



TAMPEREEN  
AMMATTIKORKEAKOULU

# SILTOJEN PUISET LAMELLIKANNET

Tervassillan koekuormitus

Heli Viljanen

Opinnäytetyö  
Huhtikuu 2016  
Rakennustekniikka  
Talonrakennustekniikka



## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Rakennustekniikka  
Talonrakennustekniikka

VILJANEN HELI:  
Siltojen puiset lamellikannet  
Tervassillan koekuormitus

Opinnäytetyö 100 sivua, joista liitteitä 22 sivua  
Huhtikuu 2016

---

Tämä opinnäytetyö tehtiin osana Tekesin INKA-projektia. Työn tutkimuskohteena oli Tampereella sijaitseva Tervassilta, joka on kaksiaukkoinen liimapuinen ulokepalkkisilta. Sillan kansirakenteena on poikittainen, päällystämätön syrjälankutus. Työssä suunniteltiin ja toteutettiin Tervassillan ensimmäinen koekuormitus. Siltaa kuormitettiin sekä staattisilla että dynaamisilla ajoneuvokuormilla yhteensä 10 erilaisella kuormitustapauksella. Kuormituksen aikana mitattiin taipumia sillan neljässä pääkannattajassa. Koejärjestelyt dokumentoitiin Tervassillan pitkäaikaista tutkimustyötä varten.

Työssä käsiteltiin liikenteestä aiheutuvia pystysuuntaisia kuormia silloissa ja puisten lamellikansien rakenteellista toimintaa. Lisäksi laskettiin teoreettinen liittovaikutus lankkukannen ja pääkannattajien välillä. Sillasta luotiin FEM-malli, jonka taipuma-arvoja verrattiin koekuormitustuloksiin. Vertailulla analysoitiin kansilaatassa olevan sauman vaikutusta kannen kuormanjakokykyyn sillan poikkisuunnassa sekä sillankaiteen kannen reunaa jäykistävää vaikutusta. FEM-mallin avulla arvioitiin myös koekuormitusajoneuvojen aiheuttamaa taivutusrasitusta kansilaatassa suhteessa siltojen mitoituskuormakaa-voioden aiheuttamiin taivutusrasituksiin.

FEM-mallin taipuma-arvot olivat keskimäärin lähes 50 % suuremmat kuin koekuormituksessa mitatut taipumat. Kuormien jakautuminen pääkannattajien kesken vastasi kuitenkin hyvin koekuormitustuloksia. FEM-mallin avulla pääteltiin, että Tervassillan ajoneuvoliikenteen kaistojen välisellä saumalla ei ole vaikutusta kuorman jakautumiselle sillan poikkisuunnassa. Sillankaiteen todettiin jäykistävän kansirakenteen reunaa. Laskennallinen liittovaikutus Tervassillan syrjälankkukannen ja pääkannattajien välillä todettiin pieneksi. Sen laskettiin kasvattavan rakenteen taivutusjäykkyyttä alle 5 %. Liittovaikutuksen toteutumista todellisessa rakenteessa oli vaikea arvioida. Laskennallisesti koekuormitusajoneuvojen aiheuttama taivutusrasitus syrjälankkukannelle oli alle 20 % mitoituskuormakaaavion LM2 aiheuttamasta taivutusrasituksesta.

Työssä pohdittiin myös ristiinliimatun massiivipuun eli CLT:n käyttömahdollisuuksia sillan kansirakenteena. CLT toimii rakenteellisesti kahdessa suunnassa, koska sen lamellikerrosten syysuunnat ovat ristikkäin, jolloin kuorma jakautuu kansilaatassa tehokkaammin. Työssä esiteltiin kaksi pohjoismaista siltakohdetta, joissa CLT:tä on käytetty tai suunniteltu käytettäväksi sillan kansirakenteena. CLT on varteenotettava vaihtoehto puusiltojen kehitystyötä ajatellen, mutta tutkimustietoa muun muassa sen pitkäaikaiskestävyydestä tarvitaan lisää.

---

Asiasanat: puusillat, lamellikansi, koekuormitus, Tervassilta, CLT

## ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Tampere University of Applied Sciences  
Degree Programme in Construction Engineering  
Building Construction

VILJANEN HELI:

Laminated Timber Decks of Bridges  
Load Testing of the Tervassilta Bridge

Bachelor's thesis 100 pages, appendices 22 pages  
April 2016

---

The purpose of this thesis was to plan and organize the first load testing of the Tervassilta Bridge. The Tervassilta is a cantilever glulam beam bridge with a nail-laminated timber deck. The bridge was loaded with ten different load cases including both static and dynamic loads. During the load testing deflections of four main girders were measured. Testing arrangements were documented for the subsequent research of the bridge.

The theoretical part of this study is based on Eurocodes and specifications of Finnish Transport Agency. The theory section covers vertical forces in bridges caused by vehicles and presents different kind of timber laminated decks. This study explores possible structural models for a laminated deck slab. The composite action between the deck slab and the main girders of the Tervassilta Bridge was calculated. Also a FEM model from the bridge was created. Structural behaviour of the nail-laminated timber deck of the bridge was evaluated by comparing the load testing results of four load cases to the deflections in the FEM model.

The deflections in the FEM model were approximately 50 % greater than the deflections measured in the load testing. However, the transversal distribution of loads in the model corresponded to the results of load testing. It was concluded that the joint in the deck between the two traffic lanes of the Tervassilta has no significant impact on load distribution in the deck slab. It was also stated that the bridge railings stiffen the longitudinal edges of the deck slab. The composite action between the deck slab and main girders was found to be quite insignificant in this case. The bending stiffness of the structure was improved by less than 5 % when composite action was taken into account. Therefore it is difficult to evaluate if in the actual structure of the Tervassilta the deck and main girders act together as a composite structure.

In this thesis possibilities of using cross laminated timber (CLT) as a bridge deck slab were considered. CLT-deck acts as a two-way slab due to cross grain direction of the layers. Therefore loads distribute more efficiently. This study presents two bridges with a constructed or planned CLT-deck. CLT is a prospective material when considering new developments of timber bridges. However, further research is required for example to determine long-term durability of CLT.

---

Key words: timber bridges, laminated deck, load testing, CLT

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	7
2	SILTOJEN LIIKENNEKUORMAT .....	9
	2.1 Siltojen suunnittelua ohjaavat säädökset .....	9
	2.2 Pystysuuntaiset liikennekuormat uusissa silloissa .....	10
	2.3 Olemassa olevien siltojen kantavuustarkastelu.....	13
3	PUISEN KANSILAATAN RAKENTEELLINEN TOIMINTA .....	16
	3.1 Siltojen puiset kansilaatat .....	16
	3.2 Pystysuorien pistekuormien jakautuminen .....	18
	3.3 Kannen rakennemallin valinta .....	19
	3.4 Kuorman jakautuminen rakennesysteemissä .....	21
4	TERVASSILLAN KOEKUORMITUS .....	25
	4.1 Tervassilta .....	25
	4.2 Koekuormituksen ajankohta .....	27
	4.3 Kuormitusajoneuvot.....	29
	4.4 Mittalaitteet ja mittauspisteet.....	30
	4.5 Kuormitustapaukset .....	32
	4.6 Mittausvirheen määrittäminen .....	35
5	LIITTOVAIKUTUS KANNEN JA PÄÄKANNATTAJIEN VÄLILLÄ.....	37
	5.1 Puisen liittorakenteen teoria.....	37
	5.2 Liittovaikutus Tervassillassa.....	41
6	TERVASSILLAN FEM-MALLINNUS .....	43
	6.1 Mallinnuksen periaatteet .....	43
	6.2 Pääkannattajien tuennat .....	46
	6.3 Liittovaikutuksen tarkastelu mallin avulla.....	48
	6.4 Liikkuvat kuormat.....	48
7	TULOSTEN ANALYSOINTI .....	50
	7.1 Koekuormituksessa mitatut taipuma-arvot .....	50
	7.2 FEM-mallin vastaavuus koekuormitustuloksiin .....	52
	7.3 Vertailu mitoituskuormakaavioiden aiheuttamiin rasituksiin.....	58
	7.4 Analysointi mittauspisteen CH4 mahdollisesta mittausvirheestä .....	61
8	CLT SILTARAKENTEISSA .....	63
	8.1 CLT materiaalina .....	63
	8.2 Leikkausvoimat CLT:ssä .....	64
	8.3 CLT:n käyttö sillan kansirakenteena .....	66

9	POHDINTA.....	72
9.1	Tervassillan syrjälankkukannen toiminta .....	72
9.2	Koekuormituksen tulokset .....	74
9.3	CLT:n käyttömahdollisuudet .....	75
	LÄHTEET.....	77
	LIITTEET .....	79
	Liite 1. Ominaislujuudet materiaaleille GL32h ja C30 .....	79
	Liite 2. Tehollisen taivutusjäykkyyden laskenta .....	80
	Liite 3. Koekuormitustapaukset.....	83
	Liite 4. Koekuormitustulosten yhteenveto .....	95
	Liite 5. Siirtymäanturin DTS-A-100 tekniset tiedot.....	96
	Liite 6. Tervassillan piirustukset 4/16348/1 ja 4/16348/6.....	97

## ERITYISSANASTO

akseli	ajoneuvon pyöriä kannatteleva rakenne
CLT	cross laminated timber, ristiinliimattua massiivipuuta
epälineaarisuusvirhe	ilmaisee mittausrvojen poikkeamaa ideaalisuorasta
hystereesivirhe	mittausarvojen ero mitattavan arvon nousu- ja las- kusuunnassa
liitoksen kiertymäjäykkyys	liitoksen kyky siirtää momenttia
liitossiirtymä	kuormituksen vaikutuksesta käyttörajatilassa tapahtuva liitoksen osien liike toisiinsa nähden
puun aspiroituminen	puun kuivuessa tapahtuva soluseinämien sulkeutuminen. Tällöin solut eivät pysty vastaanottamaan esimerkiksi kyllästysainetta.
sovituskerroimet $\alpha_{qi}$ , $\alpha_{Qi}$ ja $\beta_Q$	Eurokoodin kertoimet, joiden suuruus voidaan kansallisesti valita ja joilla vaikutetaan kuorma- kaavioiden LM1 ja LM2 mitoitusarvojen suuruuteen
sysäyskerroin	kerroin, jolla huomioidaan liikennekuormituksen dynaamisuus. Käytetään myös nimitystä dynaaminen suurennuskerroin.
teli	kahden tai useamman akselin muodostama kokonaisuus, jossa kahden peräkkäisen akselin välinen etäisyys on $\leq 2,6$ metriä ja akseleille kohdistuva kuorma jakautuu tietyssä suhteessa
toistettavuusvirhe	ilmaisee mittausanturin kykyä pitää tarkkuutensa
vierintäleikkautuminen	puun leikkautuminen, jossa leikkausvoimakomponentti vaikuttaa puusyiden tasossa syitä vastaan kohtisuorassa suunnassa. Käytetään myös nimitystä vuosilustopinnan leikkautuminen.

