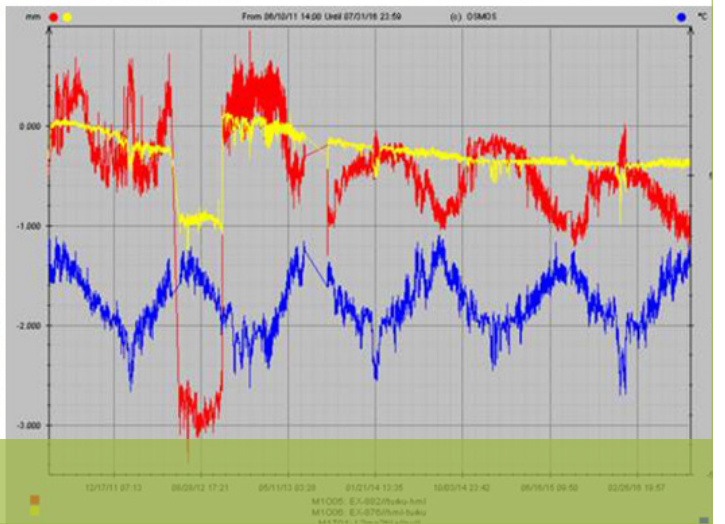
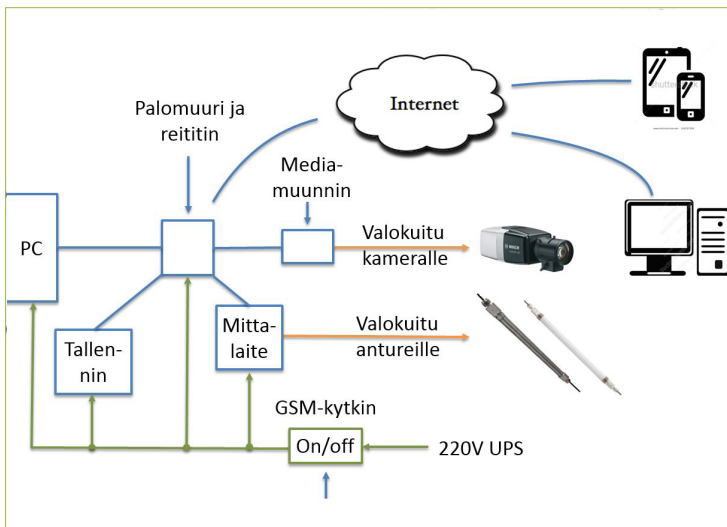


Siltojen monitorointikäsikirja



Siltojen monitorointikäsikirja

Liikenneviraston oppaita 2/2016

Liikennevirasto
Helsinki 2016

Kannen kuvat: Dimense Oy, Savcor Oy, Inspecta Oy ja Liikenneviraston kuva-arkisto

Verkojulkaisu pdf (www.liikennevirasto.fi)

ISSN-L 1798-6591

ISSN 1798-6605

ISBN 978-952-317-322-4

Liikennevirasto

PL 33

00521 HELSINKI

Puhelin 0295 34 3000

Tekniikka ja ympäristö -osasto

Korvaa

-

Voimassa

1.1.2017 alkaen toistaiseksi

Asiasanat

Sillat, monitorointi, anturit, mittauslaitteet, kuormitus, oppaat

Siltojen monitorointikäsikirja

Liikenneviraston oppaita 2/2016

Siltojen monitorointikäsikirja sisältää tie- ja rautatiesiltojen sekä soveltuvin osin muiden taitorakenteiden monitorointiin liittyviä teknisiä ohjeita ja vaatimuksia. Käsikirjan tarkoitus on luoda yhtenäiset ohjeet antureiden valinnalle, monitoroinnin suorittamiselle ja tulosten analysoinnille. Käsikirjassa on myös ohjeet monitorointitulosten systemaattiseksi tallentamiseksi niin, että tuloksia voidaan lukea tulevaisuudessa, vaikka ohjelmistot ja laitteet muuttuisivatkin.

Tekninen johtaja

Markku Nummelin

Projektipäällikkö

Timo Tirkkonen

Opas hyväksytään sähköisellä allekirjoituksella.

Merkintä sähköisestä allekirjoituksesta on viimeisellä sivulla.

LISÄTIETOJA

Timo Tirkkonen

Liikennevirasto

puh. 029 534 3616

Esipuhe

Julkaisua 'Siltojen monitorointikäsikirja' ja tilaajalle tarkoitettua ohjetta 'Siltojen monitorointiohje' käytetään maantie-, rautatie- ja katusiltojen sekä kevyen liikenteen siltojen monitoroinnissa. Monitorointikäsikirja on tarkoitettu erityisesti siltojen suunnittelijoille ja monitorointia suorittaville yrityksille, mutta se antaa myös lisätietoa siltojen omistajille ja niiden kunnosta huolehtiville organisaatioille, kun suunnitellaan sillan monitoroinnin aloittamista. Julkaisua voidaan käyttää soveltuvin osin myös muiden taitorakennetyyppien monitoroinnissa.

Tämä julkaisu sisältää ohjeet siltojen monitorointitavoista, antureiden valinnasta, mittaustaitteiden ja mittausten vaatimuksista sekä mittaustulosten analysoinnista ja tallentamisesta. Julkaisuun on liitetty myös yleistä ohjeistusta siltojen koe-kuormituksista. Käsikirjan ohjeistus on laadittu siten, että monitorointi on osa siltojen yhtenäistä hallintajärjestelmää, jolloin tulevaisuudessa monitoroitujen siltojen mittaus- ja analysointituloksia voidaan hyödyntää systemaattisesti ja tehokkaasti ja ohjata niillä korjaus- ja kunnossapitotoimenpiteiden optimoitua suunnittelua ja ajoittamista.

Siltojen monitorointikäsikirja on tarkoitettu käytettäväksi uusien siltojen osalta sillan rakennussuunnittelu- ja toteutusvaiheissa ja olemassa olevien siltojen osalta korjaus- ja kunnossapitovaiheissa, kun suunnitellaan sillan monitorointia lisätietojen saamiseksi sillan toiminnasta, kunnosta, ympäristöasituksista ja yli kulkevasta liikenteestä. Ohjeen lopussa on annettu ohjeet sillan systemaattisen monitorointisuunnitelman laatimiseksi.

Julkaisussa tie-, katu- ja rautatiesilloista käytetään yleisesti termiä silta, ellei kyseinen kohta koske erikseen määrätyn väylätyypin siltaa.

Tämän julkaisun on laatinut Liikenneviraston toimeksiannosta työryhmä, johon ovat kuuluneet Janne Wuorenjuuri, Kalle Nikula ja Timo Lahti VR Track Oy:stä, Ari Savolainen SITO Oy:stä sekä Keijo Koski ja Ilkka Hakola VTT Oy:stä. Lisäksi tekstin kirjoituksessa ovat avustaneet Pekka Toivola Savcor Oy:stä, Leena Sarell-Kankaanpää Inspecta Oy:stä ja Veijo Lyöri Dimense Oy:stä. Liikenneviraston edustajat ohjausryhmässä ovat olleet Timo Tirkkonen (pj.), Olli Pyykönen, Heikki Lilja, Jani Meriläinen ja Heini Raunio. Julkaisun loppueditoinnista on vastannut Timo Tirkkonen Liikennevirastosta.

Helsingissä joulukuussa 2016

Liikennevirasto
Tekniikka ja ympäristö -osasto, taitorakenneyksikkö

Sisällysluettelo

1	JOHDANTO	7
1.1	Julkaisun tarkoitus	7
1.2	Monitoroinnin määritelmä	8
2	MONITOROINNIN TARPEET JA TAVOITTEET	11
2.1	Rakenteellinen toiminta	11
2.2	Kuormitukset	13
2.3	Kunnon ja toiminnan seuranta	15
2.4	Rakentamisen laadun valvonta	16
2.5	Ympäristöolosuhteet	16
3	MONITOROINTIMENETELMÄT	18
3.1	Jatkuva monitorointi	18
3.2	Jaksottainen monitorointi	19
3.3	Kertamonitorointi	19
3.4	Monitoroinnin toimivuusluokittelu	20
4	MONITOROINNIN LAAJUUS	21
4.1	Erikoislaaja monitorointi	21
4.2	Laaja monitorointi	21
4.3	Suppea monitorointi	22
5	MITTAUSSUUREET JA ANTURIT	23
5.1	Yhteenveto antureista	23
5.2	Sillan rakenteellista toimintaa mittaavat anturityypit	23
5.2.1	Siirtymä, taipuma, liike	23
5.2.2	Venymä, jännitys	28
5.2.3	Värähtely	33
5.2.4	Voima	36
5.3	Sillan kuntoa ja olosuhteita mittaavat anturityypit	38
5.3.1	Kosteus	38
5.3.2	Lämpötila	39
5.3.3	Säätiedot	40
5.3.4	Aallon eteneminen (teräsrakenteet)	41
5.3.5	Teräsrakenteiden vaurioituminen	41
5.3.6	Betoniraudoituksen korroosio	42
5.3.7	Betonin vaurioituminen	43
5.4	Muut liikennettä ja sillan ominaisuuksia mittaavat anturityypit	43
5.4.1	Tieliikenne	44
5.4.2	WIM (Weight in Motion, liikkuvan ajoneuvon painon mittaus)	45
5.4.3	Mittausajoneuvo, mittausvaunu	45
5.4.4	Videokuva	46
5.4.5	Tutka	46
5.4.6	Melumittaus	46
5.4.7	Langattomat anturit	46
5.4.8	Anturin paikan määrittäminen	47
6	MITTAUSTARKKUUS SILTAMITTAUKSISSA	48
6.1	Anturin kiinnittämisen ja kiinnityskohdan aiheuttama epävarmuus	48
6.2	Mittalaitteen ja anturien mittaustarkkuus	50

7	MITATUN TIEDON TALLENNUS TIETOKANTAAN.....	54
7.1	Tiedostomuodot ja rajapinnat.....	54
7.2	Mittaustiedon pitkäaikainen arkistointi ja tallennusformaatti	56
7.3	Reaaliaikainen seuranta	60
7.4	Tiedonsiirto monitorointikohteelta	61
8	TULOSTEN RAPORTOINTI JA ANALYSOINTI	63
8.1	Analysointimenetelmät	63
8.2	Triggausarvot ja hälytykset	64
8.3	Raportointi	65
8.4	Johtopäätökset tulosten käsittelystä	65
9	KOEKUORMITUS	66
9.1	Koekuormituksen tarkoitus.....	66
9.2	Koekuormituksen suoritus	67
9.3	Koekuormitusajoneuvojen päämitat ja akselipainot.....	67
9.4	Koekuormitusasennot ja ajoneuvojen ajolinjat sillalla.....	68
9.5	Koekuormitus rautatiesilloilla.....	71
10	MONITOROINNIN SUUNNITTELU	72
10.1	Monitorointisuunnitelma.....	72
10.2	Monitoroinnin toteutussuunnitelma	79
	VIITTEET.....	86
	LIITTEET	
Liite 1	Monitoroinnin käsitteet	
Liite 2	Anturin paikan määrittäminen	
Liite 3	Tulosten ja mittalaitteiden tarkkuus, luotettavuus ja kalibrointi	
Liite 4	Esimerkki siltojen monitorointidatan arkistoinnista	
Liite 5	Esimerkki koekuormitusajoneuvojen ja koekuormitusajoneuvojen dokumentoinnista koekuormituksessa	
Liite 6	Esimerkki monitorointisuunnitelman ja monitoroinnin toteutus-suunnitelman keskeisimmistä asioista	

1 Johdanto

Monitoroinnilla tarkoitetaan rakenteen lyhyt- tai pitkäaikaista tilan, kunnan ja toiminnan seurantaan käyttäen automaattisia mittaus- ja analysointilaitteita. Sillan monitoroinnin tarkoitus on antaa tarkkaa ja usein pitkäaikaista mittaustietoa sillan käyttäytymisestä, rasituksista tai turmeltumisesta. Vanhoilla silloilla monitorointiin ryhdytään yleensä sillan tarkastuksen jälkeen, kun sillassa on havaittu vaurioita tai myös silloin, kun sillan kantavuus ei ole laskennallisesti enää riittävä. Uusia siltoja voidaan monitoroida, kun halutaan tietoa esim. uudentyyppisten rakenteiden toiminnasta tai tietoa rakentamisen laadun todentamiseksi. Monitoroinnissa pyritään mitattu ja analysoitu tieto tallentamaan ohjeiden mukaan systemaattisesti tietokantaan niin, että se voidaan lukea sieltä myöhemmin, vaikka ohjelmistot muuttuisivatkin.

Monitorointitehtävän tavoitteet voivat olla erilaisia rakenteen omistajille, rakenteen ylläpidosta huolehtiville, rakenteen käyttäjille ja rakenteen korjaamisesta tai uuden rakenteen suunnittelusta ja rakentamisesta vastaaville osapuolille. Sillan omistajalle on tärkeää tietää rakenteen arvon, toiminnan ja turvallisuuden säilyminen. Ylläpitäjä haluaa tietoa ylläpitotason riittävydestä ja tulevista huolto- ja korjaustarpeista. Käyttäjä arvostaa rakenteen luotettavuutta, mekaanisen ja fysikaalisen toiminnan käyttäjäystävällisyyttä ja ulkonäköä. Suunnittelija haluaa suunnittelun lähtötietoja ja tietoa aikaisemmin käytetyn lähtötietoaineiston mm. kuormien ja rakennemallin varmistamiseen sekä urakoitsija mm. tietoa rakentamistyön onnistumisesta.

1.1 Julkaisun tarkoitus

Tämän julkaisun tarkoitus on täydentää Siltojen monitorointiohjetta (Liikenneviraston ohjeita 18/2016, /5/) ja antaa tätä ohjetta laajemmin perustietoa ja ohjeistusta sillan suunnittelijoille, sillan omistajille tai niiden kunnosta huolehtiville henkilöille ja yrityksille, kun ne suunnittelevat ja toteuttavat sillan monitorointia, jotta siitä saatava hyöty olisi mahdollisimman kattava ja mahdolliset kunnossapito- ja korjaustoimenpiteet voitaisiin tehdä oikea-aikaisesti ja taloudellisesti.

Julkaisu on tarkoitettu ohjeeksi tie- ja rautatiesilloille sekä kevyen liikenteen silloille, mutta sitä voidaan käyttää soveltuvin osin myös muiden taitorakennetyyppien monitoroinnissa. Ohjeessa on myös yleisiä määrittelyjä ja periaatteita, jotka soveltuvat myös muidenkin rakennetyyppien monitorointiin. Ohjeessa ei selosteta yksityiskohtaisia teknisiä ratkaisuja tai laitteiden toimintaperiaatteita, vaan ne kuvataan yleisellä tasolla.

Ohjetta laadittaessa on lähdetty siitä oletuksesta, että siltojen monitorointi on palvelua, jota yritykset tarjoavat siltojen omistajille, ylläpitäjille ja suunnittelijoille. Monitoroinnin avulla siltojen omistajat tai niiden kunnosta huolehtivat yritykset saavat hyödyllisiä ja tarkempia tietoja siltojen kunnosta ja toimivuudesta, jotta voitaisiin tehdä oikeat, oikea-aikaiset ja taloudelliset päätökset sillan korjaukseen ja ylläpitoon. Monitoroinnilla voidaan myös varmistaa sillan turvallinen käyttö sillan loppuun käytön aikana.

Julkaisussa käsitellään monitorointia kokonaisuutena, johon kuuluvat itse anturit, monitorointilaitteistot, tiedon siirto- ja tallennuslaitteet sekä myös mitatun tiedon käsittelyyn tarvittavat analysointimenetelmät ja raportointi. Mittausantureista ei käsitellä teknisiä yksityiskohtia, mutta tavallisimmat anturit, niiden ominaisuudet ja käyttötarkoitus kuitenkin esitellään. Muutoin anturin valinta ja yksityiskohtainen tuntemus oletetaan olevan monitorointia toteuttavalla yrityksellä ja asiantuntijoilla. Analysointimenetelmiä ei myöskään käsitellä yksityiskohtaisesti, vaan niistä annetaan yleisesittely. Analysointi tehdään tavallisesti valmiilla tietokoneohjelmilla tai se ohjelmoidaan itse julkaistujen kaavojen ja menetelmien avulla.

Julkaisussa annetaan myös periaatteet, joilla antureista saatava mittaustieto on tallennettava ja käsiteltävä, jotta sitä voidaan hyödyntää sillan kunnossapidossa ja turvallisuusvalvonnassa. Usein monitorointi on hyvin pitkäkestoista, jolloin anturien pitkäaikaistoimivuus on tärkeää, sillä saatujen mittaustulosten on oltava luotettavia. Ohjeessa annetaan vaatimuksia ja toimintaperiaatteita, joilla mitatun tiedon luotettavuus voidaan monitoroinnissa varmistaa.

Monitorointi voi koskea yksittäistä siltaa, mutta myös saman siltatyypin osalta suurempaa ryhmää. Tällöin voidaan mittaustulokset ja niiden perusteella suunniteltavat korjaus- ja kunnossapitotoimenpiteet yleistää koskemaan jopa kymmeniä tai satoja siltoja. Tällöin on tärkeää, että mitattu tieto on systemaattisesti tallennettu sisältäen tarvittavat määrittelyt sillasta ja antureista. Tärkeää on myös mahdollisuus siltojen ja niiden osien käsittelyyn erillisinä ryhminä suoritettaessa koko siltakannan analysointeja. Julkaisussa kuvataan periaatteet monitorointitiedon systemaattista tallentamista varten. Lisäksi kuvataan analysointimenetelmiä mittaustiedon jalostamiseksi esimerkiksi tilastollisia analyysejä ja jakautumia sekä sillan mekaanisen toiminnan ja kestävyuden selvittämistä varten.

Koekuormituksella testataan mittaavat anturit ja verrataan sillan mekaanista käyttäytymistä mittaustuloksiin. Sillan turmeltumista ja korroosiota mittaavia antureita ei voida koekuormalla testata, vaan ne on testattava laboratoriossa. Monitorointi pitää aina suunnitella huolellisesti etukäteen laatimalla sillasta yksityiskohtainen monitorointisuunnitelma.

Monitorointi ei korvaa sillalle tehtäviä kuntotarkastuksia, jotka on tehtävä Liikenneviraston taitorakenteiden tarkastusjärjestelmän ja sen ohjeistuksen mukaisesti. Monitoroinnilla voidaan kuitenkin saada jatkuvasti tietoa sillan kunnosta ja sillä voidaan nähdä myös rakenteen sisälle saaden esim. tietoa betonin kunnosta ja betonirauδοitteiden korroosiosta.

1.2 Monitoroinnin määritelmä

Monitorointi on sillan tai muun taitorakenteen jatkuvaa tai jaksottaista mittaamista käyttäen erityyppisiä antureita ja mittalaitteita. Monitoroinnilla selvitetään sillan mekaanista käyttäytymistä, eri osien rasituksia, sillan kuormituksia sekä sillan turmeltumista, esim. teräsosien ja betonin korroosiota.

Monitorointiin kuuluu myös mittaustulosten jatkuva ja välitön analyysi, mahdollinen yhdistely aikaisempiin mittaustuloksiin tai muuhun informaatioon ja mahdolliset hälytykset. Monitorointi tapahtuu pääsääntöisesti automaattisesti, jolloin mitattu tieto tallentuu mittalaitteelle ja voidaan sieltä siirtää automaattisesti tai manuaalisesti serverille ja tietokantaan.

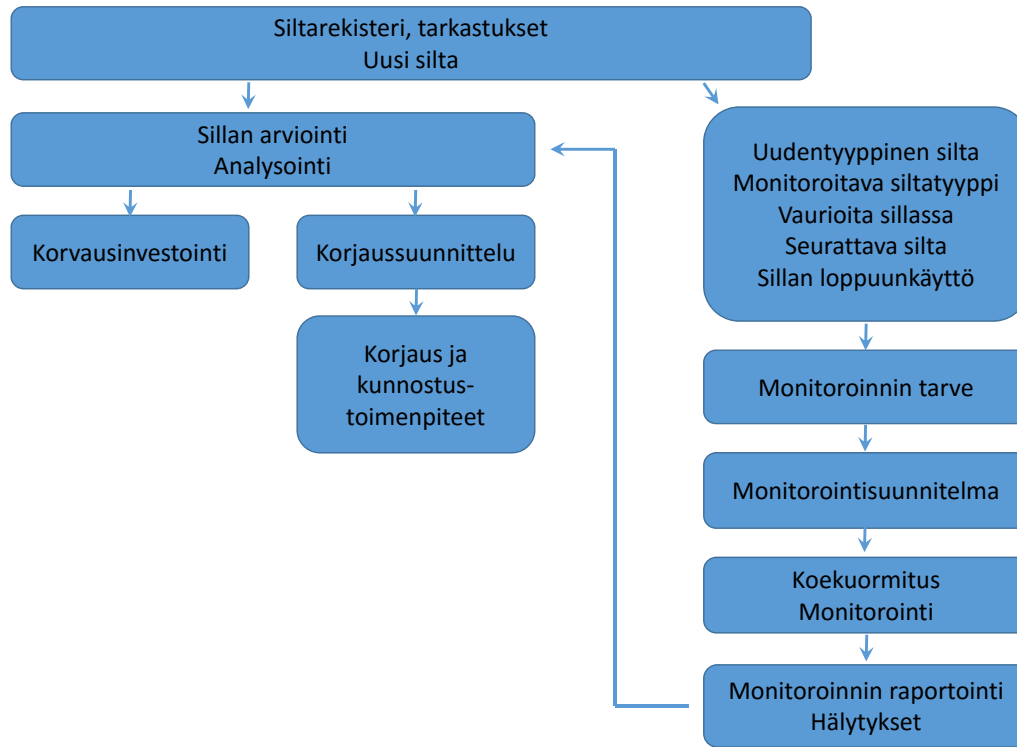
Monitoroinnin kesto voi vaihdella yhdestä päivästä useaan vuoteen. Monitorointi voi olla osa sillan kunnon hallintaa, jolloin tarkoituksena on kerätä tietoa sillan kuntoon vaikuttavista tekijöistä kuten esim. betonin halkeilusta, kloridien tunkeutumisesta, betoniraudotteiden ja rakenneteräksen korroosiosta, teräsrakenteen säröilystä, rakenteen muodonmuutoksista, kosteudesta, lämpötilasta ja liikennekuormista. Monitoroinnilla voidaan seurata sillan rakenteellista toimintaa, mm. taipumia, venymä, jännityksiä, värähtelyitä, siirtymiä ja tukivoimia.

Monitorointiin kuuluu mitatun tiedon systemaattinen tallentaminen, sovittu analysointi sekä raportointi. Monitoroinnista saadaan paras hyöty, kun siihen yhdistetään sillan koekuormitus sekä lujuus- ja turmeltumismallit, jolloin mitattu tieto voidaan siirtää malliin ja näin arvioida koko sillan tai samantyyppisten siltojen käyttäytymistä. Sillan lujuus- ja turmeltumismallin muodostamisessa voidaan käyttää apuna sillasta laadittua tietomallia (esim. BIM, Building Information Model), mikäli se on saatavilla. Ohjeet ja periaatteet sillan tietomallista on esitetty Liikenneviraston ohjeessa 'Siltojen tietomalliohje' /3/ ja 'Taitorakenteiden suunnittelun lähtötieto-ohje' /12/. Liikenneviraston ylläpitämään siltarekisteriin (X.X.2017 alkaen Taitorakenne-rekisteri, tästä lähtien tässä oppaassa käytetty termiä siltarekisteri) on talletettu siltojen teknisiä tietoja, tarkastustuloksia, valokuvia ja piirustuksia.

Monitorointi käsitteenä ei sisällä sillalle yksittäisinä tärkeinä toimenpiteinä tehtäviä manuaalisia mittauksia, tarkastuksia tai kunnon arviointia, mutta näitä voidaan käyttää kuitenkin hyväksi esim. antureiden kalibroinnissa.

Monitoroinnista päättäminen alkaa sillan tarkastuksen, analysoinnin tai muun arvioinnin jälkeen, jolloin yhdeksi menetelmäksi arvioida siltaa voidaan valita sillan monitorointi. Monitoroinnista päättämisen jälkeen kohteesta laaditaan yksityiskohtainen monitorointisuunnitelma, johon usein liittyy myös koekuormitus ja koekuormituksen analysointi. Monitoroinnista saadut mittaustulokset analysoidaan jälkikäteen päätöksenteon avuksi. Tavallisimpia jälkikäsittelemenetelmiä ovat hälytykset sekä päivä-, viikko-, kuukausi- ja vuosiraportit, luokittelut, väsymisanalyysi, lujuusanalyysi sekä turmeltumisanalyysi. Monitoroinnista saadut tulokset voivat johtaa sillan korjaustoimenpiteisiin tai sillan kunnon jatkuvaan seurantaan loppuun käytön ajaksi. *Kuvassa 1* on esitetty kaaviokuva monitoroinnista päättämisestä sekä monitoroinnin eri vaiheet. Tarkemmat ohjeet monitorointiprojektista on esitetty ohjeessa 'Siltojen monitorointiohje' /5/.

Lisäkirjallisuutta siltojen monitorointiin liittyen löytyy lähteistä /7/, /8/, /9/, /10/ ja /11/.



Kuva 1. Kaaviokuva monitoroinnista päättämisestä ja monitoroinnin vaiheet

2 Monitoroinnin tarpeet ja tavoitteet

Monitorointia voidaan tehdä sekä uusille että vanhoille silloille. Monitoroinnilla seurataan sillan käyttäytymistä ja toimintaa liikennekuormien ja muiden kuormitusten vaikutuksesta. Erityisesti useasta materiaalista koostuvat tai jänneväliiltään pitkät sillat ovat rakenteeltaan monimutkaisia ja niiden rakenteellisen toiminnan mallintaminen laskentamallilla on haasteellista. Mallin toimintaa todellisissa rasiutilanteissa voidaan testata monitoroinnin avulla. Sillan pitkäkestoisen monitoroinnin avulla voidaan myös tutkia muiden luonnonkuormien kuten tuulen, lämpötilakuormien ja jäätymisen vaikutusta, joita muuten olisi vaikea tuottaa rakenteeseen.

Monitoroinnin ensisijainen tarkoitus on useimmiten selvittää sillan kuntoa ja toimintaa ja näiden kehittymistä pitkäaikaisesti. Korjaustöiden yhteydessä voidaan tutkia korjausten ja vahventamisen vaikutusta sillan toimintaan ja kantavuuteen. Uusilla silloilla rakentamisvaiheessa sillan sisään tai pintoihin voidaan helposti asentaa antureita, joilla voidaan rakentamisvaiheessa tutkia siltaan syntyviä rasituksia sekä myöhemmin valvoa sillan toimintaa ja kunnan kehittymistä.

2.1 Rakenteellinen toiminta

Sillan rakenteellista toimintaa monitoroidaan useimmiten ensisijaisesti sillan todellisen käyttäytymisen selvittämiseksi erilaisten kuormitusten alaisena. Koska rakenteen laskentamallit ovat yksinkertaistettuja kuvauksia rakenteen todellisesta mekaanisesta käyttäytymisestä ja ne pyritään muodostamaan ns. varmalle puolelle, poikkeaa rakenteen todellinen toiminta usein laskentamallien toiminnasta. Siltaa koe-kuormittamalla ja monitoroimalla voidaan rakenteiden todellista toimintaa selvittää, päivittää laskentamalleja ja usein ottaa myös ns. ”piilovarmuus” käyttöön.

Monimutkaisten staattisesti ulkoisesti ja sisäisesti määräämättömien rakenteiden tapauksissa mallin tarkkuutta on vaikea päätellä. Betonimateriaalin ainemalli, kimmoisuus ja halkeilu ja liitosten joustavuus ja liukuminen ovat eräitä esimerkkejä epävarmuustekijöistä. Sillan rakenteen ja toiminnan monitoroinnin avulla pyritään selvittämään voimasuureiden jakautuminen sillan eri osille, sillan mahdollinen liitto-toiminta ja betonin halkeilutila. Monitoroinnilla etsitään myös mahdollisia vaurioita, niiden kehittymistä ja vaurioiden vaikutusta koko sillan toimintaan.

Betonisilloissa teräsbetonirakenne käyttäytyy epäelastisesti, sillä betonin vetokestävyys on puristuslujuuteen verrattuna pieni, mikä aiheuttaa vetopuolella rakenteen halkeilua. Sillan halkeilutila riippuu sillan kokemista kuormituksista, ja sen vaikutusta sillan toimintaan on vaikeata arvioida ilman mittauksia ja koe-kuormitusta. Suunniteltaessa ja laskettaessa siltaa betoni materiaalina mallinnetaan yksinkertaistettuna, mutta monitoroitaessa sillasta mitatut taipumat ja muut rasitukset syntyvät betonin todellisesta käyttäytymisestä. Esimerkiksi vertailtaessa laskettuja ja mitattuja sillan rasituksia on käytettävä laskennassa mahdollisuuksien mukaan betonin todellista halkeilutilaa ja palkkien poikkileikkausta, vaikka ohjeiden mukaan suojabetonia ja päällystekerroksia ei saisi huomioida tehollisessa poikkileikkauksessa. Betoni- ja puusilloissa myös kuormituksen kesto vaikuttaa muodonmuutosten suuruuteen.

Lyhyet ja rakenteeltaan yksinkertaiset palkkisillat, erityisesti teräspalkkisillat, toimivat poikkileikkauksen toiminnan osalta usein suunnitellulla tavalla, koska teräs käyttäytyy elastisesti. Poikkileikkauksen lineaarista toimintaa voi ns. ”laiskakantisissa” teräspalkkisilloissa häiritä kansilaatan ja palkiston välinen liukuma. Näissä ei betonikannen ja palkkien välillä ole liitinelimiä (vaarvoja), jolloin kansi voi kuormitettaessa liukua palkkien suhteen. Liukumista vastustavat teräspalkin ylälaipan epätasaisuudet, kuten esim. jatkokset, pulttien ja niittien kannat saavat aikaan kuitenkin poikkileikkaukseen ”osittaisen liittotoiminnan”. Liittopalkkisilloissa betonikannen ja teräspalkkien väliset vaarnatapid saavat aikaan täyden liittotoiminnan ja pitävät poikkileikkauksen toiminnan siten hyvin lineaarisena.

Teräksiset riippusillat ja vinoköysisillat ovat geometrisesti epälineaarisia rakenteita köysien suurten venymien ja siirtymien vuoksi. Analysoinnissa ja mittauksissa on huomioitava, että sillan kannen omapaino ei tavallisesti aiheuta merkittäviä taivutusmomentteja, koska ripustusköysien (riipputankojen) pituudet on säädetty geometrisesti oikeiksi sillan rakentamisen jälkeen. Vastaavanlaisia siltoja ovat myös kaarisillat (Langerpalkkisillat), joissa myös yläpuolinen kaari kannattaa sillan kantta. Vinoköysisilloilla ja Langerpalkkisilloilla kansirakenteeseen aiheutuu omasta painosta kuitenkin normaalivoimaa, joka laskennassa tulee ottaa huomioon, mutta jota ei mittauksilla saa selville.

Sillan perustukset ja niiden vaurioituminen voivat vaikuttaa koko sillan toimintaan ja kantavuuteen. Nykyisin uusissa silloissa betonirakenteiset perustukset ovat usein massiivisia ja paalutettuja. Vanhoissa, erityisesti maanvaraisesti perustetuissa ja puupaalutetuissa silloissa tai vaativissa pohjaolosuhteissa (esim. savikot) perustukset ovat voineet kuitenkin vuosien kuluessa liikkua, kallistua tai halkeilla. Perustusten kestävyys ja stabiilius voivat heikentyä myös perustusten ympärillä tai alla tapahtuvan eroosion vuoksi. Perustusten liikettä voidaan monitoroida liikettä mittaavilla antureilla, kuten mekaanisilla liike- ja optisilla antureilla sekä kallistusantureilla. Sillan päätypalkkien ja maan välistä painetta mitataan paine-antureilla. Erikseen voidaan myös mitata maaperän ominaisuuksia kuten huokosvedenpainetta. Pitkäaikaismittauksissa on tärkeää, että anturit toimivat pitkäaikaisesti luotettavasti, sillä liikkeet ovat tavallisesti hitaita.

Sillan monitoroinnissa on hyvä muistaa, että mittauksin voidaan yleensä todeta vain lisäkuormien aiheuttamia muodonmuutoksia. Pysyvien kuormien aiheuttamia muodonmuutoksia voidaan mitata yleensä vain, jos anturit kiinnitetään rakenteeseen ennen sillan rakentamista. Tällöin antureilta vaaditaan myös korkeaa pitkäaikaiskestävyyttä. Betonin sisään asennettujen antureiden 0-arvo on myös vaikea määrittää, koska betonin kovettuessa siihen vaikuttaa myös betonin kutistuminen ja lämpötila.

Sillan dynaamisen toiminnan osalta ovat tärkeimpiä selvitettäviä asioita sysäykertoimen ja värähtelyominaisuuksien mittaukset. Tietoa sysäykertoimen suuruudesta tarvitaan sillan kansirakenteen kantavuuden määrittämisessä (ks. luku 9). Koska liikennekuormat ovat tyypiltään liikkuvia kuormia, voivat ne aiheuttaa siltaan myös haitallista värähtelyä. Värähtelyn mittauksen ja tuloksena saatavien ominaisuuksien sekä ominaismuotojen avulla voidaan selvittää sillan ja sen rakenneosien (esim. riipputangot) rakenteellista toimintaa ja tarvittaessa suunnitella korjaustoimenpiteitä haitallisten värähtelyjen pienentämiseksi. Värähtelymittaukset voivat olla tärkeitä myös kävelysiltojen epämiellyttävän värähtelyn havainnoinnissa ja värähtelyn vaimennustarpeen määrittämisessä.

2.2 Kuormitukset

Sillan monitoroinnin ja mittaustulosten jatkoanalysoinnin avulla voidaan arvioida siltaan kohdistuvien sisäisten ja ulkoisten kuormitusten suuruuksia, joita ovat esim. liikennekuormat siltaa ylittävistä ajoneuvoista, tuulikuorma, lämpötilan muutosten ja rakenneosien välisten lämpötilaerojen aiheuttamat kuormat, jälkijännittämisen aiheuttama kuormitus, jää- ja lumikuorma ja sillan omapaino sekä perustusten ja tukien liikkumisesta aiheutuvat kuormat. On muistettava, että mittauksilla voidaan yleensä saada selville vain muuttuvien kuormien vaikutuksia, ei pysyvien kuormien, kuten oman painon vaikutuksia.

Liikennekuormat

Sillan merkittävin kuormitus varsinkin pienissä ja keskisuurissa silloissa syntyy ylittävistä raskaista ajoneuvoista tai rautatiesilloissa junien ylityksistä. Tietoja liikennekuormista käytetään mm. siltojen kantavuuden ja väsymiskestävyyden analysoinnissa. Olennaisimpia tietoja sillan rasituksia mitattaessa ovat ajoneuvojen määrä, ajoneuvojen paino, nopeus, akselien lukumäärä ja akselivälit sekä ajolinja. Näitä tietoja voidaan saada joko suoraan yhdellä mittausjärjestelmällä tai yhdistelemällä eri mittausten tietoja. Sillan monitorointijärjestelmää ja sen tulosten analysointia voidaan kehittää myös liikennekuormien määrittämiseen. Pitkäaikaisella monitoroinnilla tai toistettavilla mittauksilla saadaan tietoa myös liikenteen määrien ja liikennekuormien muuttumisesta.

Jatkuvaa liikennettä mittaavilla WIM-järjestelmillä (weigh in motion, ks. 5.4.2) saadaan kerralla mitattua tieto ajoneuvojen määrästä ja tyypeistä sekä niiden kokonais- ja akselipainoista. WIM-laitteistoja voidaan kiinnittää myös siltoihin (silta-WIM). Radoilla vastaavaan käyttöön junien kokonais- ja akselipainoja mittaamaan rakennettuja pyörävoimailmaisimia on Suomessa tällä hetkellä 11 kappaletta (ks. 5.4.2).

Tietoa liikennekuormista ja niiden muuttumisesta saadaan myös yhdistelemällä eri mittauksista saatua tietoa. Tielikenteen ajoneuvojen määrien osalta jatkuvaa tietoa saadaan LAM-pisteistöltä (ks. 5.4.1). Ajoneuvopainojen muuttumista taas on seurattu perinteisesti akselimassatutkimuksilla, jossa liikenteestä pysäytetyt raskaat ajoneuvot punnitaan (ks. esim. Tielaitoksen selvityksiä 6/2000, Akselimassatutkimus 1998–1999, 9.12.2016 /20/). Viimeisimmät akselimassatutkimukset on Liikennevirasto tehnyt vuosina 2013–2015 sen jälkeen, kun haluttiin saada tietoa vuoden 2013 uuden ajoneuvoasetuksen vaikutuksista liikennekuormiin (Akselimassatutkimus 2013–2014, Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 67/2015, /21/). Tähän yhteyteen liitettiin myös silta-WIM-mittausten kokeilua.

Siltojen monitoroinnin avulla sillan rasituksia tai laakerikuormia mittaamalla voidaan selvittää myös siltaa ylittävien raskaiden ajoneuvojen painoja. Menetelmässä sillan analysointimalli (lujuusmalli) ja mitatut sillan rasitukset kalibroidaan vastaamaan toisiaan koekuormituksen avulla, jonka jälkeen todellisesta liikenteestä mitattujen venymien tai taipumien perusteella voidaan arvioida sillan ylittävien ajoneuvojen painoja ainakin kokonaispainojen osalta.

Monitoroinnin avulla voidaan laskea ja luokitella sillan yli kulkeneet ajoneuvot, niiden nopeudet ja kokonaispainot. Rautatiesilloissa junien ja vaunujen tiedot ovat yleensä tarkasti tiedossa. Erityisesti hitsiliitosten väsymiskestävyyttä laskettaessa on tärkeää tietää väsymisrasitusjakauma ja eri kuormitusten toistuvuus. Nämä saadaan monitoroinnilla mitattua myös suoraan rakenteiden venymäliuskamittauksina. Betonisilloilla väsymiskestävyys ei yleensä ole kriittinen suure.

Omapaino

Sillan omapaino aiheuttaa sillan rakennus- ja/tai asennusvaiheessa kuormituksen, jota voidaan mitata todellisten rasitusten selvittämiseksi. Sillan kannella olevan päällysterkerroksen paksuus voi olla suunniteltua suurempi ja aiheuttaa siten siltaan lisärasituksia. Jos sillan omapainon vaikutuksia halutaan selvittää monitoroinnin avulla, on mittaukset aloitettava jo sillan rakentamisvaiheessa. Jos rasituksia halutaan siis suoraan mitata, on laitteiston asennus ja ns. nollaus tehtävä jo ennen oman painon aiheuttamien rasitusten syntymistä eli ennen telineiden purkamista. Sillan pitkäaikaismonitoroinnin avulla voidaan kuitenkin nähdä esim. sillan uudelleen päällystämisen tai pintarakenteiden korjaustöiden vaikutuksia mittaustuloksiin.

Tuulikuormat

Tuulikuorma rasittaa etenkin pitkäjänteisiä siltoja, riippusiltoja ja niiden köysiä. Suurimmat tuulikuorman rasitukset syntyvät tuulenpuuskista, jotka eivät useinkaan satu samanaikaisesti liikennekuormien kanssa. Tuulikuormat voidaan määrittää tuulimittarin avulla mitatun tuulennopeuden perusteella. Tuulimittarista saadaan trigger-signaali mittauksen aloittamiseen. Jotkut sillan tuuliristikon osat voivat olla sellaisia, joiden rasitukset pääasiassa syntyvät tuulesta. Siltojen köydet ja riipputangot ovat herkkiä tuulen aiheuttamalle värähtelylle. Tavallisin heräte on tuulen aiheuttama poikittaisvärähtely ja sillan ominaistaajuuden mukainen taivutusvärähtely. Köysien värähtelyitä seurataan esim. kiihtyvyyssantureilla, venymäliuskoilla ja valokuituantureilla.

Lämpötilakuormat

Ilman lämpötilan vaihtelu ja auringon lämpösäteily aiheuttavat rakenneosien lämpötilamuodonmuutoksina niiden pitenemistä tai lyhenemistä, joka puolestaan voi aiheuttaa muille rakenteille pakkovoimia, kuten normaalivoimia ja taivutusta. Lämpötilan muutoksia sillassa voidaan monitoroida lämpötila-antureiden avulla, jolloin mitataan ilman lämpötilaa ja rakenteen lämpötilaa halutuissa kohdissa rakennetta. Erikoistapauksessa, kun lämpöliike on täysin estetty, sillan rasitukset voivat olla huomattavan suuria. Kun mitataan yksittäisen vapaasti tuetun palkin venymiä esim. venymäliuskalla, on lämpöpitenevän vaikutus poistettava mittaustuloksista pitkäaikaisia rasituksia laskettaessa. Lämpöpitenevä poistetaan venymätuloksesta automaattisesti tai analysoinnin yhteydessä. Hyvin usein silta lämpenee epätasaisesti, esim. kansi nopeammin kuin alusrakenteet, jolloin lämpötilaero voi aiheuttaa sillan kannen ja palkkien käyrystymistä, josta puolestaan voi aiheutua laakereille pakkovoimia, jotka pitää pystyä mittaamaan. Myöskin palkin ylä- ja alapintaan voi syntyä lämpötilaero, jolloin palkki käyristyy ja siihen syntyy taivutusrasitus, jos käyristyminen on estetty.

Jälkijännittäminen

Betonisillan jälkijännittäminen aiheuttaa merkittäviä jännityksiä betoniin. Jännittämistyön aikaisen monitoroinnin avulla voidaan varmistaa riittävän ja oikeanlaisen jännitystilän muodostuminen rakenteeseen. Jälkijännitys aikaansaadaan tavallisesti jännepunosten avulla, jolloin jännevoimaa ja betoniin syntyvää puristusjännitystä voidaan mitata voima-antureiden, liikeantureiden, venymäliuskojen ja valokuituantureiden avulla. Jännitystilän säilyminen pitkäaikaisesti on myös tärkeää sillan toiminnan kannalta, mutta sen mittaus vaatii antureilta pitkäaikaistoimivuutta ja luotettavuutta, sillä antureita ei yleensä voi enää irrottaa rakenteesta kalibrointia varten.

Jää- ja lumikuormat

Sillan päällysrakenteeseen muodostuvat jää- ja lumikuormat ovat harvoin merkittäviä silloissa. Joissain tapauksessa kannen yläpuolisista rakenteista putoileva jää voi aiheuttaa vaaraa liikenteelle ja köysien jäätyminen voi kasvattaa rakenteen poikki-leikkausta ja lisätä herkkyyttä tuulen aiheuttamille värähtelyille. Jäätymisolosuhteita voidaan tutkia monitoroimalla säätietoja ja jäätymistä jääantureilla. Vesistösilloissa liikkuva jää (erityisesti jokisillat) tai lämpötilan muutoksen aiheuttama staattinen jäänpaine voivat aiheuttaa merkittävän kuormituksen sillan tukirakenteille. Betonin halkeamiin tunkeutunut vesi voi jäätyessään lisätä halkeilua.

Törmäyskuormat

Törmäyskuormat aiheutuvat ajoneuvon törmäämisestä siltarakenteeseen. Ne aiheuttavat usein sillan vaurioitumista, joten niitä ei voida käyttää monitoroinnissa koekuormina. Mahdollisten törmäysten vaikutuksia siltarakenteeseen esim. alikulku- korkeudeltaan matalissa silloissa voidaan kuitenkin haluttaessa monitoroida.

Muut kuormat

Siltaan voi kohdistua myös monia muita kuormituksia, joista mainittakoon maanjäristyskuorma. Suomessa ei ole merkittäviä maanjäristyksiä ja siltoja ei mitoiteta maanjäristyksille. Maanjäristysalueilla monitoroinnin avulla voidaan saada tärkeää tietoa sillan käyttäytymisestä maanjäristyksen aikana ja sillan kunnosta maanjäristyksen jälkeen.

