä lukemia kuin rakennemalli.

Taulukko 13. Pääpalkin 1 taipuman vertailu siirtymäantureiden mittaustulosten ja sillan rakennemallin välillä.

Pääpalkin 1 taipuma [mm]									
	25 T (24.10.2021)			37 T (01.06.2022)			51 T (29.09.2022)		
	Anturi	Lusas	Suhde	Anturi	Lusas	Suhde	Anturi	Lusas	Suhde
D1.1	-0.34	-0.7	49 %	-0.6	-1.0	60 %	-0.72	-0.95	76 %
D2.1	-0.71	-1.1	65 %	-1.14	-1.5	76 %	-1.07	-1.5	71 %

6.1.3 Mahdollisia syitä mittaustulosten eroille

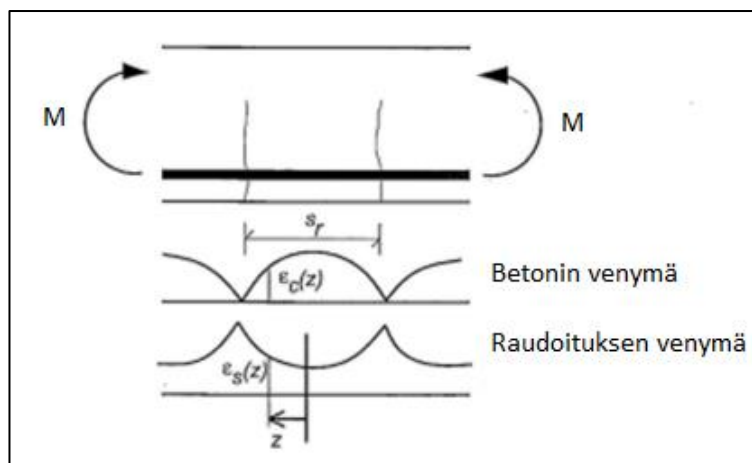
Tuiranväylän sillan monitoroinnista saadun sekä staattisen että dynaamisen mittaustulosten perusteella voidaan todeta, että lämpötilan kausivaihtelu ja siitä aiheutuva sillan rakenneosien lämpöeläminen on merkittävä syy mittaustulosten vaihtelulle. Kesällä rakenneosien epätasainen lämpeneminen ja lämpötilaerot aiheuttavat pakkovoimia, jotka voivat näkyvät mittaustuloksissa kohonneina venymän ja taipuman arvoina. Sillan rakenneosien ohella myös itse venymäliuskat ja niihin liittyvät johtimet ovat alttiita lämpötilan nousun aiheuttamalle lämpölaajenemiselle. Kappaleessa 5.5.2 kerrottiin, että Tuiranväylän sillan monitorointijärjestelmään kuuluvat lämpökompensointiliuskat eivät toimi täysin toivotulla tavalla kytkennän epäsymmetrisyyden takia. Siksi lämpökompensointi ei toimi täysimääräisesti, mikä yhdessä pakkovoimien vaikutusten kanssa vaikeuttaa todellisen venymän arviointia. Lämpöelämisestä ohella venymäliuskoihin ja niiden toimintaan vaikuttaa myös muut tekijät. Vaikka suuressa mittakaavassa venymäliuskat näyttävät keskimäärin samansuuntaisia tuloksia, on yksittäisten antureiden ja anturiparien välillä selkeitä ja osittain päinvastaisia eroja. Seuraavissa kappaleissa listataan muita huomioon otettavia epävarmuustekijöitä.

Rakennososan taipuessa anturin mittauskohdan sijainnilla on merkitys venymän suuruuteen. Lähempänä rakenteen pintaa, eli kauempana rakenneosan neutraaliakselilta sijaitsevan anturin tulisi näyttää suurempaa venymäarvoa. Edellä mainittuun perustuen betonipintaan kiinnitetyn venymäanturin tulisi näyttää suurempaa arvoa kuin syvemmälle rakenteeseen eli betoniraidoitteeseen kiinnitetyn venymäanturin. Tuiranväylän sillan pääpalkit ovat rakennekorkeudeltaan niin korkeita, että anturin etäisyyden aiheuttama virhe jää hyvin pieneksi. Sen sijaan rakennekorkeudeltaan huomattavasti matalampien laattojen kohdalla, erot anturin mittauskohdan etäisyydessä suhteessa neutraaliakseliin, voivat aiheuttaa eroavaisuutta mittaustuloksiin. Tämä voi selittää aikaisemmin esiteltyjen taulukoiden 9 ja 10 tuloksia, joista kävi ilmi, että laatoissa betonipintaan kiinnitetty venymäliuska antaa suhteessa suurempia tuloksia pääpalkkeihin kiinnitettyihin liuskoihin verrattuna.

Venymäliuskojen pituudella voi olla myös vaikutus mitattuun venymäarvoon. Venymäliuskat mittaavat keskimääräisen venymän koko liuskan pituudelta. Betonin epähomogeenisuuden takia betonipinnasta venymiä mitattaessa on hyvä käyttää pidempiä venymäliuskoja venymäpoikkeamien minimoimiseksi (Clauß et al. 2021, s. 2992). Raidoitteisiin jälkikäteen kiinnitettävät venymäliuskat ovat tavanomaisesti lyhyempiä.

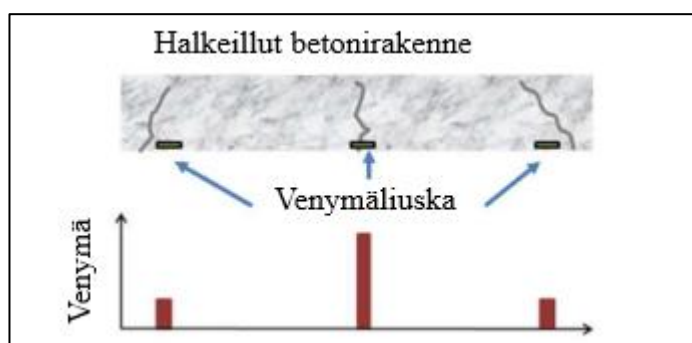
Kuten kappaleessa 5.4.1 kävi ilmi on myös Tuiranväylän sillassa betonipintaan kiinnitetyt liuskat huomattavasti pidempiä kuin betoniraidoitteeseen kiinnitetyt liuskat.

Kun taivutettua teräsbetonirakennetta kuormitetaan tarpeeksi suurella voimalla, syntyy betonin vetolujuuden ylittyessä betonirakenteen alapintaan halkeamia. Kuva 49 esittää periaatteelliset venymäjakaumat betonissa ja raudoituksessa halkeamien kohdalla. Kahden halkeaman välissä betoni venyy, mutta itse halkeamassa betonin venymä on nolla. Raudoituksella suurin venymä on halkeamien kohdalla ja pienin halkeamien välissä. (Leskelä 2008, s. 351)



Kuva 49. Betonin ja raudoitteen venymäprofiilit halkeaman kohdalla (mukaihen Leskelä 2008, s. 352)

Alla olevassa kuvassa (Kuva 50) on esitetty tilanne, jossa raudoitteeseen kiinnitetty venymäliuska sijaitsee halkeaman kohdalla tai sen läheisyydessä. Halkeaman kohdalla raudoitteeseen kohdistuu venymäpiikki, joka voi näkyä venymäliuskan mittaustuloksessa tavallisesta poikkeavana suurempana arvona. Todellisessa mittaustilanteessa on kuitenkin lähes mahdoton määrittää halkeaman tarkkaa kohtaa tai sitä sattuuko liuska sijaitsemaan juuri halkeaman kohdalla betoniraidoitteessa.