## 1 JOHDANTO

Tässä opinnäytetyössä tarkastellaan puusiltojen lamellikansien rakenteellista toimintaa Eurokoodien ja Liikenneviraston ohjeiden mukaisesti. Työssä selvitetään kannen rakennemallin valintaa, pystysuorien pistekuormien jakautumista kansirakenteessa sekä kannen kykyä jakaa liikennekuormia pääkannattajille. Työn osana toteutetaan Tampereen Vuoreksen kaupunginosassa sijaitsevan Tervassillan koekuormitus. Tervassilta on liima-puinen ulokepalkkisilta, jonka kansirakenteena on päällystämätön poikkisuuntainen syrjälankutus. Koekuormituksen aikana mitataan taipumia sillan neljässä pääkannattajassa.

Tampereen kaupunki on mukana Tekesin INKA- eli Innovatiiviset kaupungit -projektissa, jonka tavoitteena on luoda Suomeen korkeaan osaamistasoon perustuvia, kilpailukykyisiä yrityksiä. Tampereen seudun vastualueena projektissa on Älykkäät kaupungit ja uudistuva teollisuus. (Tekes 2014.) Tervassillan tutkimustyötä tehdään osana INKA-projektia. Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on suunnitella ja toteuttaa sillan ensimmäinen koekuormitus. Koekuormitus toteutetaan yhdessä Tampereen Infran ja Tampereen ammattikorkeakoulun (TAMK) laboratorion kanssa. Kuormitusajoneuvot valitaan Tampereen Infralta saatavan kaluston mukaan. TAMK:n laboratorio vastaa mittalaitteista, niiden asennuksesta siltapaikalla ja mittausdatan tallentamisesta.

Tervassillan rakenteiden käyttäytymistä liikennekuormituksen rasittamana on tarkoitus tutkia useampaan kertaan sillan elinkaaren aikana. Koekuormitusjärjestelyt dokumentoidaan siten, että koekuormitus on toistettavissa vertailutulosten saamiseksi. Sillan pääkannattajiin asennetaan seuraavia koekuormituksia varten venymäliuskat, jotka kiinnitetään liimaamalla pääkannattajien alapintaan. Tässä työssä dokumentoitu Tervassillan ensimmäinen koekuormitus toteutettiin siirtymäantureilla, sillä venymäliuskoja ei saatu asennettua sillalle työn vaatiman aikataulun puitteissa.

Työn teoriaosuudessa käsitellään puisia lamellikansia yleisellä tasolla. Työn laskentaosuudessa tarkastelu rajoittuu vain Tervassillan kansirakenteeseen. Laskennallisella tarkastelulla arvioidaan pistemäisten kuormien jakautumista Tervassillan syrjälankkukanessa sekä lankkukanen ja pääkannattajien välistä liittovaikutusta. Lisäksi Tervassillasta luodaan FEM-malli, josta saatuja pääkannattajien taipuma-arvoja verrataan koekuormi-

tuksessa mitattuihin taipuma-arvoihin. Vertailun avulla arvioidaan sillan syrjälankkukanen käyttäytymistä kuormitusilanteessa. FEM-mallin avulla koekuormitusajoneuvojen aiheuttamia rasituksia syrjälankkukannelle verrataan myös Eurokoodin mukaisten siltojen mitoituskuormakaavioiden aiheuttamiin rasituksiin.

Siltojen kuormista käsitellään vain liikenteen aiheuttamia pystysuuntaisia kuormia. Tarkastelun ulkopuolelle jää siis muun muassa ajoneuvojen jarrutuksista ja kiihdytyksistä aiheutuvat vaakasuuntaiset kuormitukset. Siltasuunnittelussa liikenteen aiheuttamat pystysuuntaiset kuormat tarkastellaan erilaisilla kuormakaavioilla. Tarkasteltaessa jo olemassa olevan sillan kantavuutta käytetään Liikenneviraston ohjeiden mukaan eri kuormakaavioita kuin uutta siltaa suunniteltaessa. Tässä työssä esitellään molempien tapaus-ten pystysuuntaisten liikennekuormien kaaviot.

Työssä pohditaan myös CLT:n (cross laminated timber) käyttömahdollisuuksia siltojen kansivaihtoehtona. CLT:llä toteutettuja sillan kansirakenteita on lukumääräisesti enemmän Keski-Euroopassa, muun muassa Itävallassa. Tähän selvitykseen valittiin esiteltäväksi kaksi ratkaisua Pohjoismaista, joissa ilmasto-olosuhteet ovat samankaltaiset kuin Suomessa. Molempien esiteltävien kohteiden rakenteellisista ratkaisuista ja suunnittelu-periaatteista oli saatavilla hyvin tietoa, mikä osaltaan vaikutti esiteltävien kohteiden valintaan. Suomessa CLT:tä on käytetty lähinnä kuivissa sisätiloissa, joten kokemusta ei ole CLT:n pitkäaikaiskestävyydestä vaihtelevissa sääolosuhteissa. Suomessa on käytetty jonkin verran myös betonia puusiltojen kansirakenteena. CLT-elementeistä koottu sillan-kansi saattaisi olla vaihtoehto betonin käytölle, sillä betonin tavoin CLT:ssä kuorma jakautuu kahteen suuntaan lamellikerrosten ristikkäisten syysuuntien ansiosta.



## 2 SILTOJEN LIIKENNEKUORMAT

### 2.1 Siltojen suunnittelua ohjaavat säädökset

Suomessa siltojen kantavat rakenteet on mitoitettu Eurokoodien mukaan 1.6.2010 lähtien (NCCI 1 2014, 5). Siltojen suunnitteluperiaatteet on esitetty materiaali-kohtaisten Eurokoodien osissa 2, joten esimerkiksi puusiltojen suunnittelussa materiaalin Eurokoodia EN 1995-1 käytetään yhdessä osan EN 1995-2 kanssa. Siltojen yleiset kuormat määritetään Eurokoodi 1:n mukaisesti, ja siltojen liikennekuormat määritellään Eurokoodi 1:n osassa 2 eli standardissa SFS-EN 1991-2.

Suomessa Liikennevirasto on julkaissut runsaasti myös omaa ohjeistusta siltojen suunnitteluun. Eurokoodien tulkitsemiseksi Liikennevirasto on koonnut NCCI-julkaisut eli Eurokoodien soveltamisohjeet. NCCI-julkaisujen numerointi noudattaa Eurokoodien numerointia, joten NCCI 1 on soveltamisohje Eurokoodi 1:lle. Kaikkia Eurokoodin ohjeita ei ole käsitelty soveltamisohjeissa, vaan soveltamisohjeet on tarkoitettu käytettäväksi rinnakkain varsinaisten Eurokoodien ja niiden kansallisten liitteiden kanssa (NCCI 1 2014, 5). Viimeisin eli kolmas versio NCCI 1:stä tuli voimaan 5.9.2014.

NCCI-julkaisujen ohjeet koskevat pääasiassa uusien siltojen suunnittelua. Liikennevirasto on julkaissut myös Siltojen kantavuuslaskentaohjeen, jota käytetään olemassa olevien siltojen kantavuuden tarkasteluun. Olemassa olevien siltojen kantavuutta joudutaan tarkastelemaan muun muassa silloin, kun ajoneuvoasetus muuttuu sallimaan aiempaa suurempia akselikuormia ja kokonaisuusajoneuvoille. Tällöin silloille, joiden kantavuus on liian pieni sallittuihin liikennekuormiin nähden, joudutaan asettamaan painorajoitus (Siltojen kantavuuslaskentaohje 2016, 11). Kantavuustarkastelun syynä voi olla myös sillan kantavuuden heikentyminen esimerkiksi vaurioitumisen seurauksena. Kantavuuslaskentaohjeen viimeisin versio tuli voimaan 1.2.2016. Uusimmassa versiossa otetaan huomioon Eurokoodien vaatimukset sekä uusimmat ajoneuvoasetuksen muutokset, jotka tulivat voimaan 1.10.2013 (Siltojen kantavuuslaskentaohje 2016, 4).

## 2.2 Pystysuuntaiset liikennekuormat uusissa silloissa

Tavanomaisissa tilanteissa liikennekuormat ovat dynaamisia ja muuttuvia kuormia. Sillat mitoitetaan erilaisille kuormituskaavioille, joilla haetaan määräävin vaikutus jokaiselle rakenneosalle. Sillan kansi, yleensä hyötyleveys, jaetaan poikkisuunnassa kuormituskaistoihin, joille kuormituskaaviot sijoitetaan. Kuormakaistojen leveys on 3 metriä, kun hyötyleveys on yli 6 metriä. Jos ajoradat on erotettu toisistaan pysyvällä kaiteella tai törmäysvaimentimilla, jaetaan kaiteen erottamat puolet erikseen kuormituskaistoihin. Myös ajoneuvoliikenteen sillalla kulkeva kevyen liikenteen kaista mitoitetaan ajoneuvokuormille, ellei ajoneuvojen pääsyä sille ole estetty pysyvillä kaiteilla. Sillan pituus- ja poikkisuunnassa kuormitus sijoitetaan siten, että saavutetaan tutkittavalle rakenneosalle epädullisin vaikutus. Tiesiltojen ajoneuvoliikenteestä aiheutuvat pystykuormien ominaisarvot määritellään kuormakaavioilla LM1...LM4. (SFS-EN 1991-2 2009, 24, 28, 30; NCCI 1 2014, 10; Vuorio 2015.)