2.3 Kunnan ja toiminnan seuranta

Sillan kunnan ja toiminnan jatkuva seuranta on monitoroinnin tärkein tehtävä ja sitä voidaan tehdä sekä sillan rasitusten että sillan pitkäaikaistoimivuuden mittausten avulla. Sillan rasitukset, kuten taipumat, muodonmuutokset ja värähtely saattavat muuttua sillan kunnan huonontuessa esim. teräsrakenteiden ruostuessa, liitosten löystyessä ja betonirakenteiden turmeltuessa sekä halkeilutilan muuttuessa. Sillan kuntoa monitoroitaessa on tärkeää, että selvitetään myös rasituksia aiheuttavat liikenne- ja ympäristökuormat, sillä sillan rasitukset lisääntyvät usein pelkästään siitä syystä, että ajoneuvokuormat kasvavat.

Tavallisesti sillan kunnolla ymmärretään sen rakenneosien (ja liitosten) kuntoa, mikä voi vaikuttaa myös sillan kantavuuteen. Teräsrakenteiden ruostuminen havaitaan yleensä helposti, mikäli ruoste on näkyvässä. Näkymättömissä olevien liitososien tai rakenteiden seuraaminen on vaikeampaa. Myös teräsrakenteiden väsymissäröt voivat, ainakin alkuvaiheessa, olla pieniä tai maalipinnan alla, joten niitä on vaikea havaita. Sillan teräsosien ruostumista voidaan seurata korroosioantureilla, mutta niitä ei juuri ole käytetty sillan teräspalkeissa. Yksittäistä väsymissärön kasvua voidaan seurata monitoroimalla säröä käyttäen esim. venymäliuskoja, liikeantureita tai akustista emissiota.

Betonirakenteiden kunto heikkenee betonin ja raudotteiden ominaisuuksien muutosten seurauksena. Betonin pintaosat voivat turmeltua monella tavalla, joista tavallisimpia ovat halkeilu, pakkasrapautuminen, kloridien tunkeutuminen ja karbonatisoituminen. Betonipeitteen turmeltuminen tai siltakannen vedeneristeen rikkoutuminen aiheuttavat loppuvaiheessa raudotteiden korroosiota, jolloin sillan kantavuus alenee. Betonin halkeilutila vaikuttaa betonipoikkileikkauksen toimintaan, teräsjännityksiin sekä taipumien suuruuteen.

2.4 Rakentamisen laadun valvonta

Viime aikoina siltöjen monitorointi on nousut uudeksi menetelmäksi tutkia uuden sillan toimintaa ja valvoa sillan rakentamisen laatua, kun uusien siltasiltamateriaalien ja uudentyypisten rakenteiden käyttäytymisestä ei ole riittävää kokemusperäistä tietoa. Esimerkkeinä voidaan esittää sillan kannen vedeneristysmateriaalit, vahventamisessa käytetty vahvistusmateriaalin liima-aine tai maalityyppi, jotka ovat tuotteina niin uusia, että niistä ei ole saatavilla riittävästi tutkimustuloksia. Myös esimerkkeinä voidaan mainita betonisillan kanteen liimattavien vahvistuskuitujen liiman lämpötilan seuranta sillan korjauksen yhteydessä tai betonin kovettumisen aikaisen lämpötilan seuranta.

Rakentamisen laadunvalvonnan monitoroinnin tulee olla riittävän kattavaa ja pitkäaikaista tutkittavaan ominaisuuteen ja ilmiöön sopivia antureita käyttäen. Monitorointi toteutetaan siten, että määritetään monitoroinnin laajuus, kesto ja tekniikka, jota toteutetaan yleisimmin takuuajan aikana. Vedeneristyksen toimivuutta monitoroitaessa anturit on usein asennettava sillan betonirakenteisiin tai betoniin ennen kannen betonivalua.

Uuden sillan laadun valvonta voi olla myös sen rakenteellisen toimivuuden osoittamisen monitorointia, jolloin monitoroidaan sitä, että silta toimii suunnitelmien mukaisesti.

2.5 Ympäristöolosuhteet

Sillan ympäristön olosuhteet, kuten esim. säätila, teiden suolaus ja ilmansaasteet vaikuttavat kunnan kehittymiseen sekä betonimateriaalin että teräsosien korroosiosuhteen. Jäätymissulamissykliä määrällä on vaikutusta betonin pakkasrapautumiseen. Lämpötilalla ja jäätymisellä on myös vaikutusta rakenteiden toimintaan mukaan lukien mm. sillan päiden penkereiden toiminta (esim. liikuntasaumattomat sillat).

Alueellista tietoa ympäristöolosuhteista saadaan säähavaintojen pohjalta tallennetuista sää tiedoista, mutta tarkempaa tietoa voidaan saada sillan läheisyyteen asennettavan sääaseman muiden antureiden mittaustuloksista. Paikallisista sää tiedoista saadaan tarkempaa tietoa esim. vallitsevasta ilman kosteudesta, tuulen suunnasta ja nopeudesta sekä auringon säteilystä, jotka voivat erota paikallisesti alueellisista arvoista. Ilman kosteuteen ja suolapitoisuuteen voi vaikuttaa myös sillan läheisyydessä oleva vesistö ja tuulen nopeuteen läheinen avoin maasto tai siinä olevat suuret esteet.

Betonirakenteiden kannalta tiesilloilla yksi tärkeä monitoroitava suure on sillan rakenteisiin vaikuttava tielle levitettävä suola. Levitetyn suolan määrää voitaisiin mitata sillalta, mutta se saadaan myös karkeasti tien hoitoluokan perusteella ja tarkemmin suolaa levittävien ajoneuvojen ajotiedoista. Etenkin kaupungeissa ja teollisuuslaitosten läheisyydessä ilmassa voi olla ilmansaasteita (esim. rikkiä), jotka vaikuttavat syövyttävästi sillan rakenteisiin.

3 Monitorointimenetelmät

Siltöjen monitorointi voidaan jakaa kolmeen perustapaukseen:

- jatkuva monitorointi
- jaksottainen monitorointi
- kertamonitorointi.

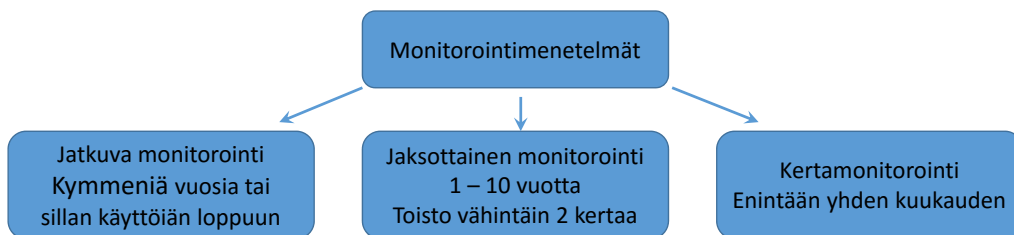
Monitorointitavan valinta riippuu monitoroitavasta kohteesta ja kohteen rakenteista tarvittavista tiedoista. Valitulle monitorointitavalle tehdään monitorointisuunnitelma noudattaen Liikenneviraston monitorointiohjetta /5/. Monitorointisuunnitelmaan kirjataan ohjeen mukaisesti mm. monitoroinnin kesto, tutkittavat rakenteen osat, käytettävät anturit ja mittalaitteet, tiedon tallennus- ja siirtökäytännöt, raportointimenettely sekä tiedon analysointi. Monitorointitapaan voidaan myöhemmin monitoroinnin kuluessa tehdä tarkennuksia ja muutoksia saatujen mittaus- ja analysointitulosten perusteella. Kaaviokuva monitorointimenetelmien laajuudesta on esitetty kuvassa 2.

3.1 Jatkuva monitorointi

Jatkuva monitorointi on sillan jatkuvaa ja keskeytyksetöntä monitorointia suunnitelmassa määritetyllä tavalla. Sen kesto voi olla useita vuosia tai jopa sillan käyttöiän mittainen aika. Mitattu tieto siirretään kaukopurkuna mittausserverille laboratorioon tai muuhun sovittoon tallennuspaikkaan. Mittausten pitkästä kestoista johtuen anturit ja mittausjohdot on asennettava kiinteästi ja tiedon siirto sekä analysointi järjestettävä automaattiseksi. Mittalaitteiden asennuksessa on huomioitava myös mahdolliset huoltotoimenpiteet ja mittausten sekä tiedonsiirron keskeytymättömyys.

Uusille silloille voidaan jo rakennusvaiheessa asentaa valmiit kiinnityskohdat antureille, kaapeleille valmiit putket tai hyllyt sekä asennuksen ja huollon helpottamiseksi huoltosillat tai huoltokelkalle kiinteät kiskot. Uusia siltoja monitoroitaessa osa antureista on mahdollista asentaa rakenteen sisään, kuten esim. kosteusanturit, betonirauhoitteiden venymäliuskat ja valokuituanturit.

Vanhoissa silloissa voidaan jatkuvassa monitoroinnissa mitata valittuja sillan kriittisiä kohtia esim. tulevaan korjaukseen asti. Tällöin on suositeltavaa mittausdatan siirtäminen kaukopurkuna mittauspalvelun toimittajalle, jotta vaurion kehittyessä ja asetettujen hälytysrajojen ylittyessä voidaan tarvittaessa ryhtyä nopeasti liikenteen rajoittamiseen ja korjaustoimenpiteisiin.



Kuva 2. Kaaviokuva monitorointimenetelmästä.

3.2 Jaksottainen monitorointi

Jaksottaisessa monitoroinnissa mittaus toistetaan suunnitelluin aikavälein ja saada tietoa sillan rasitusten tai materiaali- ja muiden ominaisuuksien muuttumisesta. Jaksottainen monitorointi on kestoaltaan kussakin mittausjaksossa muutamasta tunnista vuosiin. Useimmiten mittausanturit poistetaan sillalta kunkin mittauksen päätyttyä, mutta ne voivat olla myös kiinteitä.

Mittausjakson aika on suhteellisen lyhyt, joten kaukopurkua ei välttämättä tarvita ja tiedot voidaan tallentaa mittalaitteen muistiin jatkokäsittelyä varten. Markkinoilla on myös itsenäisesti toimivia omalla muistilla varustettuja mittalaitteita, joiden tiedot voidaan langattomasti purkaa tietokoneelle. Mittaus uusitaan muutaman kuukauden tai muutaman vuoden välein, kunnes haluttu määrä tietoa on saatu kerättyä. Jaksottaista mittausta voidaan käyttää, kun halutaan mitata sillan rasituksia ja niistä aiheutuvaa väsymiskuormitusta ja sillan toiminnan muutosta korjauksen tai vaurion jälkeen.

Jaksottaisesti voidaan mitata myös betonirakenteiden turmeltumista ja kosteusvaurioita, mutta tällöin mittausjakson on oltava riittävän pitkä, jotta esim. vuoden-aikojen ja sääolojen vaikutus mittaustuloksiin tulee näkyviin. Jaksottaista mittausta voidaan käyttää myös sillan pysyvien liikkeiden ja taipumien mittaamiseen, kuten esim. palkkien taipumien sekä paalujen ja maatumien liikkeiden mittaamiseen.

Tulevaisuudessa yksi mahdollinen jaksottainen kertamittaustapa voisi olla sillan tarkastuksen aikana suoritettava mittaus, jolloin sillan tarkastuksen ajaksi asennetaan mittalaitte siltaan. Tämä edellyttää, että sillassa on oltava kiinteästi asennettuna mittauksissa tarvittavat anturit tai anturin kiinnitystä varten tarvittavat liitoskappaleet uudelleenkiinnitystä varten. Antureilta, esim. kosteusantureilta saadaan tarkempaa tietoa, kuin silmämääräisesti sillan rakenteen pinnalta.

3.3 Kertamonitorointi

Kertamonitorointi suoritetaan pääsääntöisesti vain kerran, jolloin laaditun suunnitelman mukaan voidaan olettaa, että mittauksilla saadaan keräytyksi riittävä määrä mittaustietoa myöhemmin tehtävää analysointia varten. Monitoroinnin kesto on tavallisesti melko lyhyt; muutamasta tunnista viikkoihin. Mittalaitteet ja mittausanturit kiinnitetään vain väliaikaisesti siltaan ja mittaustieto tallennetaan siten, että mittaus käynnistetään käsin esim. muutaman päivän mittauksissa tai automaattisesti pidemmissä mittauksissa.

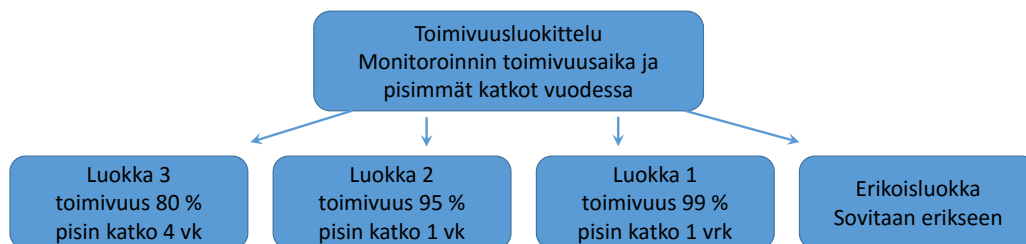
Kertamonitoroinnissa mittausantureiden määrä vaihtelee yksittäisistä antureista muutama kymmeneen, koska asennustyön kustannukset vaikuttavat merkittävästi kokonaiskustannuksiin. Mittaustieto tallentuu sillan läheisyyteen sijoitetulle tiedonkeruulaitteistolle tai anturin omaan muistiin, josta se voidaan siirtää paikan päällä tietokoneelle tai haluttaessa ainakin osaksi kaukopurkuna laboratorioon tai etäpalvelimelle. Kertamonitorointia käytetään tavallisesti sillan koekuormituksessa, lyhytaikaisessa liikenteen aiheuttamien rasitusten mittauksissa tai yksittäisten vaurioiden mittaamisessa. Myös siltaa ylittävää raskasta erikoiskuormaa voidaan monitoroida kertamonitoroinnilla.

3.4 Monitoroinnin toimivuusluokittelu

Jatkuvaa monitorointia suoritettaessa täytyy myös määritellä, mikä osa ajasta monitoroinnin on toimittava ja tuotettava mittaustuloksia. Lisäksi voidaan määritellä rajoitus pisimmästä sallitusta mittauskatkosta. Monitoroinnin kokonaistoimivuus (%), mittauskatkon suhde monitorointiaikaan) ja pisin sallittu katkoaika vuodessa on annettu alla olevalla luokittelulla ja kuvassa 3.

- Luokka 1, toimivuus 99 %, pisin katko 1 vrk/v
- Luokka 2, toimivuus 95 %, pisin katko 1 vk/v
- Luokka 3, toimivuus 80 %, pisin katko 4 vk/v
- Erikoisluokka, toimivuus ja pisin katko sovitaan erikseen

Kun on päätetty, kuka järjestää sillalle sähkönsyötön ja kiinteän verkkoyhteyden sekä vastaa niiden toiminnasta ja kustannuksista, on myös päätettävä, otetaanko sähköverkon ja tietoliikenneverkon mahdolliset katkot mukaan kokonaistoimivuutta laskettaessa. Kokonaistoimivuuden vaatimuksen kasvattaminen lisää kokonaiskustannuksia. Sähkökatkoihin on suositeltavaa varautua esim. erillisillä akuilla. Jos monitoroinnilla tähdätään liikenneturvallisuuden parantamiseen, ovat vaatimukset monitoroinnin kokonaistoimivuudelle ja katkeamattomuudelle korkeat. Esimerkiksi jos sillan monitorointi ohjaa raskaiden ajoneuvojen pääsyä sillalle, sen on toimittava myös poikkeustilanteissa, esim. sähkökatkojen aikana.



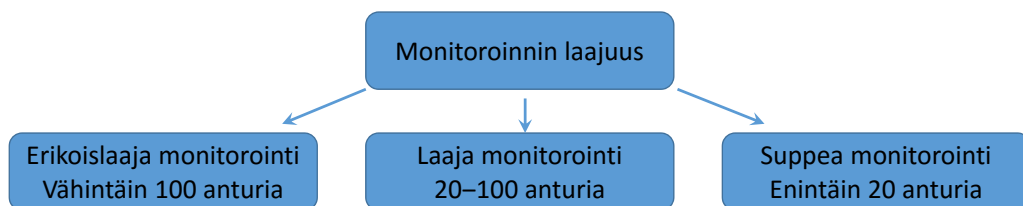
Kuva 3. Jatkuvan monitoroinnin toimivuusluokat ja enimmäiskatkoajat vuodessa

4 Monitoroinnin laajuus

Monitoroinnin laajuus kuvaa monitoroinnin suunnitteluun, toteuttamiseen ja tulosten analysointiin käytettyjä resursseja. Monitoroinnin laajuus sisältää käytetyn monitorointitekniikan, -mittalaitteiden lukumäärän ja monitorointitulosten analysoinnin. Monitoroinnin laajuus voidaan luokitella seuraavasti:

- Erikoislaaja monitorointi
- Laaja monitorointi
- Suppea monitorointi

Laajuus voidaan valita monitorointiprojektin aikana tai sitä voidaan tarkentaa monitorointisuunnitelman valmistuttua, jolloin tilaajalla on käytössään tarkempaa tietoa monitoroinnin toteutusta varten. Monitoroinnin laajuus vaikuttaa erityisesti mittauspisteiden ja mittaustekniikoiden määrään. Monitoroinnin laajuutta valittaessa on otettava huomioon myös suunnitellun analysointimallin laajuus ja tarkkuus, jotta tulosten vertailu voidaan tehdä tehokkaasti. Monitoroinnin laajuuden luokittelu on esitetty kuvassa 4.



Kuva 4. Kaaviokuva monitoroinnin laajuudesta

4.1 Erikoislaaja monitorointi

Erikoislaajaa monitorointia käytetään rakenteeltaan vaativille ja pitkille silloille ja siinä käytetään tavallisesti yli 100 kpl antureita. Sillan toimintaa ja rasituksia mitataan kaikista sillan rakenneosista ja jänteistä, jotta saadaan tarkkaa tietoa analysointia varten. Usein ainakin osaa mitattavista suureista mitataan kahdennetuilla tai erityyppisillä antureilla paremman tarkkuuden ja mittauksen luotettavuuden saavuttamiseksi. Koska antureita on paljon ja mittaus on usein pitkäkestoinen (jatkuva tai jaksottainen), mittajohdot ja anturit kiinnitetään pysyvästi rakenteeseen. Mittaustulokset siirretään automaattisesti tietokantaserverille ja niitä verrataan tarkkoihin analysointimalleihin (esim. FE-malleihin).

4.2 Laaja monitorointi

Laajassa monitoroinnissa on antureita n. 20–100 kpl. Monitoroinnin kohde on kohtalaisen vaativa tai pitkäjänteinen silta, mutta kaikkia sillan rakenteita ei välttämättä tutkita. Tarkemman tutkimuksen kohteena voi olla osa sillasta (yksi jänne) tai alustavan analysoinnin perusteella valitut kriittiset rakenneosat (esim. pääpalkit), mutta muitakin osia voidaan mitata (taipumat, venymät jne.) rakennemallia varten.

4.3 Suppea monitorointi

Suppeassa monitoroinnissa käytetään enintään 20 anturia. Suppeassa monitoroinnissa tutkitaan tavallisesti vain määrättyä kohtaa sillasta, esim. vaurioitunutta kohtaa tai yhtä kriittistä rakenneosaa (esim. pääpalkkeja). Yksi tavallisin syy suppeaan monitorointiin on sillan määrätyn rakenneosan rasiusten mittaus kasvaneelle liikennekuormalle tai väsymiskertymän seuraaminen.

5 Mittaussuureet ja anturit

Mittausanturit esitetään monitorointisuunnitelmassa, joka laaditaan Siltojen monitorointiohjeen /5/ sekä tämän oppaan ohjeistuksen perusteella. Monitorointisuunnitelmassa esitetään myös monitoroinnin syyt ja tarkoitus. Käytettävien antureiden tyypit ja lukumäärät sekä tiedonkeruulaitteiston kokoonpano määritetään sillan suunnitelmien, laskelmien ja tarkastuksen perusteella. Jos sillasta on tarkat ja luotettavat laskelmat, voidaan tarvittavien antureiden määrää vähentää. Monitorointisuunniteltaessa valitaan anturien tyypit ja anturien paikat siten, että mittaustuloksia voidaan luotettavasti ja helposti verrata analysoinnista (esim. FE-laskelmista) saatuihin tuloksiin. Anturien lukumäärää valittaessa on otettava huomioon lujuuslaskelmien tarkkuus. Mittausantureita ja laitteita on saatavilla monenlaisia, mutta tässä ohjeessa käsitellään vain tavallisimpia Suomessa siltojen monitoroinnissa käytettyjä antureita.

5.1 Yhteenvedo antureista

Taulukossa 1 on esitetty opastava taulukko, jota voidaan käyttää hyväksi valittaessa anturia sillan monitorointiin. Luvussa 5.2 on kerrottu tarkemmin anturien ominaisuuksista ja käytöstä. Anturien valmistajilla on kuitenkin hyvin erityyppisiä antureita eri käyttötarkoituksiin, joten lopullinen valinta tehdään siltasuunnittelijan, monitorointikonsultin, anturin ominaisuuksien ja myös valmistajan antamien ohjeiden mukaan.

5.2 Sillan rakenteellista toimintaa mittaavat anturityypit

Mekaanisia ominaisuuksia mittaavat anturit mittaavat yleensä sillan tai sen osien liikettä, venymää, värähtelyä tai osien välisiä voimia. Antureilta saatavia tuloksia verrataan kantavuuslaskennasta saatuihin tuloksiin.

5.2.1 Siirtymä, taipuma, liike

Sillan tavallisimpia mittaus- ja monitorointisuureita ovat koko rakenteen tai sen osien taipumat tai liikkeet, joita on perinteisesti mitattu jo kauan optisilla laitteilla, esim. teodoliitilla. Taipuman ja liikkeen mittaus kertoo hyvin sillan rakenteen kunnosta, sillan toimivuudesta, materiaalin (esim. betonin) kunnosta ja lämpöliikkeistä. Sillan taipuman mittauksissa on otettava huomioon tarvittava vertailukohta, sillä usein silta on vesistön ylittävä ja mekaanisia siirtymäantureita on vaikea asentaa tai ne voivat myös häiritä esim. vesistöliikennettä. Poikkeustapauksessa lyhytaikaisesti tai maasilloilla voidaan käyttää tavanomaisia liikeantureita tai lanka-antureita, joilla taipumaa mitataan. Sillan taipuman suuruus riippuu sillan tyypistä, riippusilloilla taipuma on useita satoja millimetrejä, mutta lyhyillä betonisilloilla alle yksi millimetri. Mittausalueeltaan sopiva mittausanturi on valittava suurimman taipuman mukaan. Mekaanisia liikeantureita käytetään, sillan rakenneosien suhteellisten liikkeiden ja lämpöliikkeiden mittaamiseen.

Taulukko 1. Tavallisimmat anturityypit siltöjen monitorointiin

Mitattava suure	Sillan osa	Tavanomainen mittaussnopeus	Tavanomainen mittaussalue	Anturityyppi
Sillan taipuma	Pääpalkki	Hidas mittaus ~ 0,1 Hz	10 mm... 1 m 1 mm...1 m ~20 mm	Teodoliitti Takymetri Laser skannaus (palkin geometria)
	Pääpalkki	0,1...1 kHz 0,1...10 Hz	1...500 mm 1...500 mm 10...500 mm 0,5... 0.0 mm	Laser taipuma-anturi Liikeanturi (maasilta) GPS+ maa-asema (pitkät riippusillat) Pyörivä laser
	Poikkipalkki Sekundääri Köysi	0...1 kHz 0,1...10 Hz	1...500 mm 1...500 mm 0,5...100 mm 0,5...100 mm	Laser taipuma-anturi Liikeanturi Laser etäisyysanturi Pyörivä laser
Venymä (Teräs, betoni ja puu, jännitys)	Pääpalkki Poikkipalkki Sekundääri Betoniteräs	0...10 kHz 0...1 kHz	50...3000 µS 50...3000 µS 100...3000 µS	Venymäliuska Optinen kuitu Venymäanturi
Sillan värähtely	Jänne palkki kansi	0,1...100 Hz		Kiihtyvyyssanturi Venymäliuska (hitaita mittaussia myös liikeanturilla)
Voima	Osien välinen voima, tukivoima	0,1...1 kHz	1 kN...1 MN	Voima-anturi (Venymäliuskat poikkileikkauksen ympärillä)
Lämpötila	Kaikki sillan osat Ilma	n. 1/min	-100 +100 °C	Lämpötila-anturi Infrapunasensori/kamera
Säätötila	Sillan lähellä	n. 1/min		Säätöasema (ilman lämpötila, kosteus, tuuli, säteily, sademäärä)
Liikenne	Sillan kansi Tie sillalle/-lta	1 Hz ... 100 Hz	Määrä, akselit, nopeus Ajoneuvotyyppi Nopeus, määrä	Induktiosilmukka Videokuva Laser detektor
Kosteus	Betoni Teräksen pinta Puupalkit	n. 1/min	0...100 %	Kosteusanturi
Särön kasvu teräksessä tai betonissa	Yleensä hitsisauma, liitos tai betoni	50 kHz ... 1 MHz		Akustinen emissio
Valmistusvirhe Väsymissärö	Teräspalkki Hitsisauma			Ultraäänianturi (yl. manuaalinen)
Betoniterästen korroosio	Betoniteräs	1 Hz	Yleensä korroosiovirta	Korroosioanturi
Liikenne ajoneuvo- ja akselipainot	Sillan kansi Tien pinta	~1 kHz	1...100 tn	BWIM, WIM, LAM

Perinteisiä menetelmiä sillan taipuman mittaamiseksi ovat optiset menetelmät, esim. teodoliitit ja takymetrit, joissa mittaus perustuu trigonometriaan; kulman ja etäisyyden avulla saadaan laskettua sillan taipuma. Laitteissa käytettävä kaukoputki saadaan asennettua tukevalle alustalle sillan ulkopuolelle, josta mittaus voidaan tehdä. Laitteet sopivat vain hitaisiin mittauksiin, sillä lukema saadaan näytöltä. Nykyisin on kuitenkin saatavilla moottorilla toimivia automaattisia takymetrejä, jotka hakevat automaattisesti useitakin mittapisteitä (rakenteeseen kiinnitetyjä prismoja) ja tallentavat lukemat digitaalisessa muodossa. Optisiin menetelmiin on luettava myös fotogrammetria, jossa maastoa tai siltaa mitataan digitaalisen valokuvan avulla. Vertaamalla kahta kuvaa eri mittausaikoina, sillan taipuma voidaan selvittää, mutta pienillä taipumilla kuvan erottelukyky tulee rajaksi.

Sillan sallitut taipumat vaihtelevat AA (ajoneuvoasetuksen mukainen kuormakaavio /1/) ja EK (erikoiskuljetuskaavio /1/) kuormille puusilloille annetusta arvosta L/320 betonisilloille annettuun arvoon L/600. Tarkemmin arvot on annettu ohjeessa 'Siltojen kantavuuslaskentaohje' /15/.

Lasertaijumamittaukset

Nykyisin käytetään sillan taipuman mittaamiseen lasermittalaitteita, jotka perustuvat lasersäteeseen ja sen havaitsemiseen suoraan mittauskohteessa tai mittauskohteeseen kiinnitetyn prisman heijastamasta. Laserlähetin voidaan asentaa tukevasti sillan ulkopuolelle kuten teodoliitti. Nykyisin laitteet pystyvät dynaamisiin mittauksiin pystytasossa (z- ja y-koordinaatti) ja ne voidaan liittää tietokoneeseen ja kaukopurkuun. Lasermittauksien tarkkuus on riippuvainen mittausetäisyydestä ja on alle 0,2...1 mm lyhyeltä etäisyydeltä. Hyvin nopeisiin mittauksiin laite ei sovellu, sillä mittaustaajuus on tavallisesti 50 Hz ... 1 kHz. Virhettä voi aiheuttaa valonsäteen taipuma ilman rajakerroksesta, esim. sillan päällysteen kuumeneminen voi aiheuttaa säteen taipumista ja mittaustulosten vääristymistä. Myös huono näkyvyys, sade ja sumu voi estää mittaukset. *Kuvassa 5* on esitetty Lasersäteeseen perustuva siirtymän mittalaite.



Kuva 5. Laser siirtymän mittalaite lähetin ja vastaanotin (Noptel Oy).

Laserkeilaus

Viime aikoina yksi tärkeä menetelmä rakenteiden todellisen muodon mittaamiseen on laserkeilaustekniikka. Laserkeilaus perustuu lähetetyn laserpulssin ja rakenteesta heijastuneen vasteen aikaeron mittaamiseen, josta voidaan edelleen laskea tarkasti kohteen etäisyys. Kohteesta saadaan kolmiulotteinen kuva, kun laserpulssi lähetetään eri kohtiin rakennetta. Kohteen sijoittamiseksi koordinaatistoon täytyy keilaimen

paikka tietää tarkasti kiintopisteen tai vähintään satelliittipaikannuksen avulla. Kolmiulotteisen ja tarkan kuvan saamiseksi laserkeilauslaitetta on siirrettävä eri puolille rakennetta, mutta myös liikkuvasta ajoneuvosta tai helikopterista skannaus on mahdollista ns. mobiililaserkeilauksena. Laserkeilaus on suhteellisen hidasta, joten sitä käytetään vain rakenteen muodon ja pysyvien muodonmuutosten mittaamiseen, mutta se ei siis sovellu dynaamisiin mittauksiin. Menetelmällä saatu tarkkuus riippuu rakenteen koosta ja keilaimen etäisyydestä rakenteesta. Hyvissä olosuhteissa voidaan saavuttaa muutaman senttimetrin (mobiililaserkeilaus) tai muutaman millimetrin (kiinteä laserkeilaus) tarkkuus.

Pyörivä laser

Pyörivään tasolaseriin perustuva taipumanmittaus on yksinkertainen tapa tutkia sillan taipumakäyttäytymistä tunnetun koekuorman avulla. Taipumainformaatiota voidaan käyttää mm. kantavuusanalyysin lähtötietona ja menetelmää onkin käytetty useissa maantie- ja ratasilloissa, joiden kantavuudessa on epäilty puutteita. Monikanavainen ja dynaaminen mittausmenetelmä mahdollistaa myös pitkäkestoisen monitoroinnin ja järjestelmään kuuluu olennaisena osana myös etäkäyttömahdollisuus sekä tiedon tallennuspalvelu. Menetelmän kertamittausresoluutio on 0,5 mm mittaustaajuuden ollessa 10 Hz. Kuten kaikessa optisessa mittauksessa, myös tasolaseriin perustuvassa menetelmässä pitää varmistua valonlähteen kiinnitystelineen, esim. kolmijalan, mekaanisesta stabiiliudesta ja huomioida myös ilmaturbulenssin mahdollinen vaikutus mittaustuloksiin.

Laseretäisyysmittaus

Laseretäisyysmittausta voidaan käyttää rakenneosien välisen liikkeen mittaamiseen. Anturin tulisi sijaita lähellä osia, sillä kaukaa mitattaessa tarkkuus huononee ja anturin hinta kasvaa nopeasti.

Ultraäänietäisyysmittaus

Ultraääni etäisyysmittausta voidaan käyttää myös rakenneosien välisten liikkeiden ja kuormitusajoneuvon sijainnin mittaamiseen. Liikkuvaa ajoneuvoa mitattaessa laitteen kohdistuspisteen on osuttava tarkasti ajoneuvoon tai siihen asennettuun levyyn, jotta mittaustarkkuus olisi hyvä.

Mekaaninen liikeanturi

Sillan osien välisiä liikkeitä tai laakerin painumaa mitataan myös usein liikeantureilla, jolloin anturi kiinnitetään mekaanisesti liikkuvien osien väliin, tavallisesti nivelellisesti. Liikeanturin toiminta perustuu joko vastuksen, induktanssin (LVDT) tai kapasitanssin muuttumiseen anturin karan liikkeessä. Anturien tarkkuuteen vaikuttavat monet tekijät (esim. lämpötila, kosteus yms.), mutta useimmiten tarkkuus on parempi kuin 0,5 ... 1 % maksiminäyttämästä. Siltamittauksissa liikeanturit ovat ulkotilassa alttiina lämpötilan ja kosteuden muutoksille, joten anturi on valittava näihin olosuhteisiin sopivaksi. *Kuvassa 6* on esitetty liikeantureita, jotka mittavat sillan kannen ja kantavien ristikoiden välistä liikettä ja sillan laakerin tukipintojen välistä painumaa.



Kuva 6. Mekaaninen liikeanturi asennettuna sillan kannen ja pääristiköiden väliin (vasemmalla) ja sillan laakerin tukipintojen väliin (oikealla)

Valokuituanturit

Sillan kannen alas- tai ylöspäin tapahtuvan liikkeen muutoksia voidaan seurata optisilla valokuituekstensiometreillä. Haluttaessa ne voidaan yhdistää samaan tiedonkäsittelyjärjestelmään esim. sillan jännitystilöiden tai muodonmuutosten seurantaanturien kanssa. Yhdistelmämittauksin saadaan taipumien lisäksi samanaikaisesti selville kuormien aiheuttamat staattiset ja dynaamiset muutokset. Kyseiset valokuituekstensiometrit soveltuvat kaikkiin siirtymien mittauksiin erillisten liitosten välillä.

Saatavana on tarkkoihin pieniin siirtymämittauksiin tarkoitettuja ekstensiometrejä (kuva 7) sekä suuriin esim. sillan kannen ja maatuon välisten siirtymien mittauksiin tarkoitettuja EX-Large ekstensiometrejä (kuva 8). Markkinoilla on myös uusi kaapeliton ja omalla virtalähteellä ja tiedonkeruuyksiköllä varustetun ekstensiometri, joka on helppo asentaa myös muihin haastaviin kohteisiin.



Kuva 7. Valokuituekstensiometrit sillan kannen painumamittauksessa (Chaplain Bridge, Montreal, Canada) (vasemmalla) ja sillan vaakaliitoksen muutoksen mittauksessa (Murtall Viadukt, Germany/Täv Rheinland) (oikealla). Kuvat Optimon Oy.



Kuva 8. EX-Large ekstensiometri sillan maatuen ja kansirakenteiden välisten siirtymien mittaamisessa (Lapinlahden silta, Helsinki). Kuva Optimon Oy.

5.2.2 Venymä, jännitys

Tavanomainen menetelmä mitata rakenteen rasituksia on mitata rakenneosan venymää määrättyltä matkalta. Venymää voidaan mitata vastusvenymäliuskoilla, venymäantureilla, optisilla kuiduilla tai värähtelevällä langalla. Teräsrakenteilla mittaus tehdään rakenneosan pinnalta (tai kotelopalkin sisältä), mutta betonirakenteilla myös betoniteräksistä betonin sisältä. Rakenteessa oleva jännitys voidaan laskea alla olevalla lujuusopin *peruskaavalla 1* silloin, kun materiaali käyttäytyy elastisesti (tavallisesti ennen myötörajaa).

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

jossa

σ	on normaalijännitys venymän suunnassa
E	materiaalin kimmomoduuli, teräksellä 210 kN/mm ²
$\varepsilon = \Delta L/L$	on venymä ja ΔL mitattu pituuden muutos ja
L	alkuperäinen mittapituus. Venymä on pelkkä luku ja ilmoitetaan usein μS (mikro strain = 10 ⁻⁶ strain)

Vastusvenymäliuska

Venymäliuska koostuu ohuesta metallilangasta, tavallisesti teräslangasta, joka on silmukoiden muodossa tukipohjalla ja jonka vastus muuttuu silmukoiden venymän ja puristuman mukana. Vastuksen muuttuminen perustuu langan poikkileikkauksen ja pituuden muuttumiseen kuormitettaessa. Myös mittauskaapelien pituus vaikuttaa mittauksiin. Vastusarvon muuttuminen on hyvin vähäistä, joten siihen käytetään ns. Wheatstonen silta kytkentää, jossa vastukset sijaitsevat neliön sivuilla ja josta mitataan jännite. Liuskamittauksissa käytetään liuskavahvistinta ja siinä tarvitaan liuskalle sekä virransyöttö että virran mittaus erillisistä johtimista. Liuskoja on pituudeltaan erimittaisia (esim. 5...100 mm) ja eri materiaalista valmistettuja erityyppisiin mittauksiin.

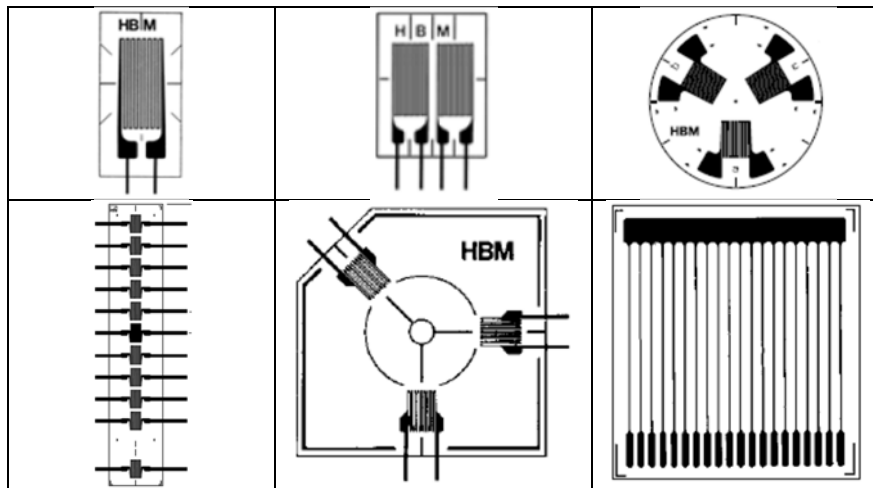
Erikoistarkoitukseen esim. ruuvin vetojännityksen mittaamiseen on saatavilla *pyöreitä liuskoja*, jotka asennetaan ruuvin varteen porattuun reikään.

Saatavilla on myös *sarjaliuskoja*, joissa on useita liuskoja lähekkäin ja joilla voidaan mitata esim. huippujännitystä liitoksen läheltä (ns. Hot Spot jännitys). Särön etenemistä voidaan mitata myös sarjaliuskoilla, jotka on kytketty siten, että systeemin vaste muuttuu tunnetulla tavalla, mikäli yksi tai useampia liuskoista katkeaa särön

vaikutuksesta. LiuskakytKentä vaatii vain yhden liuskan mittajohdot, mutta se ei mittaa enää venymää, vaan tavallaan särön etenemistä porrastetusti.

Rakenteesta voidaan mitata normaalijännityksiä ja leikkausjännityksiä sekä myös jännitysten suunnat ns. pääjännitykset saadaan selville ns. *rusettiliuskoilla*. Liuskat kiinnitetään huolellisesti *liimaamalla* puhdistettuun ja hiottuun pintaan käyttäen liuskaliimaa tai hitsattavat liuskat kiinnitetään *pistehitsaamalla*. Hitsattavia liuskoja käytetään usein vaativissa olosuhteissa (alhainen lämpötila, kosteus) ja ne ovat myös pitkäkestoisia, sillä liiman pitkäaikaisominaisuudet eivät enää vaikuta liuskan toimintaan. Hitsaus kiinnitys vaatii pistehitsauslaitteen.

Eri materiaaleille on olemassa erityyppisiä liuskoja (*kuva 9*) ja myös liuskan sisäinen vastus voi vaihdella mittalaitteesta riippuen. Betonin mittaamisessa käytetään pinnaltaan karheita tai laippapäisiä *betoniliuskoja*, jotka mittaavat suoraan betonin venymää.



Kuva 9. Periaatekuvia venymäliuskoista. Vasemmalta ylhäältä lähtien: yksi-hilainen aksiaaliliuska, kaksi-hilainen liuska (palkin taivutus), kolmi-hilainen rusettiliuska (kaksiaksaalinen jännitystila – pääjännitykset tuntemattomia), ketjuliuska+kompensointiliuska (gradientti), kolmi-hilainen porausvenymäliuskarusetti (jäännösjännitys) ja liuska särön-kasvun mittaamiseen (20 silmukkaa) (HBM Test and Measurement).

Kiinnittäminen on tehtävä huolellisesti, jotta mittaustulokset olisivat luotettavia. Pitkäaikaisissa mittauksissa liuskojen korvaamiseen kannattaa varautua esimerkiksi sijoittamalla liuskat helposti lähestyttäviin paikkoihin. Liuskan korvaaminen on tehtävä siten, että tieto pysyvästä jännitystasosta voidaan säilyttää. Tämä koskee muitakin mittaustureita. *Kuvassa 10* on esitetty venymäliuska, joka on liimattu betonipalkin alapinnan vahvistuslevyyn ja alapinnan pääteräkseen. Liuskojen suojaukseen pitkäaikaiskäytössä voidaan lisänä käyttää valmistajan suosittlemaa erikoiskittiä.

Liuskamittauksen tarkkuus riippuu erityisesti mittalaitteesta ja sen ominaisuuksista, mutta tarkoissa mittauksissa myös mittauskaapeleiden pituus on huomioitava. Itse anturi ei rajoita mittaustaajuutta, vaan se riippuu mittalaitteesta, joita on saatavilla hyvinkin nopeisiin (esim. 100 kHz) mittauksiin. Mikäli liuskamittaus käynnistetään triggaussignaalilla, on otettava huomioon liuskan lämpenemisaika, jonka jälkeen vasta saadaan luotettavia tuloksia. Materiaalin lämpöpitäminen lämpötilan muuttuessa on

poistettava pitkäkestoista mittaustuloksista, sillä se ei aiheuta jännitystä. On myös saatavilla valmiiksi lämpökompensoituja venymäliuskoja.



Kuva 10. Venymäliuska kiinnitettynä betonipalkin alapintaan liimattuun levyyn (vasemmalla) ja betonipalkin alapinnan teräkseen (oikealla).

Optiset venymäanturit

Venymäliuskojen ja muiden sähköisten antureiden ohella venymää voidaan mitata myös optisesti käyttäen valokuituun perustuvia antureita. Suorituskykynsä puolesta optiset ja sähköiset anturit vastaavat toisiaan. Valokuituantureissa toimintaperiaate perustuu valon kulkemiseen valokuidussa, joten anturit eivät tarvitse sähköä eivätkä ne ole herkkiä sähkömagneettisille häiriöille. Anturit voidaan asentaa rakenteen pintaan tai myös esim. betonin sisään. Antureita pidetään yleisesti luotettavina vaativissakin olosuhteissa ja myös pitkäaikaiskäytössä. Valokuiduilla on myös se etu, että tekniikasta riippuen, yhteen valokuituun voidaan kytkeä useita (jopa satoja) antureita ja kaapelin pituus voi olla tarvittaessa useita kilometrejä. Toistaiseksi valokuituanturit eivät sovellu kaikkein nopeimpiin mittauksiin, mutta sillan päärakenteiden mittaamiseen niiden mittaustaajuus n. 100 Hz ... 1 kHz riittää hyvin.

Venymää mittaavat valokuituanturit voidaan jakaa mittauspituuden perusteella pistemäisiin ja integraalisiin antureihin. Pistemäiset anturit eli FBG (Fiber Bragg Grating) ja Fabry-Perot-anturi ovat kokonsa ja kiinnityksensä puolesta sähköisten venymäliuskojen kaltaisia ja niitä voidaan käyttää venymäliuskojen korvaajina. Mikrotaipumaanturi, BOTDA-anturi (Brillouin Optical Time Domain Analysis) ja matalan koherenssin interferometrianturi ovat integraalisia antureita, jotka mittaavat rakenteen keskiarvo-venymiä anturipituuden vaihdella kymmenistä sentteistä jopa kymmeneen metriin. Pohjimmiltaan pistemäisestä FBG-anturista on myös saatavana integraalinen versio aina kahden metrin anturipituuteen saakka.