Kuva 50. Betoniraidoitteeseen kiinnitetyn venymäliuskan venymäjakauma halkeilleessa betonirakenteessa (mukaihen Barrias et al. 2018, s. 3)

Edellä mainitun takia Tuiranväylän sillan monitorointihankkeessa hyödynnetään sillan rakenneosien kantavuutta arvioitaessa halkeilemattoman poikkileikkauksen jännityksen kautta laskettua taivutusmomenttia. Tätä taivutusmomenttia käytetään poikkileikkauksen taivutusmitoituksessa, jossa teräsjännitys laskennallisesti määritetään halkeilleen poikkileikkauksen mukaan. Tuiranväylän sillan rakenneosien betonipintaan kiinnitetyt liuskat ovat pidempiä ja venymän keskiarvo lasketaan pidemmältä matkalta kuin raudoitteiden liuskoissa. Tämä tasaa venymäpoikkeamia ja saa mittaustuloksen vastaamaan todenmukaisemmin halkeilemattoman betonipoikkileikkauksen venymää raudoitteeseen kiinnitettyyn ja halkeaman läheisyydessä sijaitsevaan liuskaan verrattuna.

Venymäliuska-antureiden tarkkuuteen vaikuttaa myös liuskojen onnistunut asennus. Venymäliuskat mittaavat venymää tavanomaisesti yksiakselisesti eli yhdessä suunnassa. Liuskojen pienen koon takia, liuska voi olla hyvin haastava kiinnittää raudoitetankoon yhdensuuntaisesti raudoitetangon pituusakselin suhteen. Vinoon jäänyt venymäliuska saa aikaan virheen mittauskulmassa, joka johtaa todellista pienempiin venymäarvoihin. Kulmavirheen ohella Barrias et al. (2018, s. 3001) mainitsee tutkimuksessaan, että heikko kosteudelta suojaaminen ja liuskan kiinnitykseen käytetyn liimakerroksen väärä paksuus voivat aiheuttaa virhettä venymäliuskamittauksessa.

6.1.4 Johtopäätökset

Tuiranväylän sillan monitoroinnin kohdalla erityinen huoli oli betonipintaan kiinnitettyjen venymäliuskojen toiminta sillan rakenneosien ruiskubetonoinnin takia. Betonipintaan asennetut venymäliuskat ovat kuitenkin osoittautuneet toimiviksi ja ne antavat tasaisesti hyviä tuloksia. Verrattaessa venymäliuskojen mittausdataa sillan rakennemalliin, betonipintaan kiinnitetyt liuskat antoivat toisiinsa nähden tasaisempia tuloksia ja olivat samassa suuruusluokassa rakennemallin kanssa. Raudoitteisiin kiinnitetyillä liuskoilla vaihtelu oli suurempaa ja liuskojen mittaustuloksissa oli yksittäisiä selkeästi suurempia venymäarvoja. Raudoitteisiin kiinnitettyjen antureiden kohdalla ongelmat liittyvät liuskojen asentamiseen liittyviin epävarmuustekijöihin ja mahdollisuuteen liuskan sijaitsemisesta halkeaman kohdalla tai sen läheisyydessä. Halkeaman läheisyydessä sijaitsevan liuskan mittaustulokseen tulee venymäpiikki, joka vääristää halkeilemattomalle poikkileikkaukselle laskettavaa taivutusmomenttia ja rakenneosan kantavuuden määrittystä. Lisäksi on vaikea arvioida, millaisia vaikutuksia raudoitetangon esiin piikkaaminen aiheuttaa raudoitteen paikalliseen venymään, kuten

esimerkiksi muodostuuko piikattuun kohtaan keinotekoinen halkeama. Nämä tekijät lisäävät entisestään raudoitteisiin kiinnitettyjen venymäliuskojen mittausepävarmuutta.

Edellä mainitun perusteella voidaan todeta, että venymäliuskojen kiinnittäminen betonipintaan olisi riittänyt luotettavien mittaustulosten saamiseen Tuiranväylän sillan monitorointihankkeen kohdalla. Hankkeessa venymäliuskojen kiinnittäminen vain betonipintaan olisi puolittanut venymäliuskojen määrän sekä vähentänyt kerätyn datan määrää noin puolella. Monitorointijärjestelmän asennuskustannuksissa olisi myös säästetty, sillä raudoitteeseen venymäliuskan asentaminen on työlästä ja sisältää ylimääräisiä työvaiheita, kuten esimerkiksi betoniraudoitteen esiin piikkaamisen.

Uuden sillan monitoroinnin kohdalla betonirakenteen sisälle asennettavat venymäanturit voivat olla potentiaalinen vaihtoehto. Venymäliuskat tai venymää mittaavat valokuituanturit on mahdollista asentaa betoniraudoitteisiin kiinni jo sillan rakennusvaiheessa. Helpomman asennettavuuden ohella betonirakenteen sisällä sijaitsevat anturit ovat paremmin suojassa kosteudelta ja muilta ympäristön vaikutuksilta pinta- tai jälkiasennettuihin antureihin verrattuna. Betonirakenteen sisään rakennusvaiheessa kiinnitettävät venymäanturit voivat myös olla pidempiä, jolloin halkeaman aiheuttama jännityspiikki raudoitteessa tasaantuu. Olemassa olevien siltojen betonirakenteiden mittauksissa voisi vaihtoehtoisesti hyödyntää betonipintaan mekaanisesti kiinnitettyjä pidempiä antureita, jotka menisivät myös halkeamien yli ja näyttäisivät keskimääräistä venymäarvoa.

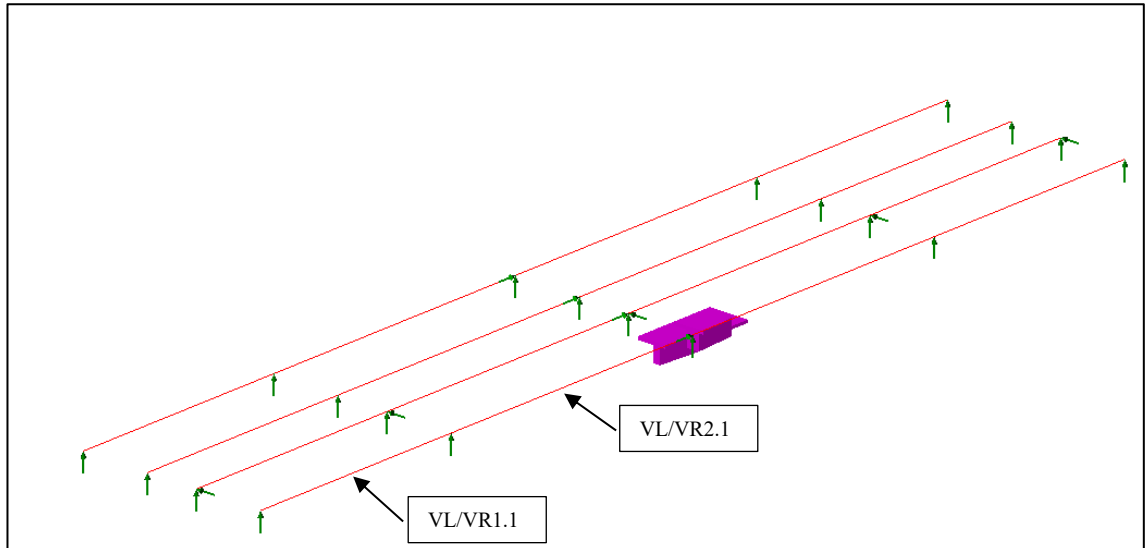
6.2 Vaurion tunnistaminen antureiden mittaustuloksista

Mittalaitteiden asentaminen pitkiin moniaukkoisiin siltoihin on hankalaa. Sillan alla kulkeva ajoväylä vaikeuttaa antureiden asentamista ja voi tehdä monitorointijärjestelmän asentamisen hyvin vaikeaksi ilman liikenteen hetkellistä pysäyttämistä. Todellinen ongelma on suurten vesistösiltojen kohdalla, jolloin antureiden asentaminen jälkikäteen veden yläpuolella oleviin rakenteisiin on erityisen haastavaa. Vaikka sillan alla kulkeva ajo- tai vesiväylä ei itsessään olisi ongelma, aiheutuu antureiden asentamisesta kuluja, joissa olisi mahdollista säästää antureiden määrää vähentämällä ja niiden sijaintia priorisoimalla.