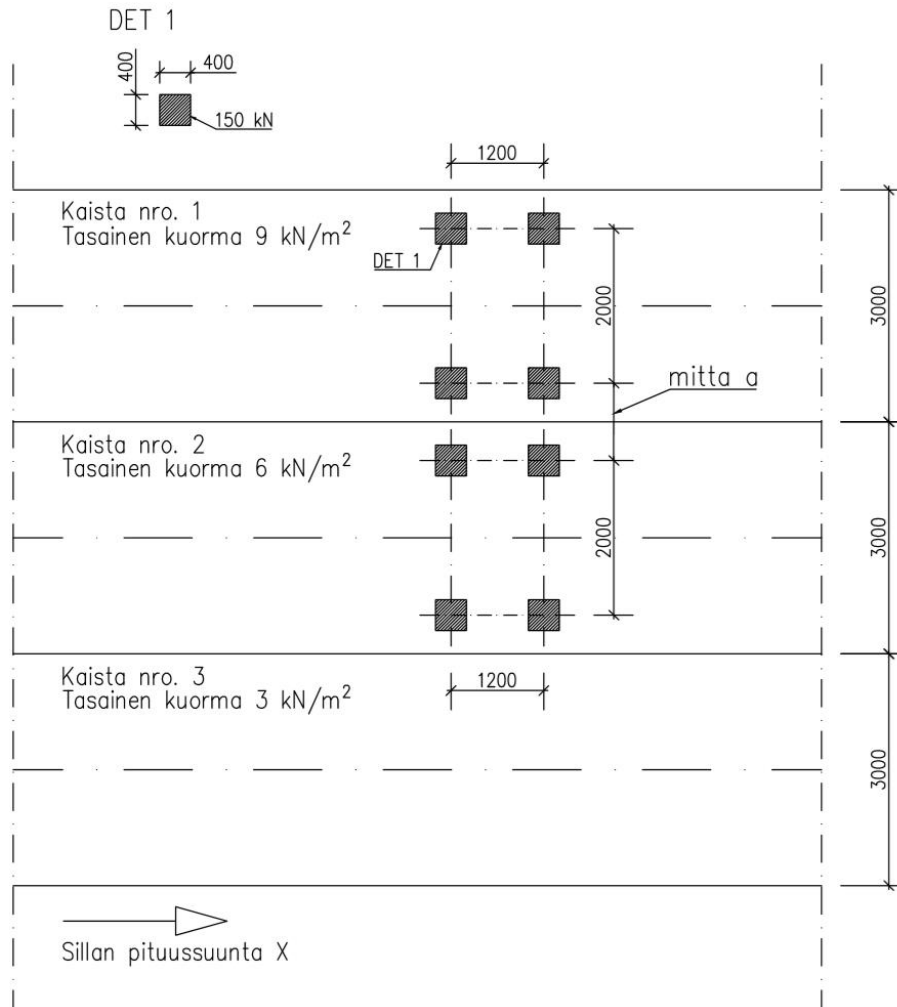
### LM1

Kuormakaavio LM1 kattaa suurimman osan kuorma- ja henkilöautoliikenteen aiheuttamista kuormituksista, ja sitä käytetään sekä sillan pääkannattajien että sekundäärysten rakenneosien mitoituksessa. LM1 koostuu tasaisesta pintakuormasta  $\alpha_{qi} \cdot q_{ik}$  sekä telikuormista  $\alpha_{Qi} \cdot Q_{ik}$ . Telikuorma koostuu kahdesta akselikuormasta, joiden akseliväli on 1,2 m. Akseli muodostuu kahdesta pyöräkuormasta, joiden etäisyys on 2 m ja vaikutusala  $0,4 \cdot 0,4 \text{ m}^2$ . Telikuormat sijoitetaan eri kuormakaistoille taulukon 1 mukaisesti. Taulukossa annetut ominaisarvot sisältävät dynaamisen suurennuskertoimen.  $\alpha_{qi}$  ja  $\alpha_{Qi}$  ovat sovituskertoimia. (SFS-EN 1991-2 2009, 30; NCCI 1 2014, 10–11.)

TAULUKKO 1. Kuormakaavion LM1 ominaisarvot (NCCI 1 2014, 11, muokattu)

Sijainti	Yleiset tied			
	Telikuorma		UDL (pintakuorma)	
	$\alpha_{qi}$	$2 \times \alpha_{Qi} \times Q_{ik} \text{ (kN)}$	$\alpha_{qi}$	$\alpha_{qi} \times q_{ik}/q_{rk} \text{ (kN/m}^2\text{)}$
Kaista nro 1	1,0	$2 \times 300$	1,0	9
Kaista nro 2	1,5	$2 \times 300$	2,4	6
Kaista nro 3	0	-	1,2	3
Muut kaistat	-	-	1,2	3
Kaistojen ulkopuolinen alue ( $q_{rk}$ )	-	-	1,2	3

Kuvassa 1 on esitetty SFS-EN 1991-2 (2009, 32) mukainen esimerkki kuormakaavion LM1 kuormien sijoittelusta. Telikuormat sijaitsevat päällysrakenteita tarkasteltaessa kuormakaistan keskellä (NCCI 1 2014, 11). Sekundääristen rakenneosien epäedullisinta vaikutusta haettaessa vierekkäisten kuormakaistojen telikuormat voidaan sijoittaa myös lähemmäksi toisiaan siten, että kuvassa oleva mitta  $a$  telikuormien välillä on kuitenkin vähintään 0,5 metriä (SFS-EN 1991-2 2009, 32).



KUVA 1. Esimerkki kuormakaavion LM1 sijoittelusta

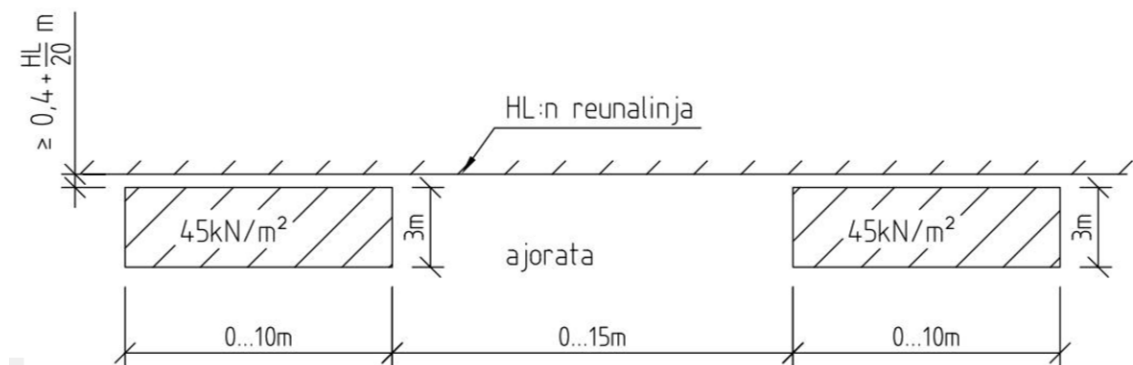
## LM2

Kuormakaavio LM2 edustaa normaalista liikenteestä aiheutuvia dynaamisia vaikutuksia lyhyissä rakenneosissa. LM2 koostuu yksittäisestä akselikuormasta  $\beta_Q \cdot Q_{ak}$ , jossa  $Q_{ak}$  on  $400 \text{ kN}$  sisältäen dynaamisen suurennusvaikutuksen. Liikuntasaumojen vieressä käytetään lisäksi dynaamista lisäsuurennuskerrointa. Suomessa sovituskertoimen  $\beta_Q$  arvo on  $1,0$ . LM2:ssa akseli koostuu kahdesta  $2 \text{ m}$ :n etäisyydellä toisistaan olevasta pyöräkuormasta, joiden vaikutuspinta-ala on  $0,35 \cdot 0,6 \text{ m}^2$ . LM2:n suurempi kuorman vaikutusala edustaa paripyörää ja on normaalisti määräävä esimerkiksi ortotrooppiselle kansilaatalle.

Yksittäinen akseli voi vaikuttaa missä tahansa ajoradan ja päällystettyjen pientareiden alueella. Jos koko akseli ei mahdu tarkasteltavan rakenteen kohdalle, sitä voidaan kuormittaa vain toisella pyöräkuormalla, jolloin yksittäisen pyöräkuorman arvo on 200 kN. (SFS-EN 1991-2 2009, 30, 33–34; NCCI 1 2014, 11.)

### LM3

Kuormakaavio LM3 edustaa ylliraskasta erikoiskuormaa, esimerkiksi teollisuuden kuljetuksia. LM3:lla tarkastellaan sillan pääkannattajat, sekundääriset rakenneosat sekä alusrakenteiden kantavuus. Kuvassa 2 on NCCI 1:ssä määritetty kuormituskaavio LM3, jolla kuormitetaan yhtä kuormakaistaa kerrallaan. Kuvan 2 tasaisesti jakautuneita kuormia käytetään Suomessa aina yleisten teiden silloilla, ellei hankekohtaisesti toisin määritetä. Hankekohtaisesti sovittuna voidaan käyttää myös esimerkiksi EN 1991-2:n liitteessä A määritellyjä LM3:n vakiokaavioita. (SFS-EN 1991-2 2009, 30; NCCI 1 2014, 12.)