Lukuun ottamatta BOTDA-anturia muut mainitut anturityypit ovat yleisesti käytössä Keski-Euroopassa ja USA:ssa. Varsinkin pitkäaikaisessa monitoroinnissa, missä luotettavuus on ensiarvoisen tärkeää, ovat valokuituanturit varteenotettava vaihtoehto. Niin ikään kohteissa, joissa tarvitaan suuri määrä mittauspisteitä, on sarjaan kytkettävien valokuituantureiden käyttö perusteltua, sillä se vähentää merkittävästi kaapelointi- ja instrumentointikustannuksia. Mikäli anturit halutaan integroida betonivalun sisään, ovat passiiviset ja ympäristötekijöille immuunit valokuituanturit perusteltu vaihtoehto. Kohteissa, joissa voi esiintyä sähkökipinöintiä, kuten rata-silloilla, valokuituanturit toimivat hyvin, sillä ne eivät saa häiriöitä sähkömagneettisista häiriöistä.

Kuvassa 11 on esitetty kaupallinen FBG-instrumentti sekä saman valmistajan piste­mäinen ja integraalinen venymäanturi kiinnitystarvikkeineen. *Kuvassa 12* on kuva betoniteräksestä, johon on kiinnitetty valokuituanturi (Braggin hilat) teräkseen jyr­sittyyn uraan. *Kuvassa 13* on esitetty mekaaninen venymäliuskaan pohjautuva betonin halkeilun ja venymän mittaamiseen. Anturi mittaa venymää yhden metrin matkalta.

Kuvassa 14 on integraalinen 2 m:n venymäanturi mittaamassa keskimääräistä muodon­muutosta sillan pitkittäispalkin keskellä.



Kuva 11. Kaupallisia FBG-tuotteita.



Kuva 12. Optinen valokuituanturi, jossa kuitu ja Braggin hilat on kiinnitettynä suojaan teräkseen jyr­sittyyn uraan (alempi teräs).



Kuva 13. Betonin venymän mittaaminen betonin pinnalta venymäliuskapohjaisella siirtymäanturilla yhden metrin matkalta (VTT).



Kuva 14. Optinen 2 m:n valokuituanturi sillan pituuspalkin muodonmuutosten ja jännitystilojen mittaamisessa (OSMOS Group). Kuva Optimon Oy.

Taulukkoon 2 on koostettu tärkeimpiä tietoja venymää mittaavista valokuituantureista. Tarkka selonteko antureiden ja instrumenttien toiminnasta sekä niiden käyttökohteista löytyy Veijo Lyörin väitöskirjasta /6/.

Taulukko 2. Valokuitupohjaisten venymäantureiden vertailu.

	FBG ¹	Fabry-Perot ²	Mikrotaipuma ³	BOTDA ⁴	Interferometri ⁵
Mittausepävarmuus [$\mu\epsilon$]	< 0.3	< 0.3	1	10	1
Näytteenottotaajuus [Hz]	> 100	> 10	< 100	DC	DC
Anturin pituus [m]	0.01–2	0.01–0.1	0.1–10	0.5–20	0.2–20
Sarjamuotoisia antureita	10–100	1	1	> 10000	1
Pistemäinen / integraalinen	pistem.	pistem.	integ.	integ.	integ.
Instrumentin hinta	kohtuullinen	kohtuullinen	kohtuullinen	kallis	keskihintainen

¹ Micron Optics: www.micronoptics.com

² FISO Technologies: www.fiso.com

³ OSMOS: www.osmos-group.com

⁴ Omnisens: www.omnisens.ch

⁵ Smartec: www.smartec.ch

5.2.3 Värähtely

Siltojen ja sillan osien värähtelyä voidaan mitata monella tavalla, sillä värähtely näkyy tavallisesti muodonmuutoksina, esim. taivutusvärähtelynä erityyppisissä antureissa kuten siirtymäantureissa, venymäliuskoissa, optisissa kuiduissa ja voima-antureissa. Tarkin ja yksinkertaisin tapa mitata värähtelyä on kuitenkin käyttää kiihtyvyyssanturia. Perinteisesti kiihtyvyyden mittaaminen antureissa perustuu jousi-massa systeemin voiman mittaamiseen.

Palkkimaisissa siltarakenteissa voidaan harmonisen värähtelyn liike, nopeus ja kiihtyvyys kuvata *kaavoilla 2, 3 ja 4*. Kaavoista nähdään, että liike ja kiihtyvyys ovat samassa vaiheessa, mutta nopeuden vaihe-ero on $\pi/2$ (90°). Tulos on esitetty ajan funktiona *kuvassa 15*.

$$x = A \cos(\omega t + \varphi) \quad (2)$$

$$v = -\omega A \sin(\omega t + \varphi) \quad (3)$$

$$a = -\omega^2 A \cos(\omega t + \varphi) \quad (4)$$

jossa

x	on värähtelyn suuruus
v	värähtelyn nopeus
a	värähtelyn kiihtyvyys
A	värähtelyn suurin amplitudi
$\omega = 2\pi/T$	värähtelyn kulmanopeus
T	värähtelyjakson pituus
φ	vaihekulma
t	aika



Kuva 15. Periaatekuva harmonisen värähtelyn liike, nopeus ja kiihtyvyys ajan funktiona.

Siltarakenteissa voidaan tasapaksun ja päistään tuetun palkin ominaistajuus laskea kaavalla 5. Palkilla on useita ominaistajuuksia $f(n)$, mutta useimmiten alimmat ovat merkitseviä taipuman kannalta.

$$f(n) = \frac{K(n)}{2L^2} \sqrt{\frac{EI}{m}} \quad (5)$$

jossa

- $f(n)$ on palkin ominaistajuus (n:s ominaismuoto)
 m palkin kokonaismassa/ palkin pituus L
 L palkin pituus
 E kimmomoduuli
 I jäyhyysmomentti
 $K(n)$ kerroin, joka riippuu palkin tuennasta ja laskettavasta ominaistajuudesta ao. taulukon mukaan

Ominaismuoto	1	2	3	4
$K(n)$ niveltuenta	9,87	39,5	88,8	158
$K(n)$ jäykkä tuenta	22,4	61,7	121,0	200

Kiihtyvyyssanturien valinta

Kiihtyvyyssanturi pitää valita suurimman kiihtyvyyden mukaan, joka ei aina ole alin ominaistajuus, sillä kiihtyvyys riippuu aina sekä värähtelyn amplitudista että värähtelyn taajuudesta kaavan 4 mukaan. Usein valittaessa kiihtyvyyssanturia monitorointiin, joudutaan testaamaan useita erityyppisiä antureita. Värähtelyn vaimeneminen on myös tärkeä ominaisuus sillassa, sillä korkea vaimennus estää värähtelyamplitudin kasvamista, jos rakenteeseen kohdistuu jaksollinen herätevoima (esim. kävelyheräte tai junan pyöräkuorma)

Kiihtyvyyssanturia valittaessa on otettava huomioon mitattavan kiihtyvyyden sekä amplitudi että taajuus, jotta anturilla voidaan mitata haluttua kiihtyvyyssaluetta. Usein hoikilla rakenteilla ja esim. riippusilloilla taivutusvärähtelyn amplitudi on suuri, mutta taajuus alhainen, jolloin mitattaessa kiihtyvyyttä sen suuruus voi olla pieni ja sitä on mitattava anturilla, jonka alarajataajuus on alhainen ja herkkyys riittävä mittauksiin. Näissä tapauksissa sillalla on muitakin ominaistajuuksia (esim. poikkipalkkien värähtely), joka myös aiheuttaa kiihtyvyyttä. Näiden ylempien ominaistajuuksien aiheuttama kiihtyvyys anturille voi olla voimakkaampaa ja siksi anturi on valittava kestämään kaikki rakenteessa esiintyvät muutkin kiihtyvyydet. Lisäksi on huomattava, että kiihtyvyyssanturi mittaa kiihtyvyyttä kaikilla niillä taajuuksilla, jotka ovat sen mitta-alueella ja usein kiihtyvyyttä aiheuttavat kaikki taajuudet, myös ne, joista ei olla kiinnostuneita. Siltojen ja köysien taivutusvärähtelyitä mitattaessa niiden ominaistajuuksia eivät näy selkeästi mittauksissa, sillä muiden rakenneosien värähtelyiden kiihtyvyydet ovat selvästi suurempia, koska niiden taajuus on korkea (vaikka amplitudi olisikin pieni). Näin sillan haluttua taivutusvärähtelyä ei saada selkeästi näkyviin edes suodattamalla, sillä suodatus ei ole luotettavaa, jos signaalin amplitudista joudutaan poistamaan suurimmat ja hallitsevat kiihtyvyydet.

Kiihtyvyyssanturit kiinnitetään tavallisesti rakenteen pintaan, usein kiinteästi, jotta ne eivät liiku rakenteen suhteen kuormituksen aikana. Kiihtyvyyssanturi on yksinkertainen tapa mitata rakenteen värähtelyn amplitudia ja sen taajuutta. Tavallisesti rakenteen taajuuden lisäksi kiihtyvyyssarvot halutaan muuntaa liikkeeksi, mikä tapahtuu mittasignaalista integroimalla kahdesti. Tässä laskennassa kuitenkin tarkkuus huononee ja tulos ei ole esim. liikkeen (taipuman) osalta niin tarkka kuin mekaanisilla taipumantureilla saadaan. Tarkkuus on riippuvainen signaalin alkuperäisestä laadusta ja voidaan tarkastaa vertailemalla liike- ja kiihtyvyyssanturista laskettuja mittaustuloksia. *Kuvassa 16* on esitetty kiihtyvyyssanturi kiinnitettynä rakenteeseen.

Pietsosähköiset anturit (ICP, IEPE)

Pietsosähköisessä anturissa massan aiheuttama voima kohdistuu pietsosähköiseen kiteeseen, johon syntyy pintojen välille varaus, joka voidaan mitata. Antureita on saatavilla hyvin erityyppisiä taajuusalueelle 1 Hz ... 20 kHz. Anturit soveltuvat hyvin myös sillan osien värähtelyiden mittaamiseen.

Kapasitiiviset anturit (MEMS)

Kapasitiivisessä anturissa kiihtyvyys saa aikaan muutoksen kapasitanssissa joko etäisyyden tai pinta-alan muuttumisen seurauksena. MEMS-antureita on myös saatavissa taajuusalueelle 0 ... 1 kHz. Anturit soveltuvat hyvin myös sillan ja sen osien mittaamiseen.

Induktiivinen nopeusanturi

Siirtymän tai taipuman nopeutta voidaan mitata nopeusanturilla, joka koostuu kesto-magneetista ja kelasta, joiden suhteen liikettä mitataan. Nopeudesta voidaan laskea derivoimalla kiihtyvyys tai integroimalla liike (esim. taipuma), mutta samalla tarkkuus huononee. Antureita on saataville 4 Hz...2 kHz. Anturityyppiä ei ole Suomessa käytetty yleisesti siltamittauksissa.

Muut tyypit

Muita tyyppöjä ovat esim. venymäliuska-, potentiometri- ja reduktiiviset kiihtyvöysanturit.



Kuva 16. Betonirakenteeseen kiinnitetty kiihtyvöysanturi.

5.2.4 Voima

Sillan rakenneosien välisiä voimia mitataan suoraan voima-antureilla. Sillat ovat kuitenkin raskaita rakenteita, joissa jo pelkkä omapaino on suuri ja siten voiman mittaaminen vaatii kapasiteetiltään suuret anturit. Lisäksi usein liitokset ovat suunniteltu alun perin siten, että niiden toiminta voi muuttua, jos liitokseen asennetaan voimaanturi.

Tavallisin voima-anturin toimintaperiaate perustuu venymän mittaamiseen venymäliuskoilla lieriömäisen putken pinnalta. Voima-antureilla mitataan yleensä puristusvoimia, mutta myös vetoa on mahdollista mitata esim. köysivoimia, jolloin anturin pinnoissa on tavallisesti ruuvikiinnitys vetovoiman mittaamiseksi. Ajoneuvojen akselipainoväoissa, jotka ovat hyvin ohuita, painon mittaaminen perustuu nestepaineen mittaamiseen paineanturilla. Voima-antureita on saatavilla laajalla skaalalla 10 N ... 1000 kN. Antureiden tarkkuus on n. 1 % ... 2 %. Kuvassa 17 on esitetty ajoneuvonosturin akselipainojen punnitsemista koekuormitusta varten.



Kuva 17. Ajoneuvon akselipainojen punnitsemista akselipainovaaioilla koekuormituksessa

Voima-antureita voidaan käyttää silloissa pienempien rakenneosien ja köysivoimien mittaamiseen sekä ajoneuvovaaioissa akselipainojen mittaamiseen. *Kuvassa 18* on esitetty voima-antureita suurten ja pitkäaikaisten voimien mittaamiseen.



Kuva 18. Pitkäaikaisten ja suurten voimien (3 MN) mittaamiseen tarkoitettuja voima-antureita (Kyowa).

5.3 Sillan kuntoa ja olosuhteita mittaavat anturityypit

Sillan kuntoa mittaavat anturit mittaavat sillan pitkäaikaisia ominaisuuksia ja niiden muutoksia. Nämä ominaisuudet eivät yleensä ole suoraan riippuvaisia sillan yli kulkevasta liikennekuormista, mutta huono kunto näkyy usein myös sillan mekaanisissa ominaisuuksissa kuten taipumassa, osien välisissä liikkeissä ja värähtelytaajuudessa. Anturit sijoitetaan usein betonin tai puun sisään, mutta muutamat anturit esim. säätietoja mittaavat anturit sijoitetaan sillan läheisyyteen.

5.3.1 Kosteus

Huokoisen materiaalin, kuten betonin, kosteuden mittaus voidaan tehdä absoluuttisen kosteuden tai suhteellisen kosteuden mittauksena. Materiaalin absoluuttisella kosteudella tarkoitetaan sen sisältämän veden painon suhdetta materiaalin kuivapainoon. Suhteellisella kosteudella tarkoitetaan materiaalin huokosissa olevan ilman suhteellista kosteutta tasapainotilassa. Suhteellinen kosteus, päinvastoin kuin absoluuttinen kosteus, riippuu ilman lämpötilasta. Käyrästä, jotka esittävät absoluuttisen kosteuden ja suhteellisen kosteuden yhteyden, kutsutaan absorptio-käyriksi, ja niiden muoto riippuu materiaalin huokosrakenteesta. Absoluuttisen kosteuden mittausmenetelmiä ovat:

- Sähköiseen vastukseen perustuva menetelmä
- Pintakosteusmittaus
- Optiseen kuituun perustuva mittaus

Sähköiseen vastukseen perustuvassa menetelmässä tutkittavan rakenteen pintaan kiinnitetään kaksi elektrodia. Elektrodit asennetaan porareikiin tarkalleen määrätyle etäisyydelle toisistaan. Elektrodien väliltä mitataan vastus, joka on periaatteessa kääntäen verrannollinen kosteuspitoisuuteen.

Ainetta rikkomattomassa pintakosteusmittauksessa betonin pintaan painetaan anturi, joka mittaa betonin dielektrisiä ominaisuuksia. Laite muuntaa siihen ohjelmoidun laskentakaavan avulla betonin dielektrisyden absoluuttiseksi kosteudeksi.

Valettavassa materiaalissa, kuten betonissa, kosteutta voidaan mitata myös kaapeli-parilla, jonka muodostavat optinen kuitu ja lämmityskaapeli. Rakenteen kosteuden seuranta varten kaapelit asennetaan rakenteen sisään haluttuun syvyyteen. Optiseen kuituun perustuvan mittausmenetelmän vahvuus on siinä, että kuidulla saadaan tietoja koko kuidun pituudelta, joka voi olla satoja metrejä tai jopa kilometrejä.

Suhteellisen kosteuden mittausmenetelmiä ovat

- Mittaus porausreiästä
- Mittaus betonivaluun asennetuilla kosteusantureilla

Materiaalin suhteellisen kosteuden mittaus rakenteeseen poratusta reiästä kapasitiivisella kosteudenmittausanturilla on ollut useiden vuosien ajan yleisessä käytössä kosteudenmittauksissa. Mittaustulokset riippuvat rakenteen lämpötilan päivittäisistä vaihteluista, minkä johdosta mittaus vaatii sen tekijältä erityistä ammattitaitoa. Säärasituksille alttiina oleville siltatyömaille se ei sovellu erityisen

hyvin, mutta rakennusten sisällä sitä voidaan käyttää mm. erilaisten pinnoitusmateriaalien kosteuskriteerien täyttymisen tarkkailussa. Menetelmä on ainetta rikkova, mutta soveltuu periaatteessa myös jatkuvatoimiseen mittaukseen.

Betoniin valuun asennettava resistiivinen anturi soveltuu kapasitiivisia antureita paremmin ulkoilmakäyttöön. Se mittaa anturin sisältämän tunnetun materiaalin, esimerkiksi puun, sähkönjohtavuutta ja muuntaa mittaustuloksen suhteelliseksi kosteudeksi laitteeseen ohjelmoidulla laskentakaavalla. Menetelmä soveltuu jatkuvatoimiseen monitorointiin.

Resistiivisiä antureita on asennettu uusien siltojen kansi- ja alusrakenteisiin sekä reunapalkkeihin betonin kosteuspitoisuuden seuraamiseksi. Kosteuspitoisuuden seuraaminen on tärkeää erityisesti, jos rakenteiden pintaan asennetaan pinnoitteita tai vedeneristyksiä.

Kuvassa 19 esitetään betoniin valettavat resistiiviset anturit, jotka mittaavat suhteellista kosteutta ja lämpötilaa. Anturit kytketään tiedonkerääjään, josta on langaton gsm-yhteys tietokoneeseen. Näitä puun vastusta mittaavia antureita ei tarvitse kalibroida uudelleen, eivätkä ne vaadi signaalin vahvistinta käytettäessä pitkiä johtoja anturin ja tiedonkerääjän välillä. Myös langaton yhteys anturista tiedonkerääjään on mahdollinen paristollisilla antureilla.



Kuva 19. FuktComin Sahlen-anturi (vasemmalla) ja Sahlen-anturi HD (Heavy Duty) (oikealla).

5.3.2 Lämpötila

Termoelementti

Rakenteen lämpötila mitataan yleensä termoelementeillä. Termoelementeissä on kaksi eri metalleista valmistettua johdinta, jotka liitetään yhteen toisesta päästä kiertämällä, hitsaamalla tai juottamalla. Mittaaminen perustuu ns. Seebeck ilmiöön, jossa kahden eri johteen väliset liitokset aiheuttavat termojännitteen lämpötilan muuttuessa. Yhteen liitetty pää sijoitetaan paikkaan, jonka lämpötilaa halutaan mitata. Termoelementti tuottaa jännitteen, jonka suuruus riippuu lämpötilasta.

Periaatteeltaan kaikki termoparianturit on valmistettu tällä tavoin. Useimmiten kuitenkin varsinaiset anturit on tehty asentamalla itse termopari suojuksen sisään. Termoparilla päästään noin 0,5 °C:n tarkkuuteen, mikä on yleensä riittävä silta-kohteissa. Yleisin termopari on K-tyyppiä, missä parin muodostavat metalliseokset ovat kromi-nikkeli ja alumiini-nikkeli. Betonin lämpötilamittauksissa voidaan käyttää myös T-tyypin antureita, joissa metallit ovat kupari ja kupari-nikkeli (konstantaani).

Termoelementtiä ja tarkkaa mittalaitetta (0,1 °C) pidetään tarkkuudeltaan riittävänä, jos joudutaan mittaamaan roudan syvyyttä esim. sillan maatuen läheisyydessä.

Vastusmittaus (PT 100 anturi)

Lämpötilaa voidaan mitata myös vastusmittauksen avulla, sillä metallin vastus muuttuu lämpötilan muuttuessa. PT100 anturin vastus on 100 ohmia 0 °C ja muuttuu 0,385 /°C. Anturin tarkkuus on 0,5 °C välillä -50 °C ... 100 °C.

Termistori

Lämpötilan mittaus termistorilla perustuu puolijohteen vastuksen muuttumiseen lämpötilan muuttuessa, joka on kuitenkin epälineaarista. Anturin mittausvirta vaikuttaa mittauksen tarkkuuteen, joka on tyypillisesti 0,1 °C–0,5 °C. Mittausanturi voidaan tehdä hyvin pienikokoiseksi ja sijoittaa rakenteen sisään.

Muut lämpötilan mittalaitteet

Lämpötilaa voidaan mitata myös monella muulla tavalla. Infrapunakamera perustuu lämpösäteilyn mittaamisen valo-lämpöherkän kennon avulla. Lämpökameralla saadaan lämpötilat koko rakenteesta, mutta sen arvoja on vaikea automaattisesti monitoroida. Mittaustarkkuudeksi luvataan 1 °C ... 2 °C.

Jatkuvatoiminen lämpötilojen seuranta on nykyisin yksinkertaista langattomilla lähettimillä. Etävastaanotin sijoitetaan rakennustyömaalle ja liitetään tietoverkkoon. Mittauslähettimet sijoitetaan lähelle mittauskohdetta ja mittauslanka viedään mittauskohteeseen, esim. betonirautaan. Etävastaanotin kuuntelee lähettimiä ja välittää mittautiedot Ethernetin kautta tiedonkeruuyksikölle, johon voidaan liittää useita työmaakohteita ja lähettimiä.

5.3.3 Säätiedot

Sillan betonirakenteiden turmeltumisen, kannen jäätymisen ja tuulen vaikutusten mittaamiseksi voidaan sillan läheisyydestä monitoroida säätietoja joko erillisillä antureilla tai sääaseman avulla. Suomessa Ilmatieteen laitos kerää ja tallentaa säätietoja omien asemiansa kautta, mutta sillan luona olevalla paikallisella sääasemalla saadaan kerättyä paikallista säätietoa sillan todellisista sääolosuhteista.

Säätietojen mittaus käsittää tavallisesti ilman ja tienpinnan lämpötilan, tuulen nopeuden ja suunnan sekä sademäärän mittaukset. Erikseen voidaan lisäksi mitata esim. ilman kosteutta ja auringon säteilyä. Tuulen nopeutta ja suuntaa mitataan esim. mekaanisesti pyörivällä ja kääntyvällä kuppiroottorilla tai liikkumattomilla ultraääniantureilla. Ultraäänimittaus perustuu äänen nopeuden mittaamiseen, joka riippuu ilman liikenopeudesta lähettimen ja vastaanottimen välillä. Lämpötilaa mitataan lämpötila-antureilla ja sademäärää pienen kallistuvan kupin avulla tai nykyisin usein ultraäänianturin avulla.

Säätietoja mitataan, jotta voidaan analysoida sillan betonirakenteiden turmeltumista esim. kosteuden vaikutuksesta ja myös turvallisuuden kannalta, kun sillan päällyste voi jäätymä kosteuden tai sateen vaikutuksesta. Sillan kannen jäätyminen on tärkeä seikka mitata reaaliaikaisesti, jotta siitä voidaan tiedottaa liikenneturvallisuuden varmistamiseksi. Kosteus, lämpötila, tuuli ja auringon säteily vaikuttavat betonin turmeltumiseen, jossa betonin märkänä pysymisen kesto on tärkeä parametri. *Kuvassa 20* on esitetty säätietojen ja auringon säteilyn mittaus sääaseman avulla (Vaisala Oy).



Kuva 20. Säätietojen ja auringon säteilyn mittaus sääaseman avulla (Vaisala Oy).

5.3.4 Aallon eteneminen (teräsrakenteet)

Akustinen emissio perustuu korkeataajuiseen (50 KHz ... 1 MHz) värähtelyn mittaamiseen rakenteesta tavallisesti teräsrakenteesta. Värähtelyt syntyvät ajoneuvojen ylityksistä ja tuulesta. Mittauksissa käytetään usein aaltojohtimia, jotta akustisen emissioon anturit voidaan asentaa rakenteen ulkopuolelle. Anturilla voidaan mitata teräsrakenteista särön kasvua ja liitoksen lähettämää värähtelyä. Sillat ovat raskaita teräsrakenteita, joissa on paljon liitoksia ja siten paljon taustakohinaa. Silta-mittauksissa ei antureita ole paljon käytetty, mutta yksittäisen särön kasvun mittaus suhteellisen läheltä säröä on mahdollista mitata. Tavallisesti mittausmenetelmä testataan ensin laboratorioissa, josta saadaan särön kasvunopeuden ja sen lähettämän aallon intensiteetin yhteys eri rakenteille ja materiaaleille.

5.3.5 Teräsrakenteiden vaurioituminen

Teräsrakenteiset sillat voivat vaurioitua korroosion seurauksena, jolloin teräksen pinta ruostuu ja siten kantavien teräsosien kestävyys voi heikentyä. Rakennneosat, jotka ovat näkyvissä, ovat helpommin tarkastettavissa kuin rakenteen sisällä olevat teräsosat ja -pinnat. Kaikki teräsosat on yleensä maalattu tai muuten pintakäsitelty, joten ruostuminen on helppo havaita silmämääräisesti sillan tarkastuksen yhteydessä. Joskus teräsosat ovat vaikeasti tarkastettavissa, jos pääsy osan luokse vaatii telineitä tai nostimen, jolloin vauriot voivat jäädä huomaamatta. Sillan monitoroinnissa ei yleensä monitoroida teräsrakenteiden pintakorroosiota, koska se muutenkin on havaittavissa.

Muita teräsosien vaurioita ovat väsymissäröt ja hitsausvirheet, jotka ovat tavallisesti pieniä ja usein myös maalipinnan peittämiä ja siten vaikeasti havaittavia. Hitsisauman viat etsitään tavallisesti heti hitsauksen jälkeen asetettujen laatu- ja tarkastusvaatimusten mukaisesti. Tarkastus voi olla ainakin osin automatisoitua, mutta varsinaisesti sillan rakentamisen jälkeen hitsivikoja ei ole monitoroitu. Hitsivioilla on kuitenkin tärkeä merkitys väsymissäröjen ydintymiskohtina. Väsymissäröt voidaan

havaita röntgen-, ultraääni- ja tunkeumanestetarkastuksissa. Näitä menetelmiä ei kuitenkaan käytetä monitoroinnissa, koska menetelmien automatisointi monitorointiin on vaikeata siten, että, niitä voitaisiin soveltaa yksittäisen löydetyn särön kasvun seuraamiseen. Havaittua väsymissäröä voidaan seurata esim. sarjaliuskoilla, jotka reagoivat särön etenemiseen ks. luku 5.2.2.

5.3.6 Betoniraudoituksen korroosio

Ilmatilassa raudoituksen korroosio voi alkaa vain, jos raudoitusta ympäröivässä betonissa tapahtuu fysikaalisia tai kemiallisia muutoksia. Terästen korroosion kannalta tärkeimmät muutoksia aiheuttavat tekijät ovat

- ilman hiilidioksidin aiheuttama karbonatisoituminen, minkä seurauksena betonin pH laskee,
- voimakkaasti korroosiota edistävien anionien, erityisesti kloridien, tunkeutuminen ympäristöstä betoniin.

Korroosio käynnistyy, kun karbonatisoituminen tai nk. kriittinen kloridipitoisuus tavoittaa raudoitussyvyyden. Karbonatisoituminen mitataan yleensä rakenteesta irrotetusta näytteestä pH-indikaattorilla. Kloridien tunkeutumissyvyys mitataan yleensä kemiallisin menetelmin eri syvyyksiltä otetuista jauhenäytteistä.

Korroosion käynnistymisaika betonipeitteen syvyyden funktiona voidaan mitata suoraan Saksassa kehitetyillä anoditikasanturilla (anode ladder, Institut für Bau-forschung). Anturin muodostavat anodina toimiva musta teräselektrodi ja katodina toimiva jalometalielektrodi. Molemmat elektrodit ovat korroosiolta suojassa ollessaan betonissa, joka ei ole karbonatisoitunut tai jonka kriittinen kloridipitoisuus ei ole ylittynyt. Kun betoni saavuttaa kriittisen kloridipitoisuuden tai sen pH laskee karbonatisoitumisen seurauksena, korroosio aktivoituu anodin pinnalla. Elektronivirta anodin ja katodin välillä voidaan helposti mitata ulkopuolisella kaapeliliitännällä ja matalavastuksisella ampeerimittarilla. Anoditikkaat asennetaan betonivaluun vinosti rakenteen sisään niin että jokainen tikasanodi on eri etäisyydellä betonipinnasta. Tikasrakenteen ansiosta korroosionopeus voidaan mitata eri syvyyksillä ja sen perusteella arvioida, miten syvällä raudoitustangot ovat suojassa korroosiolta.

Korroosion vaikutuksesta sähkökemiallinen potentiaalienttä muuttuu raudoitustangon ympärillä. Tähän perustuu raudoituksen korroosion paikallistaminen sähkökemiallisella potentiaalimittauksella. Sähkökemiallinen potentiaali mitataan millivolttimittarin ja nk. vertailuelektrodin avulla. Nykyisin on saatavilla kenttäkäyttöön kehitettyjä referenssielektrodeja, joissa yleensä on kupari tanko kuparisulfaattiliuoksessa (kupari-kuparisulfaattielektrodi). Mittarin toinen napa yhdistetään raudoitusteräkseen ja toinen referenssielektrodiin, jonka potentiaali on vakio.

Standardin ASTM C 876-09 /17/ mukaan alueella esiintyy korroosiota yli 90 %:n todennäköisyydellä, jos potentiaali ylittää -350 mV (CSE). Tämä sääntö on kehitetty siltakansille eikä pidä paikkaansa kaikilla rakenteilla.

Potentiaalimittauksen tulokset ilmaisevat, onko korroosio käynnissä vai ei. Korroosionopeudesta se ei kerro käytännöllisesti katsoen mitään. Korroosionopeus voidaan kuitenkin mitata nk. polarisaatiovastusmenetelmällä. Menetelmä on kehitetty laboratorikäyttöön, mutta sitä voidaan nykyisin käyttää myös kenttämittauksissa. Polarisaatiovastusmenetelmässä käytetään mittalaitetta, joka mittaa potentiaaliero

raudoituksen ja referenssielektrodin välillä. Laitteen toinen napa kytketään raudoitus-teräkseen ja toinen kytketään anturiin, jonka keskellä on referenssielektrodi.

Korroosionopeuden mittauksella saadaan selville korroosion etenemisnopeus. Sekään ei kuitenkaan kerro kohteen rakenteellisesta kunnosta, ts. siitä, miten paljon teräs-tangot ovat syöpyneet ja miten paljon tämä vaikuttaa rakenteen kantokykyyn ja muihin rakenteellisiin ominaisuuksiin. Tähän tarkoitukseen ei valitettavasti ole toistaiseksi luotettavia ainetta rikkomattomia menetelmiä.

Hiiliteräksisille betoniraudotteille käytännössä ainoa pitkän aikavälin menetelmä korroosion pysäyttämiseksi on katodinen suojaus. Järjestelmään kuuluvia pitkäikäisiä referenssielektrodeja käyttäen voidaan tehdä ajoittaisia depolarisaatiotestejä, joilla todennetaan korroosipotentiaalin pysyvä muutos (polarisaatio) riskirajan alapuolelle. Tällöin siis monitoroidaan korroosionestojärjestelmän tehoa korroosioriskin tai nopeuden mittaamisen asemasta.

5.3.7 Betonin vaurioituminen

Betonin sisäistä turmeltumista, halkeamia, laminoitumista ja ”rotankoloja”, voidaan tutkia kaikuluotain periaatteella. Tämän tyyppisissä laitteissa lähetinanturi lähettää pulssin, joka heijastuu takaisin materiaalin epäjatkuvuuskohdista ja heijastunut pulssi rekisteröidään vastaanottoanturilla. Pulssin liikeajasta voidaan arvioida epäjatkuvuus-kohdan syvyys. Nykyisissä mittalaitteissa on yleensä useita lähetin- ja vastaanotto-antureita rivissä, jolloin kohteesta saadaan huomattavasti enemmän tietoa. Tiedot voidaan prosessoida ja esittää monitorilla. Parhaimmassa tapauksessa monitorilla voidaan esittää 2D- tai 3D-kuva, joka ominaisuuksiltaan lähentelee todellista rakenteen poikkileikkauskuvaa.

Sähköistä kaikuluotainmenetelmää kutsutaan maatumalkaluotaukseksi, koska menetelmä kehitettiin alun perin geologisiin tarkoituksiin. Menetelmää on kuitenkin voitu soveltaa hyvällä menestyksellä myös teiden ja siltakansien tutkimuksiin. Nykyiset laitteet ovat suuria ja vaativat erityisasiantuntemusta tulosten tulkinnaissa.

Ultraääneen perustuvaa menetelmää on käytetty pitkään rakenteiden sisäisen vaurioitumisen arvioinnissa. Esimerkiksi betonin pakkasrapautumisen mittasuurena on usein käytetty ultraäänen läpimenoaikaa, joka mitataan koekappaleen päihin asetettujen lähetin- ja vastaanottoanturien avulla. Ultraääneen perustuvaa kaikuluotainmenetelmää on kuitenkin kehitetty viime aikoina pitemmälle tomografian suuntaan. Nykyisin on olemassa jo laitteita, joilla voidaan muodostaa kolmiulotteinen ”tomogrammi” rakenteen sisältä (MIRA-laite).

5.4 Muut liikennettä ja sillan ominaisuuksia mittaavat anturityypit

Liikenteen painoja ja määriä voidaan mitata erityyppisillä antureilla sekä teillä että rautateillä. Siltojen osalta tuloksia tarvitaan esim. sillan väsymiskestävyuden laskennassa. Näitä tuloksia voidaan myös yhdistää sillan muihin mittauksiin, jos halutaan tietää ylittävän raskaan ajoneuvon paino. Raskaan liikenteen painojen mittaamiseen voidaan käyttää myös tutkittavaa siltaa ja siihen liitettyä monitorointijärjestelmää.

Viime aikoina langaton anturitekniikka on kehittynyt lisää ja tulevaisuudessa nämä anturit voivat olla hyvin käyttökelpoisia siltojen monitoroinnissa etenkin, jos virran syöttöä ei tarvittaisi (esim. aurinkokennoanturit).

5.4.1 Tieliikenne

Liikenteen määrää ja nopeutta voidaan mitata monen tyyppisillä antureilla ja laitekokonaisuuksilla, jotka analysoivat mittaustulokset automaattisesti halutulla tavalla. Suomessa Liikennevirastolla on liikenteen automaattisten mittausasemien (LAM) järjestelmä, jonka mittauspisteissä (440 kpl, vuonna 2014) olevat anturit keräävät tietoa ajoneuvomääristä, -tyypeistä ja ajonopeuksista. Mittaukset perustuvat päällysteen sisään asennetuista induktiosilmukka antureista, jotka reagoivat metalliin, tavallisesti ajoneuvojen akselien, aiheuttamaan muutokseen induktiokentässä. Ylitysten perusteella saadaan myös ajoneuvot luokiteltua tyypeittäin akselin lukumäärien mukaan. LAM-mittauspisteet toimivat automaattisesti ja niissä on kaukopurku tietokantoihin, joista tulokset ovat saatavilla. LAM-pisteiden keräämistä liikennetiedoista tehdään Liikennevirastossa vuosittain yhteenvetoraportti, LAM-kirja.

Liikenteen määriä ja nopeuksia voidaan mitata myös kahden lasersäteen avulla, jolloin mittaus perustuu säteen signaalin katkeamiseen ajoneuvon kohdalla ja anturia ei tarvitse upottaa tiehen. Viime aikoina on kehitetty myös videokuvaan perustuvia analysointimenetelmiä, jotka perustuvat konenäköön. Menetelmä pystyy tunnistamaan myös ajoneuvon rekisterinumeron ja mittaamaan siten pidemmältä väliltä (esim. kaupunkien välillä) keskinopeuden. *Kuvassa 21* on kuva liikennekamerasta sillan läheisyydessä.



Kuva 21. Liikenteen valvontaan tarkoitettu liikennekamera sillan läheisyydessä (Liikennevirasto).

5.4.2 WIM (Weight in Motion, liikkuvan ajoneuvon painon mittaus)

Raskaiden ajoneuvojen kokonais- ja akselipainoja voidaan mitata tiestöllä sekä tierakenteeseen että siltaan asennettavilla järjestelmillä. Näiden järjestelmien avulla saadaan painotietojen lisäksi tavallisesti mitattua myös samat tiedot liikennemääristä ja nopeuksista kuin LAM-järjestelmillä (ks. 5.4.1), mutta usein vielä lisäksi myös tarkennetut tiedot ajoneuvotyypeistä ja akseliväleistä. Myös yksittäisistä ajoneuvoista otettujen valokuvien yhdistäminen mittauksiin on mahdollista.

Tierakenteeseen asennettavia järjestelmiä on eri tyyppisiä, perustuen mm. akselipainojen mittaamiseen tierakenteen pintaan upotetuilla vaakalevyillä tai tierakenteeseen upotetuilla paineantureilla. Silta-WIM (bridge WIM) -järjestelmissä mittausanturit kiinnitetään siltaan (esim. lyhytjänteinen betonisilta). Oikein mietityn anturikokoonpanon (esim. venymäanturit), sillan tarkasti kalibroidun toiminnan sekä analysointiohjelman perusteella voidaan määrittää kaikki WIM-järjestelmiltä vaadittavat mittauksiedot.

WIM-mittauksia voidaan tehdä joko jatkuvasti kiinteillä laitteilla tai toistuvina siirrettävillä laitteilla. Oleellista on järjestelmän kalibrointi painoltaan ja akseliväleiltään tunnetulla ajoneuvolla. Jatkuvissa mittauksissa tämä pitää tehdä säännöllisesti ja lyhytaikaisissa toistuvissa mittauksissa (Silta-WIM-mittaukset useimmiten) ennen ja jälkeen mittausjakson. Silta-WIM systeemi ei ole tarkoitettu sillan kunnon tai rasitusten mittaukseen, vaan ajoneuvopainojen määrittämiseen ja siksi sillan toiminta ei saisi oleellisesti muuttua mittausjakson aikana, jotta tulokset olisivat luotettavia. Yleisesti ongelmana on Suomen olosuhteissa ollut WIM-järjestelmille talviolosuhteet, jotka voivat muuttaa äkillisestikin rakenteiden toimintaa ja aiheuttaa haasteita laitteistojen kestävyydelle.

Liikennevirasto on testannut silta-WIM-järjestelmän käyttöä vuosina 2013–2015 kuudessa eri mittauspisteessä. Mittauksilla on selvitetty mm. raskaiden ajoneuvojen määriä ja painoja eri puolilla tieverkkoa sekä seurattu kokonaispainojen ja ajoneuvotyyppien kehittymistä vuosittain vuonna 2013 uudistuneen ajoneuvoasetuksen seurauksena.

On myös olemassa rakenteiden monitorointiin käytettäviä järjestelmiä, jotka soveltuvat ajoneuvopainojen, -määrien ja nopeuksien mittaamiseen samalla, kun ne mittaavat muodonmuutoksia ja jännitystiloja ja hälyttävät ylikuormista ja ottavat siitä kuvan.

Rautateillä käytetään junien painojen mittaamiseen pyörävoimailmaisimia, joita Suomen rataverkolla on tällä hetkellä (10/2015) on 11 paikassa. Pyörävoimailmaisimilla mitataan sekä kiskoon että kiskon ja ratapölkyn väliin asennettujen antureiden avulla pyörävoimat ja siten koko yli ajavan junakaluston paino. Järjestelmään on asetettu akselipainoille ja dynaamisille lovipyöräiskuille hälytysrajat.

5.4.3 Mittausajoneuvo, mittausvaunu

Rautateiden kuntoa mitataan jatkuvasti tarkoitukseen kehitetyllä mittavaunulla. Mittavaunulla voitaisiin rautateillä mitata myös maaperän ja siltojenkin kuntoa. Japanissa on kokeiltu betonisiltojen kunnon mittauksia kaupunkilinja-autojen akseliin asennetulla kiihtyvyyssanturilla. Mittauksen etuna on, että sillä voidaan mitata useita siltoja jatkuvasti, jolloin saadaan selville sillan kunnon kehittyminen esim. halkeilun

lisääntyminen, jolloin sillan ominaistajuus pienenee. Mittauksen tarkkuutta rajoittaa linja-auton nopeuden-, ajolinjan ja matkustajamäärän vaihtelut.

5.4.4 Videokuva

Valokuvia ja videokuva voidaan käyttää moniin monitorointitarkoituksiin, kuten liikenteen, sillan kunnan ja turvallisuuden kartoittamiseen ja valvomiseen. Kuvat otetaan nykyisin digitaalisessa muodossa ja tallennetaan tietokoneen muistiin myöhempää käsittelyä varten. Kameroina käytetään ulkokäyttöön tarkoitettuja laitteita, jotka kytketään videokaapelilla ja modeemilla valvomoon, mutta myös langaton yhteys suoraan kamerasta on mahdollinen. Liikennevirastolla on jo käytössä kelikameroita myös siltojen läheisyydessä, joilta saadaan tietoa sääolosuhteista, tien pinnan kunnosta, liikennetiheydestä ja mahdollisista onnettomuuksista.

Keskeisin tarve video- ja valokuvaamiseen on useimmiten poikkeuksellisten kuormitustilanteiden kuvaaminen. Kuvauksen voi käynnistää tietyn triggearvon ylitys, jolloin saadaan kuvaa esim. yliraskaista ajoneuvoista, useiden ajoneuvojen yhtäaikaista esiintymisestä sillalla tai erikoiskuljetuksista. Videokuva voidaan käyttää ajoneuvojen tunnistamiseen, esim. ajoneuvon nopeus, tyyppi ja ajolinja saadaan suoraan videokuvasta. Kuvasta on haluttaessa myös mahdollista tunnistaa ajoneuvon rekisterinumero.

Kameralla otettua kuvaa tai videota voidaan analysoida automaattisesti, jolloin mm. mahdollisista poikkeavuuksista, kuten jäisestä tien pinnasta ja onnettomuuksista, voidaan hälyttää automaattisesti. Sillan kuntoa voidaan valvoa yksittäisillä kuvilla ja videokuvalla, esim. eri aikoina sillan tarkastuksen yhteydessä otettuja kuvia voidaan vertailla ja löytää vaurioita tai vaurioituneiden alueiden kasvu.

5.4.5 Tutka

Tutkan toiminta perustuu radioaaltojen taajuuden muuttumiseen kohteen (ajoneuvon) liikkua tutkalähetintä kohti. Nykyisin on saatavissa liikennetutkia, jotka voidaan liittää tietokoneeseen ja joilla voidaan mitata ajoneuvon nopeus sillalla. Tutkan tarkkuus on n. +/- 1 km/h.

5.4.6 Melumittaus

Tiesilloilla ajoneuvot tai tuuli aiheuttavat harvoin häiritsevää melua, mutta teräs-rakenteisilla rautatiesilloilla junat voivat sitä aiheuttaa. Melua mitataan mikrofoneilla ja melumittareilla. Melun mittauksessa on otettava huomioon mitatun signaalin oikea suodatus standardien mukaan, jotta vaikutus ihmiskorvaan olisi oikea. Perustietoa melun mittaamisesta ja ohjearvoista on annettu Tiehallinnon julkaisussa 'Tieliikenteen melu' /16/ ja VTT:n esiselvityksessä 'Maaliikenteen aiheuttaman runkomelun arviointi'. VTT:n tiedotteita 2468 /18/.

5.4.7 Langattomat anturit

Siltamittauksissa on käytetty jonkin verran myös langattomia antureita, jotka koostuvat tavallisesti mittausyksiköstä ja siihen langallisesti liitettävistä erityyppisistä antureista. Mittausyksikkö ja anturit saavat virtansa akusta tai paristosta, joten systeemi pystyy toimimaan itsenäisesti vain muutamia vuorokausia tai enintään vuoden, jos mittaustajuus on hyvin harva. Mitattu tieto puretaan mittausyksiköltä

langattomasti keskusyksikköön, joka tavallisesti on kytketty sähköverkkoon. Tiedon-siirto, erityisesti tiedon lähettäminen kuluttaa virtaa, joten usein mittalaite ohjelmoidaan lähettämään tietoa vain kerran tunnissa tai harvemmin.