Tässä diplomityössä on tarkoitus tutkia, riittääkö antureiden sijoittaminen vain sillan reuna-aukkoihin. Tälle edellytyksenä on, että sillan keskiaukossa/-tuella tapahtuva mahdollinen vaurio huomataan reuna-aukkojen antureiden mittaustuloksista, jolloin antureita ei tarvitsisi asentaa keskimmäiseen silta-aukkoon. Tutkimus pohjautuu Tuiranväylän sillasta tehtyyn FEM-rakennemalliin ja kyseisen sillan venymäliuska-antureiden sijainteihin, joten tutkimuksessa tehdyt havainnot koskevat vain kyseistä siltaa. Tutkimus suoritetaan simuloimalla vauriota pienentämällä sillan pääpalkin/pääpalkkien jäykkyyttä keskimmäisen tuen kohdalta. Kohta on valittu sen perusteella, että kantavuuslaskennassa on selvinnyt tukimomentin olevan rajoittava tekijä ja jolla on kantokapasiteettia vähiten jäljellä. Keskituen lisäksi tarkastellaan tilannetta, jossa vaurio ilmenee toisessa sillan keskiaukoista. Jäykkyyden pienentäminen suoritetaan pääpalkin pitkittäissuuntaista taivutusvastusta muokkaamalla. Pääpalkin jäykkyyden tippuminen voi vastata käytännön tilannetta, jossa pääpalkin betoniteräksiset ovat alkaneet myötämään. Kun jäykkyys tippuu nolnaan, syntyy palkkiin nivel, joka ei enää kannaa momenttia. Tässä tilanteessa betoniteräksissä murtolujuus on ylitetty ja teräksiset ovat alkaneet katkeilemaan. Kun pääpalkin jäykkyyttä on pienennetty, tarkastellaan miten se vaikuttaa rasitusten jakautumiseen ja jännitysten nousuun pääpalkin muissa osissa. Käytännössä siis selvitetään kuinka paljon prosentuaalisesti antureiden mittaustulokset muuttuvat sillan reuna-aukoissa, kun vaurio ilmenee sillan keskiaukossa tai -tuella.

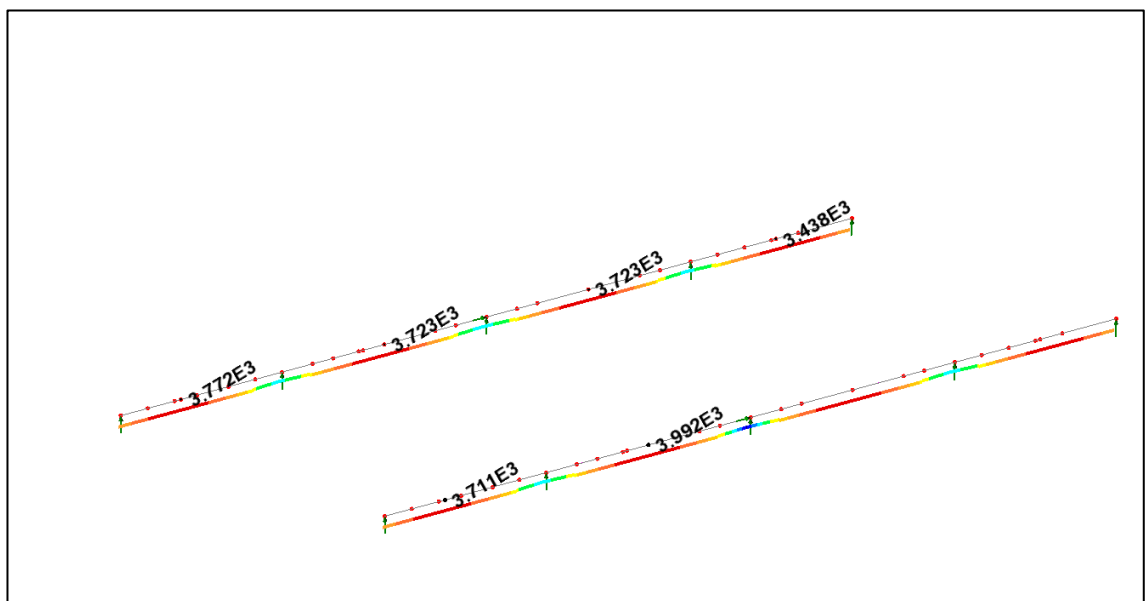
6.2.1 Vaurio keskituen kohdalla pääpalkissa

Ensimmäisessä tapauksessa vaurio tapahtuu sillan keskimmäisen välituen kohdalla sillan reunimmaisessa pääpalkissa. Kuvassa 51 on sillan rakennemalli, jossa näkyy violetilla värillä korostettuna palkkielementti, jonka jäykkyyttä muokataan pienemmäksi. Pääpalkin jäykkyyttä tiputetaan vähitellen ja lopulta tarkastellaan tilannetta, kun jäykkyys on menetetty kokonaan kyseistä kohdasta. Sillan rakennemallia tarkastellaan sekä rakenteen omapainon, että 37 tonnin ajoneuvon aiheuttamilla kuormituksilla. Kun kuormituksena on rakenteen omapaino, on muutokset antureiden mittaustuloksissa mahdollista havaita staattisesta mittaustuloksesta. Sen sijaan ajoneuvojen aiheuttamat mittaustulosten muutokset on mahdollista havaita dynaamisesta mittaustuloksesta, josta nähdään ajoneuvon aiheuttama venymä.



Kuva 51. Reunimmaisen pääpalkin vauriokohta sillan keskituella ja anturien sijainnit.

Rakennemallia, jossa pääpalkin jäykkyyttä on tiputettu verrataan sillan alkuperäiseen rakennemalliin. Taulukkoihin 14 ja 15 on kerätty jännityksen prosentuaalinen muutos reunimmaisissa aukoissa antureiden VL/VR1.1 ja VL/VR2.1 kohdalla pääpalkin jäykkyyden pienentyessä. Tarkastelussa ei ole huomioitu kolmannen ja neljännen aukon antureita, sillä ne käyttäytyvät samoin kuin ensimmäisen ja toisen aukon anturit. Jännitys ja venymä ovat samassa materiaalissa suoraan verrannollisia toisiinsa, joten jännityksen prosentuaalinen muutos vastaa suoraan venymäanturilta odotettua muutosta. Kuvassa 52 on esitetty esimerkkinä rakennemallin tulokset, kun kuormituksen on rakenteen omapaino ja kun pääpalkin jäykkyys on tiputettu tuen kohdalta 50 prosenttiin. Kuvassa ylempänä on alkuperäinen ehjä pääpalkki ja alempana pääpalkki, jossa on vaurio.



Kuva 52. Pääpalkin venymät verrattuna alkuperäiseen poikkileikkaukseen kun pääpalkin jäykkyys on tiputettu keskituen kohdalta 50 prosenttiin

Taulukko 14. Mittaustulosten prosentuaalinen muutos jäykkyyden pienentyessä pääpalkissa keskimmäisen tuen kohdalla kun kuormituksena on rakenteen omapaino.

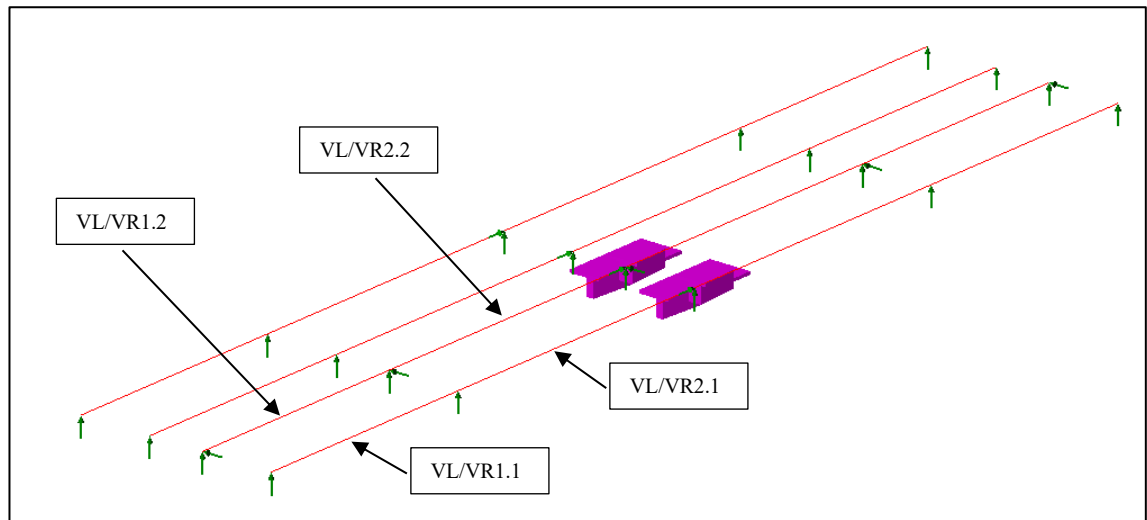
Antureiden mittaustulosten prosentuaalinen muutos jäykkyyden pienentyessä						
Kuormituksena oma paino						
Keskituella reunimmaisena palkin jäykkyyttä jäljellä						
Anturi	100 %	75 %	50 %	25 %	10 %	Nivel
VL/VR1.1	0.0 %	-0.7 %	-1.6 %	-3.3 %	-5.3 %	-10.6 %
VL/VR2.1	0.0 %	3.1 %	7.2 %	14.2 %	22.5 %	44.5 %