KUVA 2. NCCI 1:n määrittelemä kuormakaavio LM3 (NCCI 1 2014, 12)

### LM4

Kuormakaavio LM4 edustaa tungoskuormaa, ja sen käyttö määritellään hankekohtaisesti. LM4:n kuormana on tasaisesti jakautunut kuorma  $5 \text{ kN/m}^2$ , joka sisältää dynaamisen suuren vaikutuksen. Kuorma jaetaan sillan pituus- ja poikkisuunnassa siten, että saavutetaan määräävä vaikutus. (SFS-EN 1991-2 2009, 34; NCCI 1 2014, 12.) Kuormituskaavio LM4 saattaa tulla määrääväksi esimerkiksi erittäin suurilla silloilla. Tavanomaisille suomalaisille siltatyypeille sillä ei ole määräävää vaikutusta. (Saarivirta 2006, 41.)

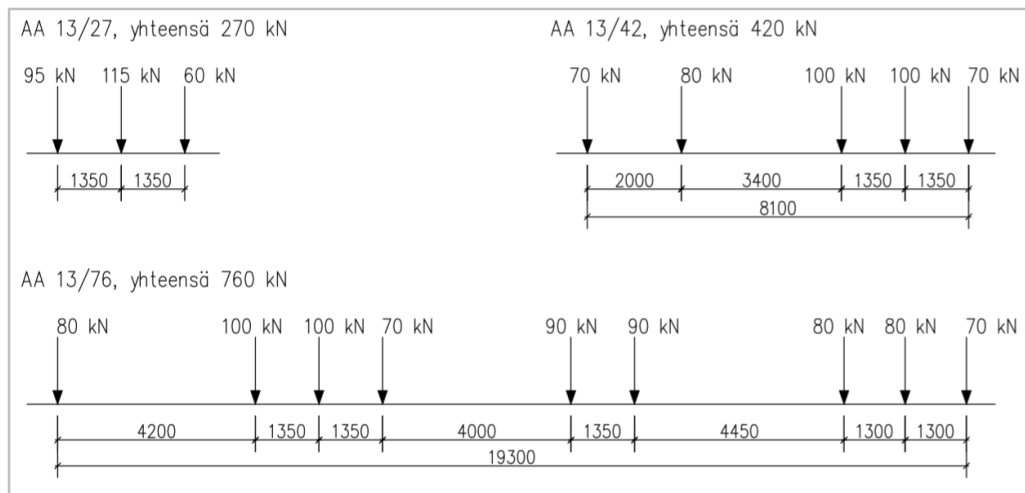
## **Kuormitusyhdistelyt**

Pystysuuntaisista liikennekuormista muodostetaan yhdessä vaakasuuntaisten liikennekuormien kanssa kuormaryhmiä. Kuormaryhmiä muodostettaessa kuormien arvot kerrotaan yhdistelykertoimilla. Kuormaryhmiä on tieliikenteen silloille yhteensä 6 kappaletta (gr1a...gr5). Murtorajatila- ja käyttörajatilamitoitusten kuormitusyhdistelyissä käsitellään näitä muodostettuja kuormaryhmiä yksittäisinä kuormina ja yhdessä kuormitusyhdistelyssä voi esiintyä vain yksi kuormaryhmä kerrallaan. (NCCI 1 2014, 13.) Koska vaakasuuntaisia kuormia ei käsitellä tässä opinnäytetyössä, jätetään myös kuormaryhmien ja kuormitusyhdistelyjen käsittely maininnan asteelle.

### **2.3 Olemassa olevien siltojen kantavuustarkastelu**

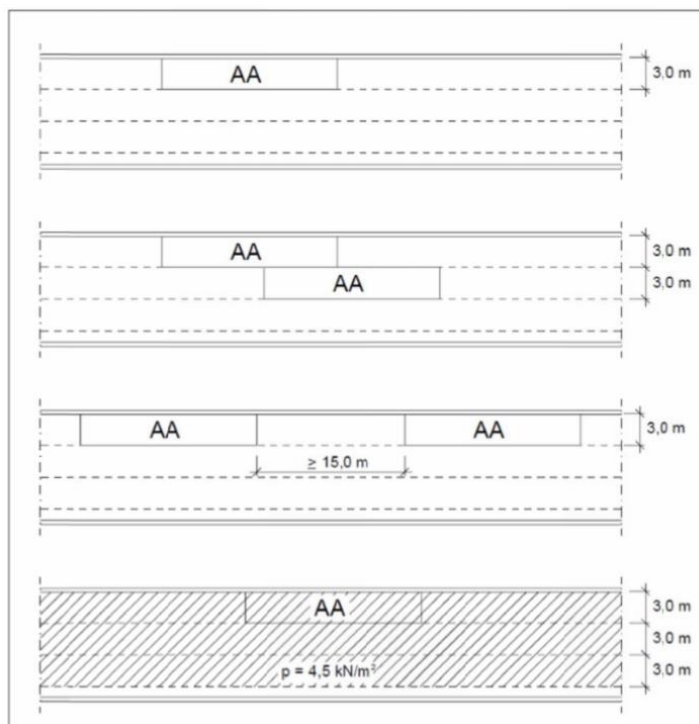
Liikenneviraston Siltojen kantavuuslaskentaohje -julkaisu määrittelee liikenteen pystysuuntaiset kuormat tarkasteltaessa olemassa olevan sillan kantavuutta. Kyseiset kuormat poikkeavat edellisessä luvussa esitettyjen uudissiltojen kuormakaavioista, ja varmuustaso on alhaisempi kuin uusien siltojen mitoituksessa. Kantavuuslaskentaohjeessa käsitellään kahdenlaisia kuormakaavioita: ajoneuvoasetuksen mukaisia kuormakaavioita ja erikoiskuljetuskaavioita. Mikäli silta ei kestä ajoneuvoasetuksen mukaisia kuormia, asetetaan sillalle painorajoitus. Erikoiskuljetuskaavioita käytetään määritettäessä suurinta sallittua akselipainoa, jonka silta kestää. Sen avulla arvioidaan sillan todellinen kantokyky erikoiskuljetuksille. Erikoiskuljetuksella tarkoitetaan ylimitallista tai ylliraskasta kuljetusta, ja niille on aina haettava lupa. (Siltojen kantavuuslaskentaohje 2016, 10–11.) Tässä työssä ei käsitellä erikoiskuljetuskaavioita.

Ajoneuvoasetuksen mukaiset kuormakaaviot on valittu siten, että ne edustavat mahdollisimman hyvin suurimpia Suomen teillä sallittuja akseli- ja kokonaispainoja sekä ajoneuvojen todellisia akselivälejä. Kuormakaaviossa käytettyjen kuormakaistojen leveys on 3 metriä. Sillan pituussuunnassa renkaan kosketuspinta-ala on 0,2 metriä ja poikkisuunnassa 0,6 metriä. Pyörien keskilinjojen etäisyys ajoneuvon leveysuunnassa on 1,8 metriä. Pistekuormakaavioiden lisäksi siltaa voi kuormittaa tasainen kuorma  $4,5 \text{ kN/m}^2$ . (Siltojen kantavuuslaskentaohje 2016, 25–26.) Kuvassa 3 on Siltojen kantavuuslaskentaohjeen (2016, 26) mukaiset kuormakaaviot, jotka vastaavat vuonna 2013 voimaan tulleen ajoneuvoasetuksen sallimia suurimpia akselipainoja. Kuvan kuormat ovat siis akselikuormia, jotka jakautuvat kahdeksi pyöräkuormaksi.



KUVA 3. Ajoneuvoasetuksen 2013 mukaiset kuormakaaviot akselikuormille

Kuvan 3 mukaiset kuormakaaviot sijoitetaan sillalle kuvassa 4 olevien periaatteiden mukaisesti. Rakenneosille haetaan määrävimmän vaikutuksen antava sijoittelu. Sillalla on samaan aikaan korkeintaan kaksi kuvan 3 kuormakaavioista. Ne voivat sijaita vierekkäisillä kaistoilla rinnakkain. Jos kuormakaaviot sijoitetaan samalle kaistalle, on niiden etäisyys vähintään 15 metriä. Kuvan 4 alimmassa kuormakaavion sijoittelussa siltaa kuormittaa yksi kuormakaavioista sekä tasainen kuorma  $4,5 \text{ kN/m}^2$ . (Siltojen kantavuuslaskentaohje 2016, 26.)



KUVA 4. Ajoneuvoasetuksen mukaisten kuormakaavioiden sijoitteluperiaatteet sillalla (Siltojen kantavuuslaskentaohje 2016, 27)

Ajoneuvoasetuksen mukaisille kuormakaavioille lasketaan sysäyskerroin, joka ottaa huomioon liikennekuormien dynaamisuuden. Siltojen kantavuuslaskentaohjeen (2016, 26–27) mukaan tarkasteltaessa muiden rakenneosien kuin massiivisten alusrakenteiden kantavuutta tai geoteknistä kantavuutta, kerrotaan jokainen akselikuorma sysäyskerroimella. Sysäyskerroin  $\Phi$  lasketaan kaavalla

$$\Phi = 1,40 - 0,006 * L \geq 1,10, \quad (1)$$

jossa  $L$  on tarkasteltavan osan jännemitta tai ulokkeen pituus metreinä. Puupalkkisilloille ja arvioitaessa puupaalujen geoteknistä kantavuutta, sysäyskerroin lasketaan kaavalla

$$\Phi = 1,20 - 0,003 * L \geq 1,10 \quad (2)$$

(Siltojen kantavuuslaskentaohje 2016, 26–27.)