Viime aikoina langattomat anturit ovat kehittyneet. Niiden ohjelmitavuus on parantunut, virran kulutus on pienentynyt ja joitain laitteita pystytään lataamaan aurinkokennolla, värähtelyllä tai lämpötilaerolla. Toistaiseksi antureita voitaisiin käyttää ainakin muutaman vuorokauden mittauksissa, esim. koekuormituksissa, jolloin säästytään mittausjohtojen asentamiselta. Langattomia antureita ovat myös ns. RFID (**R**adio **F**requency **I**dentification) anturit, jotka saadaan mittaamaan antennista tulevan ulkoisen sähkökentän avulla. Toistaiseksi antennin tuottama energia riittää lukemaan vain muutaman metrin etäisyydellä olevia antureita, mutta mittaustekniikka kehittyy nopeasti tälläkin alueella.

5.4.8 Anturin paikan määrittäminen

Monitorointia dokumentoitaessa on tarkoitus, että useita monitoroituja siltoja ja niistä saatuja mittaustuloksia voidaan käsitellä myös yhtenä ryhmänä ja analysoinnit voidaan kohdistaa koko siltaryhmään. Tämä on mahdollista, jos mitattu data on tarkasti määritelty ja anturien paikat määritelty sillan nimettyjä osia ja koordinaatteja käyttäen.

Liikennevirasto on julkaissut ohjeen sillan tietomallin tallentamisesta sähköisessä muodossa /3/, mutta toistaiseksi ei ole olemassa ohjeistusta siltojen tietomalleihin liittyvään rakenneosien nimeämiseen ja koodaukseen. Uusille silloille voitaisiin anturin paikka antaa myös sillan BIM mallissa, jolloin anturit voivat esim. vastata määrättyä sillan rakenneosaa (anturista muodostuva osa), mutta tästäkään ei ole vielä tarkempia ohjeita.

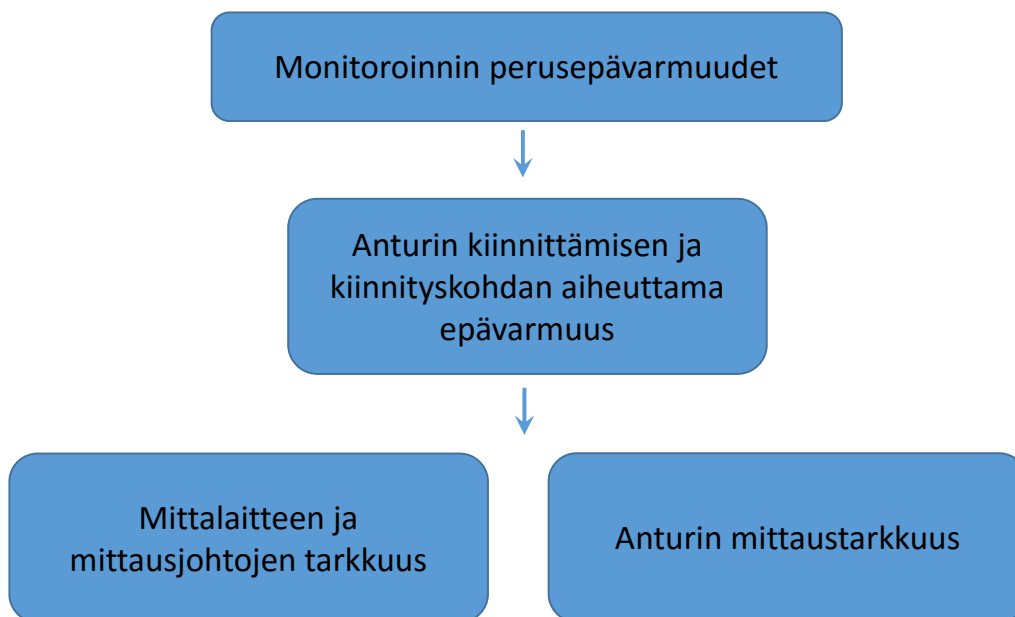
Esimerkki anturin tarkasta ja systemaattisesta koodausmenetelmästä on esitetty *liitteessä 2* ja sitä voidaan käyttää, ellei muita systemaattisia menetelmiä ole käytössä. Menetelmä pohjautuu osien nimitysten käyttöön, jotka on annettu Liikenneviraston 'Sillantarkastuskäsikirjassa' /4/ ja *liitteessä 2* esitettyihin tarkempiin määrityksiin.

6 Mittaustarkkuus siltamittauksissa

Siltamittauksia tehtäessä käytetään usein erityyppisiä antureita ja mittalaitteita. Myös mittajohtöjen pituus ja poikkileikkaus voi vaihdella. Käytännössä ei ole mahdollista kohtuullisella työllä selvittää teoreettisesti siltamittausten tarkkuutta ja tästä syystä mittaustarkkuus täytyy arvioida vain yksinkertaisella menetelmällä, jossa lähtökohtana on antureiden ja mittalaitteiden valmistajien ilmoittamat tarkkuudet. Käytettyä mittaustenmenetelmää antureineen ja mittajohtöineen on testattava ensin mittausta tarjoavan yrityksen omissa tiloissa, jotta voidaan varmistua siitä, että laitteet ja anturit ovat oikein kytketyt ja että niitä osataan käyttää valmistajien ohjeiden mukaan. Koekuormituksessa mittaustuloksia verrataan sillan analysoinnista saatuihin tuloksiin. Monitoroinnin mittaustenvirheet voidaan luokitella seuraaviin kolmeen perusepävarmuuteen, mikäli tarkempaa virhetarkastelua ei ole mahdollista tehdä.

- Anturin kiinnittämisen ja kiinnityskohdan aiheuttama epävarmuus
- Anturin mittaustarkkuus
- Mittalaitteen ja mittaustenjohtöjen tarkkuus

Perusepävarmuudet on esitetty kuvassa 22.



Kuva 22. Perusepävarmuudet siltöjen monitoroinnissa.

Yllä mainittuja perusepävarmuuksia on käsitelty tarkemmin luvussa 6 ja liitteessä 3.

6.1 Anturin kiinnittämisen ja kiinnityskohdan aiheuttama epävarmuus

Anturi on kiinnitettävä rakenteeseen valmistajan antamien ohjeiden mukaan. Useimmat anturit on kiinnitettävä sillan rakenteeseen tiukasti niin, että anturi seuraa tarkasti rakenteen muodonmuutoksia, värähtelyä, lämpötilaa ja kosteutta. Anturin kiinnitys on tehtävä oikealla tekniikalla ja huolellisesti, jotta se toimisi luotettavasti koko halutun monitorointiajan. Jotkut anturivalmistajat tai maahantuojat järjestävät kurseja, joissa opetetaan anturin oikea kiinnitystapa (esim. venymäliuskat).

Anturin kiinnittäminen tapahtuu tavallisesti liimaamalla tai käyttäen mekaanista kiinnitystapaa (esim. ruuvit, hitsaus). Käytetty liima on valittava valmistajan ohjeiden mukaan, sillä sen tulisi mahdollisimman tarkasti siirtää pinnan liike anturiin. Ruuvit ja pultit kiinnitetään rakenteeseen tavallisesti esiporattuihin reikiin. Ruuvien esikiristyksen tulisi olla riittävän suuri ja ruuvien riittävän pitkiä, jotta esikiristys säilyisi, vaikka pinnat hieman tasoittuisivat tai lämpötila muuttuisi. Ruuviiliitoksessa voimat siirtyvät tavallisesti kitka- tai leikkausvoimien avulla. Anturin kiinnittämistä hitsaamalla väsytkuormitettuun teräsrakenteeseen tulisi välttää, sillä hitsisauma voi huonontaa rakenteen väsymiskestävyyttä. Tarvittaessa siltasuunnittelija antaa kiinnitysohjeet.

Betonirakenteeseen anturi voidaan kiinnittää myös käyttäen betoniin tarkoitettuja ankkuripultteja. Myös liimausta voidaan käyttää, mutta ennen liimausta betonipinta on esikäsiteltävä huolellisesti riittävän tartunnan aikaan saamiseksi.

Anturi joudutaan kiinnittämään usein rakenteeseen käyttäen erillistä kiinnitysosaa, jos anturin valmiit kiinnityskohdat eivät sovellu suoraan kiinnittämiseen. Käytetyn kiinnitysosan (esim. palkin, tangon, kuution yms.) on oltava riittävän luja ja jäykkä, jotta se ei lisää oleellisesti mittausvirhettä. Liian ohut tanko sillan taipumamittauksessa tai venymää mitattaessa voi värähdellä tuulen tai liikennekuorman vaikutuksesta. Myös rakenteeseen kiinnitetyn taivutusalkin on oltava jäykkyydeltään riittävä, jotta sen oma taipuma tai värähtelyn amplitudi ei vaikuta mittauksen tulokseen. Kiihtyvyyksimittauksissa on käytetyn lisäosan (esim. palkki tai kuutio) jäykkyys ja ominaistajuus tarkastettava *kaavalla 5* tai muilla sopivilla menetelmillä esim. FE-laskennalla siltasuunnittelijan kanssa. Palkin alimman ominaistajuuden tulisi olla vähintään 10-kertainen tutkittavaan ylimpään taajuuteen nähden. Myös pelkästään sillan palkin laippaan kiinnitetty anturi voi värähdellä laipan värähtelyn mukana, joka pitää huomioida kiinnityskohtaa valittaessa. Betonirakenteissa on lisäosan kiinnityksen betonipintaan oltava riittävän tukeva siten, että löystymistä ei tapahdu pitkäaikaisessa rasiuksessa. Löystymistä voi aiheutua betonipinnan tasoittumisesta, ruuvien esikiristyksen alenemisestä tai käytetyn liiman ja tasoitusmassan virumisesta.

Anturi kiinnitetään siltasuunnittelijan määräämään kohtaan sillassa. Venymäanturit kiinnitetään tyypillisesti jänteen keskelle. Jatkuvassa rakenteessa myös tukien kohdalla (tavallisesti pääpalkin ylälaipassa) taivutusmomentin määrittäminen venymämittauksin voi olla vaikeaa, sillä tuen leveys vaikuttaa mittauksen maksimi-arvoon oleellisesti.

Anturin mittauspituus voi vaikuttaa mittaustulokseen, sillä pitkä anturi mittaa venymää keskimäärin pituutensa matkalla, kun taas lyhyt anturi on hyvin riippuvainen paikallisista venymistä. Esim. betonin pinta voi olla halkeillut vetopuolella ja venymäliuskan lukema venymää betonin pinnasta mitattaessa jää tällöin todellista pienemmäksi. Tästä syystä suositellaankin betonivenymiä halkeilleista rakenteista mitattaessa käytettäväksi pidempiä, jopa yli monen halkeaman ylettyviä antureita. Edellinen ongelma koskeen myös raudoitettankojen mittauksia, joissa halkeaman kohdalla saatava venymän paikallinen mittaustulos on korkeampi kuin ehjässä betonissa.

Teräsrakenteissa voi olla myös ns. paikallisia jännityksiä, jotka vaikuttavat mittaus-tulokseen. Levymäisillä rakenteilla (esim. I palkki) ja vetotangoissa voidaan käyttää kahta anturia, jotka on kiinnitetty rakenteen vastakkaisiin pintoihin taivutusrasitusten eliminoimiseksi.

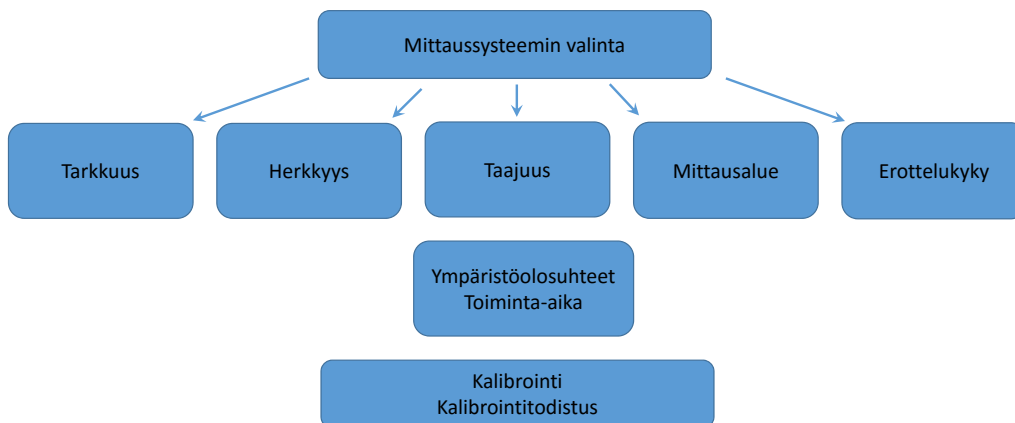
Kiihtyvyyssanturit olisi kiinnitettävä sellaiseen rakenneosaan, jossa haluttu mitattava kiihtyvyyss ja taajuus ovat suurimpia. Esimerkiksi sillan taivutusvärähtely mitataan sillan massiivisesta kannesta tai pääpalkeista ja vääntövärähtelyn selvittämiseksi mittaus tehdään molemmilta puolilta siltaa. Poikkipalkin värähtely sisältää sekä sillan globaalin taivutusvärähtelyn että palkin oman värähtelyn poikkisuunnassa.

Betonin kosteutta tai betoniraudoituksen korroosiota mitattaessa anturit usein asennetaan eri syvyyteen betonin sisään, sillä kosteus vaihtelee eniten pinnalla ja vähemmän sisäosissa. Mittausten olisi kestettävä useita kuukausia tai vähintään vuoden, sillä Suomessa vuodenaajat vaikuttavat myös betonin kosteuteen.

6.2 Mittalaitteen ja anturien mittaustarkkuus

Monitoroinnissa mittaussysteemin mittaustarkkuus riippuu sekä anturin että mitta-laitteen tarkkuuksista. Mittalaitteen ja anturin tarkkuuden tärkeimpiä ominaisuuksia siltamittauksissa ovat (ks. kuva 23):

- Tarkkuus
- Herkkyys
- Mittaustaajuus
- Mittausalue (suurin ja pienin mitta-arvo)
- Erottelukyky
- Ympäristöolosuhteiden ja toiminta-ajan vaikutus tarkkuuteen
- Kalibrointi ja kalibrointitodistus



Kuva 23. Pääparametrit mittaussysteemin valinnassa.

Tarkkuudella tarkoitetaan alun perin mitta-asteikon lukematarkkuutta, mutta nykyisin mittalaitteissa ei ole enää mekaanisia mittareita, vaan mittaus tapahtuu sähköisesti. Monissa mittalaitteissa ja antureissa tarkkuus ilmoitetaan muodossa $\pm 0,1$ (mitattava suure, esim. mm). Merkintä $\pm 0,1$ ilmoittaa mittauksen keskihajonnan ja samalla normaalijakauman σ :n. Tällöin on siis hyvinkin mahdollista, että mittaustulos poikkeaa enemmänkin kuin 0,1 mm todellisesta tuloksesta. Mittaussysteemin mittaustarkkuus koostuu siis anturin ja mittalaitteen mittaustarkkuudesta.

Herkkyys on näyttämän muutoksen suhde mittaussuureen muutokseen, esim. lämpötila-anturille $2 \Omega/^\circ\text{C}$. Herkkyys kuvaa siis anturin kykyä seurata mitattavan suureen muutosta. Herkkyyteen vaikuttaa myös käytetty mittalaite, joten ne molemmat on valittava siten, että saavutetaan haluttu mittausherkkyyys. Yleensä kaupallisesti valmistetut anturit ovat riittävän herkkiä siltamittauksiin, mutta anturin mittausaluetta ei saa valita liian suureksi. Mittalaitteessa tapahtuu analogisen jännitearvon (joskus virta-arvon) muuntaminen digitaalseksi A/D muuntimella. A/D muuntimessa käsiteltyjen bittien lukumäärä määrää arvojen lukumäärän mittaussvälille. Nykyisin pidetään riittävänä, jos mittauskortti on vähintään 24-bittinen.

Mittaustaajuuden on oltava siltarakenteissa riittävän suuri, yleensä vähintään 100 Hz, mutta mielellään jopa 1 kHz, sillä sillat ovat rakenteita, joihin ajoneuvot ja tuuli aiheuttavat värähtelyä. Mitattaessa dynaamisia kuormituksia on ennen mittausta esisuodatuksella suodatettava pois ne korkeat taajuudet, joista ei olla kiinnostuneita, jotta välttyään laskostumiselta. Tästä syystä mittalaitteen ja anturin on kyettävä mittaamaan selvästi korkeampia taajuuksia kuin mitä mittaauksissa myöhemmin tarvitaan. Sillan taipumaa jänteessä voidaan mitata pienemmälläkin taajuudella, sillä mittaustaajuuden määrää ajoneuvon ajoaika sillan tai jänteen yli. Tarvittavan mittaustaajuuden saavuttamiseen vaikuttavat valittava anturi ja mittalaite.

Mittausalue valitaan esianalysoinnin ja koemittausten perusteella siten, että kaikki mitattavat suuret (maksimi ja minimiarvot) ovat anturin mittaosalueella. Kuten edellä mainittiin, mittalaitteen ja anturin mittaosalue ei saa olla liian suuri, sillä tällöin erottelukyky ei ole ehkä enää riittävä. Joillain anturityypeillä (esim. voima-antureilla ja venymäliuskoilla) voidaan mittaosalue ylittää hetkellisesti, mutta suuret ylitykset voivat johtaa anturin 0-tason muuttumiseen ja lopulta anturin vaurioitumiseen. Lisäksi anturin mitta-alueen ulkopuolella anturin tarkkuus huononee. Mittalaitteissa anturilta tulevan signaalin mittaus perustuu tavallisesti jännitteen mittaamiseen, jolloin esim. mittauskortin maksimijännite on tavallisesti 12 V.

Erottelukyky (resoluutio) on mittalaitteen kyky reagoida mittaussuureen pieniin muutoksiin. Mekaanisessa mittalaitteessa voi kitka mekaanisten osien välillä huonontaa erottelukykyä. Sähköisessä mittaauksessa mittalaitteen ja anturin elektroniikka ja siinä olevat häiriöt vaikuttavat erottelukykyyn. Mittauskortin bittien määrä tekee mittaauksista portaallisen, jolloin erottelukyky ei voi olla parempi kuin portaan koko. Nykyisin mittauskortit ovat vähintään 24-bittisiä, joten erottelukyky muodostuu riittäväksi.

Ympäristöolosuhteiden muutokset, kuten lämpötilan tai kosteuden muutokset voivat vaikuttaa mittalaitteen ja anturin toimintaan ja heikentää niiden tarkkuutta. Anturin ja mittalaitteen valmistajan antamien tietojen perusteella voidaan valita sopiva mittaussysteemi ja anturi monitorointiin tai myös korjata anturin mittaustuloksia. Tyypillinen korjaustoimenpide on lämpöpitenevästä johtuvan venymän poistaminen pitkäaikaisissa venymämittauksissa.

Mittalaitteet, kuten anturitkin, ovat riippuvaisia lämpötilasta, kosteudesta ja värinästä, joten ne asetetaan tavallisesti mittauskaappiin tai mittauskoppiin. Suomessa kesäaikana voi mittauskaapissa olevan laitteen lämpötila nousta yli 100 °C ja talvella se ei ehkä tuota tarpeeksi lämpöä toimiakseen. Tästä syystä mittalaite voi vaatia kesällä erillisen puhaltimen ja talvella lämmityslaitteen. On huomattava, että laitteen pitää pystyä aloittamaan mittaus myös sähkökatkon jälkeen, jolloin mittauskaappia on ensin lämmitettävä. Mittalaitteet sisältävät myös elektroniikkaa kuten anturitkin, joten niidenkin ominaisuudet voivat muuttua ja nekin pitää kalibroida. Mittalaitteille ei kuitenkaan ole esitetty samanlaisia kalibrointimenetelmiä kuin antureille, mutta niiden toimivuus voidaan osoittaa käyttämällä niitä antureita kalibroitaessa. Jos monitorointi kestää useita vuosia, on varauduttava siihen, että mittalaitteet vanhenevat, ja joudutaan asentamaan uudentyyppinen uusi mittalaite. Tästä syystä monitorointia suorittavan osapuolen on dokumentoitava mittausjärjestelmänsä laatu- ja järjestelmän mukaisesti.

Tavallisesti vaaditaan myös, että mittalaitteessa on oltava valmis analoginen esisuodatus dynaamisissa mittauksissa ennen AD-muunnosta, jotta vältetään laskostumiselta. Esisuodatus valitaan jonkin verran korkeammaksi (esim. 2-kertainen) haluttuun mittaustaajuuteen nähden ja digitalisointi tehdään tämän jälkeen vähintään 10-kertaisella taajuudella. Näin haluttu taajuus saadaan kuvattua aikasarjassa vähintään 10 pisteellä. Esisuodatin ja suodatin eivät yleensä voi olla ideaalisen jyrkkiä, mikä vaikuttaa myös jonkin verran lähellä oleviin taajuuksiin ja voi aiheuttaa myös vaihesiirtoa. Joissain mittauksissa (esim. venymäliuskamittauksissa) mittausjohtojen pituudet vaikuttavat mittaustulokseen (vastus ja lämpötila) ja ne on pystyttävä huomioimaan mittalaitteen kalibrointikertoimen avulla.

Mittausjärjestelmä on valittava siten, että se pystyy jatkamaan mittauksia sähkökatkon jälkeen, jos se on liitetty sähköverkkoon. Nykyaikaisissa mittalaitteissa on edellä mainitut sähkökatko-ominaisuudet, mutta jos mittaus suoritetaan PC:llä, voi mittauskatko johtua itse tietokoneesta tai sen käyttöjärjestelmästä. PC:hen on olemassa laitteita, jotka tutkivat mittausohjelman toimivuutta ja osaavat käynnistää laitteen uudestaan. Sähkökatkojen vaikutusta voidaan pienentää UPS-laitteella, jolloin tietokone tekee hallitun sammutuksen ja tallentaa muistissa olevat tiedot.

Mittalaitteen mittausalue määräytyy anturin ominaisuuksien perusteella. Usein anturin ja mittalaitteen väliin asennetaan vahvistin, jolla voidaan valita sopiva jännite sekä mittalaitteelle että anturille. Vahvistin ja mittalaite voidaan rakentaa yhdeksi kokonaisuudeksi. PC-pohjaisissa mittalaitteissa käytetään mittauskorttia, jossa usein sisääntulojännite on kiinteä tai valittavissa 10-kertaisena jne. Jotta mittauskortin koko mittausalue tulisi hyödynnettyä, on vahvistimella asetettava ulostulojännite säädettävä mittauskortille sopivaksi.

Nykyisin mittalaitteet ovat PC:llä ohjelmoitavia tai niissä on valmistajan valmis ohjelma. Mittauksiin voi aiheutua virhettä myös mittausohjelmasta, jossa voi olla ohjelmointivirhe tai ohjelmalle on annettu väärä parametreja. Mittausohjelman toimivuus tulee testata ja testitulokset dokumentoida ennen monitoroinnin aloittamista.

Siltamonitoroinnissa käytetyt anturit on tilattava kalibrointitodistuksen kanssa, jotta ei tarvitsisi suorittaa erillistä kalibrointia laboratorioissa. Siltamittaukset ovat joskus pitkäkestoisia ja siksi kalibrointi on tehtävä myöhemmin valmistajan ohjeiden mukaan. Aina tämä ei ole mahdollista, jos anturit ovat esim. rakenteen sisällä (betonin sisällä) tai muuten kiinnitetty esim. liimaamalla (venymäliuskat). Tällöin kalibrointi tehdään

siten, että siltaa kuormitetaan koekuormitusajoneuvolla, jonka paino tunnetaan. Betonin sisällä olevia kosteusantureita ei myöskään voida irrottaa, koska irrottaminen voi vaikuttaa lähellä olevan betonin kosteuteen. Kalibrointi voidaan myös tehdä monitoroinnin päätyttyä laboratoriossa, jolloin saadaan selville anturien mittaus-tarkkuus ja mittaustulosten luotettavuus pitkän mittausjakson jälkeen.

7 Mitatun tiedon tallennus tietokantaan

Suomessa ei ole vielä päätetty siltojen monitoroinnin tuottaman mittausdatan tallennus- tai arkistointiformaatista. Monitorointidata on luonteeltaan mittausdataa, kuvia ja videoita, joten dataa syntyy paljon, mutta mittauskanavia on suhteellisen vähän. Tiedon tallennus voidaan jakaa kahteen vaiheeseen, jossa ensin data tallennetaan monitorointia suorittavan toimijan serverille ja myöhemmin siirretään arkistointitietokantaan. Arkistointitietokannan formaatin tulisi olla sellainen, että se voidaan lukea helposti tietokannasta useiden vuosien tai vuosikymmenienkin kuluttua. Varsinaisen monitorointidatan lisäksi on tärkeää tallentaa kaikki monitorointiin liittyvät dokumentit, kuten erilaiset suunnitelmat ja raportit.

7.1 Tiedostomuodot ja rajapinnat

Monitorointidatan tallennukseen löytyy eri toimijoilta monia mahdollisuuksia. Lähes jokaisella mittausohjelmalla on oma binäärinen formaatti mittautiedoston tallentamiseen, tai vaihtoehtoisesti käytetään ASCII-muotoista tiedostomuotoa. ASCII-muotoinen data vie lähes poikkeuksetta enemmän tilaa kuin muut dataformaatit ja näin myös sen lukeminen on hitaampaa. ASCII on kuitenkin niin laajalle levinnyt tiedostomuoto, että sitä tukevat kaikki mahdolliset tekstinkäsittely- ja analysointi-ohjelmat, eikä sen avaaminen muodostu ongelmaksi.

Vaikka itse tallennusformaatti olisikin käyttäjien kesken sama, eroavaisuuksia löytyy tiedostorakenteissa ja metadatan tallennuksessa. Tämä johtaa siihen, että mittauksen hallinta ja loppuanalysointi säilyy pääasiassa monitoroinnin toimittajan vastuulla, eikä keskitetty hallinta ole mahdollista. Metadatalta tarkoitetaan mittautiedostoon liittyvää lisäinformaatiota, kuten esimerkiksi näytteenottotaajuus, kanavakertoimet, aikaleima, anturin paikka ja mittauksen tekijä, ja se voidaan säilöä esimerkiksi suoraan mittautiedostoon erillisenä ylätunnisteena tai erillisenä tiedostona.

Keskitetty monitoroitavien kohteiden hallinta mahdollistuu helpoiten yhteisen mittausdatapalvelimen perustamisella, mihin kaikki monitorointipalvelun toimittajat lähettävät monitorointidatan joko määrämuotoisessa tiedostoformaatissa ja -rakenteessa, tai käyttäen yhteistä rajapintaa.

Yhteisessä monitorointidataformaatissa pitäisi yhdistyä sama tiedostoformaatti, -rakenne ja metadata. Tähän tarkoitukseen on helpointa käyttää jo olemassa olevia dataformaatteja.

Yksi esimerkki ASCII-pohjaisesta tiedostoformaatista on National Instrumentsin käyttämä Labview Measurement File (.lvm). Tiedostoformaattia ei ole suunniteltu suurten datamäärien tallentamiseen yhteen tiedostoon, vaan lyhyiden aikasarjojen tallentamiseen. Jokaisella tiedostolla on ylätunniste, josta käy ilmi esimerkiksi desimaalierotin (, tai .) ja käytetty aikaformaatti. Ylätunnisteen jälkeen tiedostossa on mittadata jaettuina osioihin. Osiointi on käytännöllistä, jos käytössä on useita kanavia, jotka toimivat eri näytteenottotaajuuksilla.

Jokaisella osiolla voi olla oma ylätunnisteensa, johon on tallennettu aikaleima, kanavien nimet ja näytteenottotaajuus. Mittausdata on jaettu vaak- ja pystyriveihin, joiden erottimina toimivat EOL-merkki CR-LF ja tab.

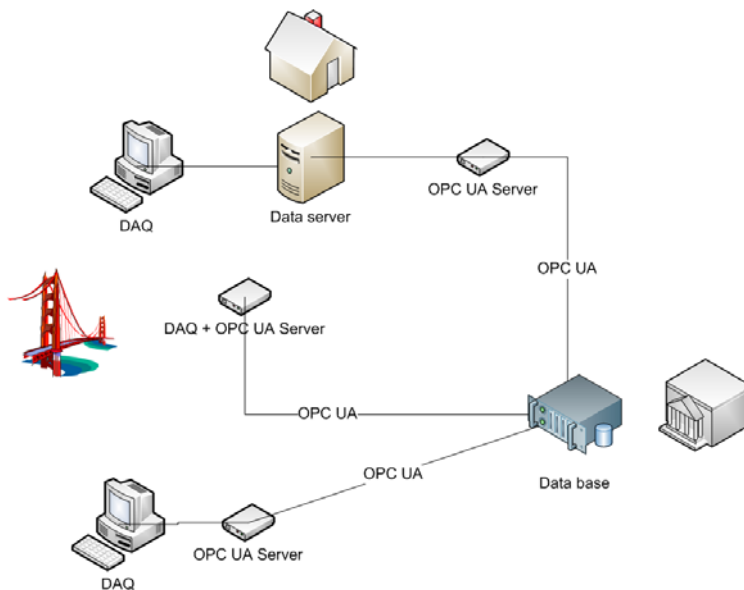
MDF (Measurement Data File) on autoteollisuuden parissa laajassa käytössä oleva mittausdataformaatti, jonka uusin 4.0-versio on saanut virallisen ASAM-standardin. MDF on binäärinen tiedostoformaatti, jonka avaamiseen tarvitsee tietää tarkasti tiedoston bittirakenne. Suosituimpiin datankäsittelyohjelmistoihin (esim. Matlab ja Labview) on saatavilla formaattia suoraan lukevat aliohjelmat ja esimerkiksi C++ -ohjelmointikielelle löytyy ilmainen API. Binääritiedostossa on sisällään mittaukseen liittyvä metadata ja siinä löytyy kentät esimerkiksi kanavien nimille, yksiköille ja aikaleimalle.

Jos mittausdatan lukemiseen valitaan yhteinen rajapinta, se ei ota kantaa siihen, missä muodossa mittadata tallennetaan. Mittadata luettaisiin tällöin kaikilta toimijoilta samoin käskyin ja luettava data olisi tämän jälkeen määrämuotoista.

OPC on automaatioalalla standardiksi muodostunut protokolla prosessihallinnassa. Sen Microsoftin DCOM-protokollaan perustuva versio on pikkuhiljaa syrjäytymässä uudella OPC Unified Architecture (OPC UA) -protokollalla, joka mahdollistaa OPC:n käytön kaikissa käyttöjärjestelmissä ja kaikilla ohjelmointikielillä. OPC UA on IEC-standardoitu (IEC 62541) protokolla, joka on siirtymässä automaatioteollisuuden parista laajempaan käyttöön.

Kuvassa 24 on esitetty OPC UA -rajapinnan erilaisia käyttömahdollisuuksia siltojen monitoroinnissa. Se on mahdollista sulauttaa suoraan mittalaitteeseen, jolloin erillistä käyttöjärjestelmää ei tarvita, ja data siirtyy suoraan mittalaitteelta palvelimelle. Vaihtoehtoisesti mittaukset voidaan tehdä monitoroinnin toimittajan omilla järjestelmillä ja menetelmillä ja data voidaan kerätä toimittajan omalle palvelimelle, minkä jälkeen tieto voidaan siirtää OPC UA -rajapinnan kautta yhteiselle palvelimelle.

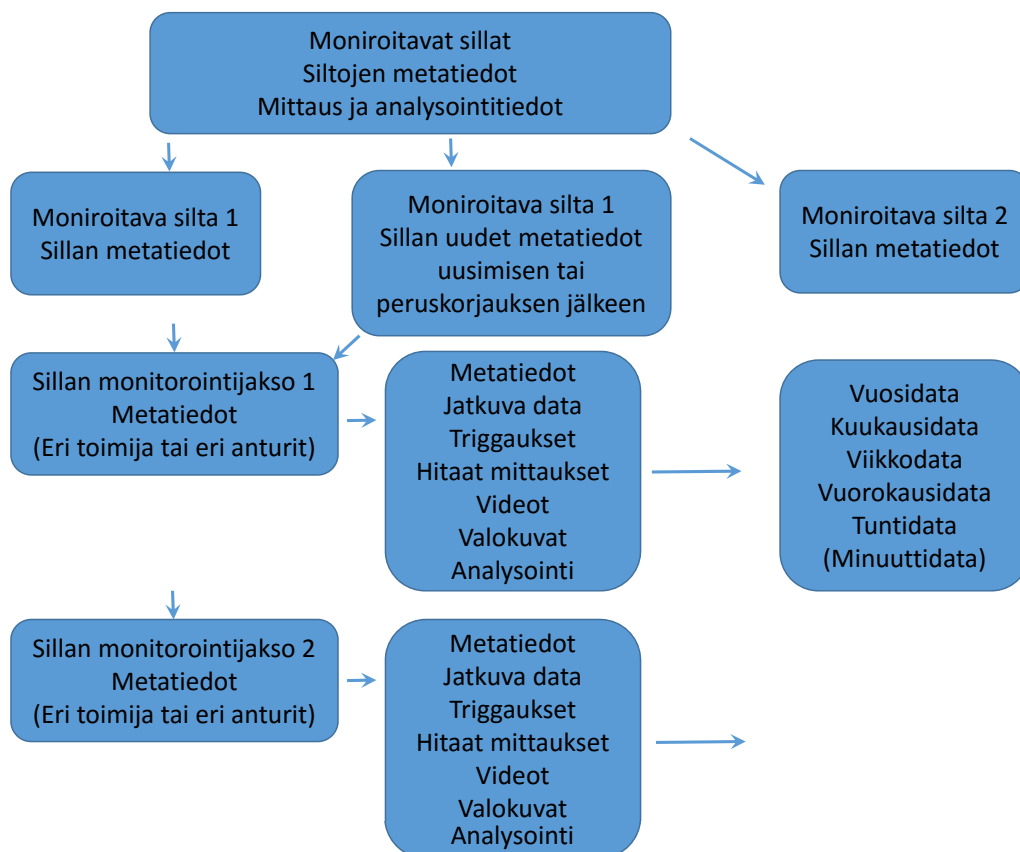
OPC UA käyttää viestittämiseen omaa UA TCP -protokollaa, joka mahdollistaa jopa kymmenien tuhansien mittausarvojen lähettämisen sekunnissa. OPC UA mahdollistaa myös erityyppiset hälytystyypit mittausarvoihin perustuvista hälytyksistä laite- ja anturivioista johtuviin hälytyksiin. Protokolla pitää sisällään tietoturvan X509-muodossa, ja myös https:n käyttö on mahdollista.



Kuva 24. OPC UA rajapinnan käyttö siltojen monitoroinnissa.

7.2 Mittaustiedon pitkäaikainen arkistointi ja tallennusformaatti

Kaikkien toimijoiden mittaama monitorointidata voidaan tallentaa yhteiseen arkistointitietokantaan, jonka muoto on niin selkeä, että se voidaan lukea kymmenienkin vuosien kuluttua. Arkistointi voidaan tehdä ASCII-muodossa, jolloin se nykyisen käsityksen mukaan on luettavissa tulevaisuudessakin. Lisäksi, jos mitattu data sisältää yksiselitteiset metatiedot, se voidaan liittää määrättyyn siltaan, sillan osaan, anturiin ja mittausaikaan. Mittaustietoa voidaan näin verrata aikaisempiin mittaustuloksiin ja analysointituloksiin. Mikäli arkistointiformaatti on hidas tai muuten hankala käyttää, siitä voidaan tehdä muunkinlainen formaatti tai tietokanta, joka on ko. ajanhetkenä käytössä. Arkistointitietokannassa oleva vuosittainen mittaustieto voidaan jakaa kuukausittaiseen, viikoittaiseen, vuorokautiseen tai jopa tuntitiedostoihin, jos se sisältää useita kanavia suurella lukutaajuudella. Tällöin tiedoston koosta ei tule liian suurta, mikä voisi vaikeuttaa lukemista. Arkistointitietokannan periaaterakenne on esitetty kuvassa 25 ja monitoroinnin arkistointitietokannan rakenne taulukoissa 3–7.



Kuva 25. Siltojen monitorointijaksot arkistointitietokannassa.

Taulukko 3. Tietokanta monitoroiduista silloista ja niiden monitorointijaksoista.

Monitoroinnissa olleiden/olevien siltojen lukumäärä			
Sillan 1 numero	Sillan 1 nimi	Sillan 1 monitorointijaksojen alkamispäivä	Sillan 1 monitorointijaksojen päättymispäivä
Sillan 2 numero	Sillan 2 nimi	Sillan 2 monitorointijaksojen alkamispäivä	Sillan 2 monitorointijaksojen päättymispäivä
Sillan N numero	Sillan N nimi		

Taulukko 4. Tietokanta monitorointijaksoista ja anturimääristä jaksoissa.

Sillan numero	Sillan nimi			
Monitorointijaksojen lukumäärä				
Jakso 1	Toimija 1	Jakson 1 alkamispäivä	Jakson 1 päättymispäivä	Jakson 1 Anturien lukumäärä
Jakso 2	Toimija 2	Jakson 2 alkamispäivä	Jakson 2 päättymispäivä	Jakson 2 Anturien lukumäärä
Jakso N				

Taulukko 5. Tietokanta monitorointijaksojen antureista ja niiden kertoimista.

Sillan numero	Sillan nimi	Jakson numero	Jakson anturien lukumäärä				
Anturi 1	Anturin tyyppi	Jakson tiedoston nimi	Yksikkö	Kerroin	Mittalaitteen nro	Mittalaitteen kanava	Anturin sijaintikoodi
Anturi 2	Anturin tyyppi	Jakson tiedoston nimi	Yksikkö	Kerroin	Mittalaitteen nro	Mittalaitteen kanava	Anturin sijaintikoodi
Anturi N							

Taulukko 6. Tietokanta monitorointijakson antureiden mittaustiedosta.

Jakson nimi	Rivien lukumäärä tiedostossa	Alkamis-päivämäärä	Päätymis-päivämäärä
Sillan numero	Sillan nimi	Jakson numero	
Antureita lukumäärä jaksossa	Mittaustaajuus		
Anturi 1	Anturi 2	Anturi N	
Tyyppi 1	Tyyppi 2	Tyyppi N	
Yksikkö 1	Yksikkö 2	Yksikkö N	
Kerroin 1	Kerroin 2	Kerroin N	
Rivi 1 luku 1	Rivi 1 luku 2	Rivi 1 luku N	
Rivi 2 luku 1	Rivi 2 luku 2	Rivi 2 luku N	
Rivi N luku 1	Rivi N luku 2	Rivi N luku N	

Taulukko 7. Tietokanta monitorointijaksojen antureista ja niiden tarkoista ominaisuuksista

Sillan numero	Sillan nimi	Monitorointi jakso				
Anturi 1	Anturin tyyppi	Herkkyys	Mittaustaajuus	Mittaus-alue	Tekniset ominaisuudet tiedoston nimi	Asennus-pvm
Kalibrointeja kpl	Kalibrointi pvm 1	Kalibrointi pvm 2	Kalibrointi pvm 2			
Anturi 2	Anturin tyyppi	Herkkyys	Mittaustaajuus	Mittaus-alue	Tekniset ominaisuudet tiedoston nimi	Asennus-pvm
Kalibrointeja kpl	Kalibrointi pvm 1	Kalibrointi pvm 2	Kalibrointi pvm 2			
Anturi N						

Taulukoissa anturin tyyppi voidaan myös koodata systemaattisesti, jolloin ne voidaan etsiä myöhemmin automaattisesti. Koodaus voidaan tehdä luvun 4 mukaan siten, että esim. tyyppi 1 vastaa mekaanisia ominaisuuksia mittaavia antureita ja alanumero 1.1 mekaanisia liikeantureita.

Mikäli arkistointiformaatti on hidas tai muuten hankala käyttää, siitä voidaan tehdä muunkinlainen formaatti tai tietokanta, joka ko. ajanhetkenä on käytössä. Arkistointitietokanta pitää päivittää aina kun käyttöjärjestelmät ja ohjelmistot muuttuvat tai niistä tulee uusia versioita, vaikka se on suunniteltu hyvin yksinkertaiseksi.

Arkistointiformaatin tärkein vaatimus on luettavuus pitkänkin aikajakson jälkeen. Esimerkiksi analysoitaessa sillan vanhenemista monitorointitulosten tarveaika voi olla 50...100 vuotta. 100 vuoden päästä voi olla tarve katsoa merkittävien siltojen monitorointidataa ja tehdä havaintoja mittaustuloksista.

Silloilta kerätty tieto on järkevää jakaa ajallisesti osiin, jolloin se lähetetään esimerkiksi kerran päivässä yhtenä siirtona. Mittauksen metatieto on UTF-8 -pohjainen tekstitiedosto, jossa on kuvaus kohteesta sekä siitä löytyvistä mittakanavista, niiden kalibroinnin asetuksista, offseteista, fyysisistä suureista ja vastaavista tiedoista, joiden pohjalta itse mittaustiedostot on tulkittavissa analyysikäytössä. Nämä tiedostot voidaan pakata GZIP tai BZIP2 -pohjaisella pakkauksella tallennuskoon pienentämiseksi. Mikäli Meta- ja mittaustiedot halutaan esteettisistä syistä yhdistää yhteen ja samaan tiedostoon, on ZIP-formaatti todennäköisin pitkän aikajakson työkalu.

Metadata

Metadatatiedosto on mahdollisimman yksinkertainen tekstitiedosto, joka on esitetty Unicode-merkistöllä ja enkoodauksena on käytetty UTF-8 muotoa. Metadata ilmaistaan kertomalla ensin hakasulkujen sisällä ryhmänimi ja sitten antamalla avain ja arvopareja. Ryhmä päätetään yhteen tyhjään rivinvaihtoon.

[ryhmänimi]

avain1 = arvo1

avain2 = arvo2

[ryhmänimi2]

avain3 = arvo3

avain4 = arvo4

Esimerkki metadatatiedostosta esitetään *liitteessä 4*. Tarkoitus on varmistaa, että metadata on sekä koneen että ihmisen helposti luettavissa. Tämä on ensisijaisen tärkeää, koska arkistoitu mittaustiedosto menettää hyödyllisyytensä, jos siihen liitetty metatieto muuttuu mahdottomaksi tulkita. Lisäksi on turvallista olettaa, että dokumentaatio, joka selittäisi metatiedon eksoottisempia rakenteita, tulee hukkumaan, joten itsestään selvä tai suoraan pääteltävissä oleva metatieto on minimioletus. Selkeässä, ihmissilmällä tarkistettavassa olevassa tekstitiedostossa on etuna myös virheiden helppo havaitseminen.

Mittaustieto

Mittaustieto talletetaan rivi kerrallaan CSV (Comma Separated Values) [RFC4180] -muotoiseen tiedostoon päivän kokoisina erinä. Rivin alussa on aikaleima RFC3339 muodossa, joko aikavyöhykkeellä tai ilman (tämä löytyy metadatasta). Yksittäiseen CSV-tiedostoon kerätään ne mittakanavat, joista on otettu näytteet samalla kellolla tai ajanhetkellä. Mikäli mitta-asetus on eri taajuuden mittauksia tai mittauksia, jotka on tahdistettu eri kellon, niiden rivit laitetaan eri CSV-tiedostoon, jolla on oma metatietotiedostonsa. (*Liite 4*)

Purskeittainen tieto

Mikäli mittaustieto ei ole jatkuvaa vaan purskeista, se voidaan joko esittää jatkuvan tietovirran kaltaisena, mikäli sillä ei ole vaikutusta, mistä purskeet alkavat ja loppuvat. Mikäli purskeiden alulla ja lopulla on vaikutusta, voidaan mittaustietovirtaan lisätä yksi tyhjä rivi merkitsemään purskeen loppuhetkeä.

Ei numeerinen tieto

Ei-numeerinen tieto mittausrivillä lisätään CSV-määritelmän mukaisesti lainausmerkkien sisään. (Liite 4)

Kommentit

Käytetään # merkkiä kommenttirivin alussa.