Taulukko 15. Mittaustulosten prosentuaalinen muutos jäykkyyden pienentyessä pääpalkissa keskimmäisen tuen kohdalla kun kuormituksena on 37 tonnin ajoneuvo.

Antureiden mittaustulosten prosentuaalinen muutos jäykkyyden pienentyessä						
Kuormituksena 37 tonnin ajoneuvo						
Keskituella reunimmaisena palkin jäykkyyttä jäljellä						
Anturi	100 %	75 %	50 %	25 %	10 %	Nivel
VL/VR1.1	0.0 %	0.1 %	0.1 %	0.2 %	0.4 %	0.7 %
VL/VR2.1	0.0 %	0.9 %	2.2 %	4.3 %	6.7 %	12.1 %

Taulukoista 14 ja 15 huomataan, että antureiden kohdalla havaittu mittaustuloksen muutos on hyvin pieni jäykkyyden pienentyessä. Vaikka pääpalkin jäykkyys keskituen kohdalla olisi menetetty kokonaan, näkyisi tämä reuna-aukon anturissa VL/VR1.1 vain -10.6 % mittaustuloksen eli venymän pienentymisenä, kun kuormituksena on rakenteen omapaino. Kun sillan kuormituksena on 37 tonnin ajoneuvo, on reuna-aukon anturilta VL/VR1.1 oletettu mittaustuloksen muutos lähes nolla. Vauriokohdan viereisessä aukossa sijaitsevalla anturilla VL/VR2.1 muutos on selvästi suurempi, mutta edelleen vaikeasti havaittavissa muissa kuin pahimmissa vauriotilanteissa.

Kuvassa 53 ja taulukossa 16 tarkastelua on laajennettu tilanteeseen, jossa vaurio ilmenee kahdessa vierekkäisessä pääpalkissa, jolloin niiden jäykkyyttä pienennetään saman verran. Tässä tapauksessa käytetään kuormituksena rakenteen omapainoa. Taulukon perusteella huomataan, että merkittävää eroa mittaustulosten muutoksessa ei tapahdu reuna-aukon antureiden osalta verrattuna ensimmäiseen tapaukseen, jossa vain yhden palkin jäykkyyttä oli pienennetty. Äärimmäisessä vauriotilanteessa vaurioituneen kohdan viereisessä aukossa anturin VL/VR2.1 kohdalla havaittaisiin mittaustuloksissa hieman yli 60 % venymän kasvu.



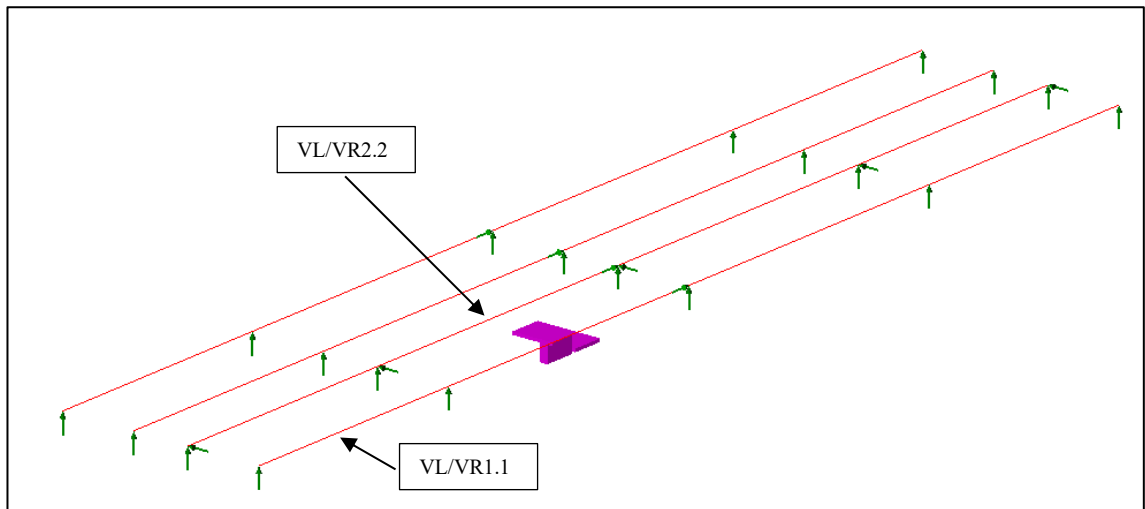
Kuva 53. Pääpalkkien vauriokohdat sillan keskituella ja anturien sijainnit.

Taulukko 16. Mittaustulosten prosentuaalinen muutos jäykkyyden pienentyessä kahdelta reunimmaiselta pääpalkilta keskimmäisen tuen kohdalla.

Antureiden mittaustulosten prosentuaalinen muutos jäykkyyden pienentyessä						
Kuormituksena oma paino						
Keskituella kahden palkin jäykkyyttä jäljellä						
Anturi	100 %	75 %	50 %	25 %	10 %	Nivel
VL/VR1.1	0.0 %	-1.0 %	-2.3 %	-4.6 %	-7.6 %	-16.5 %
VL/VR1.2	0.0 %	-1.0 %	-2.3 %	-4.5 %	-7.4 %	-14.3 %
VL/VR2.1	0.0 %	4.0 %	9.3 %	18.6 %	30.0 %	63.8 %
VL/VR2.2	0.0 %	2.8 %	6.6 %	12.8 %	20.4 %	36.3 %

6.2.2 Vaurio aukon keskellä pääpalkissa

Toisessa tapauksessa tarkastellaan tilannetta, jossa vaurio ilmenee toisessa sillan keskiaukoista. Kuvassa 54 näkyy vaurioituva palkkielementti, jonka jäykkyyttä muutetaan. Antureiden tarkastelupisteet ovat viereisen pääpalkin aukossa sijaitseva anturi VL/VR2.2 ja ensimmäisen pääpalkin reuna-aukossa sijaitseva VL/VR1.1. Tarkastelu suoritetaan sekä rakenteen omapainon että 37 tonnin ajoneuvon aiheuttamalle kuormitukselle.



Kuva 54. Pääpalkin vauriokohta toisen silta-aukon keskellä ja anturien sijainnit.

Alla oleva taulukot 17 ja 18 on koostettu vastaavalla tavalla kuin aiemmin. Tulokset ovat samassa suuruusluokassa aikaisempien taulukoiden tulosten kanssa eivätkä mittaustulokset muutu merkittävästi muuta kuin tilanteessa, jossa jäykkyys on kokonaan menetetty. Reuna-aukon anturin VL/VR1.1 muutokset ovat selvästi pienemmät kun kuormituksena on 37 tonnin ajoneuvo verrattuna tilanteeseen kun kuormituksena on rakenteen omapaino.

Taulukko 17. Mittaustulosten prosentuaalinen muutos jäykkyyden pienentyessä silta-aukon keskellä reunimmaiselta pääpalkilta kun kuormituksena on rakenteen omapaino.