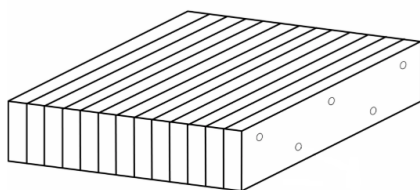
### 3 PUISEN KANSILAATAN RAKENTEELLINEN TOIMINTA

#### 3.1 Siltojen puiset kansilaatat

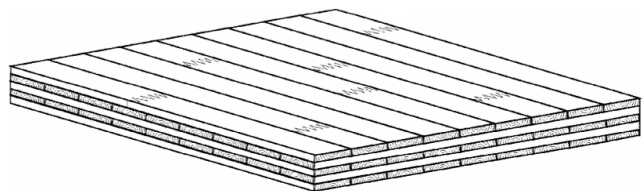
Puusillan kansirakennetta voidaan käyttää kahteen päätarkoitukseen: kantamaan kuormitusta sekä suojaamaan alapuolisia pääkannattajia säärasitukselta. Kansi jakaa liikenteestä aiheutuvat pistemäiset pyöräkuormat pääkannattajille. Kansi voidaan myös suunnitella toimimaan levynä, jolloin sitä voidaan hyödyntää pääkannattajien jäykisteenä. Tällöin kansi kykenee siirtämään myös vaakasuuntaisia kuormia, kuten ajoneuvojen jarrutuskuormia ja tuulikuormia. (Puurakenteet - STEP 2 1998, 273.) Kannen pääkannattajia säärasituksilta suojaava vaikutus perustuu kansirakenteen tiiveyteen sekä kansiulokkeen pituuteen.

Sillan puurakenteinen lamellikansi kootaan syrjällään tai lappeellaan olevista lamelleista, jotka yhdistetään toisiinsa mekaanisilla liittimillä tai liimaamalla. Kansilaatta voidaan koota myös useammasta lamellikerroksesta, jolloin lamellien syysuunta vaihtelee kerroksittain. Tällöin puhutaan ristiinlaminoidusta kansilaatasta. Kerrosten syysuunta on joko kohtisuorassa tai eri kulmissa toisiinsa nähden. (SFS-EN 1995-2 2004, 8–9.) Kannen lamellit voidaan sijoittaa poikittain pääkannattajien päälle, kuten tämän työn luvussa 4.1 esiteltävässä Tervassillassa. Kannen lamellit voidaan sijoittaa myös pitkittäin pääkannattajien väliin.

Kuvassa 5 on kaksi esimerkkiä puisesta kansilaatasta. Tässä työssä käsiteltävän Tervassillan syrjälankkukannen periaate on sama kuin kuvan 5 vasemmanpuoleisessa kansirakenteessa. Kuvan oikeanpuoleinen kansi kuvaa CLT-elementeistä koottua kansirakennetta. CLT-kansirakennetta käsitellään tarkemmin luvussa 8.



Naula- tai ruuvilaminoitu lamellikansi



Liimaamalla ristiin laminoitu kansilaatta

KUVA 5. Eri tavoin koottuja puisia kansilaattoja (SFS-EN 1995-2 2004, 9, muokattu)



Lamelleista kootut kansilaatat voidaan myös esijännittää, jolloin kansilaatan toiminta perustuu lamellien väliseen kitkaan. Pitkäaikaisten esijännitysvoimien tulee olla riittävän suuria estämään lamellien väliset liukumukset. (NCCI 5 2013, 45.) Poikittaisjännitettyssä laattasillassa vierekkäin ladotut lankut tai liimapuupalkit on puristettu esijännitysvoiman avulla yhtenäiseksi laataksi kuvan 6 mukaisesti. Poikittaisjännitettyssä palkkisillassa kansilankutus sijaitsee pääkannattajina toimivien liimapuupalkkien välissä.



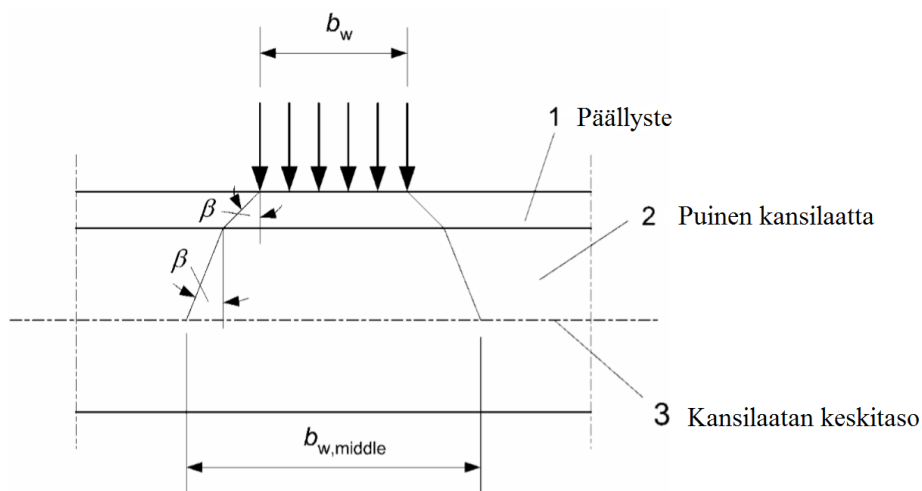
KUVA 6. Poikittaisjännitetyn laattasillan periaate (Kevyt ja kestävä puusilta 2015, 4, muokattu)

Puinen kansilaatan päälle voidaan tehdä vesieristys sekä kulutuskerros esimerkiksi kumi-bitumiasfaltilla. Kansi voidaan jättää myös päällystämättä, mikäli puulamelleilla on riittävä kulutuskestävyys ja kansilamellien kulumisen otetaan huomioon kannen suunnittelun käyttöiän määrittämisessä. Mitoitettaessa päällystämätöntä kansilaattaa sen rakennekorkeutena käytetään sitä sallittua minimikorkeutta, joka johtaa rakenteen uusimiseen (SFS-EN 1995-2 2004, 15).

Siltojen rakenteissa käytettävä puutavara kyllästetään A-luokkaan. Suolakyllästettyjen puuosien mitoitus tehdään tapauskohtaisesti joko käyttöluokassa 2 tai 3. Mitoitus käyttöluokassa 2 edellyttää, että rakenneosat on suojattu myös muulla rakenteellisella tavalla suorilta vesikosketukselta, esimerkiksi kansilankutuksen päällystäminen kumi-bitumiasfaltilla. Kreosootilla kyllästetyt puuosat voidaan mitoittaa ilman rakenteellista suojaustakin käyttöluokassa 2 mutta biologisten haittavaikutustensa takia kreosootin käyttöä on vältettävä erityisesti pohjavesialueilla. (NCCI 5 2013, 14, 26.)

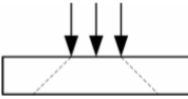
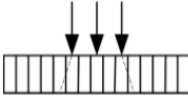
### 3.2 Pystysuorien pistekuormien jakautuminen

Pystysuorien pistekuormien vaikutus tarkastellaan sillan kansilaatan korkeuden keskitasossa. Kuorman oletetaan jakaantuvan keskilinjalle kulmassa  $\beta$ , joka riippuu materiaalista ja puun syiden suunnasta. Kuvassa 7 esitetään pintakuorman kuormitusleveyden  $b_w$  jakaantuminen rakennekerroksissa kulmassa  $\beta$ . Päälystekerrokseen vaikuttava pintakuorma on jakautunut kansilaatan keskitasoon leveydelle  $b_{w,middle}$ . Jakaantumiskulman  $\beta$  arvot saadaan taulukosta 2. Jakaantumiskulma  $\beta$  on  $45^\circ$  muissa tapauksissa kuin lamellikannessa syitä vastaan kohtisuorassa suunnassa, jolloin jakaantumiskulma  $\beta$  on  $15^\circ$ .



KUVA 7. Päälysteeseen vaikuttavan pintakuorman jakautuminen kansilaatan keskitasoon (SFS-EN 1995-2 2004, 16, muokattu)

TAULUKKO 2. Jakautumiskulman  $\beta$  arvot eri materiaaleille (SFS-EN 1995-2 2004, 17)

Päälyste (standardin EN 1991-2 kohdan 4.3.6 mukaisesti)		$45^\circ$
Laudat ja lankut		$45^\circ$
Laminoidut puiset kansilaatat		$45^\circ$
— syiden suunnassa		$45^\circ$
— syitä vastaan kohtisuorassa		$15^\circ$
Vaneri ja ristiin laminoidut kansilaatat		$45^\circ$

### 3.3 Kannen rakennemallin valinta

Lamelleista koottu, puinen kansilaatta analysoidaan SFS-EN 1995-2:n (2004, 16) mukaan jollakin seuraavista menetelmistä:

- käyttämällä ortotrooppisten laattojen teoriaa
- mallintamalla laatta arinana
- käyttämällä yksinkertaistettua menettelyä.

#### Ortotrooppisten laattojen teoria

Puu on ortotrooppinen materiaali eli sen ominaisuudet syysuuntaan ovat erilaiset kuin kohtisuoraan syitä vasten. Ortotrooppisten laattojen teoriassa tarkastellaan laattaa, jolla on erilaiset jäykkyys- ja lujuusominaisuudet eri suunnissa. Taulukossa 3 on SFS-EN 1995-2:n (2004, 16) määrittelemät jäykkyysominaisuuksien suhdeluvut naulaamalla, liimaamalla ja esijännityksen avulla kootuille puisille lamellikansille. Taulukossa  $E$  kuvaa materiaalin kimmokerrointa ja  $G$  liukukerrointa. Alaindeksi  $0$  kuvaa kyseistä jäykkyysominaisuutta syiden suunnassa ja alaindeksi  $90$  syitä vastaan kohtisuorassa suunnassa. Esimerkiksi taulukon  $E_{90,mean}/E_{0,mean}$  -sarake antaa arvon puun kimmokertoimelle syitä vastaan kohtisuorassa suunnassa suhteessa kimmokertoimeen syiden suunnassa.