Kuvien arkistointi

Mittausaseman ottamien kuvien arkistointiin on vain vähän vakiintuneita formaatteja. JPEG-formaatti antaa suhteellisen hyvän oletuksen pitkäaikaisesta käytettävyydestä.

Mikäli kuva on sen tyylinen, että sitä ei saa pakata, JPEG tyyllisellä tietoa hukkaavalle formaatille ovat vaihtoehdot vähissä. Yksi mahdollinen ratkaisu on käyttää varsin nuorta PNG-formaattia. Se kattaa perustarpeet tarvittavan metatiedon tallentamisesta, mutta on vielä hyvin nuori ja on epäselvää, jääkö se henkiin. TIFF-formaatti on ollut käytössä joissain yhteyksissä, mutta se on huonosti spesifioitu, joten pitkäaikaisen käytön kannalta sitä on parempi välttää, jos kuvaa halutaan myöskin pakata.

Videokuvan arkistointi

Tällä hetkellä ei ole tarjolla yhtään täysin ongelmattonta formaattia videokuvan pitkäaikaiseen tallennukseen. WEBM on määrittelynsä puolesta lupaava, mutta aivan liian nuori, jotta voitaisiin päätellä, jääkö se henkiin. h.264 on yhtä ongelmallinen kuin kaikki edeltäjänsä, mutta tarjoaa hyvän pakkaussuhteen, joten se voi olla kelvollinen kompromissi hyvien vaihtoehtojen puuttuessa. h.264 yhteydessä on kuitenkin huomioitava lisenssirajoituksia, jotka voivat muuttua.

Mittaustiedon talletusformaatti (jos CSV on liian hidas käsitellä)

Tehokas laskenta edellyttää, että tieto on nopeasti luettavissa satunnaisesta kohtaa. Tämä edellyttää usein jonkinlaista binääripuuhakukelpoista indeksiä. Mittaustieto ei myöskään voi olla tekstimuodossa, vaan sen pitää olla binäärimuodossa, joka on prosessorille helppo käsitellä. Lisäksi mittaustiedon toistuvuus usein tekee tehokkaammaksi pakata tieto isoissa lohkoissa, koska ratkaiseva viive on kovalevyn lukunopeus. Varjopuolena tiiviissä ja pakatuissa binääriformaateissa on käyttöjärjestelmä- ja työkaluspesifisyydet.

NASA on satelliittidatan yhteydessä ottanut käyttöön HDF5-formaatin, joka näyttäisi olevan tällä hetkellä paras kompromissi arkistointikelpoisuuden, nopeuden ja käsiteltävyyden välillä. Tieto talletetaan lohkoina, jotka voivat olla pakattuja ja niihin voidaan silti viitata yksittäisen alkion tarkkuudella ilman, että koko muuta tiedostoa pitää purkaa. Lisäksi perustyökalut kuten matlab, python, java yms. vastaavat tukevat datan käsittelemistä suoraan HDF5-tiedostosta ilman välivaiheita.

7.3 Reaaliaikainen seuranta

Reaaliaikainen seuranta on mahdollista toteuttaa esimerkiksi etäyhteyden tai selainsovelluksen avulla. Etätyöpöytäsovellukset, kuten VNC tai Remote Desktop mahdollistavat pääsyn suoraan mittauskoneen käyttöjärjestelmään, joten niiden käyttö on turvallista vain monitorointilaitteiston toimittajan toimesta. Etätyöpöytäyhteydet ja niihin liittyvät VPN-ratkaisut tarjoavat ulkopuoliselle taholle varsin suuren hyökkäysmahdollisuuden, niissä on paljon tunnettuja heikkouksia ja kokonsa vuoksi riski myös uusien ilmenemiselle. Päivityskuorman pienentämiseksi olisi suositeltavaa,

että etätyöpöytäyhteyksiä ei käytettäisi kuin poikkeusolosuhteissa ja niissäkin vain lyhytaikaisesti.

Reaaliaikaista dataa näyttävä selainsovellus voidaan toteuttaa joko suoraan mittauskoneelle toteutettuun web-palvelimeen tai erilliseen palvelimeen, joka saa reaaliaikaista tietoa mittauskoneelta. Jälkimmäinen vaihtoehto on turvallisempi, koska sivun mahdollisella ruuhkautumisella ei ole näin minkäänlaista vaikutusta itse mittauksiin.

7.4 Tiedonsiirto monitorointikohteelta

Tiedonsiirtotavan valintaan vaikuttavat asiat ovat:

- siirrettävä datamäärä
- reaaliaikaisen seurannan tarve
- raportointikausi
- kohteen sijainti.

Nykyään käyttökelpoisin ratkaisu tiedonsiirtoon monitorointikohteen ja datapalvelimen välillä on 3G- ja 4G-verkon hyödyntäminen. Datapaketteja on saatavilla monelta eri operaattorilta, ja kaistanleveys on valittavissa oman tarpeen mukaan. Joillain operaattoreilla liittymissä kaikki portit http-porttia lukuun ottamatta ovat vakiona suljettu, jolloin erilaisten tiedonsiirtoratkaisuiden käyttö rajoittuu huomattavasti. Tämän lisäksi kannattaa hankkia ammattikäyttöön suunniteltu 3G- tai 4G-modeemi liittymän mukana tulevan modeemin sijaan. Liittymien mukana toimitettavat modeemit ovat suunniteltu ns. viihdekäyttöön, eikä monitoroinnin vaatimaan 24h/vrk-käyttöön.

3G- ja 4G-verkot kattavat käytännössä koko Suomen, mutta paikoin kuuluvuus voi olla heikkoa ja saatavilla voi olla vain hitaita yhteyksiä. Kuuluvuutta voi yrittää parantaa ulkoisilla antennilla. Esimerkiksi silloilla antennin tuominen sillan alta kannelle parantaa joissain tapauksissa huomattavasti signaalin voimakkuutta. Useimmissa rautatietunneleissa on käytössä ns. vuotavat kaapelit, joten 3G-verkko voi toimia jopa tunneleiden sisällä. Tämä kuitenkin kannattaa varmistaa ennen monitoroinnin aloittamista ja varautua siihen, että antenni tai tukiasema on vietävä tunnelin suuaukon ulkopuolelle.

Jos siirrettävä datamäärä on pieni, eikä reaaliaikaiseen seurantaan ole tarvetta, voidaan tiedonsiirtoon käyttää GSM-modeemia. GSM-verkko kattaa käytännössä koko Suomen, joten kuuluvuus ei muodostu ongelmaksi. Tiedonsiirto GSM-verkon yli on kuitenkin hidasta, eikä sitä kannata käyttää suurilla anturimääriä ja mittaustaajuuksia käytettäessä. GSM-yhteys ei myöskään ole päällä jatkuvasti, ja datanpurkuun tarvitsee ottaa erikseen yhteyttä mittauskoneelle.

Yksi vaihtoehto on myös tallentaa kaikki data mittauskoneelle ja hakea se paikanpäältä tarvittaessa. Tätä voidaan suositella vain, jos mittausdataa kertyy paljon, reaaliaikaiselle seurannalle (esim. hälytysrajojen ylitykset) ei ole tarvetta ja raportointikausi on pitkä, esim. kerran kuukaudessa tai vuodessa.

7.5 Tietoturvallisuus

Tiedonkeruu ja tallennuslaitteet on suojattava mahdollisia tietomurtoja vastaan. Laitteissa on käytettävä uusimpia käyttöjärjestelmiä ja mittausohjelmia, joissa todetut turvallisuuspuutteet on korjattu. Monitoroinnin aikana on myös huolehdittava uusista saatavissa olevista päivityksistä. Käytetyt salasanat on valittava riittävän pitkiksi sisältäen erikoismerkkejä, jotta sitä ei saada selville kokeilemalla. Tarvittaessa on käytettävä tietoturvan erikoisosaajia.

8 Tulosten raportointi ja analysointi

Sillasta monitoroinnin avulla mitattu data on analysoitava systemaattisesti ja tulokset esitetään sovitussa raportointimuodossa. Edelleen laadittujen analysointi- ja turmeltumismallien avulla tehdään johtopäätökset ja suositukset sillan korjaamiseksi sekä kunnossapitosuunnitelmaksi. Monitoroinnin avulla voidaan myös seurata sillan toimintaa ja kuntoa sillan loppuun käytön ajan.

8.1 Analysointimenetelmät

Sillan analysointi tehdään ensin ennen monitoroinnin aloittamista ja myöhemmin monitorointitulosten jälkeen käyttäen sillasta laadittua lujuusmallia, joko FE-mallia tai muuta yksinkertaisempaa mallia. FE-mallia muodostettaessa pyritään käyttämään hyväksi sillan tietomallia (esim. BIM, **Bridge Information Model**) tai vastaavaa geometrista mallia.

Ennen monitorointia lujuusmallilla tehdyn analysoinnin avulla määritetään monitoroinnissa tarvittavien antureiden lukumäärät, tyypit ja sijainnit. Monitorointitulosten ja koekuormituksen perusteella lujuusmallia kehitetään ja kalibroidaan vastaamaan mittaustuloksia mahdollisimman tarkasti. Tällä kalibroidulla lujuusmallilla saadaan laskettua sillan rasitukset kaikilla tarpeellisilla liikennekuormilla sekä myös niissä paikoissa, joihin ei ole asennettu antureita. Tarvittaessa antureiden määrää voidaan lisätä tai niiden paikkoja voidaan muuttaa paremman mallin kehittämiseksi. Lujuusmallin avulla määritetään myös ns. kriittiset arvot ja hälytysarvot mittaustulosten mittaustuloksille, jolloin on otettava huomioon kaikki vaikuttavat tekijät kuten sillan pysyvät kuormat, materiaalien lujuus ja osavarmuusluvut.

Lujuusteknisen analysoinnin avulla voidaan sillasta tehdä vaurioitumismalli, jonka avulla lasketaan oletettujen vaurioiden vaikutus ja myös se, miten vaikutus saadaan mitattua antureilla. Mittaustulosten perusteella tarkennettua lujuusmallia voidaan käyttää myös sillan lopulliseen kantavuuslaskentaan, joka suoritetaan ohjeen Siltojen kantavuuslaskenta /15/ mukaisesti. Lisäohjeistusta rakennelaskelmiin on annettu myös ohjeessa Siltojen rakennelaskelmat /13/.

Muita lujuusteknisiä analysointimenetelmiä ovat esim. taajuus- ja moodianalyysi sillan värähtelyjen ja värähtelymuotojen selvittämiseksi sekä väsymisanalyysi väsymiskestävyyden laskemiseksi. Rakenteen paikallisen väsytytkuormituskertymän kertova väsymisanalyysi tehdään luokittelemalla mitatut jännitysvaihtelut ja laskemalla näiden avulla summattavat osakertymät paikalliseen rakenteeseen sopivalla väsymiskäyrällä. Mitatut jännitysvaihtelut voidaan luokitella esimerkiksi Rainflow-menetelmän avulla, jolle on annettu ohjeet standardeissa (ks. esim. https://en.wikipedia.org/wiki/Rainflow-counting_algorithm). Joissain mittalaitteissa ja ohjelmistoissa analyysi on jo valmiina saatavilla.

Betonirakenteiden kuntoa ja kunnan kehittymistä analysoidaan laaditun turmeltumismallin avulla. Mallin kalibrointia varten tarvitaan monitorointitietoa esim. lämpötilasta, kosteudesta, auringon säteilystä ja betonin karbonatisoitumisesta useiden vuosien ajalta. Myös puurakenteille voidaan laatia turmeltumismalli mm. lahoamisen osalta. Mittaustietona tarvitaan mm. rakenteen lämpötila ja kosteus.

Muita yleisiä analysointimenetelmiä mittausrvoille ovat maksimi-, minimi- ja keskiarvojen sekä keskihajonnan laskeminen määrättyssä aikayksikössä sekä näiden arvojen luokittelut histogrammin muodossa. Maksimi- ja minimiarvoja voidaan määrittellä esim. arvot/10 s, arvot/1 min, arvot/ tunti, arvot/vrk jne.

8.2 Triggausarvot ja hälytykset

Monitorointia varten jokaiselle anturille asetetaan kynnysarvot (triggausarvot), joiden ylitykset lasketaan ja tarvittaessa annetaan hälytykset valvontakeskukseen. Triggausarvoja voi olla suuruudeltaan useita jokaisella anturilla ja ne vastaavat tavallisen esim. raskaan liikenteen tai tuulen aiheuttamia rasituksia, suurimpia laskennallisia jännityksiä ja materiaalin myötörajan ylittäviä jännitystä. Myötörajan ylittävä jännitys on jo hyvin kriittinen, sillä silloin kuormitus on jo ollut hyvin suuri, käytetyt osavarmuusluvut ovat alittuneet ja rakenteeseen on voinut jäädä pysyviä muodonmuutoksia. Triggausrajat asetetaan yhdessä sillan analysoijan kanssa ja samalla sovitaan mahdollisista hälytysrajoista ja hälytysten lähettämisestä tilaajan kanssa.

Triggausrajoja määritettäessä on huomioitava mahdolliset sähköiset ja mekaaniset viat ja häiriöt. Anturin mittaustuloksen luotettavuutta voidaan parantaa asentamalla lähekkäin kaksi anturia, jolloin voidaan päätellä anturien toimivuus. Mikäli anturit näyttävät eri arvoja, toinen antureista (tai mittauskanavista) on todennäköisesti viallinen. Myös muiden lähellä olevien antureiden lukemia voidaan verrata keskenään ja päätellä niiden toimivuus. Jos sillalle on tehty vaurioanalyysi, voidaan päätellä mahdollisen vaurion näkyminen eri etäisyydellä olevissa antureissa. Väärien hälytysten lähettämistä tulisi välttää, sillä lopulta oikeat hälytykset häviävät väärien sekaan. Lisäksi väärät hälytykset aiheuttavat turhia kustannuksia.

Kohdassa 6.2 edellytetään mittauksilta esisuodatusta mm. laskostumisen estämiseksi. Mittauksissa voidaan mittaustulokset keskiarvottaa tai erittäin lyhyet ja todennäköiset sähköhäiriöt hylätä ennen vertaamista asetettuihin triggausrajoihin. Keskiarvoistus voidaan tehdä erikseen jokaiselle mittauskanavalle, sillä esim. taipumamittaukset ovat usein luonteeltaan hitaampia kuin esim. kiihtyvyydsmittaukset. Näistä menetelmistä sovitaan siltasuunnittelijan kanssa ja ne pyritään testaamaan sillalla esim. koe-kuormitustilanteessa.

Taulukossa 8 on esitetty esimerkki monitorointitulosten yhteenvetotaulukosta yhden kuukauden ajalta. Taulukossa on esitetty eri sarakkeissa suurin ja pienin mitattu arvo sekä keskiarvo kultakin mitta-anturilta (3 kpl). Lisäksi taulukossa on koottu kynnysarvon ja hälytysrajan ylittäneiden tapahtumien lukumäärät. Vastaava taulukko voidaan tehdä muiltakin ajanjaksoilta kuten päivittäin, vuosittain ja koko mittausajalta. Ääriarvoja määritettäessä on huomioitava niiden kesto aika, jolloin saadaan eliminoitua mahdolliset lyhytkestoiset sähköiset häiriöt.

Taulukko 8. Esimerkki monitoroinnin kuukausiraportin yhteenvedosta ja triggaus-rajoista (3 kpl antureita).

Silta No 999, Jokisilta, Mittaus aika: Tammikuu 2015							
Anturi	Yksikkö	Suurin/ pienin	Keski- arvo	Triggaus raja	Triggaus- raja- ylitykset (kpl)	Hälytys- raja	Hälytys- raja- ylitykset (kpl)
Taipuma	mm	50	5,6	25	100	60	1
		-2		-5	1	-25	0
Venymä	µS	120	80	100	80	200	0
		-20		-15	2	-100	0
Voima	kN	100	50	80	5	200	0
		20		0	0	0	0

8.3 Raportointi

Tavallisin raporttimuoto koostuu vuorokausiraporteista, joista koostetaan kuukausiraportit ja lopuksi vuosiraportti. Raportit ovat graafisia kuvaajia, joissa vaaka-akseli on aika ja pystyakseli mitattu suure. Raportit ovat sähköisessä muodossa ja ne voidaan tarvittaessa tulostaa myös paperimuotoon. Raportoinnissa voidaan jokainen mittauskanava esittää erikseen tai saman tyyppiset kanavat voidaan esittää samassa kuvassa.

Monitoroinnin yksi tarkoitus voi olla myös valvoa siltaa ylittävää liikennettä ja sen turvallisuutta. Mahdollisissa poikkeustapauksissa monitorointilaitteisto lähettää sovitun viestin viranomaisille tai liikenteen valvontakeskukselle. Hälytysviestien muodosta ja lähetystavasta sovitaan monitorointia aloitettaessa monitorointisuunnitelmassa.

8.4 Johtopäätökset tulosten käsittelystä

Monitoroinnilla kerätään tietoa sillan liikenne- ja luonnonkuormien vaikutuksesta sen rakenneosien rasituksiin. Tulosten avulla voidaan päättää mm. sillalle sallittavista liikennekuormituksista, sillan korjaus- ja kunnossapitotoimenpiteistä sekä yleisesti arvioida sillan jäljellä olevaa käyttöikää.

Monitorointituloksia verrataan analysoinnista saatuihin tuloksiin ottaen lisäksi huomioon sillan tarkastuksessa ja siltarekisteristä saadut tiedot sillan kunnosta. Mikäli havaittu sillan vaurio on ollut paikallinen tai muuten vaurion syy ja sillan toiminta on saatu selvitettyä, voidaan monitorointi lopettaa ja mittalaitteet poistaa sillalta. Monitorointia voidaan myös jatkaa suunnitelman mukaisesti, jos esim. silta on tyyppinsä edustaja tai sillä kerätään tietoa liikenteestä. Lopullisen analysoinnin perusteella voi olla myös mahdollista, että vaurion syytä ei saada riittävästi selvitettyä, jolloin monitorointia joudutaan jatkamaan ja ehkä monitorointisuunnitelmaa muuttamaan.

9 Koekuormitus

Sillan koekuormitusta käytetään yleisesti terminä sillan kertamonitoroinnille, kun halutaan tietoa sillan rakenteiden toiminnasta kantavuustarkasteluita varten. Suppeille koekuormituksille, joissa on tarkoitus saada vain mittaustuloksia, joilla voidaan varmistaa käytetyn laskentamallin toimivuus, käytetään termiä testikuormitus (ks. Siltojen monitorointiohje, luku 4 /5/).

Sillan monitorointia toteutettaessa koekuormituksen tarkoituksena on asennettujen anturien kalibrointi. Kertamonitorointina koekuormitus voidaan tehdä, koska halutaan varmistua sillan kantavuudesta, joka voi olla alentunut vaurioitumisen tai ikääntymisen johdosta. Usein myös raskaiden ajoneuvojen kokonaispainot tai akselipainot ovat kasvaneet ja liikennemäärät lisääntyneet. Testikuormituksessa ei käytetä automaattisia mittalaitteita, vaan siltaa tutkitaan manuaalisesti käyttäen esim. vain taipumamittausta.

Useimmat sillat Suomessa ovat betonisilloja, tai niissä on betonikansi. Betonirakenteen käyttäytyminen kuormitusta lisättäessä ei ole lineaarista vaan sen halkeilu-tila voi muuttua betonin vetolujuuden ylittyessä, josta seuraa rakenteen jäykkyyden pieneneminen. Terässillat käyttäytyvät elastisesti myötörajaan asti, mutta niissäkin on useimmiten betonikansi, jossa voi tapahtua halkeilua. Riippusillat ja vinoköysisillat käyttäytyvät epälineaarisesti, sillä niiden geometrinen muoto on jonkin verran riippuvainen kuormituksesta. Koekuormituksessa koekuormitusajoneuvon kokonaispainoa lisätään vähitellen, jotta myös sillan epälineaarisesta käyttäytymisestä saadaan tietoa. Koekuormituksessa käytetyt ajoneuvot on punnittava, jotta niiden kokonaispainot ja akselipainot tunnettaisiin.

9.1 Koekuormituksen tarkoitus

Koekuormituksen tarkoitus on testata ja mitata uutta tai vanhaa siltaa sen käyttäytymisen tai kantavuuden selvittämiseksi. Vanhoille ja huonokuntoisille silloille koekuormitus tehdään useimmiten niiden todellisen kantokyvyn selvittämiseksi alhaisen suunnittelukuorman ja havaittujen vaurioiden vuoksi.

Koekuormitusta edeltää usein alustava kantavuuslaskenta, jossa sillan kantavuus on osoittautunut riittämättömäksi. Koekuormituksella halutaan tarkennettua tietoa kantavuuslaskennan ja lujuusmallin (tavallisesti FE-mallin) tarkentamiseksi sillan todellisesta toiminnasta, jotta kantavuus voitaisiin tarkemmin määrittää. Koekuormitusajoneuvojen liikkuessa sillan yli eri ajolinjoilla voidaan mitata kaikki liikkuvan kuorman aiheuttamat rasitukset ja vertailla niitä analysointituloksiin.

Sillan dynaaminen käyttäytyminen ja analysoinnissa käytettävä sysäyskerroin saadaan mitattua ajamalla sillan yli tavallisimmin nopeusrajoituksen mukaisella nopeudella. Nopeuden vaikutusta sysäysvaikutukseen voidaan myös testata käyttämällä eri ajonopeuksia. Joissain tapauksissa nopeusrajoituksen asettaminen sillalle voi pienentää oleellisesti sysäysvaikutusta.

Monitorointiin liittyvän koekuormituksen tarkoituksena on lujuuslaskentamallin tarkentamisen lisäksi mm. todentaa, että anturien asennus on onnistunut ja että ne toimivat suunnitellusti sekä asettaa monitorointiin tarvittavat triggerajajat.

9.2 Koekuormituksen suoritus

Koekuormitus toteutetaan sillan normaalia käyttötilannetta vastaavilla tai sitä suuremmilla ajoneuvopainoilla. Kuormitus tehdään siten, että koekuormituksen ohjaaja opastaa ajoneuvot oikealle paikalle ja ajolinjalle ensin tulosuunnassa sillan ulkopuolelle ja näyttää tarkan ajettavan ajolinjan sillalla. Koekuormituksen aikana ohjaaja antaa merkin mittausten käynnistämisestä ja lopettamisesta. Nykyisin mittaukset tehdään tavallisesti jatkuvana, jolloin kuormitusajoneuvo voidaan ajaa valitulla ajolinjalla sillan yli koekuormituksen ohjaajan kävellessä sen rinnalla. Tarvittaessa voidaan kuitenkin ajoneuvo pysäyttää valittuun kuormitusasentoon, jolloin sillan värähtelyt saadaan vaimenemaan ja betonisilloilla betonin jännitykset vakiintumaan.

Koekuormitus voidaan tehdä myös kahdella tai useammalla kuormitusajoneuvolla, jotka ajetaan peräkkäin tai vierekkäin sillan yli. Kun käytetään kolmea tai useampaa kuormitusajoneuvoa, niiden ajolinjat tai etäisyydet voivat helposti muuttua, jolloin on suositeltavaa, että ne pysäytetään sillan kriittisiin kohtiin ja tarkastetaan niiden tarkat asemat. Osaa ajoneuvoista voidaan myös liikuttaa erikseen, jos eniten rasitusta tuottavaa kuormitusasentoa ei ole tiedossa. *Kuvassa 26* on esitetty koekuormitus-tilanne, jossa kaksi ajoneuvoa ajaa rinnakkain sillan yli.



Kuva 26. Esimerkki koekuormituksesta ajoneuvonosturilla ja yhdistelmäajoneuvolla.

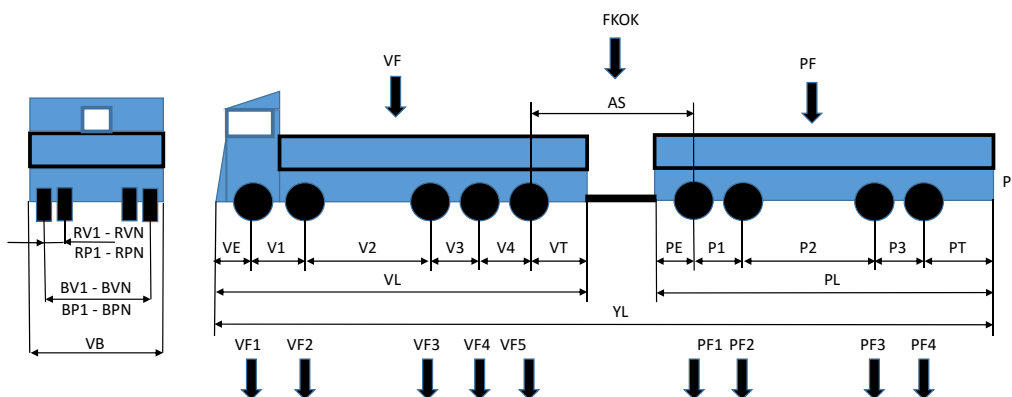
9.3 Koekuormitusajoneuvojen päämitat ja akselipainot

Sillan koekuormitusajoneuvojen valinta riippuu siitä, ollaanko sillalle selvittämässä painorajoitustarvetta vai määrittämässä kantavuutta erikoiskuljetuksille. Jälkimmäisessä tapauksessa on suositeltavaa käyttää koekuormituksessa ajoneuvoasetuksen mukaisten ajoneuvojen lisäksi erikoiskuljetusajoneuvoja, joiden kuormaa voidaan koekuormituksen aikana suurentaa. Koekuormituksessa käytettävien ajoneuvojen tavoitepainot valitaan kantavuus- ja analysointilaskelmien perusteella.

Kuormituksen ensimmäisessä vaiheessa on suositeltavaa käyttää yhtä ajoneuvoasetuksen mukaista ajoneuvoa, joka yli 10 m pitkillä silloilla on täysperävaunullinen yhdistelmäajoneuvo. Sitä ajetaan hitaasti, kävelyvauhtia sillan yli ja tarvittaessa pysähtyen esim. tukien kohdalla ja jänteiden keskellä. Toisessa vaiheessa käytetään kahta ajoneuvoasetuksen mukaista ajoneuvoa (tavallisesti täysperävaunuyhdistelmää), jotka ajetaan sillan yli rinnakkain ja peräkkäin.

Kun kantavuutta tutkitaan erikoiskuljetuksille, voidaan kuormitusta jatkaa edelleen käyttämällä esim. raskaasti kuormitettua lavettia tai ajoneuvonosturia, joilla saadaan suhteellisen lyhyelle pituudelle sillassa suuri kuormitus. Akselipainot voivat olla suurimmillaan yli 15 t ja lavettia käytettäessä maksimipaino jopa 200 t. Lavetissa voidaan nostaa myös osa akseleista ylös, jolloin muiden akselien akselipaino lisääntyy. *Kuvassa 27* on esitetty yhdistelmäajoneuvon kaaviokuva päämittoineen ja akselipainoineen.

Analysointia varten kaikkien kuormitusajoneuvojen mitat ja akselipainovaakojen avulla punnitut akselipainot kirjataan tietokantaan ja mittauspöytäkirjaan *kuvan 27* ja *Liitteen 5* mukaisesti. Kuorma-autojen kuormana on tavallisesti soraa tai sepeliä, mutta myös puukuljetuksia on käytetty. Lavetissa painoina käytetään useimmiten teräslevyjä, betonielementtejä tai nosturien vastapainoja. Usein lavetin kokonaispaino on niin suuri, että sillä ei voi täydessä lastissa ajaa koekuormituspaikalle, vaan osa painoista on tuotava paikalle erikseen. Tällöin siellä on oltava käytössä myös nosturi painojen siirtoa varten. Myöskään ajoneuvonosturien ei usein ole sallittua liikkua kaikilla vastapainoilla varustettuna.



Kuva 27. Esimerkki koekuormituksessa käytetyn yhdistelmäajoneuvon päämitoista ja akselipainoista.

9.4 Koekuormitusasennot ja ajoneuvojen ajolinjat sillalla

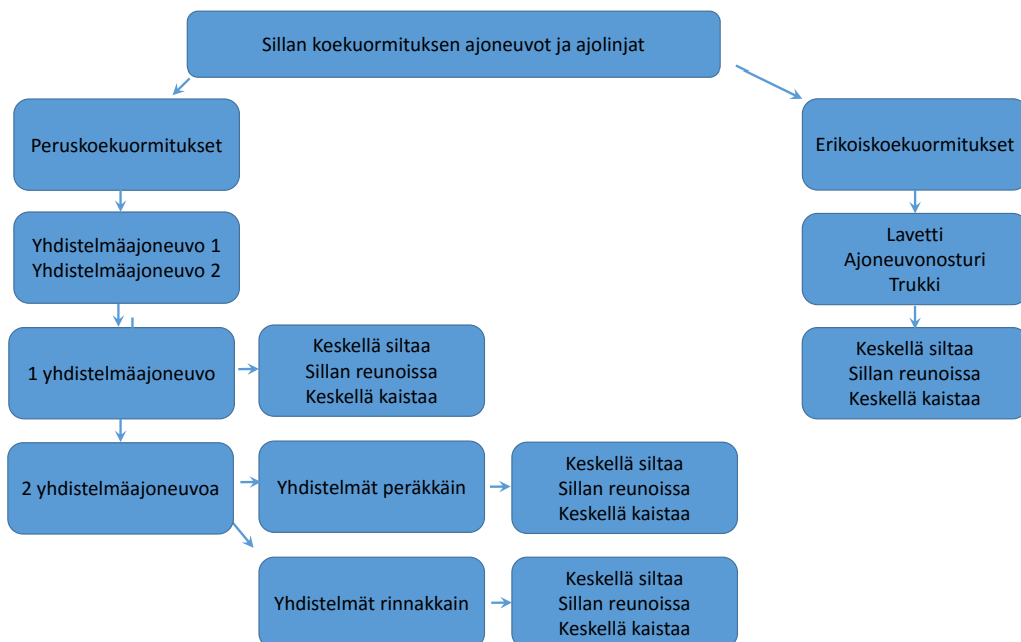
Sillan koekuormitus voidaan jakaa peruskoekuormitukseen, jotka tehdään yhdellä tai kahdella ajoneuvoasetuksen mukaisella ajoneuvolla ja erikoiskuormitustapauksiin lavetilla, ajoneuvonosturilla ja muilla raskailta ajoneuvoilla, ks. *kuva 28*. Kuormituksissa on suositeltavaa lisätä kuorman painoa yhdessä tai useammassa vaiheessa (erityisesti lavetit) tai voidaan käyttää kahta eripainoista tai erityyppistä yhdistelmäajoneuvoa. Dynaamiset ajot tehdään useimmiten vain yhdellä kokonaispainolla käyttäen suurinta sillalla sallittua ajonopeutta.

Koekuormituksessa ajolinjat ovat esim. sillan keskellä, ajokaistan keskellä ja aivan sillan reunassa. Käyttämällä useita eri ajolinjoja sillan poikkisuunnassa saadaan selville sillan taivutus- ja vääntöjäykkyys poikkisuunnassa ja edelleen kuormitusten jakautuminen sillan poikkisuunnassa erityisesti sillan päärakenteille, kuten kantaville palkeille. Kun halutaan kuormittaa vain yhtä sillan pääpalkeista, ajolinja valitaan siten, että pyörät kulkevat aivan pääpalkin päällä sillan kannella.

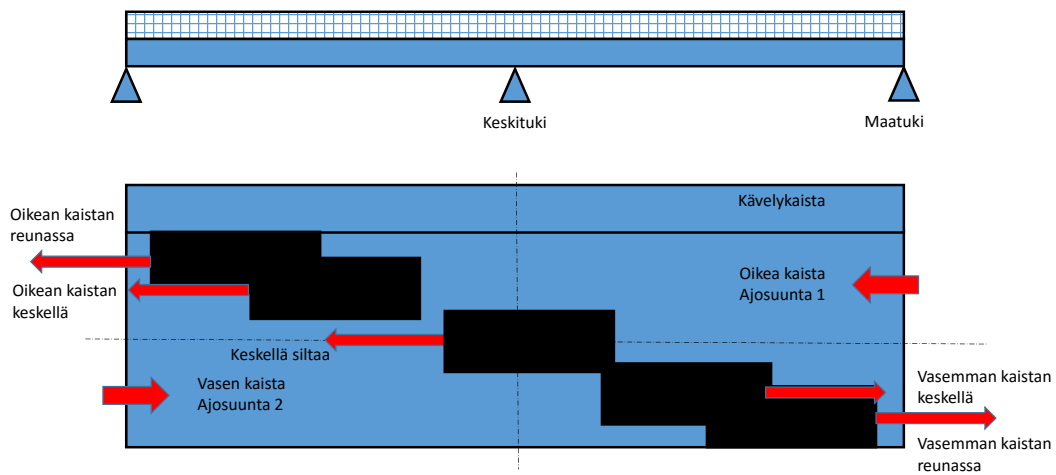
Kuormitukset ovat usein syytä tehdä kumpaankin ajosuuntaan sillalla, sillä silta ei ole usein aivan symmetrinen esim. jalkakäytävän vuoksi. Sillan laakerointi ja mahdollinen kitka kannen ja palkkien välillä voi olla myös riippuvainen ajosuunnasta. Muutama koekuormitus on suositeltavaa tehdä siten, että ajoneuvo pysäytetään haluttuun kohtaan sillalla, esim. jänteiden keskelle ja välitukien kohdille. Tarkkoja paikkoja tarvitaan sillan tarkassa analysoinnissa. Koekuormitusajoneuvojen etäisyydet sillan reunasta eri ajolinjoilla kirjataan koekuormitusraporttiin analysointia varten.

Kuvassa 29 on esitetty kaksikaistaisen sillan peruskuormitustapaukset, jotka koostuvat viidestä eri ajolinjasta sillalla. Peruskuormitustapauksessa käytetään yhdistelmäajoneuvoa tai joskus pelkästään vetoautoa. *Kuvassa 30* on esitetty neljä peruskuormitustapauksia kahdella vetoautolla, jotka ovat joko rinnakkain tai peräkkäin sillalla.

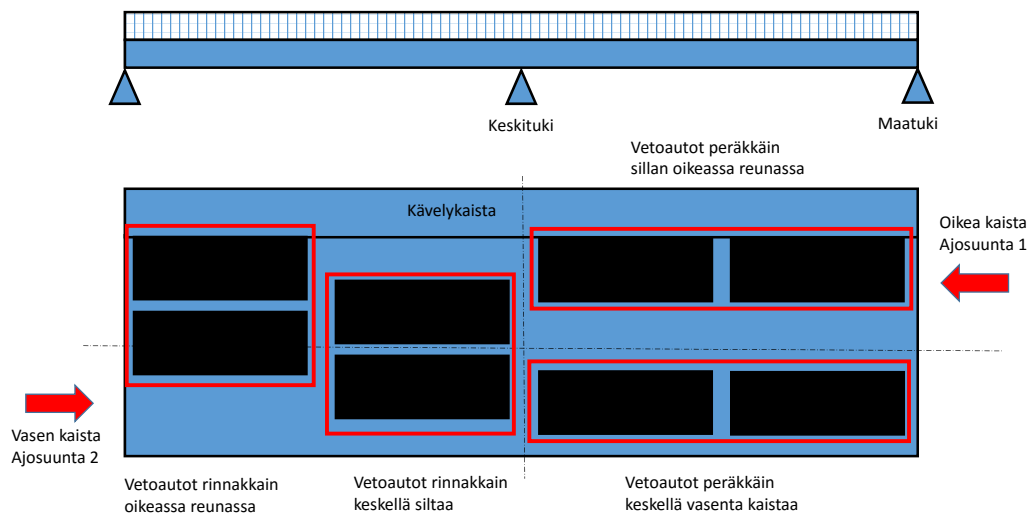
Koekuormitusajoneuvojen painot, ajosuunnat ja nopeudet kirjataan ylös mittauspöytäkirjaan ja tietokantaan *Liitteen 5* mukaisesti. Koekuormituksessa syntyneet mittaustiedostot tallennetaan samoin kuin monitoroinnissa syntyneet tiedostot luvun 7 mukaisesti. Koekuormituksen mittaustiedostoon tallennetaan lisäksi tiedot koekuormitusajoneuvosta, ajolinjasta, ajonopeudesta ja suunnasta. Ajoneuvon paikaksi sillan kannelle pituussuunnassa voidaan sopia esim. vetoauton takatelin keskimmäisen akseli, jolloin paikka kuvaa hyvin suurimman telikuorman kohtaa. Etäisyys ilmoitetaan esim. sillan maatuen liikuntasaumasta lähtien.



Kuva 28. Esimerkki peruskoekuormitusajoista yhdellä ja kahdella yhdistelmäajoneuvolla sekä erikoiskoekuormitustapauksia



Kuva 29. Esimerkki koekuormituksessa käytetyn ajoneuvojen sijainnista ja ajolinjoista (1 ajoneuvo).



Kuva 30. Esimerkki koekuormituksessa käytettyjen ajoneuvojen sijoittelusta ja ajolinjoista (2 ajoneuvoa).

9.5 Koekuormitus rautatiesilloilla

Rautatiessillat ovat Suomessa yleensä teräs- tai betonirakenteisia siltoja ja niiden kannella kulkee yksi tai useampi raide. Rautatiesiltojen koekuormituksilla pyritään todentamaan sillan käyttäytyminen uudessa, muuttuneessa tai poikkeavassa tilanteessa. Koekuormitus voi tulla kyseeseen, jos halutaan selvittää korotettujen akselipainojen, nopeuksien tai todetun vaurioiden vaikutusta siltaan.

Rautatiesiltojen koekuormituksen tarkoitus on selvittää kuormitettuna sillan todellinen käyttäytyminen, mahdollisten havaittujen vaurioiden vaikutus sillan kantavuuteen tai sillan väsymiskestävyyteen. Koekuormituksella voidaan myös mitata sillan dynaamista rasituskerrointa tai ylityksen aiheuttamaa melua ympäristöön.

Koekuormituksessa käytetään yleensä tavallista rataosuudella kulkevaa henkilö- tai tavarajunaa, jonka paino saadaan yleensä selville suhteellisen tarkasti. Junien paino tulee selvittää etukäteen, sillä yleensä rataosuudella kulkee useampia junatyyppejä. Myös yksittäisen junan eri vaunut saattavat olla eri painoisia.

Erikoistapauksessa voidaan käyttää tarkoitukseen valittua ja raskaasti lastattua erikoisjunaa. Koekuormituksessa junaa ei yleensä voida pysäyttää sillalle muun liikenteen takia. Jos halutaan selvittää junan dynaamisia vaikutuksia, on mahdollista ajattaa junia eri nopeustasoilla sillan yli.

Käytettävät ajolinjat rautatiesillalla määräytyvät sillalla olevien raiteiden sijainnin mukaan. Kuormitus ei välttämättä ole sillalla keskeinen raiteiden epäkeskisyyden takia. Myös kaarteissa raiteen asema sivusuunnassa voi vaihdella sillan kannella.

Koekuormituksessa mitattuja jännityksiä verrataan sillasta laaditun analysointimallin tuloksiin ja malli kalibroidaan vastaamaan sillan todellista käyttäytymistä kuten tiesilloilla. Erityisesti rautatiesiltojen toiminnassa tulee ottaa huomioon kiskojen toiminta. Ne välittävät vetoa ja voivat jakaa kuormitusta sillan pituussuunnassa. Onkin suositeltavaa mitata rautatiesillan koekuormituksen yhteydessä myös kiskojen muodonmuutoksia esim. venymäliuskoilla.

10 Monitoroinnin suunnittelu

Ennen sillan monitoroinnin aloittamista kohteesta laaditaan monitorointisuunnitelma, jossa esitetään mm. monitoroinnin tarkoitus, valitut mittaussuureet, mittauskohdat ja anturit sekä vaatimukset tiedonsiirrolle, analysoinnille ja raportoinnille. Monitorointisuunnitelma voidaan tehdä useammassa vaiheessa tarkentuvana dokumenttina, jolloin sitä täydennetään ja lopuksi laaditaan toteutussuunnitelma. Alkuvaiheessa monitorointisuunnitelmaa voidaan käyttää mm. monitoroinnin toteuttajaa kilpailutettaessa. Tällöin siinä esitetään ensisijaisesti laatuvaatimukset sillan monitoroinnille.

Monitoroinnin pääsuunnittelijan tehtävä on laatia monitorointisuunnitelma /5/ monitoroinnin kohteeksi valitusta sillasta. Monitoroinnin toteuttaja täydentää suunnitelman monitoroinnin toteutussuunnitelmaksi /5/. Lisäksi tilaaja laatii monitoroinnin valmistelua varten turvallisuusasiakirjan /5/, joka sisältää monitoroinnin toteuttamiseen liittyvät tarpeelliset turvallisuustiedot, ja nimittää turvallisuuskoordinaattorin. Monitoroinnin toteuttaja laatii turvallisuusasiakirjan pohjalta turvallisuussuunnitelman /5/.

Monitoroinnin suunnitteluun liittyvät useimmiten myös etu- ja jälkikäteen tehty lujuustekninen analysointi sekä mittalaitteiden ja anturien kalibroimiseksi koe-kuormitus. Monitorointi sekä siihen liittyvät tiedon tallennus ja analysointi on tehtävä annettujen ohjeiden mukaan, jotta myöhemmin talletettua ja analysoitua dataa voidaan systemaattisesti käyttää hyväksi. Tulevaisuudessa on tarkoitus hyödyntää monitorointitietoa siltojen suunnittelussa, hallinnassa ja korjauksessa, jolloin analysointi voidaan kohdistaa koko siltojen monitorointitietokantaan. Jos sillasta on olemassa tietomalli (inframalli) sähköisessä muodossa, sitä voidaan käyttää hyväksi lujuusteknisessä analysoinnissa ja monitorointia suunniteltaessa.

Rautatiesiltojen osalta on hyvä tutustua myös ohjeeseen Ratatekniset ohjeet (RATO) osa 8, Rautatiesillat /14/.

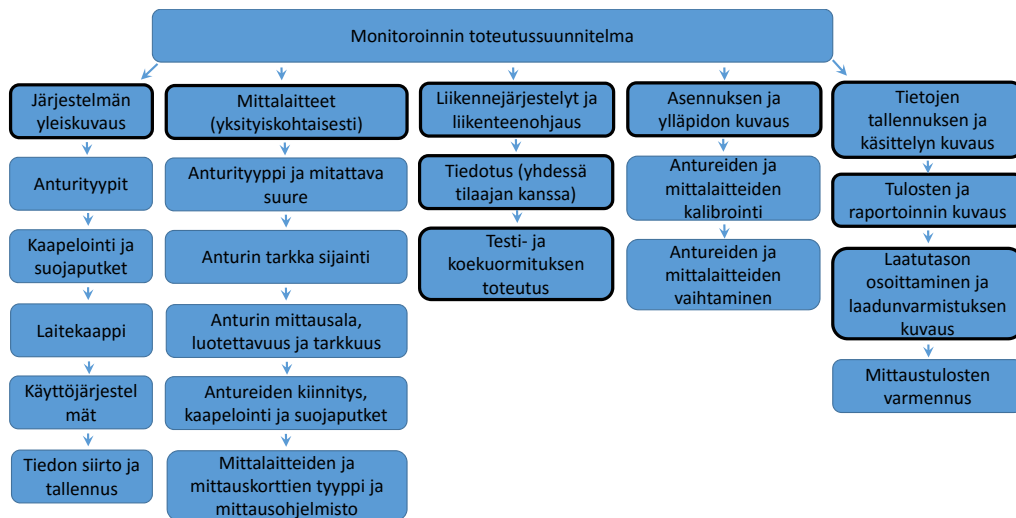
10.1 Monitorointisuunnitelma

Monitoroinnin pääsuunnittelijan on tehtävä siltakohtainen monitorointisuunnitelma, jossa esitetään

- kohteen yleiskuvaus
- monitorointiprojektin aikataulu
- monitoroinnin tavoitteet
- kaikki tarpeelliset toimenpiteet ja laitteet monitoroinnin suorittamiseksi
- tarvittavan lujuusteknisen analyysin sekä testi- tai koe-kuormituksen määrittely
- kriittisten mittauskohtien valinta
- antureiden ominaisuudet ja tarkkuustaso
- mittalaitteiden sijoitus
- asennustapa
- jatkuvan monitoroinnin enimmäiskatko aika
- kaapeloinnin suunnittelu periaatteellisella tasolla
- tiedonsiirto periaatteellisella tasolla

- mitatun datan tallennuspaikka ja formaatti
- mittaustulosten käsittely, signaalinkäsittely
- analysoinnin ja raportoinnin määrittäminen

Lujuustekninen analyysi ei ole tarpeen, jos ei ole kyse rakenteellisesta monitoroinnista. Monitorointisuunnitelma voidaan tehdä myös useammassa vaiheessa tarkentuvana dokumenttina, jolloin sitä täydennetään ja lopuksi laaditaan toteutussuunnitelma. Monitorointisuunnitelma on hyväksyttävä tilaajalla ennen töiden aloittamista. Monitorointisuunnitelmaa voidaan käyttää hankinta-asiakirjana monitoroinnin toteutusta tilattaessa tai kilpailutettaessa. Tällöin on keskeistä, että monitorointisuunnitelmassa on esitetty selkeästi monitoroinnin laatuvaatimukset. Monitoroinnin perusvaiheet on esitetty kuvassa 31.