Antureiden mittaustulosten prosentuaalinen muutos jäykkyyden pienentyessä						
Kuormituksena oma paino						
Aukon keskellä reunimmaisesta palkin jäykkyyttä jäljellä						
Anturi	100 %	75 %	50 %	25 %	10 %	Nivel
VL/VR1.1	0.0 %	-0.7 %	-1.8 %	-4.5 %	-8.9 %	-17.2 %
VL/VR2.2	0.0 %	1.3 %	3.3 %	7.8 %	15.9 %	33.5 %

Taulukko 18. Mittaustulosten prosentuaalinen muutos jäykkyyden pienentyessä silta-aukon keskellä reunimmaiselta pääpalkilta kun kuormituksena on 37 tonnin ajoneuvo.

Antureiden mittaustulosten prosentuaalinen muutos jäykkyyden pienentyessä						
Kuormituksena 37 tonnin ajoneuvo						
Aukon keskellä reunimmaisesta palkin jäykkyyttä jäljellä						
Anturi	100 %	75 %	50 %	25 %	10 %	Nivel
VL/VR1.1	0.0 %	0.1 %	0.4 %	1.0 %	2.0 %	5.0 %
VL/VR2.2	0.0 %	1.5 %	4.0 %	10.5 %	21.4 %	49.1 %

6.2.3 Johtopäätökset

Vaurion syntyminen tai olemassa olevan vaurion paheneminen on hankala havaita muissa kuin itse vauriokohdan läheisyydessä sijaitsevien antureiden mittaustuloksissa. Selkeitä

prosentuaalisia eroja antureiden mittaustuloksiin syntyy vasta silloin, kun jäykkyys on täysin menetetty eli pahimmissa onnettomuustilanteissa. Tällöin vaurio on todennäköisesti jo aiheuttanut silmämääräisesti havaittavia muodonmuutoksia siltaan. Näissäkin tilanteissa mittaustulokset muuttuvat vain lähimpänä vaurioitunutta kohtaa sijaitsevilla antureilla, kun taas kauempana sijaitsevien antureiden mittaustulokset pysyvät lähes samoina. Pienemmällä jäykkyyden muutoksilla (75 % - 25 %) vaurion aiheuttama venymien kasvu tai pienentyminen sekoittuu lämpötilamuutosten aiheuttamaan mittaustulosten kausivaihteluun ja muihin mittauksen epävarmuustekijöihin.

Tutkimuksen tulokset osoittavat monitorointitulosten staattisen analyysin tärkeyden, sillä jäykkyyden pieneneminen aiheutti selvästi suurempia muutoksia antureiden mittaustuloksiin, kun kuormituksena oli rakenteen omapaino. Pelkästään dynaamisen mittausdatan perusteella vaurion havaitseminen on haastavaa, sillä muutokset reuna-aukon mittaustuloksissa olivat hyvin pieniä. Tämän tutkimuksen perusteella voidaan todeta, että pelkästään reuna-aukkoihin antureiden sijoittaminen ei ole riittävää vaurion havaitsemiseen sillan keskeltä. Venymäanturit ovat välttämättömiä sillan keskiaukoissa, eli lähellä todennäköisimmin vaurioituvia rasitettuimpia siltarakenteita. Tutkimus osoittaa myös sillan vaurioanalyysin tärkeyden jo sillan monitorointia ja antureiden sijoittelua suunniteltaessa.

7 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Tämän diplomityön tavoitteena oli tehdä selvitys maailmalla siltojen monitorointiin liittyvistä käytännöistä, standardeista ja käytetyimmistä anturityypeistä. Pääpainona oli selvitystyö etenkin pitkäaikaisen ja jatkuvan monitoroinnin osalta. Kirjallisuusselvityksen lähdemateriaalina käytettiin kansainvälisiä aiheesta tehtyjä julkaisuja ja tutkimuksia. Diplomityön aiheen taustalla vaikutti Oulun kaupungin tilaama vuoden 2021 lopulla käynnistynyt Tuiranväylän sillan monitorointihanke. Tuiranväylän sillasta saatu monitorointidata ja sen analysointi oli diplomityön tutkimusosuuden pääosassa. Tutkimuksen päätavoitteiksi muodostui selvittää, miten siltojen monitorointia voitaisiin toteuttaa pienemmässä mittakaavassa ja täten säästää monitorointijärjestelmän asennus- ja ylläpitokustannuksissa.

Kirjallisuusselvityksen alussa perehdyttiin Suomen siltoihin ja niiden kuntoon. Suuri osa tiesilloista alkaa olla elinkaarensa päässä tai odottaa peruskorjausta. Selvityksessä kävi ilmi, että ulkomailla tilanne on vastaava, johtuen siltojen samankaltaisesta ikärakenteesta. Kasvaneet liikennemäärät ja raskaan liikenteen kokonaispainot ovat kasvaneet vuosikymmenten aikana. Alun perin pienemmille kuormille suunnitellut sillat eivät enää kestä nykypäivän liikennettä, jolloin silloille on täytynyt asettaa painorajoituksia.

Siltojen monitoroinniksi kutsutaan siltarakenteen lyhyt- tai pitkäaikaista tilan, kunnan ja toiminnan seuraamista käyttäen automaattisia mittaus- ja analysointilaitteita. Monitorointi voi antaa tietoa sillan vaurioista, kantavuudesta ja jäljellä olevasta käyttöiästä. Diplomityössä esiteltiin monitorointiin liittyviä keskeisimpiä käsitteitä sekä yleisimpiä monitoroinnissa käytettäviä mittaussuureita ja -antureita ja niiden toimintaperiaatteita. Työssä esiteltiin lisäksi tarkemmin yksittäisiä monitorointiprojekteja sekä Suomesta että maailmalta. Kansainvälisistä siltojen monitorointiprojekteista kävi ilmi, että venymä, lämpötila ja värähtely ovat siltatyypistä riippumatta yleisimmät mittaussuureet sekä vanhoja, että uusia siltoja monitoroitaessa. Niiden avulla saadaan tärkeää tietoa sillan rakenneosien jännityksistä, värähtelyistä ja lämpölaajenemisen vaikutuksista.

Diplomityön kirjallisuusselvityksessä käsiteltiin lisäksi siltojen monitorointiin liittyvää lainsäädäntöä sekä standardeja ja ohjeita. Viime vuosikymmenten aikana ympäri maailman on kehitetty ja julkaistu useita siltojen monitorointiin liittyviä ohjeita, normeja

ja standardeja, joiden tarkoituksena on ollut yhtenäistää käytäntöjä ja lisätä tietoisuutta monitoroinnista. Suurin osa olemassa olevista ohjeista ja standardeista pyrkii kuvailemaan tällä hetkellä käytössä olevaa monitorointiteknologiaa ja käsittelee monitorointia vain yleisellä tasolla, mutta ei kuitenkaan aseta tarkempia teknisiä vaatimuksia monitorointijärjestelmille. Muista valtioista poiketen Kiinassa on 2010-luvulla julkaistu useampia siltojen monitorointiin velvoittavia standardeja. Vuonna 2016 julkaistussa standardissa on asetettu suora vaatimus anturoinnin asentamisesta suurille silloille ja tietyille siltatyypeille. Standardit asettavat lisäksi vaatimuksia muun muassa mittausantureiden ominaisuuksille sekä datan siirrolle ja käsittelylle.

Diplomityön Tuiranväylän sillan monitorointihankkeeseen liittyvässä osiossa hyödynnettiin sillasta vuoden monitoroinnin ajalta saatua mittausdataa sekä sillasta LUSAS Bridge -ohjelmistolla tehtyä FEM-rakennemallia. Diplomityön tavoitteena oli selvittää miten monitorointia voidaan suorittaa kevyemmin antureiden lukumäärää vähentämällä, jolloin säästettäisiin monitorointijärjestelmän asennus- ja ylläpitokustannuksissa. Työssä tutkittiin riittääkö venymäliuska-antureiden kiinnittäminen vain betonin pintaan betoniraudoitteen sijasta luotettavan mittaustuloksen saamiseen. Samalla arvioitiin venymäliuskamittaukseen liittyviä epävarmuustekijöitä. Lisäksi tutkittiin, voiko keskellä siltaa ilmenevän vaurion huomata reunimmaisten siltaukkojen antureiden mittaustulosten muutoksesta, jolloin voitaisiin luopua antureiden asentamisesta sillan keskiaukkoon.