TAULUKKO 3. SFS-EN 1995-2:n mukaiset jäykkyysominaisuudet puisille lamellikansille

Kansilaatan tyyppi	$E_{90,mean}/E_{0,mean}$	$G_{0,mean}/E_{0,mean}$	$G_{90,mean}/G_{0,mean}$
Naulalaminoitu	0	0,06	0,05
Jännittäen laminoitu			
– sahattu	0,015	0,06	0,08
– höylätty	0,020	0,06	0,10
Liimattu	0,030	0,06	0,15

#### Arinamalli

Rakennemallina arina koostuu samassa tasossa sijaitsevista ristikkäisistä palkeista, jotka on yhdistetty toisiinsa momenttijäykästi. Kaikki kuormitukset arinamallissa vaikuttavat tasoa vastaan kohtisuorassa suunnassa. Koska palkit on kytketty toisiinsa, yhdelle palkille tuleva rasitus aiheuttaa rasituksia myös muihin palkkeihin. Arinamallin tuentoina käytetään pistemäisiä tukia palkkien päissä. (Saarivirta 2006, 41.)

### Yksinkertaistettu menettely

EN 1995-2:n kappaleessa 5.1.3 määritetään menettely, jonka avulla kansirakenne voidaan analysoida kahta edellistä tapaa yksinkertaisemmin. Yksinkertaistetussa menettelyssä kansilaatta korvataan lamellien suunnassa yhdellä tai useammalla palkilla, joiden tehollinen leveys lasketaan kaavalla

$$b_{ef} = b_{w,middle} + a, \quad (3)$$

jossa  $b_{w,middle}$  on kuormitusleveys laatan korkeuden puolivälissä kuvan 7 (sivu 18) mukaisesti. Mitan  $a$  arvot saadaan SFS-EN 1995-2:n (2004, 17) mukaisesta taulukosta 4.

TAULUKKO 4. Mitta  $a$  eri kansilaattarakenteissa SFS-EN 1995-2:n mukaan

Kansilaattarakenne	Mitta $a$ [m]
Naulalaminoitu	0,1
Jännittäen laminoitu tai liimattu	0,3
Ristiin laminoitu	0,5

Lasketaan Tervassillan syrjälankkukannen korvaavien palkkien tehollinen leveys  $b_{ef}$ . Silan naulalaminoitun syrjälankkukannen lamellien poikkileikkauskoko on  $50 \times 150 \text{ mm}^2$ . Tervassillan koekuormituksessa käytettyjen ajoneuvojen pyöräkuorman kosketuspinnan leveys sillan pituussuunnassa todettiin olevan noin 200 mm. Tämä mitta kuvaa siis kuormituspinnan leveyttä kannen lamellien syysuuntaa vastaan kohtisuorassa suunnassa. Sivun 18 taulukosta 2 saadaan jakaantumiskulman  $\beta$  arvoksi  $15^\circ$ . Pyöräkuorman kannen puoliväliin jakautuneen leveyden arvo  $b_{w,middle}$  saadaan tällöin kaavalla

$$b_{w,middle} = b_w + 2 * \left( \tan \beta * \frac{h}{2} \right) = b_w + \tan \beta * h, \quad (4)$$

jossa  $b_w$  on pintakuorman kuormitusleveys,  $\beta$  on jakaantumiskulma ja  $h$  on syrjälankkukannen korkeus. Tervassillan syrjälankkukannen puoliväliin jakautuneen pyöräkuorman arvoksi  $b_{w,middle}$  saadaan siten

$$b_{w,middle} = 200 \text{ mm} + \tan 15^\circ * 150 \text{ mm} = 240,19... \text{ mm} \approx 240 \text{ mm}$$

Naulalaminoidulle kansilaatulle mitaksi  $a$  saadaan taulukon 4 mukaan 0,1 m eli 100 mm. Teholliseksi leveydeksi saadaan siten kaavalla (3) laskettuna

$$b_{ef} = 240 \text{ mm} + 100 \text{ mm} = 340 \text{ mm}$$

Yksinkertaistetulla menettelyllä tarkasteltuna Tervassillan syrjälankkukantta edustavien palkkien tehollinen leveys on siis 340 mm. Sillan FEM-mallissa kansilankutus mallinnetaan palkkielementeillä, joiden leveytenä käytetään kyseistä arvoa. FEM-mallia käsitellään tarkemmin luvussa 6.

### 3.4 Kuorman jakautuminen rakennesysteemissä

Kuorman jakautumisessa tarkastellaan yhteen suuntaan kantavia pääkannattajia, jotka on yhdistetty toisiinsa sellaisilla sekundäärisillä rakenneosilla, joilla on kyky siirtää kuormaa pääkannattajien kesken. Sekundäärisinä rakenneosina voidaan tarkastella esimerkiksi pääkannattajia yhdistävää levytystä tai laudoitusta. Yksittäisen pääkannattajan kantavuus tällaisen rakennesysteemin osana on suurempi verrattuna pääkannattajan kantavuuteen erillisenä rakenteena. Sekä piste- että tasaiset kuormat jakautuvat sekundääriskannattajien avulla mutta vaikutus on selvempi pistekuormien tapauksessa. (Puurakenteet - STEP 1 1996, B16/1.)

Kuorman jakautumisen perusteella pääkannattajien suunnittelulujuutta voidaan kasvattaa. Kuorman jakautuessa useammalle pääkannattajalle on pienempi todennäköisyys, että rakennesysteemin heikoin lenkki osuisi suurimpien jännitysten alueelle. Lisäksi puurakenteen lujuuden ja jäykkyyden välillä on positiivinen korrelaatio eli lujuuden kasvaessa myös jäykkyys kasvaa. Tämä korrelaatio mahdollistaa sen, että rakennesysteemin jäykempi osa kantaa suhteessa suuremman osan kokonaiskuormasta kuin vähemmän jäykkä osa. Kuormat siis jakautuvat jäykkyyksien suhteessa, jolloin heikommille rakenneosille tulee vähemmän kuormaa kannettavaksi. Puu ei ole materiaalina tasalaatuinen, joten myös sen materiaaliominaisuuksissa esiintyy hajontaa. Kuormien jakautuminen pienentää materiaaliominaisuuksien hajonnan vaikutusta systeemin kantokykyyn. (Puurakenteet - STEP 1 1996, B16/1.)

Eurokoodi 5:ssä kuormien jakautuminen rakennesysteemissä otetaan huomioon korottamalla rakenteen kestävyysominaisuuksia kuorman jakoluvulla  $k_{sys}$ . Liikenneviraston NCCI 5 -ohjeessa käsitellään kuorman jakautumista liimapuisissa palkkisilloissa. NCCI 5:n (2013, 44) mukaan sillan sekundäärisinä poikittaisrakenteina voidaan tarkastella syrjälantutusta, poikkipalkkeja, liimapuista lamellikantta ja liittorakenteessa betonilaattaa. Kertoimelle  $k_{sys}$  määritellään eri arvot sen mukaan, tarkastellaanko pääkannattajien vai kansilaatan kestävyyttä.

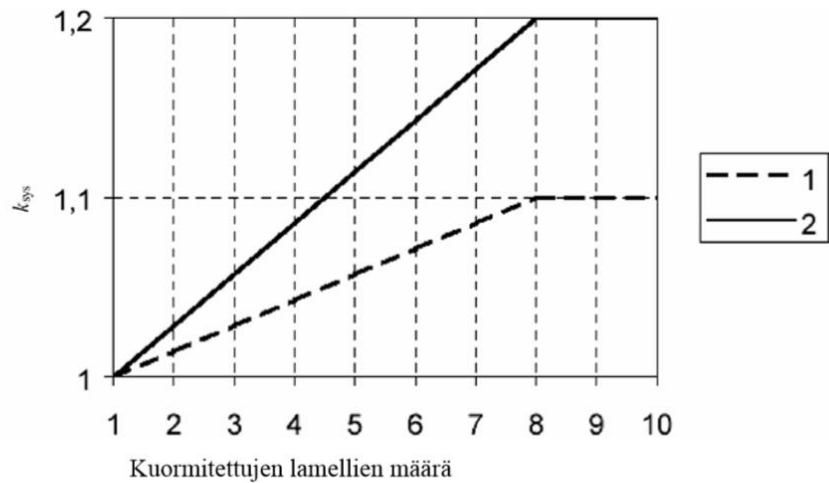
### **Kuorman jakoluku $k_{sys}$ pääkannattajien kestävyyttä tarkasteltaessa**

Pääkannattajina toimivien liimapuupalkkien lujuuksia voidaan korottaa kertoimella  $k_{sys} = 1,1$ , jos seuraavat ehdot toteutuvat:

- Pääkannattajat ovat samanlaisia, sijaitsevat vakiovälein eikä pääkannattajien keskinäinen jako ylitä 1200 mm:ä.
- Yhdistettäviä pääkannattajia on vähintään 4 kappaletta, kun sekundäärirakenne ei sisällä jatkoksia ja vähintään 6 kappaletta, kun poikittaisrakennetta on jatkettu. Liimattua lamellikansielementtiä voidaan tarkastella jatkamattomana.
- Yksittäiset, jatkamattomat sekundäärirakenneosat ovat vähintään 2-aukkoisia, jatkuvia rakenneosia, ja ne yhdistävät vähintään kolme pääkannattajaa.
- Vierekkäisten poikittaispalkkien jatkokset eivät sijaitse samalla kohtaa.
- Poikittaispalkkien keskinäinen etäisyys on pienempi kuin pääkannattajien keskinäinen etäisyys.
- Tarkastelualueen rajoittavat poikittaisrakenteen vapaat reunat tai sillan pituus-suuntainen koko poikittaisrakenteen jatkoslinja.
- Kuormitus on lyhytaikaista tai hetkellistä. (NCCI 5 2013, 44.)

### **Kuorman jakoluku $k_{sys}$ kansilaatan kestävyyttä tarkasteltaessa**

Lamellirakenteisten puukansien kestävyyttä tarkasteltaessa lamellien taivutus- ja leikkauslujuutta voidaan korottaa  $k_{sys}$  -kertoimella (SFS-EN 1995-2 2004, 19). Kuormanjakoluvun  $k_{sys}$  arvot määritetään kuvan 8 mukaisesti.