Kuva 31. Esimerkki monitoroinnin perusvaiheista.

Kohteen yleiskuvaus

Tiedot monitoroitavasta sillasta ja viimeisimmät tiedot uusimmista tarkastuksista ja analysoinneista saadaan Taitorakennerekisteristä (vuoteen 2017 saakka Silta-rekisteristä). Taitorakennerekisteriin ja Monitorointitietokantaan voidaan tallentaa myös sillan piirustuksista ja laskelmista päämitat, pääpalkkien mitat ja muut tärkeät toiminnalliset mitat, jos niitä halutaan hyödyntää monitorointitulosten raportoinnissa tai analysoinnissa. Anturien ja kaapelien asennusta varten sillasta tallennetaan valokuvia ja videoita sekä koekuormituksen suorittamista varten myös kääntöpaikkojen ja levennysten paikat sillan läheisyydessä.

Monitoroitava silta voi olla myös rakennettava uusi silta. Tällöin sillan tiedot saadaan suunnitelmapiiirustuksista ja sillan inframallista. Monitoroinnin pääsuunnittelijan täytyy tällöin olla yhteydessä sillan pääsuunnittelijaan sekä mittauskohtien valitsemiseksi että lisättävän monitorointijärjestelmän vaikutusten määrittämiseksi sillan suunnitelmiin.

Monitorointiprojektin aikataulu

Monitorointisuunnitelmassa esitettävä sillan monitoroinnin aloittamisen ajankohta ja aikataulu tarkennetaan monitoroinnin toteutussuunnitelmaan. Suunnitelmissa on esitettävä myös ajankohta, jolloin aloitetaan anturien asennus, mahdollisen koekuormitus sekä monitoroinnin purkaminen. Aikataulua laadittaessa otetaan huomioon kohteen liikenneolosuhteet. Erityisesti vilkasliikenteisissä kohteissa pyritään minimoimaan liikennehäiriöt mittalaitteiden asennuksen ja koekuormituksen aikana ajoittamalla työt tarvittaessa esim. ilta- ja yöaikaan. Myös monitoroinnin tulosten ja koko monitorointiprojektin tulosten raportoinnille esitetään aikataulu.

Monitoroinnin tavoitteet

Päätös sillan monitoroinnista perustuu monitorointitarpeeseen. Monitorointitarve syntyy tilanteessa, jossa sillan nykyisten käytettävissä olevien tietojen perusteella ei voida saavuttaa haluttua tavoitetilaa (ks. kohta 1.2 /5/). Monitoroinnilla voidaan myös seurata sillan kuntoa ja kantavuutta sen loppuun käytön ajan. Monitoroinnin tavoitteet voivat koskea

- havaittuja vaurioita
- rakenteellista kantavuutta
- käyttöikää
- käyttömukavuutta
- tutkimusta ja kehittämistä (T&K)

Monitoroinnin tavoitteiden selkeä esittäminen ja hyväksyttäminen ovat yksi monitorointiprojektin tärkeimmistä vaiheista, sillä pelkillä monitoroinnin tuottamilla mittaustuloksilla ei voida arvioida sillan kuntoa. Tärkeimmät tulosten analysointitavat ovat esitetty luvussa 8.

Kaikki tarpeelliset toimenpiteet ja laitteet monitoroinnin suorittamiseksi

Monitoroinnin alkuvaiheessa suunnitellaan tarvittavat mittalaitteet, niiden lukumäärä, tiedonsiirtolaitteet ja arkistointilaitteet. Monitorointimenetelmä (kerta, jaksottainen tai jatkuva) valitaan luvun 3 mukaan ja monitoroinnin laajuus (suppea, laaja tai erikoislaaja) luvun 4 mukaan. Monitoroinnin olisi oltava systemaattista toimintaa ja siksi arkistoinnista olisi sovittava niin, että kaikille silloille saataisiin yhteinen tietokanta.

Lujuustekninen analyysi ja testi- tai koekuormituksen määrittely

Monitoroinnin suunnitteluun liittyy aina jonkintasoinen lujuus- tai turmeltumis-analyysi, sillä mittaustulokset suoraan eivät kerro sillan kunnosta tai kantavuudesta. Vanhoille silloille on olemassa yleensä vain käsin tehtyjä laskelmia, joten uudemmille laskelmille on hyvät perusteet ja ne tehdään usein FE-analyysillä. Aiempien laskelmien jälkeen sillan todelliset liikennekuormat sekä raskaiden ajoneuvojen painojen että lukumäärien osalta ovat voineet kasvaa, jolloin koko sillalle on tehtävä uusi kantavuuslaskenta. Sillassa on myös voitu havaita vaurio, jolloin vauriokohdasta laaditaan tarkempi malli ja lujuusanalyysi. Monitoroinnin käynnistämisen yhteydessä tehdään sillalle myös koekuormitus, jotta anturien toimivuus voidaan varmentaa ja samalla myös verrata laaditun lujuusmallin toimivuutta. Pitkäkestoisessa monitoroinnissa koekuormitus on suositeltavaa tehdä useampaan kertaan, vähintään ennen ja jälkeen monitoroinnin.

Koekuormituksen laajuus riippuu monitoroinnin laajuudesta. Jos siltaan on asennettu useita kymmeniä antureita eri kohtiin, on koekuormituksessa käytettävä eri ajosuuntia, useita ajolinjoja sekä myös eripainoisia ja -tyyppisiä ajoneuvoja. Koekuormitus-suunnitelma tehdään tämän ohjeen luvun 9 ja *liitteen 5* mukaan.

Betonisiltojen kuntoa voidaan mitata kosteus- ja korroosioantureilla. Näiden testaamiseen ei tarvita koekuormitusta, mutta toimivuutta voidaan testata siten, että ainakin yksi anturi sijoitetaan siltarakenteen ulkopuolelle betonipalan sisään sillan läheisyyteen ja tätä anturia testataan (esim. kostuttamalla), jolloin anturin toimivuus voidaan todeta. Korroosioanturi testataan valmistajan ohjeiden mukaan. Kosteutta voidaan mitata myös siltojen puurakenteista.

Mittauskohtien valinta

Antureiden paikat valitaan sillan analysointitulosten tai havaittujen vauriokohtien perusteella.

Sillan muodonmuutosten ja edelleen rakenteellisen toiminnan selvittämiseksi antureilla etsitään tietoa mm. eri rakenneosille tulevista rasituksista, palkiston rasituksista sillan pituussuunnassa mm. aukkojen kriittisten pisteiden ja välitukien kohdilla, kuormien jakaantumisesta poikkileikkauksessa eri palkeille sekä yksittäisen palkin toiminnasta (mm. neutraaliakselin paikka).

Tavallisia antureiden paikkoja ovat sillan pääpalkkien alapinta/alalaippa aukkojen keskellä taivutusmomentin maksimikohtien kohdalla. Terässilloilla teräspalkkien laipoissa on usein kuitenkin lisälevyjä, jolloin jännityksen maksimikohta voi olla aivan lisälevyn pään vieressä. Lisälevyn pää on myös väsymislujuuden kannalta huono detalji, mikä voi aiheuttaa myös mittaustarpeen. Jatkuvassa sillassa taivutusmomentin ääriarvo on välituen kohdalla, jonne voidaan myös kiinnittää antureita. Tuen läheltä palkin uumasta voidaan mitata myös välillisesti leikkausvoimaa.

Poikkipalkkien rasitukset mitataan tavallisesti pääpalkkien puolivälistä. Jos sillassa on havaittu vaurio, anturien paikat valitaan vauriokohdan läheisyydestä. Varsinkin teräspalkkirakenteissa suuria jännityksiä ja jännitysvaihteluita voi esiintyä pituus- ja poikkirakenteiden liitoksissa, joista venymiä voi olla myös aiheellista mitata. Koska momentti muuttuu äkillisesti epäjatkuvuuskohdassa esim. liitoslevyn läheisyydessä, anturi kiinnitetään tavallisesti noin palkin korkeuden verran liitoslevystä, jotta saadaan luotettavampi tulos analysointitulokseen.

Anturien paikat ilmoitetaan tarkasti sanallisesti, niistä otetaan valokuvat ja niiden tarkka paikka ilmoitetaan myös digitaalisesti *liitteen 2* mukaisesti. *Liitteessä 2* on täydentävää tietoa mitattavien kohteiden valinnasta.

Antureiden ominaisuudet ja tarkkuustaso

Monitorointisuunnitelmassa pääsuunnittelija asettaa minimivaatimukset anturien tärkeimmille ominaisuuksille. Monitoroinnin toteutussuunnitelmassa monitoroinnista vastaava toimija määrittää lopulliset anturityypit ja hyväksyy ne tilaajalla. Antureiden ja mittalaitteiden tärkeimmät ominaisuudet on annettu luvussa 50. Monitorointia suorittava toimija valitsee yhdessä pääsuunnittelijan kanssa anturien tyypit ja ominaisuudet siten, että mittaustulokset ovat riittävän luotettavia, mutta ottaen huomioon myös niiden aiheuttamat kustannukset.

Mittalaitteiden sijoitus

Mittalaitteet sijoitetaan tavallisesti sillan maatukeen tai maatuen läheisyyteen, johon saadaan tarvittava sähkövirta ja tietoliikenneyhteys. Pienet mittalaitteet voidaan sijoittaa suoraan siltarakenteisiin, mutta tällöin sähkövirran tuonti sillalle voi muodostua hankalaksi. Pysyvät mittalaitteet sijoitetaan aina mittauskaappiin, johon järjestetään tarvittaessa tuuletus ja lämmitys ja jossa mittalaitteet ovat paremmin

ilkvallalta suojassa. Huollon ja asennusten kannalta kannattaa mittauskaappi sijoittaa siten, että sen edessä työskentely on helppoa koko monitoroinnin ajan. Lyhyissä mittauksissa (esim. koekuormitus) voidaan mittalaitteet sijoittaa väliaikaisesti suojattuun paikkaan esim. sillan kannelle tai tien reunaan sillan päähän.

Antureiden asennustapa

Antureiden asennustapa päätetään monitorointisuunnitelmissa. Teräsrakenteisissa silloissa anturit asennetaan tavallisesti rakenteen pintaan ja betonisilloissa raudoitteisiin betonin sisään. Antureiden asennustapaa mietittäessä tulee ottaa huomioon mm. vaatimus antureiden ja niiden liitosten pitkäaikaistoimivuudesta ja -kestävyydestä sekä asennustavan vaikutukset rakenteen ja sen pintakäsittelyn pitkäaikaiskestävyyteen.

Liimaamalla anturi voidaan kiinnittää rakennetta vahingoittamatta, mutta jos joudutaan poraamaan kiinnitysreikiä tai käytetään hitsaamista, siitä on sovittava pääsuunnittelijan kanssa, sillä nämä kiinnitystavat voivat heikentää etenkin teräsrakenteiden väsymiskestävyyttä. Kun anturit (esim. venymäliuskat) kiinnitetään olemassa olevissa silloissa betoniraudoitteeseen, joudutaan raudoitetanko piikkaamaan esiin, mikä voi vaikuttaa mittauksien tulokseen. Tästäkin on sovittava erikseen pääsuunnittelijan kanssa. Pitkäaikaismonitoroinnissa tulee rakenneteräksen pintakäsittelystä huolehtia myös antureiden ympärillä (esim. venymäliuskojen kohdat) ja raudoitetankojen piikkauskohdat tulee täyttää monitorointisuunnitelmassa esitetyn suunnitelman mukaisesti. Periaatteena on, että monitorointi ei saa huonontaa rakenteen pitkäaikaiskestävyyttä.

Jatkuvan monitoroinnin enimmäiskatko aika

Monitorointisuunnitelmassa määritellään jatkuvan monitoroinnin toimivuusluokka ja pisin sallittu katko aika vuodessa. Toimivuusluokkaa valittaessa on huomioitava sillan sijainti ja siirtymisaika sillalle korjausta varten. Anturien toimivuutta voidaan parantaa asentamalla ylimääräisiä antureita (kahdentamalla antureita), jolloin yhden anturin toimimattomuus ei aiheuta mittauskatkoa. Jos monitoroinnilta vaaditaan korkeaa toimivuusastetta, on systeemi varustettava vara-akuilla (UPS), mutta nämäkään eivät riitä pitkiin sähkökatkoihin. Toimivuusluokkaa valittaessa voidaan erikseen sopia yleisen sähköverkon ja dataverkon aiheuttamien katkojen huomioon ottamisesta.

Kaapeloinnin suunnittelu periaatteellisella tasolla

Monitoroinnissa käytetään vielä nykyisin useimmiten langallisia antureita, jolloin antureille syötetään kaapeloinneilla sähkövirtaa ja kerätään mittausdataa. Tavallisin tapa on asentaa jokaiselle anturille monisäikeinen kaapeli, joka samalla syöttää virtaa ja kerää mittausdataa. Tässä järjestelyssä kaapelien lukumäärä kasvaa, kun antureita on useita kymmeniä. Jos mittaussignaali muunnetaan digitaaliseen muotoon, voidaan mittausdata siirtää muutamalla kaapelilla mittalaitteelle tallennusta varten. Virtaa syöttävä kaapeli voi olla tällöin yhteinen usealle anturille. Muutaman päivän kestävässä mittauksissa kaapelit voidaan asentaa sillan kannelle, mutta pitkäaikaisessa monitoroinnissa ne sijoitetaan sillan alle kiinnitetyille kaapelihyllyille tai suojaputkiin. Kaapelihyllyjä kiinnitettäessä ei sillan päärakenteita saa vahingoittaa niin, että esim. väsymiskestävyys heikkenee. Kiinnitystavasta on sovittava pääsuunnittelijan kanssa. Pitkässä monitoroinnissa mittausten loputtua ei mittajohtoja yleensä kannata purkaa, vaan ne voidaan jättää mahdollisia tulevia mittauksia varten.

Langattomat anturit eivät tarvitse kaapeleita, mutta niissä olevat patterit tai akut joudutaan vaihtamaan pitkäkestoisissa mittauksissa. Usein langaton anturi koostuu mittausyksiköstä ja anturista, joka on liitetty yksikköön lyhyellä kaapelilla. Mittausyksikkö pyritään sijoittamaan siten, että sen akut voitaisiin helposti vaihtaa esim. sillan reunan läheisyydessä.

Tiedonsiirto periaatteellisella tasolla

Langallisilta antureilta tuleva tieto on analogista tai digitaalista. Nykyisin on saatavilla myös langattomia antureita, joiden tiedonsiirto on valmistajakohtainen. Tavallisesti mittaus-tieto tallennetaan sillan läheisyydessä olevalle mittalaitteelle tai PC:lle. Yksinkertaisinta on tallentaa kaikki mitattu tieto jokaiselta anturilta aikasarjana. Dynaamisissa mittauksissa tämä kasvattaa kuitenkin tallennettavan tiedon määrää, jolloin sen siirto esim. GSM-verkon kautta on hidasta. Tästä syystä osa dynaamisesta mittaus-tiedosta voidaan analysoida mittauspaikalla ja siten vähentää sen määrää.

Tyypillinen ja eräs yksinkertaisimmista analysointitavoista on tiedon triggauk. Siinä tallennetaan vain se tieto, joka ylittää ns. kynnysarvon. Kynnysarvo on asetettu siten, että saadaan talteen mittausdata esim. raskaiden ajoneuvojen ylityksistä tai sillan värähtelystä määrättyllä amplitudilla tuulen vaikutuksesta.

Sillasta mitattu tieto tallennetaan sovitussa formaatissa sillan mittalaitteelle tai PC:lle, jotta se voidaan tallentaa pysyvästi tietokantaan. Siirrettäessä tietoa tietokantaan, on kaikkien mittaus-tulosten yksiköiden, mittaus-aajuuden, mahdollisten kertoimien ja mittaus-aajan oltava saatavilla standardimuodossa, jotta tallennus onnistuisi systemaattisesti.

Mittausdatan tallennuspaikka ja formaatti

Monitorointitulokset tallennetaan aluksi sillalla olevalle mittalaitteelle tai mittaus-PC:lle. Monitoroitu data voi olla jatkuvaa tai määrätyn kynnysarvon ylittäviä aikasarjoja. Sitä voidaan esikäsitellä tai analysoida jo mittaus-PC:llä, jos tiedonsiirtoyhteys on hidas tai puuttuu kokonaan. Mitattu monitorointidata on suositeltavaa siirtää vähintään kerran päivässä arkistointitietokantaan, jonka tallennusformaatti on esitetty luvussa 7.

Mittaus-tulosten käsittely, signaalinkäsittely

Mittaus-tulokset käsitellään siten, että niitä voidaan käyttää esim. sillan kunnon, kantavuuden tai siinä havaitun vaurion tutkimiseen ja siten saavuttaa halutut monitoroinnin määritetyt tavoitteet. Pelkät mittaus-tulokset eivät suoraan kerro sillan kuntoa tai käyttäytymistä. Tavallisin tapa lyhentää ja selventää mitattua dataa on laskea siitä maksimi, minimi ja keskiarvo määrättyssä aikayksikössä (esim. arvot/10 s, arvot/1 min/, arvot/vrk). Näitä arvoja voidaan verrata edelleen määritettyihin kriittisiin arvoihin ja laskea lukumäärät kriittisten arvojen ylityksistä. Kriittisiä arvoja ovat analysoinnista saadut maksimijännitykset, jotka ovat yleensä pienempiä kuin esim. aineen myötöraja. Mittausdata voidaan edelleen esittää luokiteltuna histogrammina, jolloin lasketaan maksimi- tai minimijännitysten lukumäärät valitussa luokkavälissä. Histogrammista yksi sovellus on väsymisikää laskettaessa tehtävä Rainflow-analyysi, jolla voidaan analysoida mittausdatasta jännitysvaihteluiden suuruudet ja määrät sekä edelleen laskea teräsdetaljien kestoikä.

Analysoinnin ja raportoinnin määrittäminen

Sillan monitoroinnista saadaan paras hyöty, kun kokonaisuuteen yhdistyvät sillan lujuustekninen tai turmeltumisen analyysi, monitorointi ja lopuksi tulosten systemaattinen tallennus ja analysointi. Sillan lujuusteknisessä analysoinnissa muodostetaan sillan lujuusmalli, tavallisesti FE- (Finite Element) malli, jolla silta analysoidaan käyttäen sovittuja kuormituksia. Siltojen kuormituksista on ohjeita Liikenneviraston ohjeissa 'Siltojen kantavuuslaskentaohje' /1/ ja 'Eurokoodin soveltamisohje, 'Siltojen kuormat ja suunnitteluperusteet – NCC 1' /2/. Sillan lujuusteknisen analysoinnin perusteella valitaan monitoroinnissa käytettyjen anturien tyypit, anturien lukumäärät ja sijoituspaikat.

Sillan monitoroinnin tarkoitus voi myös olla mahdollisten vaurioiden havaitseminen esim. silloin, kun silta on jo vanha ja huonokuntoinen. Sillan oletettujen vaurioiden vaikutus saadaan tekemällä sillasta vauriomalli (esim. FE-malli), johon oletetut vauriot mallinnetaan. Analysoinnissa voidaan laskea mahdollisten vaurioiden aiheuttamat muutokset sillan muodonmuutoksissa, kuten esim. taipumissa, jännityksissä ja värähtelykäyttäytymisessä. Yleisesti voidaan sanoa, että mitä kauempaa mahdollista vauriota mitataan, sitä heikommin se näkyy mittaustuloksissa. Esimerkiksi moni-aukkoisissa rakenteissa on asennettava antureita jokaiseen aukkoon, jotta mahdollinen pääpalkin vaurio voitaisiin havaita ajoissa. Käytännössä on todettu, että sillan käyttäytyminen voi muuttua lämpötilan ja vuodenaikojen mukaan, mikä vaikeuttaa mahdollisen vian havaitsemista.

Liikennevirasto on julkaisut ohjeen 'Siltojen tietomalliohje' /3/, jossa esitetään periaatteet, miten sillan tietomalli voidaan muodostaa ja tallentaa digitaalisessa muodossa. Sillan lujuusmallin geometria voidaan periaatteessa muodostaa tuotemallista, mutta sen automaattinen muodostaminen vaatii vielä kehitystyötä. Usein lujuusmalli voi olla geometrialtaan jonkin verran yksinkertaistettu, kun taas tietomalleissa pyritään melko suureen tarkkuuteen.

Uusien siltojen suunnitteluvaiheessa voidaan tehdyn lujuusmallin avulla määrittää mahdollisten anturien paikat monitoroinnissa, jolloin anturit antavat tietoa sillan toiminnasta ja kriittisten kohtien rasituksista. Uuden sillan monitorointi voi olla esitetty vaatimus, jolla sillan suunnittelija ja rakentaja osoittavat, että silta toimii suunnitellulla tavalla ja että sillan rasitukset ovat myös analysoinnin mukaiset.

Sillan turmeltumismallin avulla lasketaan sillan vaurioitumisen kehittyminen esim. kosteusvaurioiden, korroosion ja kloridien tunkeutumisen osalta. Samoin kuin lujuusmallin myös turmeltumismallin avulla valitaan anturien paikat ja tyypit monitorointia varten.

Monitoroinnin tulokset esitetään erilaisten raporttien ja analysointitulosten avulla. Yksinkertaisin tapa on esittää mittaustulokset aikasarjana, mutta näitä pitää kuitenkin verrata analysoinnista ja koekuormituksesta saatuihin kriittisiin tai sallittuihin arvoihin. Monitorointitulosten analysointia ja raportointia käsitellään laajemmin luvussa 8.

Monitorointisuunnitelman dokumentointi

Ennen monitoroinnin varsinaista aloittamista monitorointisuunnitelma dokumentoidaan tarkasti, jotta siitä saataisiin paras mahdollinen hyöty. Monitorointisuunnitelmassa esitetään monitoroinnin tarkoitus, anturit ja mittalaitteet, sekä mitatun datan tallennustapa ja formaatti. Lisäksi esitetään raportointitapa, analysointi ja jälkianalysointi.

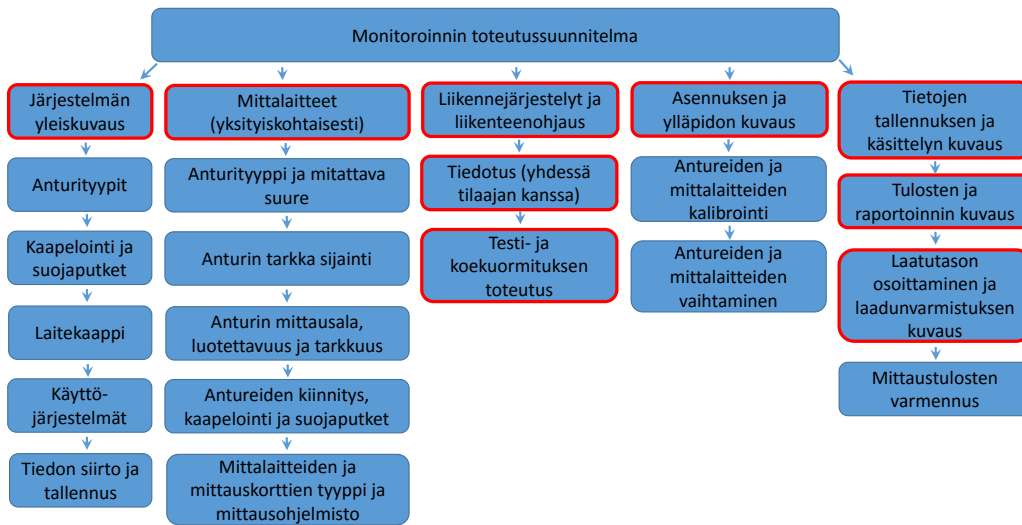
Taulukossa 1/liite 6 on esitetty monitorointisuunnitelman dokumentointikaavakkeen malli. Osa tiedoista saadaan siltarekisteristä, mutta joitain arvoja joudutaan katsomaan sillan piirustuksista, koska suuri osa päämitoista ei ole vielä tallennettuna siltarekisteriin lukuina.

Monitorointiin liittyy läheisesti sillan koekuormituksen lisäksi analysointimallin (FE-malli) ja turmeltumismallin muodostaminen. Yksinkertainen FE-malli voidaan muodostaa siltaryhmälle päämittojen avulla, jolloin monitorointi tuloksia analysoitaessa voitaisiin käyttää apuna päämittojen avulla automaattisesti muodostettuja FE-malleja.

10.2 Monitoroinnin toteutussuunnitelma

Monitorointipalvelun toimittajan on tehtävä siltakohtainen monitoroinnin toteutussuunnitelma, jossa on esitetty selkeästi toimitettava järjestelmä. Monitoroinnin toteutussuunnitelma tehdään tavallisesti täydentämällä aiemmin tehty monitorointisuunnitelma, jolloin selkeästi nähdään, miten toteutussuunnitelma vastaa kaikkiin monitorointisuunnitelmassa asetettuihin vaatimuksiin. Toteutussuunnitelmassa esitetään monitoroinnin toteutus vaiheittain alla olevan luettelon ja *kuvan 32* mukaisesti.

- Järjestelmän yleiskuvaus
 - anturityypit
 - kaapelointi ja suojaputket
 - antureiden suojakotelot
 - laitekaappi
 - käyttöjärjestelmät
 - tiedon siirto ja tallennus
- mittalaitteet (yksityiskohtaisesti)
 - anturityyppi ja mitattava suure
 - anturin tarkka sijainti
 - anturin mitta-alue, luotettavuus ja tarkkuus
 - antureiden kiinnitys, kaapelointi ja suojaputket
 - mittalaitteiden ja mittauskorttien tyyppi ja mittaushjelmisto
- järjestelmän asentaminen
 - eri vaiheessa asennettavat osat
 - antureiden ja suojakoteloiden kiinnitykset
 - pintakäsittelyn ja piikkauskolojen paikkaukset antureiden asennuksen jälkeen
 - työnaikaiset kaapeloinnit sekä lopputilanteen kaapeloinnit
 - suojaputkien kiinnitykset ja sijoitus
- liikennejärjestelyt ja liikenteenohjaus
- tiedotus (yhdessä tilaajan kanssa)
- testi- tai koekuormituksen toteutus
- asennuksen ja ylläpidon kuvaus
 - antureiden ja mittalaitteiden kalibrointi
 - antureiden ja mittalaitteiden vaihtaminen
- tietojen tallennuksen ja käsittelyn kuvaus
- tulosten ja raportoinnin kuvaus
- laatutason osoittaminen ja laadunvarmistuksen kuvaus
 - mittaustulosten varmennus



Kuva 32. Esimerkki monitoroinnin perusvaiheista

Järjestelmän yleiskuvaus

Järjestelmä koostuu antureista, mittajohdoista, mittalaitteista ja tiedonsiirtolaitteista. Varsinaisen mittausjärjestelmän lisäksi järjestelmä käsittää mahdolliset antureiden koteloinnit, kaapelihyllyt tai putket, mittalaitekaapit sekä tiedon tallennusserverin laboratorioissa.

Erityyppiset anturit on esitelty luvussa 5 ja antureilta vaadittavat ominaisuudet luvuissa 5 ja 60. Anturit on asennettava tarvittaessa säältä suojattuun koteloon ja venymäliuskat suojataan lakkakerroksella. Sillan kannella olevat anturit vaativat usein myös mekaanisen suojan jään ja lumen mekaanista rasitusta vastaan. Suojauksen tason valintaan vaikuttaa monitoroinnille suunniteltu kesto.

Pitkäaikaismonitoroinnissa anturien johdot asennetaan sillan alle kaapelihyllyille tai suojaputkiin. Yleiskuvauksessa kuvataan ja piirretään kaapelit ja niiden hyllyt sekä niiden kiinnitys rakenteeseen. Antureiden ja kaapeleiden kiinnityksistä sovitaan suunnittelijan kanssa, jotta ne eivät huonontaisi siltarakenteen kantavuutta ja pitkäaikaiskestävyyttä.

Mittalaitte, mittaustietokone, vahvistimet, suodattimet ja tiedonsiirtolaitteet sijoitetaan mittauskaappiin, joka sijaitsee tavallisesti sillan maatuella. Mittauskaappiin tulee sähköliitäntä ja mahdollinen verkkokaapeli, ja se täytyy tarvittaessa varustaa jäädytyksellä (kesällä) ja lämmityksellä (talvella). Jos pysyvissä monitoroinneissa mittauskaappi voidaan sijoittaa esim. lukittuun ja lämmitettyyn valvontatilaan, on tämä suositeltavaa, vaikka mittauskaapeleita jouduttaisiinkin vetämään hieman pidempiä matkoja. Mittalaitteista selvitetään tiedon siirto ja tallennusformaatti. Arkistointiformaatista on annettu ohjeet luvussa 7.

Antureiden ja tiedonsiirron suunnittelusta on annettu lisäohjeita liitteissä 2, 3 ja 4.

Mittalaitteet (yksityiskohtaisesti)

Anturit valitaan siten, että ne täyttävät asetetut vaatimukset koskien tarkkuutta, herkkyyttä, mittaustaajuutta, mittausaluetta ja ympäristöolosuhteita lukujen 5 ja 6 sekä *liitteen 3* mukaan. Antureilla on oltava valmistajan kalibrointitodistukset tai ne on kalibroitava uudelleen valmistajan ohjeiden mukaan. Uudelleen kalibroinnissa voidaan käyttää hyväksi koekuormitusta ja siitä saatuja sillan analysointituloksia. Lisäksi anturin paikka annetaan tarkasti sekä tehtävässä piirroksessa että käyttäen systemaattista koodia, joka on selitetty liitteessä 2.

Mittalaitteita käytetään antureilta tulevan mittaustiedon lukemiseen ja ne sijoitetaan mittauskaappiin. Mittalaitteesta ilmoitetaan käyttöjärjestelmä ja mittausohjelma. Mittalaitteiden on oltava yhteensopivia valittujen antureiden kanssa. Anturien kiinnitystapa ja mittajohtojen kiinnitys selitetään suunnitelmassa.

Järjestelmän asentaminen

Järjestelmän asentamisesta laaditaan selkeä aikataulu, jossa selitetään erikseen antureiden, mittajohtojen ja mittauskaapin asentaminen. Antureiden asentamisessa tarvitaan usein henkilönostinta tai siltakurkea, jolloin siitä voi aiheutua rajoituksia liikenteelle. Asennuksen valmistuttua järjestelmän toimivuutta testataan tavallisen raskaan liikenteen avulla koekuormitusta ja lopullista monitorointia varten. Jos mittausjärjestelmää asennetaan rakennettavaan siltaan, tulee asentamisjärjestelyistä ja aikataulutuksesta sopia pääurakoitsijan kanssa.

Liikennejärjestelyt ja liikenteen ohjaus

Antureiden asennuksen aikana joudutaan usein liikennettä rajoittamaan ja sulkemaan vähintään sillan yksi kaista. Suunnitelmassa sovitaan pisimmästä sallitusta liikennekatkoajasta ja liikenteen ohjauksesta. Vilkasliikenteisillä silloilla tarvitaan usein liikenteenohjaajat tai liikennevalot. Liikenteen ohjausta tarvitaan myös koekuormitusten yhteydessä sekä myös mittaussysteemiä huollettaessa ja poistettaessa. Tieliikenteen järjestelyjen toteuttajan on aina laadittava kirjallinen liikenteenohjaussuunnitelma, ks. /5/, luku 6.2. Rautatiekohteissa on noudatettava Radanpidon turvallisuusohjeita (TURO) /19/.

Tiedotus (yhdessä tilaajan kanssa)

Monitorointilaitteiston asentamisesta ja koekuormitusten aiheuttamista liikennekatkoista tai rajoituksista sovitaan monitoroinnin tilaajan kanssa. Tiedottaminen tehdään annettujen ohjeiden mukaan. Merkittävistä liikennekatkoksista ja haitoista tiedotetaan tavallisesti paikallisradiossa ja paikallislehdissä. Yksittäinen liikennekatko, esim. koekuormituksen yhteydessä, ei saisi ylittää 15 min rajaa, ellei kiertotietä ole järjestetty liikenteelle työn ajaksi.

Testi- ja koekuormituksen toteutus

Monitoroinnin toteuttamiseen liittyy lähes aina koekuormitus, jolla testataan antureiden toimivuutta ja verrataan tuloksia analysointituloksiin. Ennen koekuormituksen suorittamista siitä laaditaan koekuormitussuunnitelma, jossa esitetään koekuormitusajoneuvot, niiden ajolinjat ja ajonopeudet. Ohjeet koekuormituksen suorittamisesta on annettu luvussa 9 ja *liitteessä 5*. Koekuormitus tehdään myös silloin, kun sillan kantavuus on heikentynyt tai sillan laskettua kantavuutta halutaan nostaa esim. muuttuneiden akselipainojen tai kokonaispainojen vuoksi. Koekuormituksessa käytettyjen ajoneuvojen kokonais- ja akselipainot punnitaan tarkoitukseen soveltuvalla vaakakalustolla.

Asennuksen ja ylläpidon kuvaus

Antureiden ja mittalaitteiden asennus ja kiinnitys kuvataan yllä olevien ohjeiden mukaan. Monitoroinnin tilaajan kanssa sovitaan erikseen työmenetelmistä ja liikenteen rajoituksista, joita joudutaan tekemään antureita huollettaessa. Mikäli antureiden toimivuusaste on asetettu korkealle, voidaan niiden ylläpitotoimenpiteitä joutua tekemään usein, mikä voi ajoittain haitata liikennettä sillalla.

Tietojen tallennuksen ja käsittelyn kuvaus

Monitoroinnissa on tärkeää, että kaikki tieto tallennetaan systemaattisesti ja sovitulla tavalla tietokantaan, jotta sitä voidaan myöhemmin helposti hyödyntää. Mittaus-tuloksia voidaan tarvita jopa vuosikymmenienkin päästä, jolloin on myös tärkeää, että kerätyn mittaustiedon tallennusformaatti on sellainen, jota on mahdollista lukea myös tulevaisuudessa. Tiedon systemaattisesta tallentamisesta on annettu ohjeet luvussa 7 ja liitteessä 4. Jos monitoroinnin tuloksista halutaan saada nopeita hälytyksiä, ne lähetetään suoraan mittauskoneelta sillan omistajan valvontakoneelle. Hälytysten formaatista sovitaan erikseen tilaajan kanssa.

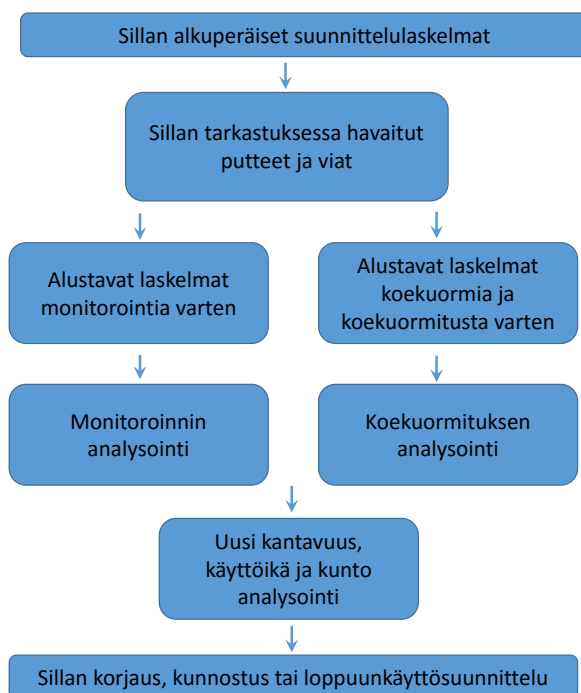
Tulosten ja raportoinnin kuvaus

Useimmiten monitorointi on kestoaltaan suhteellisen pitkä, mistä johtuen tulosten analysointia ja raportointia joudutaan tekemään useassa vaiheessa. Lähtökohtana monitoroinnille on sillan suunnittelu- ja kantavuuslaskelmat sekä tarkastuksessa havaitut puutteet ja viat. Näiden perusteella laaditaan alustavat suunnitelmat antureista ja niiden paikoista sekä mahdollisen koekuormituksen suunnittelu-laskelmat.

Kertamonitoroinnissa ja jaksottaisissa monitoroinneissa, mukaan lukien koekuormitukset, silta analysoidaan monitoroinnin jälkeen monitorointitulosten perusteella ja saadaan tarkempi arvio sillan kantavuudesta ja kunnosta, ja päätetään mahdollisesta sillan korjaus- ja kunnostussuunnittelusta tai muista jatkotoimenpiteistä.

Jatkuvassa monitoroinnissa, esim. sillan loppuun käyttämisen aikana, mittaustulosten ja niiden analysoinnin perusteella seurataan sillan toimintaa ja kunnan kehittymistä koko monitoroinnin ajan sovitulla tavalla. Analysointitulosten perusteella voidaan määrittää tarkemmin sillan jäljellä oleva käyttöikä sekä tarkentaa sillan korjaus- tai uusimistarvetta ja -ajankohtaa.

Analysoinnin vaiheita on esitetty kuvassa 33.



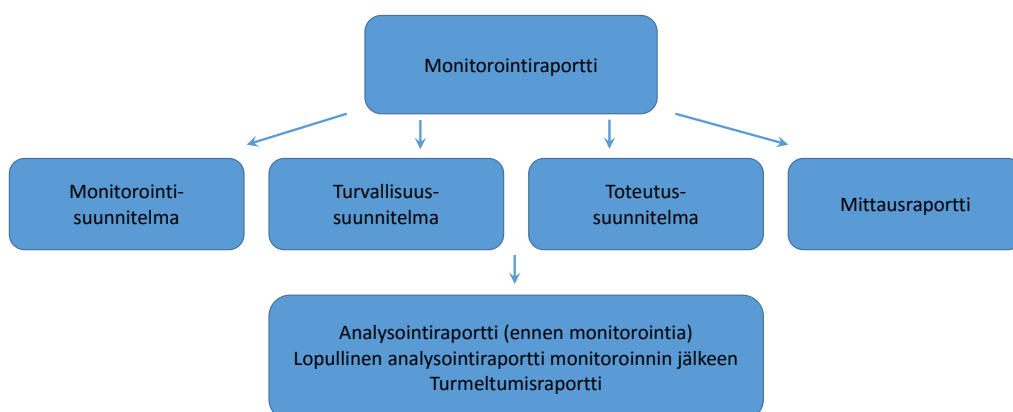
Kuva 33. Esimerkki sillan analysointivaiheista monitoroinnin yhteydessä.

Monitorointia dokumentoidaan ja raportoidaan useassa vaiheessa 'Siltöjen monitorointiohjeen' /5/ luvun 3 mukaan, jossa on mainittu seuraavat raportit

- Monitorointisuunnitelma
- Turvallisuussuunnitelma
- Toteutussuunnitelma
- Mittausraportti
- Monitorointiraportti

Lopullinen monitorointiraportti voi koostua siis kuvan 34 mukaista osaraportteista ja myös sillan analysointi ennen monitorointia ja sen jälkeen liitetään raporttikokonaisuuteen.

Lopullinen lujuustekninen analysointi ja monitoroinnin mittaustulokset esitetään Monitorointiraportissa. Keskeistä monitorointiraportissa on esittää johtopäätökset sillan kantavuudesta ja käyttöiästä sekä ehdotukset jatkotoimenpiteiksi mm. mahdollisesta korjaus- ja uusimistarpeesta sekä korjauksen tai uusimisen suositelluista ajankohdista.



Kuva 34. Lopullisen monitorointiraportin osaraportteja.

Monitorointisuunnitelman ja toteutussuunnitelman raportit sisältävät edellä kohdissa 10.1 ja 10.2 esitetyt tiedot.

Turvallisuussuunnitelma on monitoroinnin päätoteuttajan laatima asiakirja, joka tehdään tilaajan laatiman turvallisuusasiakirjan pohjalta. Monitoroinnin ja koekuormituksen työturvallisuuteen liittyvät vaatimukset on esitetty Siltojen monitorointiohjeessa /5/. Turvallisuuden takaamiseksi tarvittavia suunnitelmia on tehtävä mm.:

- työ- ja tukitelineistä
- putoamisvaarallisista töistä
- hukkumisvaaran sisältävistä töistä
- sähkötapaturmavaarallisista töistä
- sukellustöistä.
- nostotöistä
- liikennejärjestelyistä
- tie- ja katualueella sekä rautateillä tehtävistä töistä

Antureita, mittalaitteita ja johtoja asennettaessa on käytettävä tarkoitukseen sopivia ja hyväksytyjä työ- ja tukitelineitä. Telineissä on oltava ohjeiden määräämät kaiteet ja portaot niin, että työskentely on turvallista. Pimeällä työskenneltäessä on käytettävä riittävää kohde- ja yleisvalaistusta. Työskenneltäessä on huolehdittava, että käytetyt sähkökaapelit, sähkötyökalut ja mittalaitteet ovat turvallisia ja niitä voidaan käyttää ulkona märissä olosuhteissa. Telineet on asennettava ohjeiden mukaisesti tukevalle alustalle siten, että ne pysyvät pystyssä asennusolosuhteissa. Telineiden asennuspaikkaa valittaessa on otettava huomioon sillalla ja sillan alla kulkeva liikenne niin, ettei synny törmäysvaaraa.

Vesistöisilloilla joudutaan usein käyttämään asennuksessa lauttaa, jonka on oltava työskentelyyn hyväksytty ja myös mahdolliset telineet lautalla ovat turvallisia ja soveltuvat tuuli- ja aalto-olosuhteisiin asennuspaikalla. Asennettaessa on käytettävä ohjeiden mukaisia turvavälineitä esim. turvaliivejä, pelastusliivejä ja huomioliivejä.

Antureita ja niiden johtoja asennettaessa käytetään usein myös siltanostinta, jonka nostokorista käsin asennustyö voidaan tehdä sillan kannen alla. Nostimen on oltava hyväksytty ko. tarkoitukseen ja sitä on käytettävä ohjeiden mukaan niin, että ei synny vaaratilanteita. Antureiden, niiden kaapeleiden ja mittalaitteiden kiinnittämisestä laaditaan suunnitelma ja työohje, jossa selostetaan kiinnitystyössä tarvittavat nostimet, telineet ja muut asennustyökoneet. Usein nostin joudutaan sijoittamaan sillan kannelle ja kaventamaan ajorataa. Tällöin on muuta liikennettä varoitettava ja mahdollisilta törmäyksiltä on suojauduttava ohjeiden mukaan. Siltanostimen pyörät tai tukitassut voivat olla merkittävä pistemäinen kuormitus sillan kannella, esim. puusilloilla, joka pitää tarkastaa siltasuunnitelmista yhdessä siltasuunnittelijan kanssa. Sillan alla työskenneltäessä on otettava huomioon mahdolliset laitehäiriöt, jolloin niistä on pystyttävä ilmoittamaan sillan alta nostotöiden ohjaajalle. Sillan alla nostokorissa työskenneltäessä on käytettävä turvalaitteita ohjeiden mukaan.