Tutkimus suoritettiin tarkastelemalla Tuiranväylän sillan monitoroinnista saatua mittausdataa, jonka perusteella suoritettiin vertailua venymäliuskojen kiinnitystapojen välillä. Vertailua suoritettiin myös tarkastelemalla muutamien suurien ajoneuvojen aiheuttamia venymiä ja vertaamalla niitä rakennemallin vastaaviin tuloksiin. Vertailun perusteella todettiin, että betonipintaan kiinnitetyt venymäliuskat olisivat olleet riittäviä luotettavan mittaustuloksen saamiseen Tuiranväylän sillan monitorointihankkeen kohdalla. Sen sijaan esiin piikattuihin betoniraudoitteisiin kiinnitettyjen venymäliuskojen mittaustuloksiin liittyi enemmän vaihtelua ja epävarmuutta.

Toinen tutkimuskysymys liittyi vaurion tunnistamiseen mittaustuloksista. Tutkimus toteutettiin simuloimalla keskelle siltaa syntyvää vauriota sillan rakennemallissa. Vauriota simuloitiin pienentämällä rakennemallissa sillan pääpalkin jäykkyyttä oletetussa vauriokohdassa. Tutkimuksessa tarkasteltiin kahta tapausta, joista toisessa vaurio ilmenee

sillan keskimmäisen tuen kohdalla pääpalkissa ja toisessa tapauksessa vaurio syntyy pääpalkkiin toisessa sillan keskiaukoista. Tämän jälkeen tarkasteltiin miten sillan rasitukset jakautuvat ja laskentatulokset muuttuvat vaurioituneessa tilanteessa, joka olisi suoraan verrattavissa todellisessa rakenteessa sijaitsevien antureiden mittaustulosten muutokseen. Tutkimuksen tuloksena todettiin, että sillan keskikohdalla reunimmaisen pääpalkin jäykkyyden tippuminen puoleen (50 %), aiheuttaisi vain noin 2 % muutoksen reuna-aukon venymäanturin mittaustuloksessa. Jäykkyyden tippuminen kymmenesosaan (10 %) aiheuttaisi myös vain 5 % muutoksen mittaustulokseen. Vaurion aiheuttama venymien kasvu tai pienentyminen sekoittuu helposti lämpötilamuutosten aiheuttamaan mittaustulosten kausivaihteluun ja muihin mittauksen epävarmuustekijöihin. Näin ollen todettiin, että siltaan syntyvää vauriota ei pysty luotettavasti havaitsemaan kauempana vauriokohtaa sijaitsevistä venymäantureista ennen kuin vaurio on tapahtunut ja sillan jäykkyys kyseisessä kohtaa on kokonaan menetetty. Tulosten perusteella tehtiin johtopäätös, että venymäantureiden asentaminen ainoastaan sillan reuna-aukkoihin ei olisi ollut riittävää vaurion havaitsemiseen muualta sillasta.

LÄHDELUETTELO

Aktan, A., Catbas, F., Grimmelsman, K. & Pervizpour, M., 2002. Development of a Model Health Monitoring Guide for Major Bridges [verkkodokumentti]. Philadelphia: Federal Highway Administration Research and Development. Saatavissa: <https://www.scribd.com/document/343127708/Development-of-a-Model-Health-Monitoring-Guide-for-Major-Bridges> [viitattu 1.8.2022]

ANSHM, 2022. Introduction, Australian Network of Structural Health Monitoring (ANSHM) [verkkosivu]. ANSHM. Saatavissa: <https://www.anshm.org.au/introduction.html> [viitattu 1.8.2022]

ARTBA, 2021. Bridge Conditions Report [verkkodokumentti]. American Road & Transportation Builders Association. Saatavissa: <https://artbabridgereport.org/reports/2021-ARTBA-Bridge-Report.pdf> [viitattu 1.8.2022]

Autoalan Tiedotuskeskus, 2022. Liikennekäytössä olevan autokannan kehitys. Tilastot, Autokannan kehitys [verkkosivu]. Autoalan Tiedotuskeskus. Saatavissa: https://www.aut.fi/tilastot/autokannan_kehitys/liikennekaytossa_olevat_autot [viitattu 14.10.2022]

Barrias, A., Casas, J. & Villalba, S., 2018. Embedded Distributed Optical Fiber Sensors in Reinforced Concrete Structures—A Case Study [verkkodokumentti]. *Sensors*, 18 (4), s. 980-1002. Saatavissa: <https://www.mdpi.com/1424-8220/18/4/980/htm#B4-sensors-18-00980> [viitattu 18.11.2022]

Brownjohn, J.M.W., De Stefano, A., Xu, Y.L., Wenzel, H. & Aktan, A., 2011. Vibration-based monitoring of civil infrastructure: challenges and successes [verkkodokumentti]. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 1 (3–4). s. 79–95. Saatavissa: <https://eprints.whiterose.ac.uk/152418/1/PDF%2023.pdf> [viitattu 30.8.2022]

Cadence, 2022. The Need for Temperature Compensation in a Strain Gauge [verkkosivu]. Cadence system analysis. Saatavissa: <https://resources.system-analysis.cadence.com/blog/msa2020-the-need-for-temperature-compensation-in-a-strain-gauge> [viitattu 10.11.2022]

Clauß, F., Ahrens, M. & Mark, P., 2020. A comparative evaluation of strain measurement techniques in reinforced concrete structures—A discussion of assembly, application, and accuracy [verkkodokumentti]. *Structural Concrete*, 22 (5), s. 2992-3007. Saatavissa: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/suco.202000706> [viitattu 18.11.2022]

Culbertson A., 2018. France: 840 bridges are at risk of collapse, audit warns government [verkkodokumentti]. *Iso-Britannia: Sky News*. Saatavissa: <https://news.sky.com/story/france-840-bridges-are-at-risk-of-collapse-audit-warns-11476690> [viitattu 1.8.2022]

Dimense, 2014. Ahvenkosken sillan monitorointi, S115 [verkkodokumentti]. Saatavissa: https://dimense.fi/site/assets/files/1358/ahvenkosken_sillan_monitorointi.pdf [viitattu 18.11.2022]

Dong, C.Z. & Catbas, N., 2020. A review of computer vision-based structural health monitoring at local and global levels [verkkodokumentti]. *Structural Health Monitoring*, 29 (2). Saatavissa: <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/1475921720935585> [viitattu 2.8.2022]

EHP Environment, 2021. Tuiranväylän sillan monitorointi – järjestelmäkuvaus.

Elfgrén, L., Olofsson, J., Bell, B., Paulsson, B., Niederleithinger, E., Jensen, J., Feltrin, G., Täljsten, B., Cremona, C., Kiviluoma, R. & Bien, J., 2008. Sustainable Bridges – Assessment for Future Traffic Demands and Longer Lives [verkkodokumentti]. Sweden: Skanska Sverige AB. Saatavissa: https://cordis.europa.eu/docs/results/1/1653/121979191-6_en.pdf [viitattu 17.8.2022]

Erkkilä, I., 2021. Ahvenkosken sillan monitorointitulosten analysointi [opinnäytetyö]. Oulun Yliopisto: Jultika. Saatavissa: <http://jultika.oulu.fi/Record/nbnfioulu-202105197911> [viitattu 18.11.2022]

Faridazar, F., 2019. Toward Self-Diagnosing Bridges [verkkodokumentti]. *Public Roads*, 82(4). Saatavissa: <https://highways.dot.gov/public-roads/winter-2019/toward-self-diagnosing-bridges> [viitattu 18.11.2022]

Fidler, P., Vardanega, P., Houlst, N. & Middleton C., 2021. Long-Term monitoring of the Humber Bridge Hessle anchorage chamber [verkkodokumentti]. Lontoo: University of Bristol. Saatavissa: <https://research-information.bris.ac.uk/en/publications/long-term-monitoring-of-the-humber-bridge-hessle-anchorage-chambe> [viitattu 18.11.2022]

Gatti, M., 2019. Structural health monitoring of an operational bridge: A case study [verkkodokumentti]. *Engineering Structures*, 195, s. 200-209. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029618336563> [viitattu 18.11.2022]

González, I., 2011 Study and Application of Modern Bridge Monitoring Techniques [verkkodokumentti]. Sweden: KTH Royal Institute of Technology. Saatavissa: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:458107/FULLTEXT01.pdf> [viitattu 30.8.2022]

Hakola, I., Halonen, M., & Vesikari, E., 2008. Monitoring of bridges [verkkodokumentti]. VTT Technical Research Centre of Finland: VTT Tutkimusraportti No. VTT-R-11201–08. Saatavissa: https://cris.vtt.fi/ws/portalfiles/portal/33838107/VTT_R_11201_08.pdf [viitattu 5.7.2022].