**Selite**

1 Nauloin tai ruuvein yhdistetyt lamellit

2 Esijännittämällä tai liimaamalla yhdistetyt lamellit

Kuva 8. Puisen lamellikannen  $k_{sys}$  -kertoimen arvot (SFS-EN 1995-1-1 2014, 49)

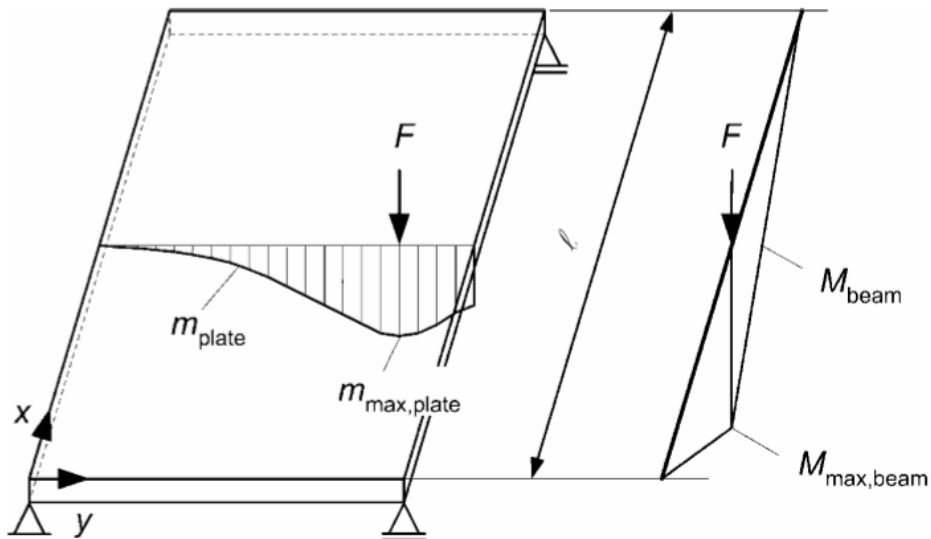
$k_{sys}$ -kertoimen arvoon vaikuttaa lamellien liitostapa sekä kuormittuvien lamellien lukumäärä.  $k_{sys}$  saa arvoja väliltä 1...1,2 ja suurin arvo saavutetaan, kun kuormittuvia lamelleja on vähintään 8. Kuormittuvien lamellien lukumäärä lasketaan kaavalla

$$n = \frac{b_{ef}}{b_{lam}}, \quad (5)$$

jossa  $b_{ef}$  on toimiva leveys ja  $b_{lam}$  on yhden lamellin leveys. Toimiva leveys  $b_{ef}$  lasketaan kaavalla

$$b_{ef} = \frac{M_{max,beam}}{m_{max,plate}}, \quad (6)$$

jossa  $M_{max,beam}$  on laattaa edustavan palkin maksimitaivutusmomentti ja  $m_{max,plate}$  on laattateorian mukaan lasketun laatan maksimitaivutusmomentti kuvan 9 mukaisesti. (SFS-EN 1995-2 2004, 19.)



KUVA 9. Toimivan leveyden  $b_{ef}$  määrittämiseen tarvittavat maksimimomentit (SFS-EN 1995-2 2004, 19)

$b_{ef}$  tarkastelee kansilaatan toimivaa leveyttä lamellien suunnassa. Toisin sanoen se kuvaa lamellien suunnassa sitä leveyttä, jolle kuorman vaikutus jakautuu.  $b_{ef}$  voidaan määrittää myös yksinkertaistetulla menettelyllä (SFS-EN 1995-2 2004, 19). Yksinkertainen menettely käsiteltiin luvussa 3.3, jossa  $b_{ef}$  laskettiin kaavalla (3).

Kansilaatan taivutuslujuuden  $f_{m,d,deck}$  ja leikkauslujuuden  $f_{v,d,deck}$  mitoitusarvot lasketaan kaavoilla

$$f_{m,d,deck} = k_{sys} * f_{m,d,lam} \quad (7)$$

$$f_{v,d,deck} = k_{sys} * f_{v,d,lam} \quad (8)$$

joissa  $k_{sys}$  on kuorman jakoluku,  $f_{m,d,lam}$  on lamellien taivutuslujuuden mitoitusarvo ja  $f_{v,d,lam}$  on lamellien leikkauslujuuden mitoitusarvo. (SFS-EN 1995-2 2004, 19).



## 4 TERVASSILLAN KOEKUORMITUS

### 4.1 Tervassilta

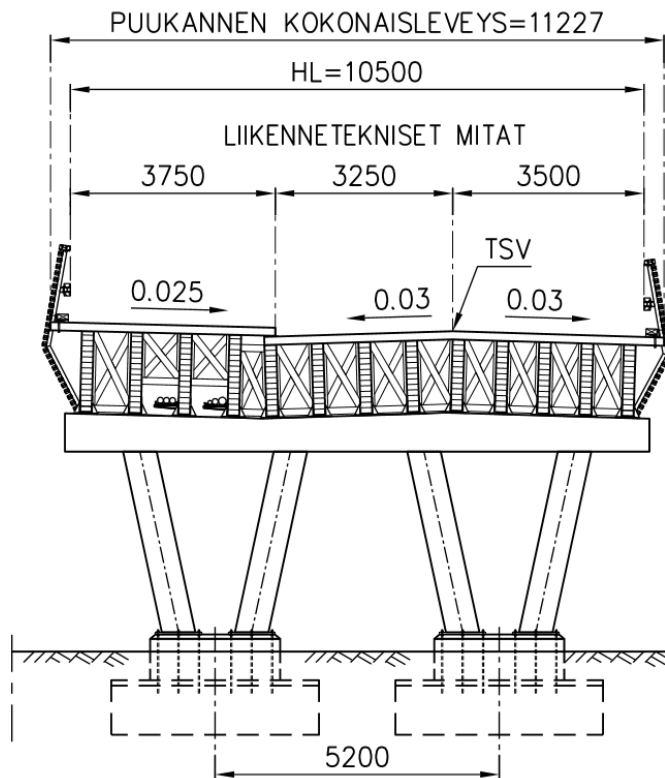
Tervassilta valmistui Tampereen Vuoreksen kaupunginosaan kesällä 2015. Sillä on kaksi kaistaa ajoneuvoliikenteelle ja yksi kevyelle liikenteelle. Silta on kaksiaukkoinen liimapuinen ulokepalkkisilta, jonka kansirakenteen muodostaa päällystämätön syrjälankutus. Pääkannattajien materiaali on GL32h, jossa kirjain  $h$  tarkoittaa, että liimapuupalkit ovat homogeenisiä eli kaikki lamellit ovat samaa lujuusluokkaa. Kevyen liikenteen kaistan kohdalla pääkannattajat ovat korkeampia kuin ajoratojen kohdalla. Kannen syrjälankut ovat sahatavaraa C30. Materiaalien ominaislujuudet on kirjattu liitteeseen 1. Silta on perustettu maanvaraisille anturoille. Maatuet T1 ja T3 ovat teräsbetonirakenteisia. Välituen T2 muodostaa liimapuupilareihin tukeutuva liimapuupalkki. Sillan on suunnitellut Ville Vuorio Suunnittelukide Oy:stä. Sillan yleispiirustus ja syrjälankukannen rakennepiirustus ovat liitteessä 6. Kuvassa 10 on Tervassilta kuvattuna syksyllä 2015.



KUVA 10. Tervassilta (Kuva: Heli Viljanen 2015)

Sillan kansi muodostuu poikkileikkaukseltaan  $50 \times 150 \text{ mm}^2$  syrjälankuista, jotka on suolakyllästetty A-luokkaan. Lankut on liitetty toisiinsa ja pääkannattajiin kuumasinkityillä  $150 \times 4.5$  nauloilla. Naulaus on tehty kahdessa rivissä reunaetäisyyden ollessa 40 mm ja naularivien keskinäisen etäisyyden ollessa 70 mm lankkujen korkeuden suunnassa. Naulojen välinen etäisyys lankkujen pituussuunnassa on 290 mm. Naularivit on porrastettu

siten, että sillan pituussuunnassa joka neljännessä lankussa naulat ovat samalla kohtaa. Kuvassa 11 on sillan poikkileikkaus välituelta T2.



KUVA 11. Tervassillan poikkileikkaus välituella T2 (Tervassillan piirustukset)

Kuvassa 12 on sillan syrjälankkukansi kuvattuna syksyllä 2015. Kuva on otettu tuelta T2 tuelle T3 päin. Kuvassa vasemmalla näkyy kevyen liikenteen kaista, joka on korotettu kahdesta ajoneuvoliikenteen kaistasta.



KUVA 12. Tervassillan syrjälankkukansi (Kuva: Heli Viljanen 2015)

Taulukoon 5 on kirjattu sillan päämitat sekä pääkannattajien ja syrjälankkukannen poikileikkausmitat.