Monitorointia, erityisesti laiteasennuksia ja koekuormitusta suoritettaessa on huolehdittava riittävästä liikenteenohjauksesta niin, että työ voidaan tehdä turvallisesti. Liikenteen ohjaus tehdään Liikenneviraston ohjeiden mukaan ja tavallisesti sitä hoitavat liikenteenohjaajat ja heidän esimiehensä. Mikäli koekuormitus tehdään pimeällä, on huolehdittava riittävästä valaistuksesta ja ajoneuvojen

vaatimista pysäytysmatkoista. Koekuormitusajoneuvojen turvalliset kääntymispaikat ja odotuspaikat on selvitettävä etukäteen, etteivät ne aiheuta vaaraa liikenteelle. Koekuormitusajoneuvot voivat olla hyvin painavia, joten niiden ajoreitit ja mahdolliset kuormaamiset on tutkittava etukäteen ennen koekuormituksen alkamista.

Sillan kannella on usein valaistusta, sillan alla voi kulkea sähkökaapeleita, jotka on otettava huomioon työskentelyssä. Sähköradalla ajolangoissa kulkee suurjännite ja turvaetäisyyttä ei saa alittaa työskentelyssä ja ei myöskään mittalaitteiden ja niiden kaapeleiden asennuksessa.

Monitorointilaitteita asentavien ja koekuormitusta suorittavien henkilöiden, jotka liikkuvat sillalla, radalla ja ajotiellä, on oltava koulutettuja ja riittävästi perehdytettyjä suorittamaan työtä siltapaikalla. Työhön ja työn johtamiseen osallistuvien henkilöiden turvallisuuteen liittyvät pätevyysvaatimukset on esitetty 'Siltojen monitorointiohjeen' /5/ luvussa 6.

Laatutason osoittaminen ja laadunvarmistuksen kuvaus

Tilaaaja edellyttää monitoroinnin toteuttajalta dokumentoitua laadunvarmistusmenettelyä, jonka pääperiaatteet on annettu 'Siltojen monitorointiohjeen' /5/ luvussa 5. Laadunvarmistus edellyttää, että anturit ja mittalaitteet, niiden tyypit ja ominaisuudet on tarkasti dokumentoitu siten, että mittaukset voidaan tarvittaessa jäljittää ja toistaa. Monitoroinnissa käytetyt anturit ovat kalibroituja valmistajan ohjeiden mukaan ja niiden kalibroinnista monitoroinnin aikana on sovittu erikseen. Antureiden ja niiden mittaamisessa käytettyjen mittalaitteiden ja ohjelmistojen pitää olla yhteensopivia ja niiden toiminta on testattu ja myös dokumentoitu ennen monitorointiprojektin aloittamista. Monitoroinnin teknisissä osioissa noudatetaan tämän dokumentin ohjeita. Lisäksi monitoroinnin suorittajan on osoitettava, että henkilöstö on riittävästi koulutettu ja kykenevä suorittamaan monitorointia sillalla.

Viitteet

- /1/ /Siltojen kantavuuden laskentaohje, Tiehallinto, Helsinki 1992, 2000.
- /2/ Eurokoodin soveltamisohje, Siltojen kuormat ja suunnitteluperusteet – NCC1. Liikenneviraston ohjeita 24/2014
- /3/ Siltojen tietomalliohje, Liikenneviraston ohjeita 6/2014.
- /4/ Sillantarkastuskäsikirja, Suunnittelu- ja toteuttamisvaiheen ohjaus. Liikenneviraston ohjeita, 26/2013.
- /5/ Siltojen monitorointiohje, Liikenneviraston ohjeita 18/2016
- /6/ Veijo Lyöri, Structural monitoring with fibre-optic sensors using the pulsed time-of-flight method and other measurement techniques (<http://jultika.oulu.fi/Record/isbn978-951-42-8702-2>).
- /7/ Development of a Model Health Monitoring Guide for Major Bridges, Federal High Administration Research and Development, July 2003.
- /8/ Indian River Inlet Bridge Monitoring Manual, Daniel F. Weston, May 2006.
- /9/ Bridge Health Monitoring and Inspection a Survey of Methods, Andrew Gastineau, 2009.
- /10/ IABMAS 2012, 6th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, Proceedings, Presentations, July, 2012.
- /11/ Jacob Egede Anderson, Mario Fustinoni, Structural Health Monitoring Systems, Futurtec 2006.
- /12/ Taitorakenteiden suunnittelun lähtötieto-ohje. Liikenneviraston ohjeita 21/2014
- /13/ Siltojen rakennelaskelmat. Liikenneviraston ohjeita 12/2012
- /14/ Ratatekniset ohjeet (RATO) osa 8, Rautatiesillat. Liikenneviraston ohjeita 43/2013
- /15/ Siltojen kantavuuslaskentaohje, Liikenneviraston ohjeita 36/2015
- /16/ Tieliikenteen melu, Perustietoa tieliikenteen melusta ja sen torjunnasta. Tiehallinto
- /17/ ASTM C876-09 Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete
- /18/ Asko Talja, Ari Saarinen. Maaliikenteen aiheuttaman runkomelun arviointi, esiselvitys. VTT:n tiedotteita 2468.
- /19/ Radanpidon turvallisuusohjeet (TURO). Liikenneviraston ohjeita, 6/2015.
- /20/ Akselimassatutkimus 1998–1999, Tielaitoksen selvityksiä 6/2000.
- /21/ Akselimassatutkimus 2013–2014, projektin loppuraportti. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 67/2015.

Monitoroinnin käsitteet

Monitorointi Sillan (tai taitorakenteen) jatkuvaa tai jaksottaista mittaamista käyttäen erityyppisiä antureita ja mittalaitteita. Monitorointiin kuuluu myös mittaustulosten jatkuva, välitön, systemaattinen analysointi, tallentaminen ja raportointi.

Tietomalli Yleisnimitys sillanrakentamisessa käytettäville digitaalisille, tietoa sisältäville malleille. Yleisin käytössä oleva malli on BIM (**B**uilding **I**nformation **M**odel). Infrarakentamiseen liittyvästä tietomallista käytetään myös nimitystä inframalli.

Lujuusmalli (Analysointimalli) Sillasta laadittu tavallisesti yksinkertaistettu geometrinen malli, jolla sillan lujuus ja rasitukset eri kuormille voidaan laskea. Tavallisin malli on FE- (Finite Element) malli. Kaupallisilla FE-ohjelmilla on omia toisistaan poikkeavia formaatteja mallin tallentamiseksi.

Vaurioitumismalli Lujuusteknisessä laskennassa siltaan tehty oletettu vaurio, jolla tutkitaan vaurion vaikutusta sillan toimintaan anturien paikan valitsemiseksi monitorointia varten.

Turmeltumismalli Sillasta laadittu malli, joka kuvaa sillan osien turmeltumista erilaisista rasituksista kuten ympäristöstä tulevista rasituksista aiheutuen. Betonisilloilla tavallisimpia turmeltumismuotoja ovat betonin turmeltuminen ja betoniterästen korroosio.

Monitorointisuunnitelma Monitoroinnin tavoitteet, suunnitellun toteutustavan ja laajuuden sekä laatuvaatimukset määrittävä, monitoroinnin pääsuunnittelijan laatima asiakirja.

Analysointi ja raportointi Mittaustulosten jälkikäsitteily ja analysointi päätöksentekoa tai toimenpiteitä varten. Tavallisin raportointitapa on päivä-, kuukausi- ja vuosi-raportointi.

Koekuormitus Sillan kuormittaminen testikuormalla, tavallisesti raskailla koekuormitusajoneuvoilla, joiden kuormitustiedot, kuten akselipainot, akselivälit ja raideleveydet tunnetaan.

Anturi (Sensori) Sillan rakenteeseen kiinnitetty laite, joka mittaa jotain siltaan kohdistuvaa mekaanista tai ympäristön aiheuttamaa rasitusta.

Mittalaite. Anturiin kytketty laite, joka mittaa anturin avulla halutun mekaanisen suureen. Tavallisimpia mittalaitteita ovat vahvistimet, virransyöttölaitteet ja mitauskortit.

Tiedonkeruulaite Laite, johon mitattu tieto tallennetaan. Tavallisimpia tiedonkeruulaitteita ovat PC, mittalaite tai loggeri.

Mittaus-PC, Tietokone, johon on yhdistetty mittauskortti ja jolla voidaan myös analysoida mitattua tietoa.

Serveri Tiedontallennus-PC, jolle kaikilta mittaustietokoneilta tuleva tieto tallentuu sovitussa muodossa ja jota voidaan käyttää myös tiedon jakamiseen.

Mittaustaajuus, näytteenottotaajuus Yksittäisten mittausten lukumäärä aikayksikössä.

Resoluutio Mittaussysteemin tai anturin erottelukyky.

Kalibrointi Mitatun suureen luotettavuuden toteaminen. Kalibrointi tehdään tavallisesti anturille ja mittalaitteelle vertaamalla arvoa kalibroidun anturin näyttämään.

Triggaus Mittauksen käynnistämiseksi asetettu kynnysarvo, jonka ylitys aiheuttaa monitoroinnin aloituksen ja mittaustiedon tallennuksen.

Rajapinta (*Application programming interface, API*) on määritelmä, jolla eri ohjelmat voivat vaihtaa tietoja eli keskustella keskenään.

Esisuodatus Ennen analogisen tiedon muuntamista digitaaliseksi tehtävä analoginen suodatus, jolla määrätään yleensä suurin (korkein) mitatun signaalin taajuus. Esisuodatuksen jälkeen suodatettu signaali luetaan yleensä 5–10-kertaisella taajuudella, jotta korkeimpaan taajuuteenkin saadaan riittävästi mittapisteitä.

Laskostuminen Ei-todellinen taajuus, joka voi muodostua mittaussignaalista, mikäli esisuodatusta ei käytetä.

ASCII muoto Tiedoston tallennusmuoto tekstimuodossa standardin **American Standard Code for Information Interchange** mukaan. Luvut ovat luettavissa lähes kaikilla tekstinkäsittely-, taulukkolaskenta- ja analysointiohjelmilla.

GSM (**G**lobal **S**ystem for **M**obile Communications, alun perin **G**roupe **S**pécial **M**obile) Langattomassa puhelinliikenteessä käytetty tiedon siirtotekniikka.

AA Ajoneuvoasetuksen mukainen kuormakaavio /1/

EK Erikoiskuljetuskaavio /1/

RFID (**R**adio **F**requency **I**dentification) Langattomien anturien tiedonsiirtotekniikka.

Anturin paikan määrittäminen

1 Antureiden ja niiden paikan valinta

Useimmiten monitoroinnilla seurataan koko sillan peruskäyttäytymistä, kuten taipumia, rasituksia (venymiä) ja värähtelyä. Koska mittauksilla halutaan tällöin saada selville koko sillan ja sen yksittäisten rakenneosien suurimpia muodonmuutoksia ja rasituksia, on anturit sijoitettava niiden kannalta edustaviin pisteisiin. Nämä voidaan määrittää etukäteen tehtävän alustavan lujuusanalyysin perusteella.

Yleisesti antureiden tyyppin, määrän ja paikan valinnassa tulee ottaa huomioon mm. seuraavia asioita:

- siltatyyppi ja rakennusmateriaalit
- sillan aukkojen määrä ja kannen poikkileikkaus
- kantavuuden kannalta kriittiset rakenteet
- sillan vauriot, niiden laajuus sekä turmeltumismalli
- selvitettävä toiminta: esim. poikkileikkauksen toiminta, kuormien jakaantuminen rakenteessa ja yksittäisten rakenneosien maksimirasitukset

Kun monitoroinnilla tutkitaan sillan vaurioita ja niiden vaikutuksia sillan toimintaan, mitattavien kohteiden valinta sillassa riippuu myös tutkittavan vaurion laajuudesta. Yksinkertaisimmassa tapauksessa monitoroitava kohde on vain yksi vaurio kohta sillassa, mutta pelkkä sen seuraaminen ei yleensä anna riittävästi tietoa vaurion synnystä ja syistä. Suositeltavampaa on liittää seurantaan muitakin antureita, joilla sillan rasituksia seurataan vaurion läheisyydessä.

Mittaustekniikka luo edellytykset usean suureen laajemmalle seurannalle, sillä tyypillisesti mittalaitteeseen tai mittakorttiin voidaan liittää antureita 8 kpl:n ryhmissä ja näin useamman anturin asentaminen ja mittaaminen lisäävät vain vähän mittaus- ja asennuskustannuksia.

Paikallisia jännityksiä hitsisauman läheisyydestä mitataan esim. sarjaliuskoilla, jolloin voidaan arvioida jännityshuippu ja liitoksen väsymiskestävyys. Betonisilloilla anturit kiinnitetään joko betonin pintaan (betonin keskimääräiset muodonmuutokset pidemmällä matkalla) tai raudoitetankoihin betonirakenteen sisällä sillan aukkoihin. Betonisilloilla tuen läheisyydessä on suhteellisen laajalla alueella hakaraudoitteita, mistä johtuen leikkausrasitusten mittaus voi olla epätarkkaa.

2 Anturin paikan systemaattinen määrittäminen

Tässä ohjeessa anturin paikka sillassa määritellään systemaattisesti jakamalla silta ensin *perusosiin*, jotka muodostuvat jänneväleistä tai lohkoista, joita tuet rajoittavat. Jaottelussa mikään sillan osa ei jatku viereiseen perusosaan (lohkoon), tarvittaessa se määritellään uudelleen kuten esim. pääpalkki tai kansi, jotka usein ovat fyysisesti jatkuvia tuen yli.

Jännevälien mukaiset perusosat jaetaan edelleen *rakenneosiin* (kuva 2), joita ovat sillan palkit kuten pääpalkit, poikkipalkit ja sillan kansi. Mikäli perusosassa on useampia rakenneosia, ne numeroidaan alkupään mukaan siten, että ensimmäinen osa on se, jolla on pienin x-koordinaatti tai jos se on sama (kuten pääpalkeilla) verrataan seuraavaksi y-koordinaattia jne. Käytännössä tämä johtuu siitä, että esim. pääpalkit numeroidaan vasemmalta oikealle sillan alkupäästä katsottuna ja poikkipalkit sillan alkupäästä loppupäähän. Ristikkorakenteilla palkin alkupää voi olla sama kahdella palkilla, jolloin verrataan seuraavaksi loppupään koordinaatteja numerointia tehtäessä.

Rakenneosat voidaan edelleen jakaa *aliosiin*, joita ovat esim. teräsilloilla I-palkit ja kotelopalkkien levymäiset osat (esim. uuma- ja laippalevyt). Sillan kansi on laaja kokonaisuus, joka voidaan jakaa tarkemmin kussakin perusosassa (lohkossa) taulukkomaisesti osiin, joita rajoittavat sillan pääpalkit ja poikkipalkit. Tässäkin tapauksessa jaottelu aloitetaan myös vasemmasta reunasta, ks. kuva 1. Vastaavalla tavalla voidaan myös sillan muut palkit jakaa pienempiin osiin, ks. kuva 3.

Osien perusjaottelu on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Sillan perusosien ja aliosien rakenne anturien paikan määrittämiseksi.

Sillan nimi ja numero	Tarkasteltava jänneväli (lohko) = perusosa	Jännevälillä oleva rakenne-osa esim. palkki tai kannen osa	Rakenneosan aliosa, esim. levy tai betoniterästanko	Anturin paikka rakenneosassa koordinaatisto ja kiinnityspinnan määrittely

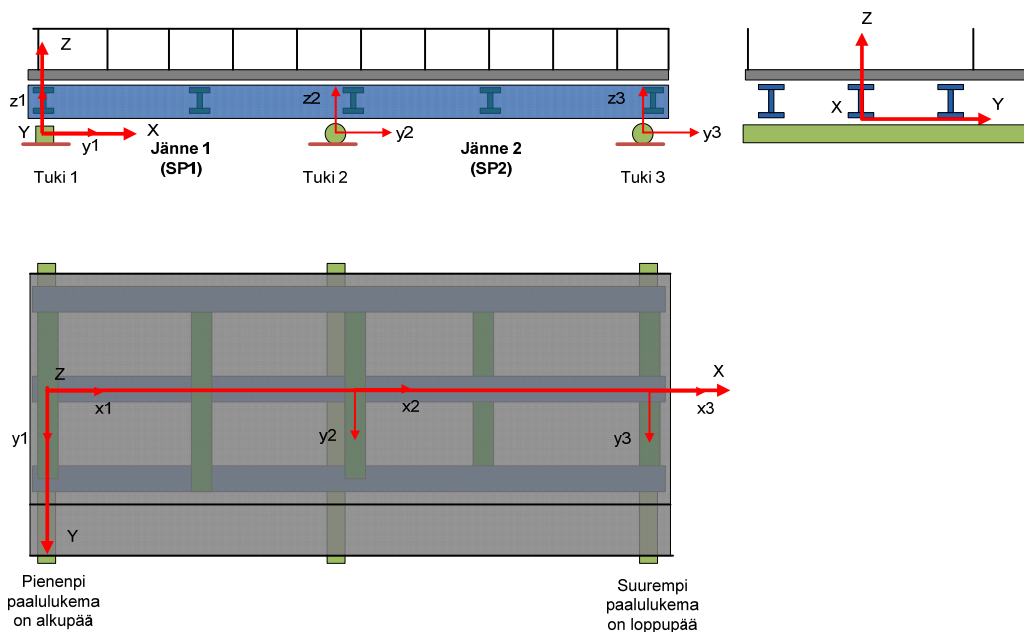
2.1 Koordinaatistot anturin paikan määrittämisessä

Siltojen mallille ei ole Suomessa sovittu yhtenäistä koordinaatistoa, joten tässä ohjeessa lähestymistapa on valittu yksinkertaiseksi anturien asennuksen kannalta. Silta tunnistetaan *sillan numeron* mukaan ja sillan alkupää valitaan *pienemmän paalulukeman* mukaan. Useimmat anturit asennetaan sillan alle, joten monitorointikoordinaatisto valitaan lähtemään sillan maatumen laakerin keskilinjalta tai välituen keskilinjalta. Koska sillan kokonaispituus ja jännevälit ovat tunnettuja, voidaan anturin sijainti ilmoittaa kustakin rakenneosasta lähtien koordinaatin avulla. Tätä varten jokaisen rakenneosan alkupään koordinaatit kussakin perusosassa (jänne tai lohko) on tunnettava. Edelleen myös loppupää on tunnettava, jos palkki ei ole minkään pääkoordinaattiakselin suuntainen (kuten esim. tuulisiteet). Sillan ns. monitorointikoordinaatistoksi on valittu sillan keskilinja (ajoväylän keskilinja pois lukien erillinen kevyen liikenteen kaista), sillä useimmat sillan pääpalkit sijaitsevat sivusuunnassa symmetrisesti sillan alla (ks. kuva 2 ja 3).

Silta jaetaan *perusosiin* jänteiden (tai lohkojen) mukaan ja jokainen jänne sisältää sillan perusosat kuten pääpalkit, poikkipalkit ja kannen. Osien nimitykset ja tunnistenumerot on otettu Liikenneviraston Sillantarkastuskäsikirjasta /4/. Jokainen osa numeroidaan koordinaatiston suunnan mukaisesti alkupäästä loppupäähän (x), vasemmalta oikealle (y) ja alhaalta ylös (z) (siltaa katsotaan siis alkupäästä käsin, ns. vasemman käden koordinaatisto). Jokaisella *rakenneosalla* (palkilla) ja *aliosalla* jänteen sisällä on paikallinen koordinaatisto, joka alkaa osan alkupäästä, mutta sijaitsee osan (palkin) *alapinnassa*, sillä erityisesti antureita asennettaessa paikka voidaan mitata helpoiten alapinnasta. Sillan kannen koordinaatisto kulkee joko ala- tai

yläpinnassa riippuen siitä, mihin pintaan (mitä kautta) anturit on asennettu. Edellä esitetyllä tavalla voidaan ilmoittaa myös anturin korkeus kaarevalle sillalle, jos tulkitaan pituuskoordinaatin olevan myös kaareva.

Monitorointikoordinaatiston periaatteet on esitetty *kuvassa 1*. Edellä kuvattua määrittelyä ei voida soveltaa kaikkiin siltoihin. Tarkoitus onkin, että määrittelyt kehittyvät monitoroinnin ja tietomallimäärittysten (BIM, **B**uilding **I**nformation **M**odel) mukana. Periaatteessa BIM-mallia kuvattaessa ei koordinaatistojen akselin suuntia tarvitsisi määritellä aina samalla tavalla, mutta siltarakenteissa tämä helpottaa oleellisesti oikean merkinnän antamista asennetulle anturille.



Kuva 1. Monitorointikoordinaatisto ja perusosien koordinaatistot jänneiden mukaan.

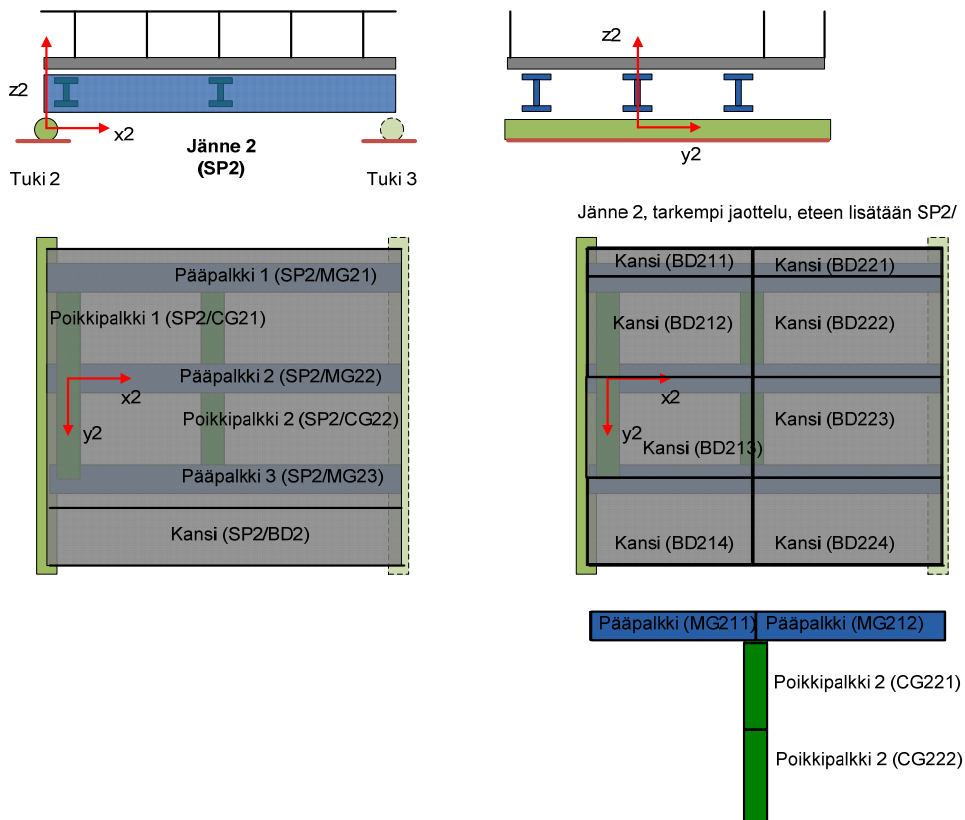
2.2 Sillan rakenneosat ja niiden aliosat

Taulukkoon 2 on koottu betonisillan sekä teräksisen palkkisillan ja ristikkosillan tärkeimmät osat ja niiden tunnuksat. Viimeisessä sarakkeessa on lisäksi annettu englanninkielinen lyhenne sillan perusosalle, jota voidaan käyttää sillan rakenteiden analysointiohjelmissä. Taulukko ei ole vielä täydellinen, mutta sitä on tarkoitus täydentää, kun erityyppisiä siltoja tulee monitoroitavaksi.

Taulukko 2. Sillan rakenneosien nimet ja lyhenteet.

Sillan osan nimi	Osan numerotunnus (Sillantarkastus käsikirja)	Nimitys englanniksi	Lyhenne englanniksi systemaattista käsittelyä varten
Pääpalkki	302	Main girder	MG
Sekundääripalkki	308	Secondary beam	SB
Poikkipalkki	309	Cross girder	CG
Tuuliside	311	Wind brace	WB
Yleispalkki ¹⁾		Common beam	CB
Kansilaatta	301	Bridge deck	BD
Pintarakenteet	500	Surface and pavement	SP
Reunapalkki	201	Edge beam	EB
Alapaarre	306	Bottom chord	BC
Yläpaarre	306	Top chord	TC
Diagonaali	301	Diagonal Internal bracing	DL
Vertikaali	306	Vertical chord	VC

1) Yleisnimitys palkille, joka ei kuulu taulukossa nimettyihin rakenneosiin.

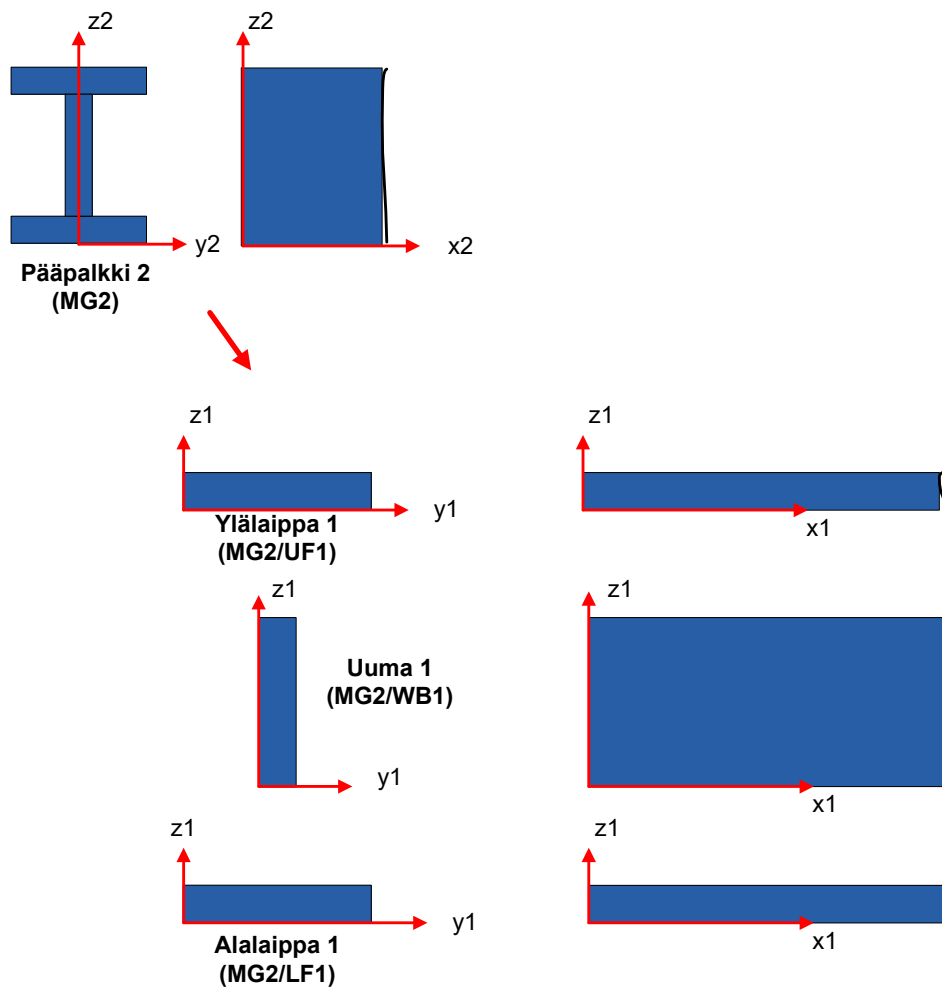


Kuva 2. Esimerkki sillan perusosasta Jänne 2', joka koostuu edelleen rakenneosista (palkeista) kuten pääpalkit ja poikkipalkit.

Edellisen lisäksi sillan jokainen rakenneosa voi koostua aliosista kuten teräslevyistä, jäykisteistä ja betonipalkit betonirauδοitteista. Edellä esitetyn mukaan myös osat voidaan systemaattisesti koodata. Esimerkkinä taulukkoon 3 on koottu nimitykset teräsprofiileille I ja kotelorakenne. Kuvassa 3 on esitetty sillan pääpalkin (I-palkki) jakaantuminen aliosiin laippoihin ja uumaan.

Taulukko 3. Teräsprofiilien aliosien nimitykset ja lyhenteet.

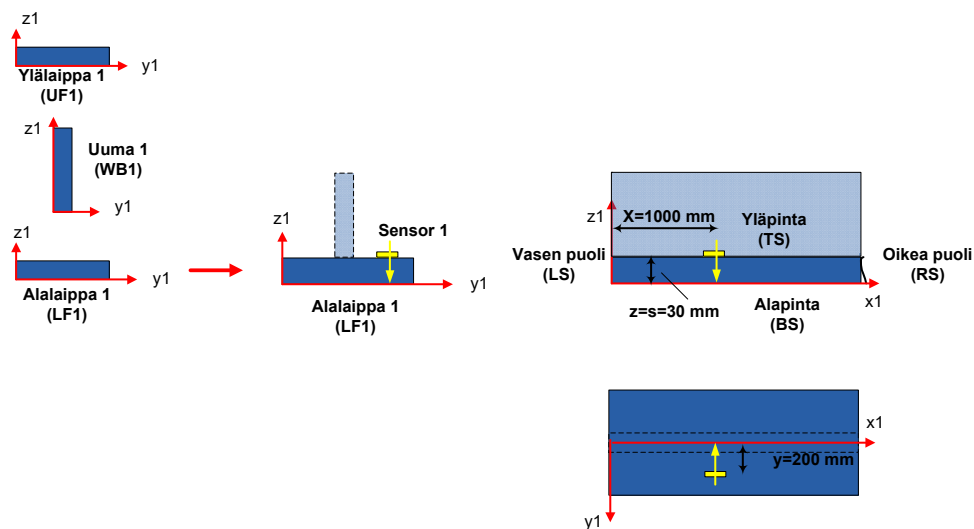
Profiilin nimi	Osan numero-tunnus (Sillan-tarkastus käsikirja)	Nimitys englanniksi	Lyhenne englanniksi systemaattista käsittelyä varten
Uuma	302	Web	WB
Ylälaippa	302	Upper flange	UF
Alalaippa	302	Lower flange	LF
Vasen uuma	302	Left web	LW
Oikea uuma	302	Right web	RW
Pääraudoitus/raudoitetanko		Rebar	RB
Yläpinnan pääteräkset		Upper rebars	UR
Alapinnan pääteräkset		Lower rebars	LR
Leikkausraudoitus/leikkaushaka		Stirrup	SU



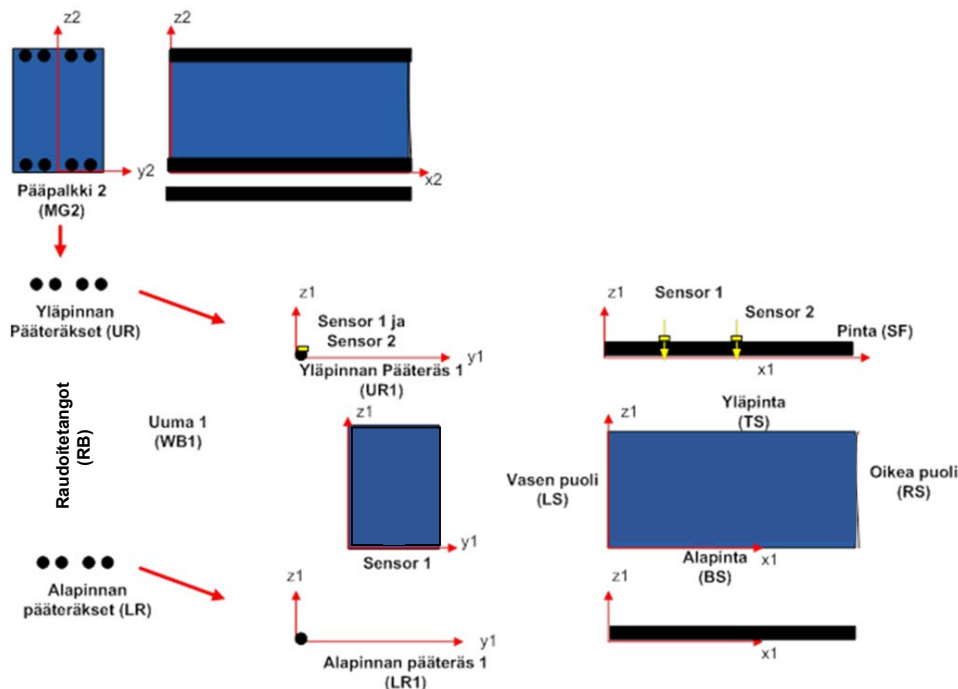
Kuva 3. Esimerkki sillan rakenneosasta 'Pääpalkki 2', joka koostuu edelleen aliosiin (levyistä) kuten alalaippa, ylälaippa ja uumat.

2.3 Anturin paikka rakenneosassa, perusosassa ja aliosassa

Anturin paikan määrittämiseksi on siis tärkein määriteltävä asia rakenneosa, jossa anturi sijaitsee. Tarkka paikka rakenneosassa saadaan määrittelemällä sijainti perusosassa ja aliosassa kuvien 4 ja 5 sekä taulukon 4 mukaan. Jossain tapauksessa anturi voi sijaita aliosan sisällä (esim. betonipalkissa), jolloin ilmoitetaan lisäksi syvyys määrittelystä ulkopinnasta käyttäen lyhennettä dp (depth). Edelleen jotkut anturit ovat suhteellisen pitkiä (esim. valokuituanturit), tällöin voidaan ilmoittaa anturin alkupään sijainti ja anturin pituus tunnuksella LG (length) ja myös koordinaatiston suunta koordinaattitunnuksella X, Y, Z (taulukko 4). Anturin mittaussuunta ilmoitetaan vielä erikseen edellisen mukaisessa koordinaatistossa. Esim. X ilmoittaa, että anturi mittaa vain suunnassa X ja RX pyörimistä X akselin ympäri.



Kuva 4. Esimerkki anturin 'Sensor 1' määrittämisestä alalaipan 1 yläpinnassa ($x = 1000 \text{ mm}$, $y = 200 \text{ mm}$, $z = 30 \text{ mm}$)



Kuva 5. Esimerkki anturien 'Sensor 1 ja 2' määrittämisestä yläpinnan raudoitettangossa 1.

Taulukko 4. Esimerkki aliosan pintojen määrittelystä anturin paikkaa ilmoitettaessa.

Pinnan nimitys	Nimitys englanniksi	Lyhenne englanniksi systemaattista käsittelyä varten
Yläpinta	Top surface	TS
Alapinta	Bottom surface	BS
Vasen pinta	Left surface	LS
Oikea pinta	Right surface	RS
Pinta (pyöreä kpl)	Surface	SF
Etäisyys pinnasta (syvyys)	Depth	DP
Anturin pituus ja suunta	Length, x, y, x	LG, X, Y, Z

Yhteenvedona voidaan sanoa, että anturin paikka sillassa ilmoitetaan yo. selostetun siltakoordinaatiston ja annettujen ohjetaulukoiden mukaan seuraavasti:

1. Sillan tunnus on sillan virallinen *nimi ja numerotunnus*
2. Sillan alkupää on *pienemmän paalulukeman pää*
3. Sillan *pääkoordinaatisto* kulkee sillan ajoneuvoliikenteen alla olevien pääpalkkien keskiviivalla, x eteenpäin, y oikealle ja z ylöspäin
4. Silta jaetaan *perusosiin*, jotka muodostuvat jänneväleistä tai tarkemmassa jaottelussa myös muista lohkoista. Mikäli lohkojakoa käytetään, ei enää silmämääräisesti voida määrittää anturin paikkaa, koska numerointi riippuu lohkojaosta.
5. Kaikkien osien numerointi on alkupään mukaan sillan alkupäästä loppupäähän (x), vasemmalta oikealle (y) ja alhaalta ylös (z). Numerointi määräytyy pienimmän perusosan x koordinaatin mukaan, jonka jälkeen määräävä on y ja z sekä lopuksi loppupää.
6. Kukin perusosa (lohko) jaetaan *rakenneosiin*, joita ovat ko. perusosaan (lohkoon) kuuluvat palkit (palkkien osat, jos ne jatkuvat seuraavaan osaan). Tyypillisiä rakenneosia ovat pääpalkit, poikkipalkit, sekundäärit ja tuulisiteet sekä perusosaan kuuluva kansi.
7. Rakenneosat jaetaan *aliosiin*, joita ovat teräslevyt ja betoniraidoitteet.
8. Anturin paikka ilmoitetaan suhteessa aliosaan ilmoittamalla anturin alku (ja loppupään) koordinaatit ja aliosan pinnan tunnus sekä anturin syvyys *pinnasta*, mikäli anturi on asennettu aliosan sisään.
9. Osien *koordinaatisto on aina osan alkupäässä*, alapinnassa ja vasemmalla.
10. Anturin mittaussuunnat ilmoitetaan kohdan 8 mukaan ilmoittaen mittaussuunnat (X, Y Z) tai kiertymät (RX, RY, RZ).

Taulukossa 5 on annettu esimerkki kuvassa 4 annetun anturin paikan määrittämiseksi. Anturi kuuluu sillan perusosaan 2 (2. jänne), pääpalkkiin 2, joka on I-palkki. Anturi sijaitsee I-palkin alalaipan yläpinnassa ja kohdassa $x = 1000$ mm, $y = 200$ mm ja $z = 30$ mm. Anturi on pistemäinen ja sijaitsee siis osan pinnassa. Anturin paikka tulee tässä määrittelyksi ja lisäksi tiedetään sen rakenneosa ja myös aliosa, jossa anturi sijaitsee. Lisäksi tarvitaan kaikki yllä mainitut koordinaatistojen määrittelyt, jotta anturi pystyttäisiin sijoittamaan sillan lujuusmalliin tai tietomalliin (BIM).

Taulukko 5. Esimerkki kuvan 4 anturin paikan määrittämisestä (Sillan perusosa 2, Pääpalkki 2, alalaippa, yläpinta, koordinaatit $x = 1000$ mm, $y = 200$ mm ja $z = 30$ mm).

Sillan nimi	Sillan numero	Sillan perusosa (jänne, lohko)	Sillan rakenneosa (Taulukko 10)
Jokisilta	101	SP2	MG2
sillan aliosa (Taulukko 11)	Aliosan pinnan tunnus (Taulukko 12)	Anturin alkupään koordinaatit aliosassa	Lisäparametrit Anturin pituus Anturin syvyys Koordinaatit
LF1	TS $x = 1000$ mm $y = 200$ mm $z = 30$ mm	LG 0, 0, 0 mm ($x = y = z = 0$ mm)	DP = 0 mm (x, y ja z ei tarvita) X (mittaa x suunnassa)
Lyhennetty merkintä: BR101/SP2/MG2/LF1/TS1000,200,30/LG0,0,0/DP0,0,0,X (Bridge 101, Spacing 2, Main Girder 2, Lower flange 1, Top Surface $x = 1000$ mm, $y = 200$ mm, $z = 30$ mm, LG 0, 0, 0 mm, DP $x = 0$ mm, $y = 0$ mm, $z = 0$ mm), X (mittaus x suunnassa)			

Tulosten ja mittalaitteiden tarkkuus, luotettavuus ja kalibrointi

Mittaustulos on arvio mitattavasta arvosta ja siihen sisältyy aina virhettä. Mittaus-epävarmuus on arvio siitä, kuinka suuri mittausvirhe voi olla. Tarkkuusmittauksissa mittaustulokseen tulee aina liittää tieto mittauksen epävarmuudesta. Mittaus-epävarmuuden laskemisesta on useita standardeja ja suosituksia, joista yleisimmin hyväksytty on International Organization for Standardization (ISO): *Uncertainty of measurement — Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995)* (ISO/IEC GUIDE 98-3:2008).

Tyypillisiä mittaukseen liittyviä epävarmuuskomponentteja ovat seuraavat.

1. Mittalaitteesta aiheutuvat

- Kalibrointi
- Aika kalibroinnista
- Lineaarisuus
- Taajuusriippuvuus
- Resoluutio
- Mittalaitteen stabiilius

2. Käyttöedellytykset

- Lämpötila, kosteus, paine
- Sähköiset häiriöt
- Verkkojännite

Edellisten osalta erityisesti näiden vaihtelu mittauksen aikana.

3. Käyttäjistä johtuvat (lähinnä analogisissa mittalaitteissa)

- Mittarin asento
- Lukematarkkuus
- Alkuasetukset

4. Mittauskohteesta aiheutuvat

- Mittarin vaikutus mittauskohteeseen
- Kuormitus
- Maasilmukat, vuotovirrat, mittajohdot, epäsovitus
- Mitattavan ilmiön stabiilius

Mittausten luotettavuuteen liittyvää terminologiaa

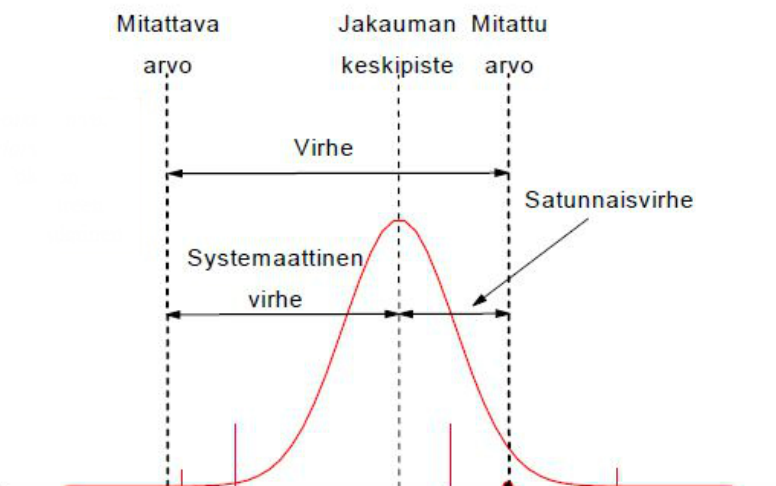
Mittaustulos

Mittaustulos on arvio mitattavan suuren arvosta. Ollakseen käyttökelpoinen mittaustuloksen tulee sisältää tieto mittausepävarmuudesta. Esimerkiksi, $\Delta\varepsilon = 20 \mu\text{m/m} \pm 3 \mu\text{m/m}$ (95 %), jossa vaihteluväli ($\pm 3 \mu\text{m/m}$) on yhdistetty standardiepävarmuus ja sulkeissa oleva prosenttiluku luottamusväli.

Yksinkertaisimmassa tapauksessa mittaustulos saadaan yhdestä mittauksesta. Usein lopullinen tulos on kuitenkin funktio monesta parametrasta, $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n)$, jossa parametrit X_n sisältävät kaikki tulokseen oleellisesti vaikuttavat tekijät, kuten mitatut arvot, korjaustermit, laitteiden ominaisuudet, näytteet, mittaajan, päivän ja laboratorion. Eli funktio voi siis kuvata koko mittausprosessia, eikä pelkkää fysikaalista ilmiötä.

Mittausvirhe

Mittaustuloksen ja mitattavan arvon välinen ero on mittausvirhe. Yksittäisen mittauksen mittausvirhe jakaantuu *systemaattiseen* ja *satunnaiseen* virheeseen. Systemaattinen virhe pysyy samana tai muuttuu säännönmukaisella tavalla. Osa systemaattisesta virheestä voi olla tunnettua. Satunnaisvirhe aiheutuu useista, usein riippumattomista, tekijöistä. Satunnaisvirhe on tyypillisesti normaalijakautunutta. (Kuva 1)



Kuva 1 Systemaattinen ja satunnainen virhe.