IM-SAFE, 2022. Project, Approach [verkkosivu]. Hollanti: TNO. Saatavissa: <https://im-safe-project.eu/project/approach/> [viitattu 30.8.2022]

IM-SAFE, 2021. Standardisation in monitoring, safety assessment and maintenance of the transport infrastructure: current status and future perspectives, Publications [verkkodokumentti]. Hollanti: TNO. Saatavissa: <https://im-safe-project.eu/publications/standardisation-in-monitoring-safety-assessment-and-maintenance-of-the-transport-infrastructure-current-status-and-future-perspectives/> [viitattu 30.8.2022]

ITV, 2012. 40 years since work began on Humber Bridge [verkkosivu]. Saatavissa: <https://www.itv.com/news/calendar/2012-07-27/40-years-since-work-began-on-humber-bridge> [viitattu 18.11.2022]

Kjellman, J., 2014. Tuiranväylän silta – Tarkastusraportti. Oulu: Ramboll Finland Oy.

Leskelä, M.V., 2008. BY210 – Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus. Helsinki: Suomen Betoniyhdistys r.y., 711 s. ISBN 978-952-5075-96-0

Liikennevirasto, 2015a. Akselimassatutkimus 2013–2014, Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä, Loppuraportti [verkkodokumentti]. Saatavissa: https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/120897/lts_2015-67_978-952-317-179-4.pdf?sequence=3 [viitattu 30.8.2022]

Liikennevirasto, 2015b. Siltojen kantavuuslaskentaohje, Liikenneviraston ohjeita [verkkodokumentti]. Helsinki: Liikennevirasto Saatavissa: https://ava.vaylapilvi.fi/ava/Julkaisut/Liikennevirasto/lo_2015-36_siltojen_kantavuuslaskentaohje_web.pdf [viitattu 30.8.2022]

Liikennevirasto, 2015c. InfraTeema-tutkimushankkeen vuosien 2010–2014 arviointi, Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä [verkkodokumentti]. Helsinki: Liikennevirasto. Saatavissa: https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lts_2015-69_infrateema-tutkimushankkeen_web.pdf [viitattu 1.8.2022]

Liikennevirasto, 2016a. Siltojen monitorointikäsi kirja, Liikenneviraston oppaita [verkkodokumentti]. Helsinki: Liikennevirasto. Saatavissa: <https://www.doria.fi/handle/10024/130143> [viitattu 5.7.2022].

Liikennevirasto, 2016b. Siltojen monitorointiohje, Liikenneviraston ohjeita [verkkodokumentti]. Helsinki: Liikennevirasto. Saatavissa: https://ava.vaylapilvi.fi/ava/Julkaisut/Liikennevirasto/lo_2016-18_siltojen_monitorointiohje_web.pdf [viitattu 5.7.2022].

Linderman, L., Brown, R., McCoy, R., Shield, C. & Hedegaard, B., 2020. Ten-Year Review of Monitoring System on I-35W Saint Anthony Falls Bridge [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://cts-d8resmod-prd.oit.umn.edu/pdf/mndot-2020-19.pdf> [viitattu 30.8.2022]

Lyöri, V., 2014. Ahvenkosken maantiesillan pääkannattajan alalaippaan kiinnitetty FBG-valokuituanturi [valokuva].

Lyöri, V., 2020. Kaksi venymäliuskaa kiinnitettynä Logomon kävelysillan ripustustankoon [valokuva].

Lyöri, V., 2021. Venymäliuska-asennuksia [valokuva].

Mackinac Bridge Authority, 2019. Innovative sensor testbed expansion slated for Mighty Mac [verkkosivu]. Michigan: Mackinac Bridge Authority. Saatavissa: <https://www.mackinacbridge.org/innovative-sensor-testbed-expansion-slated-for-mighty-mac/> [viitattu 13.9.2022]

Mackinac Bridge Authority, 2008. Mackinac Bridge from Bridge Authority boat July 25th 2008 [valokuva]. Michigan: Mackinac Bridge Authority. Saatavissa: <https://www.mackinacbridge.org/2016-gallery/nggallery/page/2> [viitattu 14.10.2022]

Majumder, M., Gangopadhyay, T., Chakraborty, A., Dasgupta, K. & Bhattacharya, D.K., 2008. Fibre Bragg gratings in structural health monitoring – Present status and applications [verkkodokumentti]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 147 (1), s. 150–164. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924424708002380?via%3Dihub> [viitattu 30.8.2022]

Minnesota Legislature, 2020. Minneapolis Interstate 35W Bridge Collapse [verkkodokumentti]. Minnesota: Minnesota Legislature. Saatavissa: <https://www.lrl.mn.gov/guides/guides?issue=bridges> [viitattu 2.8.2022]

Moreu, F., Li, X., Li, S. & Zhang, D., 2018. Technical Specifications of Structural Health Monitoring for Highway Bridges: New Chinese Structural Health Monitoring Code [verkkodokumentti]. *Frontiers in Built Environment: Structural Sensing, Control and Asset Management*. Saatavissa: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fbuil.2018.00010/full> [viitattu 1.8.2022]

Mufti A., 2001. Guidelines for Structural Health Monitoring [verkkodokumentti]. Winnipeg: ISIS. Saatavissa: <https://pdfcoffee.com/22-structural-health-monitoring-manual-isis-pdf-free.html> [viitattu 1.8.2022]

Noel, A., Abdaoui, A., Elfouly, T., Ahmed, M., Badawy, A. & Shehata, M., 2017. Structural Health Monitoring Using Wireless Sensor Networks: A Comprehensive Survey [verkkodokumentti]. IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS & TUTORIALS, 19 (3), s. 1993-2002. Saatavissa: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7894175> [viitattu 9.9.2022]

Paakkunainen, J., 2021. O-1618, Tuiranväylän silta - Tarkastusraportti. Oulu: Ponvia.

Puuinfo, 2021. Puupäivä 4.11.2021 / Siltapäivä. Tapiolantien puusillan monitorointi ja Click Design, 4:42:52-5:10:08. VTT [youtube-video] Saatavissa: <https://www.youtube.com/watch?v=ZpmC2BAcyUA> [viitattu 12.9.2022]

Raudasoja, V., 2021. Tuiranväylän silta [valokuva].

Raudasoja, V., 2022a. Tuiranväylän silta [valokuva].

Raudasoja, V., 2022b. O-1618, Tuiranväylä silta – kuukausiraportti nro 12.

RIL, 2018. Sillat – suunnittelu, toteutus ja ylläpito. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, 509 s. ISBN 978-951-758-629-0

Rizzo, P. & Enshaeian, A., 2021a. Challenges in Bridge Health Monitoring: A Review [verkkodokumentti]. Sensors, 21 (3), s. 1–18. Saatavissa: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/13/4336> [viitattu 9.9.2022]

Rizzo, P. & Enshaeian, A., 2021b. Bridge health monitoring in the United States: A review [verkkodokumentti]. Structural Monitoring and Maintenance, 8 (1), s. 1-50. Saatavissa: <http://www.techno-press.org/content/?page=article&journal=smm&volume=8&num=1&ordernum=1> [viitattu 2.10.2022]

Rodrigues, C., Félix, C., Lage, A. & Figueiras, J., 2010. Development of a long-term monitoring system based on FBG sensors applied to concrete bridges [verkkodokumentti]. Engineering Structures, 32 (8), s. 1993–2002. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029610000866?via%3Dihub> [viitattu 30.8.2022]

Rücker, W., Hille, F. & Rohrman, R., 2006. Guideline for Structural Health Monitoring [verkkodokumentti]. Berliini: SAMCO. Saatavissa: http://www.samco.org/network/download_area/mon_guide.pdf [viitattu 1.8.2022]

Rymsza, J., 2021. Causes of the Collapse of the Polcevera Viaduct in Genoa, Italy [verkkodokumentti]. Applied sciences, 11 (17), s. 1-20 Saatavissa: <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/17/8098> [viitattu 15.9.2022]

SAMCO, 2006. Network [verkkodokumentti]. SAMCO. Saatavissa: <http://www.samco.org/network/index.htm> [viitattu 1.8.2022]

Savcor, 2022. Kirjalansalmen OHM – järjestelmäkuvaus.

Sazonov, E., Krishnamurthy, V. & Schilling, R., 2010. Wireless intelligent Sensor and Actuator Network – A Scalable Platform for Time-synchronous Applications of Structural Health Monitoring [verkkodokumentti]. Structural Health Monitoring 9 (5), s. 465-476. Saatavissa: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1475921710370003> [viitattu 9.9.2022]

SEWilco, 2008. I-35W Saint Anthony Falls Bridge [valokuva]. Saatavissa: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Saint_Anthony_\(35W\)_Bridge_river_view_2008-09-18.JPG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Saint_Anthony_(35W)_Bridge_river_view_2008-09-18.JPG) [viitattu 17.10.2022]

Taitorakennerekisteri, 2019a. Tapiolantien risteysilta [valokuva]. Saatavissa: <https://extranet.vayla.fi/trex/#/rakenne/45081/> [viitattu 14.10.2022]

Taitorakennerekisteri, 2019b. Kirjalansalmen silta [valokuva]. Saatavissa: <https://extranet.vayla.fi/trex/#/rakenne/19382/> [viitattu 14.10.2022]

Taitorakennerekisteri, 2022a. KaS-1500 Ahvenkosken itäinen silta [verkkosivu]. Saatavissa: <https://extranet.vayla.fi/trex/#/rakenne/2959> [viitattu 18.10.2022]

Taitorakennerekisteri, 2022b. Taitorakennerekisteri. Väylävirasto [verkkosivu].

Tieyhdistys, 2009. Monitorointi siltojen kunnan ja turvallisuuden seurannan apuna [verkkodokumentti]. Tie & Liikenne, 3, s. 6-8. Saatavissa: https://www.tieyhdistys.fi/site/assets/files/1351/tl3_2009.pdf [viitattu 18.11.2022]

Tirkkonen, T. & Juntunen, J., 1995. Siltojen koekuormitukset vuosina 1983–1993 [verkkodokumentti]. Espoo: VTT Technical Research Centre of Finland. Saatavissa: <https://cris.vtt.fi/en/publications/loading-tests-of-bridges-between-1983-and-1993> [viitattu 30.8.2022]

Traficom, 2021. Liikenne maanteillä. Tilastot [verkkosivu]. Traficom. Saatavissa: <https://tieto.traficom.fi/fi/tilastot/liikenne-maanteilla?toggle=L%C3%A4hteet%20ja%20lis%C3%A4tiedot> [viitattu 30.8.2022]

Vardanega, P., Webb, G., Fidler, P., Huseynow, F., Kariyawasam, K. & Middleton C., 2022. 32 – Bridge Monitoring [verkkodokumentti]. Innovative Bridge Design Handbook: Construction, Rehabilitation and Maintenance. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128235508000238?via%3Dihub> [viitattu 1.8.2022]

Vanhatalo, V., 2022. VS: Diplomityö siltojen monitoroinnista - Diplomityökokous 5 [yksityinen sähköpostikeskustelu]. Vastaanottaja Mäki-Mantila, A. Lähetetty 15.12.2022 klo 16.15 (GMT +0200)

VTT, 2008. SIMO, Siltojen monitorointi [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://docplayer.fi/16659968-Simo-siltojen-monitorointi-ilkka-hakola-vtt.html> [viitattu 2.8.2022]

Väylävirasto, 2021a. Liikenneväylien korjausvelka 2021, Väyläviraston julkaisuja 5/2021 [verkkodokumentti]. Helsinki: Väylävirasto. Saatavilla: <https://www.doria.fi/handle/10024/181983> [viitattu 2.8.2022]

Väylävirasto, 2021b. Väyläviraston sillat 31.12.2020, Väyläviraston julkaisuja 38/2021 [verkkodokumentti]. Helsinki: Väylävirasto. Saatavilla: <https://www.doria.fi/handle/10024/181299> [viitattu 2.8.2022]

Väylävirasto, 2022a. Mt180 Kirjalansalmen ja Hessundinsalmen siltojen uusiminen [verkkodokumentti]. Väylävirasto. Saatavissa: https://www.maanmittauslaitos.fi/sites/maanmittauslaitos.fi/files/V%C3%A4yl%C3%A4_esitys_Hessund_Wikstr%C3%B6m.pdf [viitattu 2.12.2022]

Väylävirasto, 2022b. Taitorakennerekisteri. Sillat ja muut taitorakenteet. Palveluntuottajalle [verkkosivu]. Väylävirasto. Saatavissa: <https://vayla.fi/palveluntuottajat/sillat/trex> [viitattu 19.10.2022]

Webb, G., Vardanega, P. & Middleton, C., 2015. Categories of SHM Deployments: Technologies and Capabilities [verkkodokumentti]. *Journal of Bridge Engineering* 20 (11). Saatavissa: <https://ascelibrary.org/doi/epdf/10.1061/%28ASCE%29BE.1943-5592.0000735> [viitattu 1.9.2022]

Xi, R., He, Q. & Meng, X., 2021. Bridge monitoring using multi-GNSS observations with high cutoff elevations: A case study [verkkodokumentti]. *Measurement*, 168, s. 1–13. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224120308423> [viitattu 2.8.2022]

Xu, Y. & Xia, Y., 2012. *Structural Health Monitoring of Long-Span Suspension Bridges* [verkkodokumentti]. Lontoo: CRC Press. Saatavissa: <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/b13182/structural-health-monitoring-long-span-suspension-bridges-lin-xu-yong-xia> [viitattu 9.10.2022] s. 390

Yang, Y., Li, QS. & Yan, BW., 2017 Specifications and applications of the technical code for monitoring of building and bridge structures in China [verkkodokumentti]. *Advances in Mechanical Engineering*, 9 (1). Saatavissa: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1687814016684272> [viitattu 2.8.2022]

Ymsza, J., 2021. Causes of the collapse of the Polcevera Viaduct in Genoa, Italy [verkkodokumentti]. *Applied Sciences*, 11 (17), s. 1–20. Saatavissa: <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/17/8098/htm> [viitattu 2.8.2022]

Zangeneh, A., Svedholm, C.M. & Johansson, M., 2013. Effects of restrained thermal strains in transversal direction of concrete slab frame bridges [verkkodokumentti]. Tukholma: KTH Royal Institute of Technology. Saatavissa:

https://www.researchgate.net/publication/324978731_Effects_of_restrained_thermal_strains_in_transversal_direction_of_concrete_slab_frame_bridges [viitattu 30.11.2022]

Zhou, G., Yi, T., Li, W., Zhong, J. & Zhang, G., 2020. Standardization construction and development trend of bridge health monitoring systems in China [verkkodokumentti]. *Advances in Bridge Engineering*, 1 (13), s. 1–18. Saatavissa: <https://aben.springeropen.com/track/pdf/10.1186/s43251-020-00016-5.pdf> [viitattu 2.8.2022]

Åman, M., 2008. Merikosken siltojen kantavuustarkastelu -Tuiranväylän silta. Oulu: Ramboll Finland Oy.

43 Clicks North, 2020. Photo of the Humber Bridge, Hull [valokuva]. Hull: 43 Clicks North. Saatavissa: https://unsplash.com/photos/psZVH_TDH_s [viitattu 14.10.2022]