Mittausepävarmuus

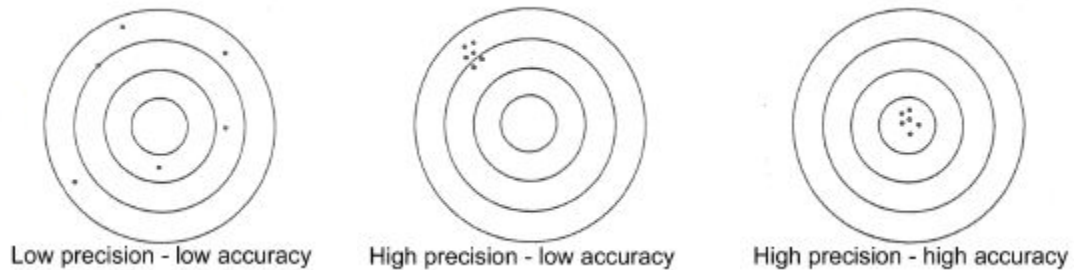
Mittausepävarmuus on mittaustulokseen liittyvä parametri, joka kuvaa mittaussuureen arvojen odotettua vaihtelua. Mittausepävarmuus sisältää systemaattiset ja satunnaiset virheet. Useimmat epävarmuuskomponentit noudattavat normaalijakaumaa tai tasa-jakaumaa.

Accuracy - tarkkuus (paikkansapitävyys)

Accuracy on kvalitatiivinen termi, joka ilmaisee, kuinka lähellä mittalaitteen vaste on lähellä tosiarvoa (kuva 2). Koska tarkatkin mittaukset ovat vain arvioita, accuracy kertoo toisaalta, kuinka epätarkka mittaus on johtuen erilaisista väistämättömistä tekijöistä kuten mittalaitteen epälineaarisuudesta ja hystereesiefektistä, ympäristöolosuhteista, tärinästä, ryöminästä ja monista muista tekijöistä.

Precision – toistuvuus (täsmällisyys)

Yleistermi joka kuvaa mittauksen riippumattomuutta satunnaisista vaihteluista (kuva 2). Toisin sanoen termi ilmaisee kuinka lähellä saman mittaussuureen peräkkäiset mittaustulokset ovat toisiaan joko samoissa olosuhteissa (repeatability) tai muuttuneissa olosuhteissa (reproducibility). Molemmissa tapauksissa precision voidaan ainoastaan ilmaista kvantitatiivisesti käyttämällä tilastomatematiikan termejä kuten keskijointa (σ) ja varianssi (σ^2).



Kuva 2 Havainnekuva accuracy- ja precision termien välisestä erosta.

Resolution - erottelukyky

Resoluutio on mittalaitteen kyky reagoida mittaussuureen pieniin muutoksiin.

Epävarmuuslaskelma

Epävarmuuslaskelmassa määritetään estimaatit mittauksen virhelähteille ja korjataan ne tuloksiin. Tämän jälkeen lasketaan korjausten epävarmuudet neliöllisesti yhteen. Epävarmuuslaskelma antaa luotettavuusvälin, jolla mitattava suure on tietyllä tilastollisella todennäköisyydellä (yleensä 95 %).

Virhearvio

Virhearviossa määritetään estimaatit mittauksen virhelähteille ja lasketaan ne yhteen. Virhearvio antaa ylärajan mittaustulokselle.

Stability - stabiilius

Mittalaitteen kyky säilyttää metrologiset ominaisuutensa muuttumattomina ajan kuluessa. Termejä epästabiilius ja stabiilius käytetään usein ristiin. Stabiilius riippuu käytetystä ajanjaksosta ja käyttöolosuhteista. Valmistajat ilmoittavat stabiiliuden eri tavoin, esimerkiksi 1V/vuosi.

Epälineaarisuus

Epälineaarisuus on mittalaitteen kalibrointikäyrän suurin poikkeama suorasta.

Hystereesi

Hystereesi on mittalaitteen näyttämien ero, kun mitataan suureen samaa arvoa muutossuunnan ollessa toisaalta suureneva ja toisaalta pienenevä.

Traceability – jäljitettävyys

Mittaustuloksen tai mittanormaanin yhteys ilmoitettuihin referensseihin, yleensä kansallisiin tai kansainvälisiin mittanormaaleihin, sellaisen aukottoman vertailuketjun välityksellä, jossa kaikille vertailuille on ilmoitettu epävarmuudet.

Reproducibility - uusittavuus

Samana mittausuureen tulosten yhtäpitävyys, kun mittaukset suoritetaan muuttuneissa olosuhteissa.

Repeatability - toistettavuus

Samana mittausuureen peräkkäistenmittaustulosten yhtäpitävyys, kun mittaukset suoritetaan samoissa olosuhteissa.

Dynamic range - dynaaminen alue

Dynaaminen alue on mittausalueen alarajan ja ylärajan välinen suhde. Mittausalueen alaraja on pienin mitattavissa oleva mittausuureen arvo ja se määräytyy järjestelmän häiriötasosta, esimerkiksi kohinasta. Mittausalueen yläraja on suurin mitattavissa oleva mittausuureen arvo ja se määräytyy järjestelmän sietokyvystä.

Sensitivity - herkkyys

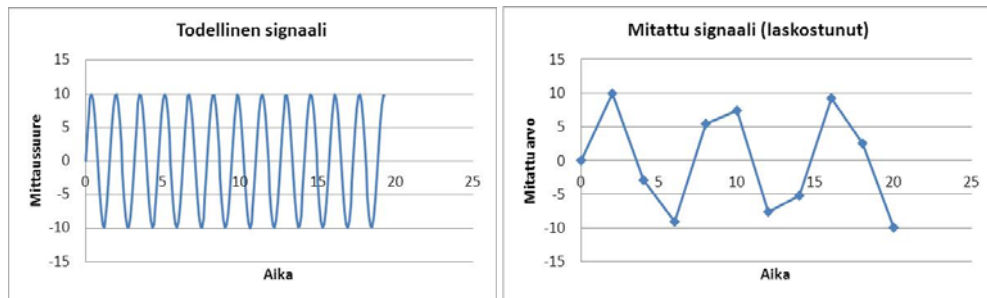
Herkkyys on näyttämän muutoksen suhde mittausuureen muutokseen, esim. lämpötila-anturille $2 \Omega/^\circ\text{C}$.

Adjustment - viritys

Viritys on toimenpide, jonka avulla mittalaitteen suorituskyky saadaan käyttöön sopivaksi.

Laskostuminen

Signaalista tulee ottaa näytteitä taajuudella, joka on suurempi kuin kaksinkertainen alkuperäisessä signaalissa esiintyvään suurimpaan taajuuteen nähden, jotta näiden näytteiden perusteella voidaan rakentaa alkuperäistä vastaava signaali (ns. ruotsalaisen Harry Nyquistin esittämä teoreema). Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että mitattu signaali on ennen mittausta suodatettava laskostumisen esto-suodatuksella ja tämän jälkeen suoritetaan mittaus suuremmalla taajuudella, kuin saatu suodatettu mittaus. *Kuvassa 3* on esitetty esimerkki laskostumisesta mittauksen yhteydessä. Oikealla oleva näyte on tallennettu liian harvalla näytteenottotaajuudella ja siksi siihen on syntynyt ns. 'haamutaajuus' jota ei ole alkuperäisessä signaalissa.



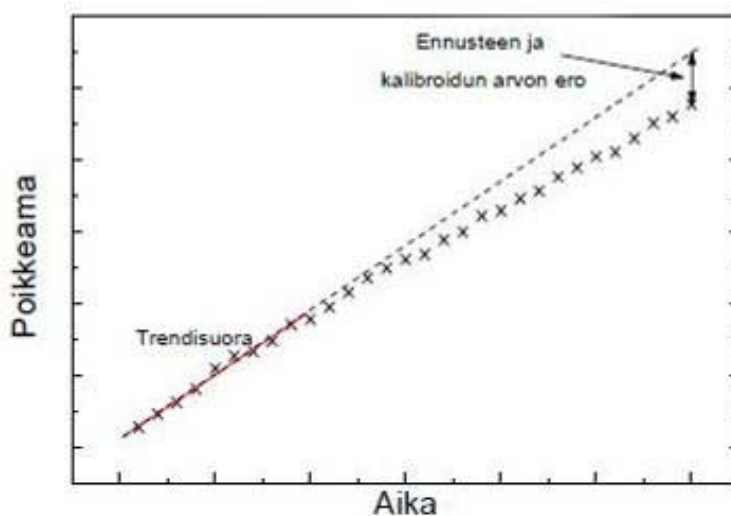
Kuva 3. Esimerkki laskostumisesta, vasemmalla todellinen signaali ja oikealla liian harvalla taajuudella mitattu laskostunut signaali.

Kalibrointi

Kalibroinnissa verrataan mittalaitteen näyttämää tai kiintomitan arvoa mittanormaaliin. Mittalaitteelle vertailu tehdään useassa pisteessä määrätyn mittausalueen sisällä. Kalibroinnin jälkeen mittalaitteen näyttämän (tai kiintomitan arvon) yhteys suureen tosiarvoon tunnetaan annetulla epävarmuudella.

Ajan kuluessa mittalaitteen epävarmuus kasvaa, mikä johtuu ympäristöolosuhteiden aiheuttamasta rasituksesta (lika, pöly, höyryt, kemikaalit), mekaanisesta kulumisesta sekä ikäänymisestä. Laittevalmistajat antavat yleensä epävarmuuden, jonka saavuttamiseksi laite on kalibroitava määrätyn väliajoin. Tavallisilla elektronisilla mittalaitteilla valmistajan suositus on tyypillisesti 12 kk. Kalibrointipalvelua tarjoavat akkreditoituneet kalibrointilaboratoriot.

Piirrettäessä kalibrointien tulokset ajan funktiona saadaan mittalaitteen epävarmuus selville mahdollisimman hyvin. Joissain tapauksissa voidaan ennustaa mittalaitteen trendisuora (kuva 4). Jos käytettävissä on useita samanlaisia laitteita, voidaan vanhenemista seurata laitteita vertaamalla. Tarkkuuden seuranta paljastaa myös mittalaitteiden pieniä vikoja, jotka näkyvät suorituskyvyn muutoksina.



Kuva 4. Mittalaitteen näyttämän poikkeama mittanormaaliasta ajan funktiona.

Mittaustulosten käsittely

Mittauksista saadaan tuloksina joukko estimaatteja, joista etsitään mittausten käsittelyllä mahdollisimman todennäköinen arvo mitattavalle suurelle. Käsittelyn tarkoituksena on laskea mittauksista yksikäsitteinen tulos ja selvittää mittausepävarmuus. Yleisimpiä menetelmiä mittaustulosten käsittelyssä ovat suodatus ja keskiarvoistus.

Alipäästösuodatus on eräs käytetyimmistä signaalinkäsittelymenetelmistä rakennemittauksissa. Suodatuksen tarkoituksena on poistaa mittaustuloksista korkea taajuusinformaatio, jotta tutkittava hitaampi ilmiö tulisi selvemmin esille. Suodattimen kaistanleveys tulee olla signaalin kaistanleveyttä suurempi, jotta hyötyinformaatiota ei menetetä. Muita suodatintyyppejä ovat ylipäästö- ja kaistanpäästösuodattimet sekä kaistanestosuodatin. Kaikki suodatintyypit voidaan toteuttaa aktiivisilla tai passiivisilla piirielementeillä. Suodatus voidaan tehdä myös jälkepäin käyttäen sopivaa signaalinkäsittelyohjelmaa kuten MATLAB®.

Suodatuksen ohella rakennemittauksissa käytetään myös keskiarvoistusta mittaus-tarkkuuden parantamiseen. Keskiarvoistuksessa signaali-kohinasuhde paranee suhteessa mittaustulosten N lukumäärän neliöjuureen (\sqrt{N}).

Käytettäessä keskiarvoistusta on huomioitava, että se pätee vain normaalijakautuneeseen mittaustulostukseen, eli toisin sanoen keskiarvoistuksella ei voida vähentää systemaattista virhettä.

Esimerkki siltojen monitorointidatan arkistoinnista

Alla esimerkki metadatatiedoston rakenteesta ja esimerkit mittaustiedon sekä ei-numeerisen tiedon sisällöistä liittyen luvun 7.2 mittaustiedon arkistointiin.

Kenttiä ja esimerkkejä:

[station]

Name = Kirjalansalmi

TZ = EET

Position = 60.365889 22.358472

channels = 2

[group1]

name = Hanger 22

channels = Sg21 Dio1

[channel1]

name = Sg21

unit = MPa

limits = -1000 -800 100 150

desc = Weldable straingage

calib = 0.0573 0

[channel2]

name = Di01

unit = mm

limits = -174 -104 104 174

desc = Displacement at extension joint

calib = 0.00572 0

Tarkoitus on, että metadata voidaan lukea sekä koneen että ihmisen avulla. Tämä on ensisijaisen tärkeää, koska arkistoitu mittausdata menettää hyödyllisyytensä, jos siihen liitetty metatieto muuttuu mahdottomaksi tulkita. Lisäksi on turvallista olettaa, että dokumentaatio, joka selittäisi metatiedon eksoottisempia rakenteita, tulee hukkumaan, joten itsestään selvä tai suoraan pääteltävissä oleva metatieto on minimoioletus. Selkeässä, ihmissilmällä tarkistettavassa olevassa tekstitiedostossa on etuna myös virheiden helppo havaitseminen.

Esimerkki CSV mittaustiedoston sisällöstä:

```
2015-01-10T00:00:00.059,811,638,-4188,-120,-233,5206 2015-01-
10T00:00:00.069,811,638,-4188,-123,-237,5207 2015-01-
10T00:00:00.079,811,638,-4188,-106,-241,5209 . . .
```

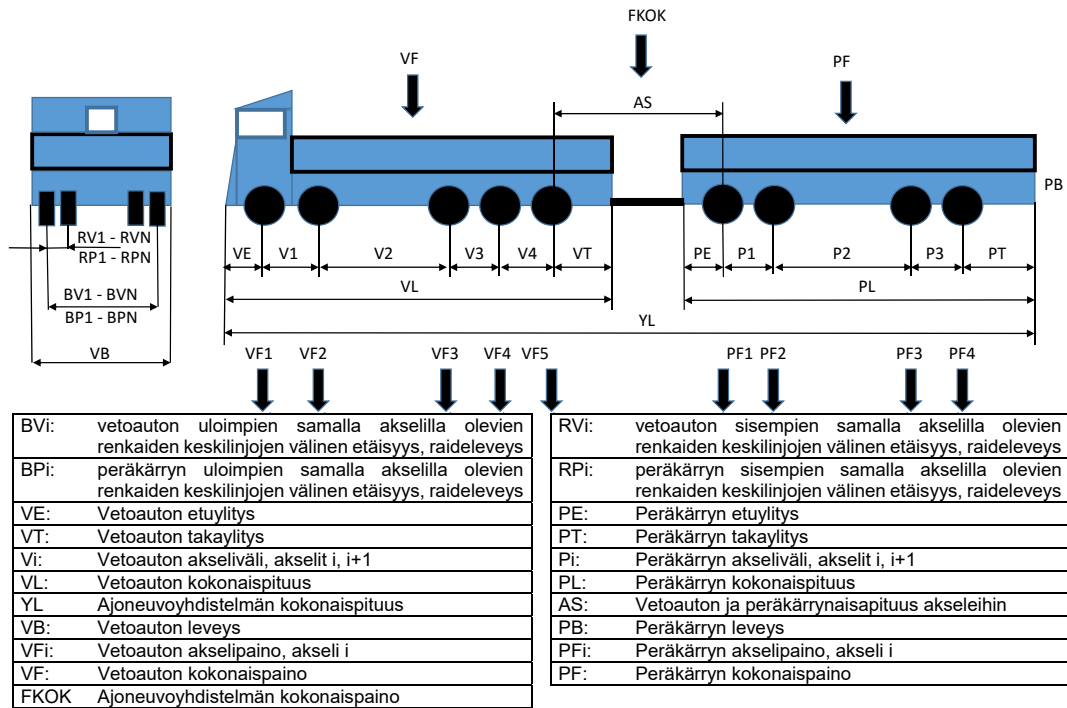
Esimerkki ei-numeerinen tiedon arkistoinnista

Ei-numeerinen tieto mittausrivillä lisätään CSV määritelmän mukaisesti lainausmerkkien sisään

```
2015-01-10T00:00:00.059,811,638,"Class1",-120,"Small Vehicle"
```


Esimerkki koekuormitusajoneuvojen ja koekuormitusajoneuvojen dokumentoinnista koekuormituksessa

Koekuormitusajoneuvon pituus- ja poikkisuuntaisten mittojen sekä akselipainojen esittämistä ohjeistetaan kuvassa 1 sekä siihen liittyvässä taulukossa. Taulukossa 1 on esitetty ajoneuvomittojen ja akselipainojen esittämistä taulukkomuodossa.



i on akselien lukumäärä (i = 1, ..., N) sekä vetoautolle että peräkärrylle erikseen.

Kuva 1. Esimerkki yhdistelmäajoneuvon päämitoista koekuormitusta varten.

Taulukko 1. Esimerkki koekuormitusajoneuvojen mitoista ja painoista.

Koekuormitusajoneuvo 1	Yhdistelmä 1		
Päivämäärä			
Osa	Akseliväli	Raideleveys	Akselipaino
	mm	mm	t
Vetoauto			
Rekisterinumero	AA-NNN		
Akselien lukumäärä	4		
	V ₁ -VN	RV ₁ - RVN	VF ₁ VFN
Etuyllitys VE			
Akseli 1			
Akseli 2			
Akseli 3			
Akseli 4			
Takayllitys VT			
Kokonaispituus VL ja paino VF			
Perävaunu			
Rekisterinumero	PP-NNN		
Akselien lukumäärä	4		
Aisapituus akseleihin AS			
	P ₁ -PN	RP ₁ - RPN	PF ₁ PFN
Etuyllitys PE			
Akseli 1			
Akseli 2			
Akseli 3			
Akseli 4			
Takayllitys PT			
Kokonaispituus PL ja paino PF			
Koko ajoneuvon kokonaispituus YL ja paino FKOK			

Taulukko 1 tallennetaan tietokantaan nimeltään koekuormitusajoneuvot, jolloin ne saadaan yhdistettyä analysointivaiheeseen.

Seuraavassa taulukossa 2 tallennetaan tietokantaan nimeltään koekuormitusajot, jolloin ne saadaan yhdistettyä analysointivaiheeseen. Lisäksi jokaisen koekuormituksen mittaustiedoston alkuun lisätään anturien määrittelyn jälkeen yllä olevasta taulukosta vastaava rivi. Mikäli on käytetty useampia ajoneuvoja, lisätään jokaisesta oma rivi. Mittaustiedostossa on siten myös tieto käytetystä kuormitusajoneuvosta, sen kokonaispaino, ajonopeus, ajosuunta ja ajokaista. Ajosuunta voidaan määrittää niin, että sillan alkupää on 1 ja loppupää 2. Ajoneuvon tarkka paikka sillalla ajosuunnassa voidaan antaa antamalla alku- ja loppupisteet. Mikäli ajoneuvo pysähtyy sillalla, molemmat yo. pisteet ovat samat. Esimerkki peruskuormitustapauksista kahdella yhdistelmäajoneuvolla on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 2. Esimerkki peruskoekuormituksista yhdellä ja kahdella yhdistelmäajoneuvolla

Vaihe/ ajon nro vai- heessa 1)	Aika	Kuormitus- ajoneuvo	Koko- nais- paino	Ajolinja sivusuunnassa	Ajo- nopeus tai pysäytys (maa- tuelta)	Ajosuunta 1= paikka1 2=paikka 2
			tonnia	km/h		
1		Yhdistelmä 1	25+35	1 yhdistelmä		
11	10:27	Yhdistelmä 1	25+35	Keskellä siltaa 2 m	5m, 10m, 15m	1-2
12	10:37	Yhdistelmä 1	25+35	Keskellä kaistaa 1.5 m	5m, 10m, 15m	1-2
13	10:49	Yhdistelmä 1	25+35	Sillan reunassa 0.5 m	5m, 10m, 15m	1-2
14	11:01	Yhdistelmä 1	25+35	Keskellä kaistaa 1.5 m	5	2-1
15	11:43	Yhdistelmä 1	25+35	Sillan reunassa 0.5 m	5	2-1
16	11:52	Yhdistelmä 1	25+35	Keskellä kaistaa 2 m	60	1-2
17	12:14	Yhdistelmä 1	25+35	Keskellä kaistaa 2 m	60	2-1
2		Yhdistelmä 1 Yhdistelmä 2	25+35 30+35	Rinnakkain		
21	14:42	Yhdistelmä 1 Yhdistelmä 2	25+35 30+35	Keskellä siltaa Rinnakkain 0,5 m	5	1-2
22	14:56	Yhdistelmä 1 Yhdistelmä 2	25+35 30+35	Sillan reunassa Rinnakkain 0.5 m	5	1-2
23	15:10	Yhdistelmä 1 Yhdistelmä 2	25+35 30+35	Sillan reunassa Rinnakkain, 0.5 m	5	2-1
24	15:20	Yhdistelmä 1 Yhdistelmä 2	25+35 30+35	Keskellä kaistojaan Rinnakkain 2 m	5	1-2
25	15:58	Yhdistelmä 1 Yhdistelmä 2	25+35 30+35	Keskellä kaistojaan Rinnakkain 2 m	60	1-2

3		Yhdistelmä 1 Yhdistelmä 2	25+35 30+35	Peräkkäin		
31	16:41	Yhdistelmä 1 Yhdistelmä 2	25+35 30+35	Sillan reunassa Peräkkäin 10 m	5	1-2
32	17:09	Yhdistelmä 1 Yhdistelmä 2	25+35 30+35	Sillan reunassa Peräkkäin 10 m	5	2-1
33	18:29	Yhdistelmä 1 Yhdistelmä 2	25+35 30+35	Keskellä kaistaa Peräkkäin 10 m	5	1-2
34	19:02	Yhdistelmä 1 Yhdistelmä 2	25+35 30+35	Keskellä kaistaa Peräkkäin 10 m	5	2-1
35	19:11	Yhdistelmä 1 Yhdistelmä 2	25+35 30+35	Keskellä kaistaa Peräkkäin 10 m	60	1-2
36	16:41	Yhdistelmä 1 Yhdistelmä 2	25+35 30+35	Keskellä kaistaa Peräkkäin 10 m	60	2-1

1) Koekuormitusajoneuvo(t), koekuormituksen tyyppi (staattinen/dynaaminen), ajoneuvon pysäytyskohdat kussakin vaiheessa.

Taulukko 3. Esimerkki peruskoekuormituksista kahdella yhdistelmäajoneuvolla

Koekuormituksen nro					
Koekuormitusajoneuvojen määrä					
Sijainti toisiinsa nähden	Etäisyys toisistaan	Sijainti reunasta	Sijainti kannen päästä (alku)	Sijainti kannen päästä (loppu)	
Koekuormitusajoneuvo 1	Veto-vaunun paino	Perä-vaunun paino	Ajo-nopeus	Ajosuunta Alkupiste	Ajosuunta Loppupiste
Koekuormitusajoneuvo 2	Veto-vaunun paino	Perä-vaunun paino	Ajo-nopeus	Ajosuunta Alkupiste	Ajosuunta Loppupiste

Esimerkki mittaustiedoston rivistä koekuormituksessa No 31 on annettu alla.

31

2

Peräkkäin, 5, 0.5, 0, 20

Yhdistelmä 1, 25,35, 5,1,2

Yhdistelmä 2, 30,35, 5, 1,2

Esimerkki monitorointisuunnitelman ja monitoroinnin toteutussuunnitelman keskeisimmistä asioista

Monitorointisuunnitelma

- kohteen yleiskuvaus
- monitorointiprojektin aikataulu
- monitoroinnin tavoitteet
- kaikki tarpeelliset toimenpiteet ja laitteet monitoroinnin suorittamiseksi
- lujuustekninen analyysi ja testi- tai koekuormituksen määrittely
- kriittisten mittauskohtien valinta
- antureiden ominaisuudet ja tarkkuustaso
- mittalaitteiden sijoitus
- antureiden asennustapa
- jatkuvan monitoroinnin enimmäiskatkoaika
- kaapeloinnin suunnittelu periaatteellisella tasolla
- tiedonsiirto periaatteellisella tasolla
- mitatun datan tallennuspaikka ja formaatti
- mittaustulosten käsittely, signaalinkäsittely
- analysoinnin ja raportoinnin määrittäminen

Monitoroinnin toteutussuunnitelma

- Järjestelmän yleiskuvaus
 - anturityypit
 - kaapelointi ja suojaputket
 - antureiden suojakotelot
 - laitekaappi
 - käyttöjärjestelmät
 - tiedon siirto ja tallennus
- mittalaitteet (yksityiskohtaisesti)
 - anturityyppi ja mitattava suure
 - anturin tarkka sijainti
 - anturin mittausala, luotettavuus ja tarkkuus
 - antureiden kiinnitys, kaapelointi ja suojaputket
 - mittalaitteiden ja mittauskorttien tyyppi ja mittausohjelmisto
- järjestelmän asentaminen
 - eri vaiheessa asennettavat osat
 - antureiden ja suojakoteloiden kiinnitykset
 - pintakäsittelyn ja piikkauskolojen paikkaukset antureiden asennuksen jälkeen
 - työnaikaiset kaapeloinnit sekä lopputilanteen kaapeloinnit
 - suojaputkien kiinnitykset ja sijoitus
- liikennejärjestelyt ja liikenteenohjaus
- tiedotus (yhdessä tilaajan kanssa)
- testi- tai koekuormituksen toteutus
- asennuksen ja ylläpidon kuvaus
 - antureiden ja mittalaitteiden kalibrointi
 - antureiden ja mittalaitteiden vaihtaminen
- tietojen tallennuksen ja käsittelyn kuvaus

- tulosten ja raportoinnin kuvaus
- laatutason osoittaminen ja laadunvarmistuksen kuvaus
 - mittaustulosten varmennus

Monitorointisuunnitelma ja monitoroinnin toteutussuunnitelma yhdistettynä (Taulukko 1)

- Kohteen yleiskuvaus
 - Sillan päämitat ja rakentamisvuosi
 - Sillasta havaitut vauriot ja puutteet
 - Sillan pääosien mitat /siltarekisteristä)
 - Yleis- ja erikoistarkastusten päätulokset
- Monitorointiprojektin aikataulu
 - Monitoroinnin suunnittelun aikataulu
 - Antureiden asennuksen aikataulu
 - Monitoroinnin jaksojen aikataulu
 - Koekuormituksen aikataulu
 - Raportoinnin aikataulu
- Monitoroinnin tyyppi, laajuus ja luotettavuus
 - Monitoroinnin tyyppi
 - Monitoroinnin laajuus
 - Monitoroinnin enimmäiskatkoaika
- Monitoroinnin tavoitteet
 - Havaittuja vaurioita
 - Rakenteen kantavuus
 - Käyttöikä
 - Mukavuus
 - Tuotekehitys
- Mittalaitteet
 - Lukumäärä ja sijainti
 - Sähkö ja tiedonsiirto mittauskoppiin
 - Valmistaja, tyyppi nro
 - Käyttöjärjestelmä, versio
 - Mittausohjelma, versio
 - Mittaustarkkuus
 - Mittaustaajuus
 - Mittausalue (Max., Min.)
 - Erottelukyky
 - Ympäristöolosuhteet
 - Varmuuskopiointi, sähkökatko-ominaisuudet.
 - Esisuodatus
 - Muu suodatus
 - Tallennustaajuus

- Anturit
 - Anturityyppien valinta
 - Antureiden kokonaismäärä
 - Valmistaja, tyyppi nro
 - Herkkyys
 - Mittaustaajuus
 - Mittausalue (maksimi, minimi)
 - Erottelukyky
 - Ympäristöominaisuudet
 - Anturin tarkka paikkakoodi
 - Kalibrointi (todistus, menetelmä)
 - Antureiden kiinnitystapa eri osiin
- Analysointi ennen monitorointia
 - Alkuperäiset laskelmat
 - Esianalysointi sillan kunnosta
 - Kriittisten mittauspisteiden alustava valinta
 - Tarkan FE-mallin muodostaminen
 - Vaurioanalyysi mahdollisten vaurioiden varalta
 - Koekuormitusten määrittäminen
 - Uusien liikenne- ja erikoiskuormien tarkempi analysointi
 - Kriittisten mittauspisteiden tarkka sijainti
- Kaapeloinnin suunnittelu
 - Kaapeleiden kokonaismäärä
 - Kaapeleiden alustavat paikat sillan alla
 - Anturityyppien kaapeleiden pituus ja sijainti
 - Kaapeleiden tarkka sijainti jänteissä ja sillan poikkisuunnassa
 - Kaapeleiden kulku (suoja-putki, hylly) ja kiinnitystapa sillan eri osissa
- Tiedon tallennus ja tiedonsiirto
- Tiedonsiirron tyyppi (kaapeli, GSM verkko, muu)
- Tiedon tallennusformaatti mittauskoneessa
 - Tiedon varmuuskopiointi mittauskoneessa
 - Tiedon arkistointiformaatti monitorointiserverillä
 - Tiedon arkistointimenetelmä ja formaatti serverillä
- Mittaustulosten käsittely
 - Jatkuva aikasarja
 - Kynnysarvon ylityksen aikasarja
 - Suurimmat, pienimmät ja keskiarvot aikayksikössä kaikista kanavista
 - Hälytys ja kriittisten arvojen ylitykset
 - Rasitusten luokittelu N luokkaan
- Analysointi ja raportointi
 - Analysointimallin tarkentaminen koekuormitusten ja monitoroinnin avulla
 - Koekuormitusten jälkianalysointi
 - Uusien liikenne ja erikoiskuormien analysointi
 - Kokonais- tai akselipainojen määrittäminen mittaustuloksista
 - Raskaiden ajoneuvojen määrät, suunnat ja nopeudet mittaustuloksista
 - Ominaistaajuuksien ja amplitudien määrittäminen raskaalle liikenteelle

- Rainflow-analyysi ja väsymisanalyysi (käyttöiän laskenta) monitorointituloksista
- Betonin turmeltumisanalyysi
- Liikennejärjestelyt
 - Siltakurki/henkilönostin/telineet, tarve
 - Liikenteen ohjaus antureiden ja mittalaitteiden asennuksen aikana
 - Liikenteen ohjaus koekuormituksen aikana
 - Liikenteen ohjaus antureiden ja mittalaitteiden huollon tai purun aikana
- Tiedotus liikenneerajoituksista ja ruuhkista
 - Yleistiedot sillan monitoroinnista ja huoltotoimenpiteistä
 - Tiedotus antureiden ja mittalaitteiden asennuksen aikana
 - Tiedotus koekuormituksen aikana
 - Tiedotus antureiden ja mittalaitteiden huollon ja purun aikana
- Laadunvarmistus
 - Laatujärjestelmän kuvaus
 - Mittalaitteiden toimivuuden testaus
 - Kalibrointitodistukset
 - Koekuormituksen ja analysoinnin vertailu

Taulukko 1. Esimerkki monitorointisuunnitelman tärkeimmistä tiedoista.

Sillan yleistiedot			
	Sillan nimi	Sillan numero	Tien nro
	Rakentamivuosi	Sillan tyyppi	Sillan alkupää (kaupunki)
	Kokonaispituus	Leveys	Jätteiden lukumäärä
	Yleispiirustukset		
	Sillan pääosat (siltarekisteristä)	Jänne 1	Jänne N
	Jätteiden/ulokkeiden pituudet		
	Pääpalkkien lukumäärä		
	Pääpalkkien tyyppi		
	Poikkipalkkien lukumäärä		
	Poikkipalkkien tyyppi		
	NN palkkien lukumäärä		
	NN palkkien tyyppi		
	Kannen leveys		
	Kannen paksuus		
	Ajokaistan leveys (vasen)		
	Ajokaistan leveys (oikea)		
Projektin aikataulu			
	Suunnittelun alku	Päättyminen	
	Anturien asennus, alku	Päättyminen	
	Monitorointi, alku	Päättyminen	
	Koekuormitus 1	Päättyminen	
	Raportointi	Päättyminen	
	Projekti alkaa	Päättyminen	

	Projektin kesto ja laajuus		
	<i>Jatkuva monitorointi</i>	<i>Jaksottainen monitorointi</i>	<i>Kertamonitorointi</i>
	<i>Erikoislaaja monitorointi</i>	<i>Laaja monitorointi</i>	<i>Suppea monitorointi</i>
	Enimmäiskatko aika		
	Toimivuusluokka 1	Toimivuusluokka 2	Toimivuusluokka 3
	99 %, 1 vrk/vuosi	95 %, 1 vk/vuosi	80 %, 4 vk/vuosi
	Muu määräyty		Virransyöttö mukana toimivuudessa
	NN %, NN/vuosi		
	Verkkoyhteys mukana toimivuudessa		
	Projektin tavoitteet		
	Vaurioituminen Rakenteellinen kantavuus Käyttöikä Käyttömukavuus Tuotekehitys, T&K	Tavoite 1	Tavoite N
	Mittalaitteet		
	Mittalaitteita yht. kpl	Mittauskanavia yht. kpl	
	Mittalaite, tyyppi 1	Mittalaite, tyyppi 2	Mittalaite, tyyppi 3
	Valmistaja, tyyppi nro	Valmistaja, tyyppi nro	Valmistaja, tyyppi nro
	Käyttöjärjestelmä, versio	Käyttöjärjestelmä, versio	Käyttöjärjestelmä, versio
	Mittausohjelma, versio	Mittausohjelma, versio	Mittausohjelma, versio
	Mittaustarkkuus	Mittaustarkkuus	Mittaustarkkuus
	Mittaustaajuus	Mittaustaajuus	Mittaustaajuus
	Mittausalue (Max., Min.)	Mittausalue (Max., Min.)	Mittausalue (Max., Min.)
	Erottelukyky	Erottelukyky	Erottelukyky
	Ympäristöolosuhteet	Ympäristöolosuhteet	Ympäristöolosuhteet
	Varmuuskopiointi, sähkökatko-ominaisuudet.	Varmuuskopiointi, sähkökatko-ominaisuudet.	Varmuuskopiointi, sähkökatko-ominaisuudet.
	Esisuodatus	Esisuodatus	Esisuodatus
	Tallennustaajuus	Tallennustaajuus	Tallennustaajuus
	Analysointi		
	Yksinkertainen malli	FE-malli	BIM malli
	Liikennekuormat	Erikoiskuormakaaviot	Väsymiskuormitus
	Koekuormitus, yht. kpl	Yhdistelmä, ajolinjat kpl	2 yhdistelmää kpl
	Lavetit kpl		
	Kriittiset mittauskohdat		
	Kriittiset mittapisteet yht. kpl	Mittapisteet pääpalkit kpl	Poikkipalkki kpl
	Sekundääri kpl	Kansi kpl	Muu kpl
	Anturien ominaisuudet		
	Anturityypit yht. kpl	Antureita yht. kpl	
	Liikeanturi kpl	Venymäanturi kpl	Kiihtyvyyssanturi kpl
	Voima-anturi kpl	Lämpötila-anturi kpl	Optinen kuitu kpl
	Kosteusanturi kpl	Korroosioanturi kpl	Muu tyyppi N

	<i>Liikeanturi, tyyppi 1</i>	<i>Venymäanturi, tyyppi 2</i>	<i>Kiihtyvyyssanturi, tyyppi 3</i>
	Valmistaja, tyyppi nro	Valmistaja, tyyppi nro	Valmistaja, tyyppi nro
	Herkkyys	Herkkyys	Herkkyys
	Mittaustaajuus	Mittaustaajuus	Mittaustaajuus
	Mittausalue (max, min)	Mittausalue (max, min)	Mittausalue (max, min)
	Erottelukyky	Erottelukyky	Erottelukyky
	Ympäristöominaisuudet	Ympäristöominaisuudet	Ympäristöominaisuudet
	Kalibrointi (todistus, menetelmä)	Kalibrointi (todistus, menetelmä)	Kalibrointi (todistus, menetelmä)
	<i>Voima-anturi, tyyppi 4</i>	<i>Lämpötila-anturi, tyyppi 5</i>	<i>Optinen kuitu, tyyppi 6</i>
	Valmistaja, tyyppi nro	Valmistaja, tyyppi nro	Valmistaja, tyyppi nro
	Herkkyys	Herkkyys	Herkkyys
	Mittaustaajuus	Mittaustaajuus	Mittaustaajuus
	Mittausalue (max, min)	Mittausalue (max, min)	Mittausalue (max, min)
	Erottelukyky	Erottelukyky	Erottelukyky
	Ympäristöominaisuudet	Ympäristöominaisuudet	Ympäristöominaisuudet
	Kalibrointi (todistus, menetelmä)	Kalibrointi (todistus, menetelmä)	Kalibrointi (todistus, menetelmä)
	Asennuspaikat, palkki, laippa, teräs	Asennuspaikat, palkki, laippa, teräs	Asennuspaikat, palkki, laippa, teräs
	Asennuspaikan kooditunnus	Asennuspaikan kooditunnus	Asennuspaikan kooditunnus
	<i>Kosteusanturi, tyyppi 7</i>	<i>Korroosioanturi, tyyppi 8</i>	<i>Muu tyyppi N</i>
	Valmistaja, tyyppi nro	Valmistaja, tyyppi nro	Valmistaja, tyyppi nro
	Herkkyys	Herkkyys	Herkkyys
	Mittaustaajuus	Mittaustaajuus	Mittaustaajuus
	Mittausalue (max, min)	Mittausalue (max, min)	Mittausalue (max, min)
	Erottelukyky	Erottelukyky	Erottelukyky
	Ympäristöominaisuudet	Ympäristöominaisuudet	Ympäristöominaisuudet
	Kalibrointi (todistus, menetelmä)	Kalibrointi (todistus, menetelmä)	Kalibrointi (todistus, menetelmä)
	Asennuspaikat, palkki, laippa, teräs	Asennuspaikat, palkki, laippa, teräs	Asennuspaikat, palkki, laippa, teräs
	Asennuspaikan kooditunnus	Asennuspaikan kooditunnus	Asennuspaikan kooditunnus
	Mittalaitteiden sijoitus		
	Mittauskaappi, kpl	Sijainti maatuki	Sijainti muu
	Mittauskaapissa virransyöttö (220 V)	Eristys	Lämmitys/tuuletus
	Virransyötön järjestäjä/ylläpitäjä	Verkkoyhteyden järjestäjä/ylläpitäjä	
	Antureiden asennustapa		
	Pääpalkit	Poikkipalkit	Sekundääripalkit
	Liimaus, hitsaus, ruuvi, muu	Liimaus, hitsaus, ruuvi, muu	Liimaus, hitsaus, ruuvi, muu
	Kansi	Muu	
	Liimaus, hitsaus, ruuvi, muu		

Kaapeloinnin suunnittelu			
	Kaikilta antureilta oma kaapeli, pituus	N anturilta oma kaapeli, pituus	N anturilta oma kaapeli, pituus
	Tiedonsiirto verkkokaapeleilla N, pituus		
	Kaapelit kulkevat sillan kannella N	Kaapelit kulkevat sillan alla kaapelihyllyillä N	Kaapelit kulkevat, muu ratkaisu
	Kaapelit kiinnitetään sillan kanteen, kiinnitystapa	Kaapelit kiinnitetään pääpalkkeihin, kiinnitystapa	Kaapelit kiinnitetään poikkipalkkeihin, kiinnitystapa
	Muu kiinnitystapa		
Tiedonsiirto			
	Tiedonsiirto langallisesti N kertaa/vrk	GSM puhelinverkon kautta, N kertaa/vrk	Muu siirtotapa N kertaa /vrk
	Ei tiedonsiirtoa, varmuuskopiointi paikalla		
Mittausdatan tallennus ja formaatti			
	Mittaus jatkuvana aikasarjana	Tallennetaan suurin, pienin ja keskiarvo	Lisäksi tallennetaan kynnysarvon
	Tallennusformaatti mittauskoneessa, kuvaus	Arkistointiformaatti ASCII muodossa (luku 6)	
Mittaustulosten käsittely			
	Mittaus jatkuvana aikasarjana NN Hz, kaikki tallennetaan	Tallennus suurin, pienin ja keskiarvo /NN s	Lisäksi tallennetaan NN kynnysarvojen ylittäneet arvot ja lukumäärät
	Lisäksi tallennetaan NN hälytysrajan ylittäneet arvot ja lukumäärät	Luokitellaan kunkin ajoneuvon ylityksen max., min, keskiarvot N luokkaan	
Triggausrajat			
		Mittalaite 1	Mittalaite 1
		Kanava 1	Kanava 2
	Keskiarvopisteiden lkm	N11	N12
	Poistettava piikkiarvo	Luku111	Luku 121
	Triggausraja 1	Arvo 112	Arvo 122
	Triggausraja 2	Arvo 113	Arvo 123
	Hälytysraja 1	Arvo 1114	Arvo 124
		Mittalaite 2	Mittalaite 2
		Kanava 1	Kanava 2
	Keskiarvopisteiden lkm	N211	N221
	Poistettava piikkiarvo	Luku212	Luku 222
	Triggausraja 1	Arvo 213	Arvo 223
	Triggausraja 2	Arvo 214	Arvo 224
	Hälytysraja 1	Arvo 215	Arvo 225
		Mittalaite N	Mittalaite N
		Kanava N	Kanava N

Analysointi ja raportointi			
	Lujuustekninen analysointi vanhoista laskelmista	Laaditaan uudet laskelmat ('käsikaavat')	Laaditaan uusi FE-malli, tyyppi
	Analysoidaan N koekuormitusta	Analysoidaan liikennekuormat	Analysoidaan erikoiskuormakaaviot
	Määritetään ajoneuvopainot ylityksistä	Määritetään ylittävien ajoneuvojen määrät, suunnat ja nopeudet	Luokitellaan raskaat ajoneuvot akselien perusteella
	Määritetään sillan ominaistajuudet ja ominaismuodot		
	Tehdään Rainflow analyysi N anturille	Tehdään betonin turmeltumisanalyysi	
Liikennejärjestelyt			
	Liikenteen ohjaus, antureiden asennus	Liikenteen ohjaus, koekuormitus	Liikenteen ohjaus, antureiden ylläpito
	Aikavälit	Aikavälit	Tarvittaessa
	2 liikenteenohjaajaa	2 liikenteenohjaajaa	2 liikenteenohjaajaa
Asennusnostimet ja telineet			
	Asennuksessa tarvittava henkilönostin/siltakurki	Asennuksessa tarvittavat telineet	Asennuksessa tarvittava lautta
	Aikavälit	Aikavälit	Aikavälit
Tiedotus			
	Liikenteen ohjaus, mittalaitteiden asennus	Liikenteen ohjaus, koekuormitus	Liikenteen ohjaus, antureiden ylläpito
	Ajankohta	Ajankohta	Ajankohta
	Tiedotusvälineet	Tiedotusvälineet	Tiedotusvälineet
Laadunvarmistus, laatutaso			
	Laatujärjestelmän kuvaus	Mittaussysteemin toimivuuden testaus	Kalibrointitodistukset
	Koekuormituksen ja analysoinnin vertailu		
Raportit tai osaraportit			
	Sillan kunnon ja kantavuuden arviointi	Anturien paikkojen määrittäminen	
	Sillan monitorointisuunnitelma	Anturien paikkojen määrittäminen	Monitoroinnin toteutussuunnitelma
	Koekuormitussuunnitelma	Koekuormituksen toteutus	Koekuormituksen mittausraportti
	Turvallisuussuunnitelma	Laadunvarmistusraportti	Liikenteen ohjaus ja tiedotussuunnitelma
	Monitoroinnin mittausraportti		
	Monitorointitulosten analysointi- ja johtopäätös raportti		
Mahdolliset tulevat raportit			
	Korjaussuunnitelma	Uudet kantavuus ja kunto laskelmat	Korvausinvestointi suunnitelmat

ISSN-L 1798-6591
ISSN 1798-6605
ISBN 978-952-317-322-4
www.liikennevirasto.fi

Liik
enne
vira
sto



Tämä asiakirja on allekirjoitettu

Lista allekirjoittajista

Allekirjoittaja

Todennus