TAULUKKO 5. Tervassillan päämitat (Tervassillan piirustukset)

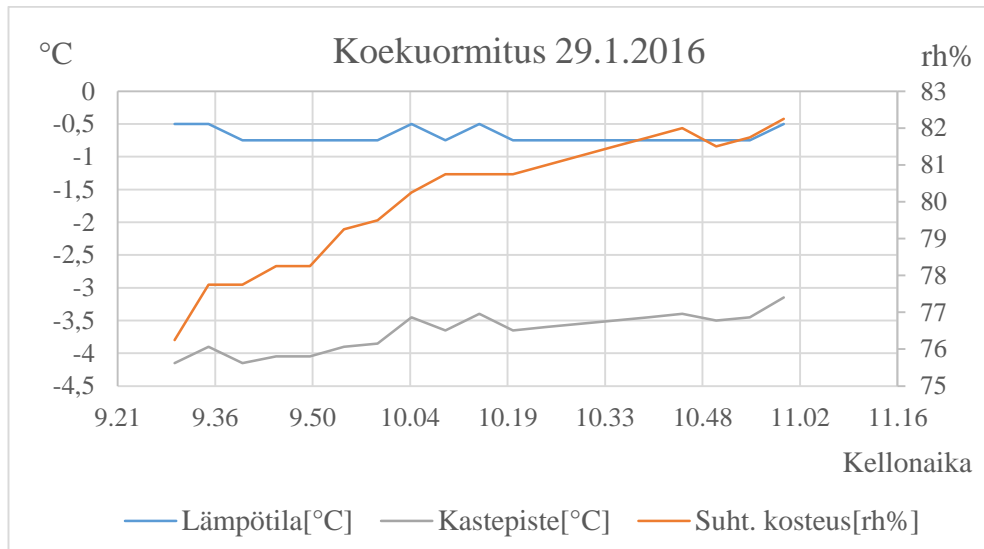
Sillan kokonaispituus	41,820 m
Hyötyleveys	10,500 m
Puukannen kokonaisleveys	11,227 m
Jännemitat	(1,5) + 19,410 + 19,410 + (1,5) m
Liikenteellinen kaistajako	3,500 + 3,250 + 3,750 m
Pääkannattajat ajoradan kohdalla	215 x 1305 mm <sup>2</sup>
Pääkannattajat kevyen liikenteen väylällä	215 x 1476 mm <sup>2</sup>
Liimapuupalkkien pituus	20 900 mm
Kannen syrjälankut	50 x 150 mm <sup>2</sup>

Tervassillalla ajoneuvoliikenteen pääsyä kevyen liikenteen kaistalle ei ole kaitein estetty, joten koko silta on mitoitettu ajoneuvoliikenteen kuormille. Sillan mitoituksessa on käytetty Liikenneviraston NCCI 1 -julkaisun 2. painoksen mukaisia kuormakaavioita LM1 ja LM2. (Vuorio 2015.) NCCI 1:n 2. painos on korvattu 3. painoksella 5.9.2014. Kuormakaavio LM3 voitiin vielä 2. painoksen aikana jättää hankekohtaisesti määritettynä tarkastelematta. Uusimmassa 3. painoksessa LM3 on määritetty tarkasteltavaksi aina yleisten teiden silloilla. Myös kuormakaavio LM1 muuttui julkaisun 2. ja 3. painoksen välillä.

#### 4.2 Koekuormituksen ajankohta

Tervassillan ensimmäinen koekuormitus järjestettiin 29.1.2016. Kuormitusajankohta määräytyi tämän opinnäytetyön aikataulun sekä mittalaitteiden kestämän lämpötila-alueen puitteissa. Liikenne sillan yli tähän ajankohtaan mennessä oli ollut pitkälti työmaaliikennettä uuden Harjanteen asuinalueen rakennustyömaille. Työmaaliikenteeseen lukeutuvat kaikenlaiset ajoneuvot henkilöautoista pitkiin ajoneuvoyhdistelmiin, joten liikenne sillan yli tammikuuhun 2016 mennessä on luultavasti ollut melko vaihtelevaa. Koska Harjanteen asuinalue on vasta rakenteilla, voidaan myös olettaa, että liikenne koekuormitusajankohtaan mennessä ei ole ollut kovin vilkasta.

Koekuormitus alkoi klo 10 ja kesti noin tunnin. Koetilanteen aikana sillan molemmissa päissä oli käynnissä liikenteenohjaus. Pääsääntöisesti sillalle pyrkivät ajoneuvot ohjattiin läheiselle kiertotielle. Muutama kuorma-auto ja yksi pidempi ajoneuvoyhdistelmä päästettiin kuormitustapausten välillä ylittämään silta, koska kapea ja jyrkkämutkainen kiertotie ei soveltunut suuremmille ajoneuvoille. Siltapaikalla mitattiin ilman lämpötilaa ja kosteutta koekuormitustilanteen ajan. Mittaustulokset on esitetty kuvassa 13.



KUVA 13. Ilman lämpötilä, kosteus ja kastepiste koekuormituksen aikana

Kuvasta 13 nähdään, että ilman lämpötilä koekuormituksen aikana oli noin  $-0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Kevyen liikenteen kaistan kannen syrjälantkkujen päälle oli muodostunut jääkerros, kuten nähdään kuvasta 14. Tammikuun 2016 koekuormitusta edelsi melko pitkä kylmän sään jakso, jolloin lämpötilat Tampereen seudulla olivat  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ :n molemmin puolin ja alimmillaan noin  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



KUVA 14. Kevyen liikenteen kaistan jäinen kansi koekuormituspäivänä (Kuva: Heli Viljanen 2016)

### 4.3 Kuormitusajoneuvot

Kuormitusajoneuvot saatiin Tampereen Infralta, jossa yhteyshenkilönä toimi työpäällikkö Jukka Hepokari. Siltaa kuormitettiin kahdella 3-akselisella, täyteen sorakuormaan lastatulla kuorma-autolla. Autojen ohjaava eli etummainen akseli oli singelipyöräinen, jolloin akselilla on vain kaksi pyörää. Kaksi muuta akselia olivat paripyöräisiä, jolloin akseli muodostuu neljästä pyörästä. Liitteen 3 sivulla 2 on kuormitusajoneuvojen ulkomitat, akselien väliset etäisyydet sekä paripyörällisen akselin renkaiden keskiölinjojen etäisyydet. Kuvassa 15 on koekuormituksessa käytetyt ajoneuvot kuvattuna kuormitustapauksen Tervassilta 01 aikana.



KUVA 15. Koekuormituksessa käytetyt ajoneuvot, kuormitustapaus Tervassilta 01 (Kuva: Heli Viljanen 2016)

Autojen tyhjät painon tiedettiin olevan 10–11 t polttoaineen määrän vaihdellessa. Autoihin lastatun sorakuorman massa punnittiin kuormauksen yhteydessä. Auton 1 kuorman massaksi saatiin 15,95 t ja auton 2 15,00 t, joten yhden auton kokonaismassaksi saatiin noin 26 tonnia. Se on myös suurin sallittu kokonaismassa 3-akseliselle autolle, jonka vetävässä akselissa on ilmajousitus ja paripyörät tai jokainen vetävä akseli on varustettu paripyörin, eikä yhdellekään akselille kohdistu suurempaa massaa kuin 9,5 t (Valtioneuvoston asetus ajoneuvojen... 407/2013). Autojen akseleihin kohdistuvia massoja ei tiedetä tarkasti mutta jakauman oletettiin olevan 8-9-9 t, joista ensimmäinen luku kuvaa ohjaavaa akselia. Tähän jakaumaan päädyttiin kuormitusajoneuvojen mittoihin perustuvalla karkealla laskelmalla sekä ajoneuvoasetuksen 2013 määrittämällä suurimmilla sallituilla akselipainoilla.

Koekuormituksen aikana sillankansi oli jäinen ja luminen, joten kuormitusajoneuvojen ajolinjat sillan poikkisuunnassa merkittiin merkintämaalilla sillan kannen lumikerrokseen. Sillan pituussuunnassa ajoneuvojen sijainti merkittiin kaiteen käsi- ja siltajohteen sidottujen huomionauhojen avulla.

#### 4.4 Mittalaitteet ja mittauspisteet

Pääkannattajien taipumat mitattiin Kyowan DTS-A-100 -siirtymäantureilla, joilla saatiin mitattua pääkannattajien alapinnan pystysuuntainen siirtymä. Mittaustaajuutena käytettiin 10 hertsiä eli taipuman arvo tallentui 10 kertaa sekunnissa. 10 Hz:n taajuus valittiin, jotta dynaamisistakin kuormitustapauksista saatiin tallennettua mittausdataa riittävän tiheästi. Yhtämittainen tallennuskapasiteetti 10 Hz:n taajuudella oli 100 sekuntia. Jokaisesta kuormitustapauksesta kerättiin dataa 100 sekunnin maksimimäärä, jolloin yhden kuormitustapauksen aikana tallentui 1000 taipuman arvoa yhdessä mittauspisteessä. Kuvassa 16 on siirtymäanturi asennettuna mittauspaikalla.



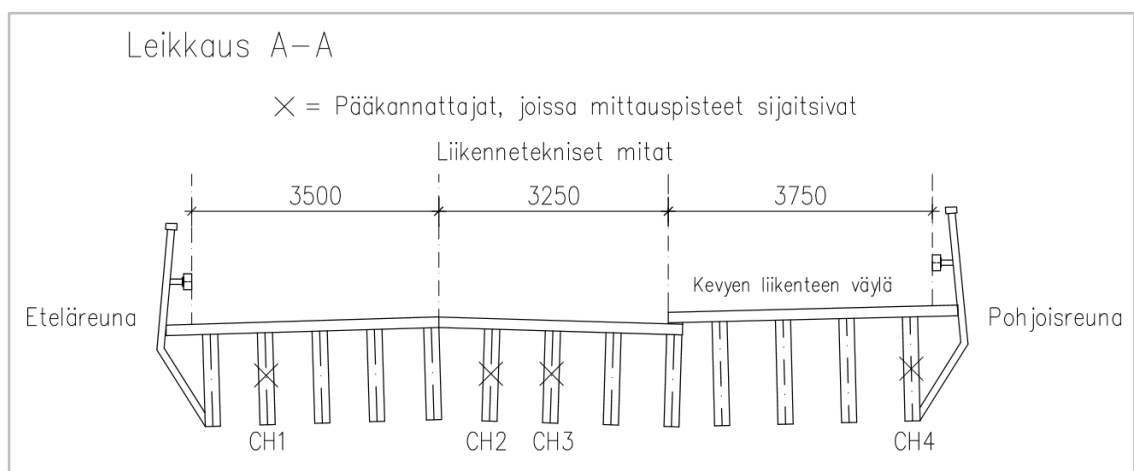
KUVA 16. Siirtymäanturi asennettuna siltapaikalle (Kuva: Heli Viljanen 2016)

Siirtymäanturit asennettiin kertopuisen telineen varaan, joka on kuvassa 17. Tampereen ammattikorkeakoulun laboratorion henkilökunta suunnitteli telineen ja rakensi sen siltapaikalle koekuormitusta edeltävänä päivänä 28.1.2016. Siirtymäanturit asennettiin paikalleen koekuormituspäivänä klo 9.

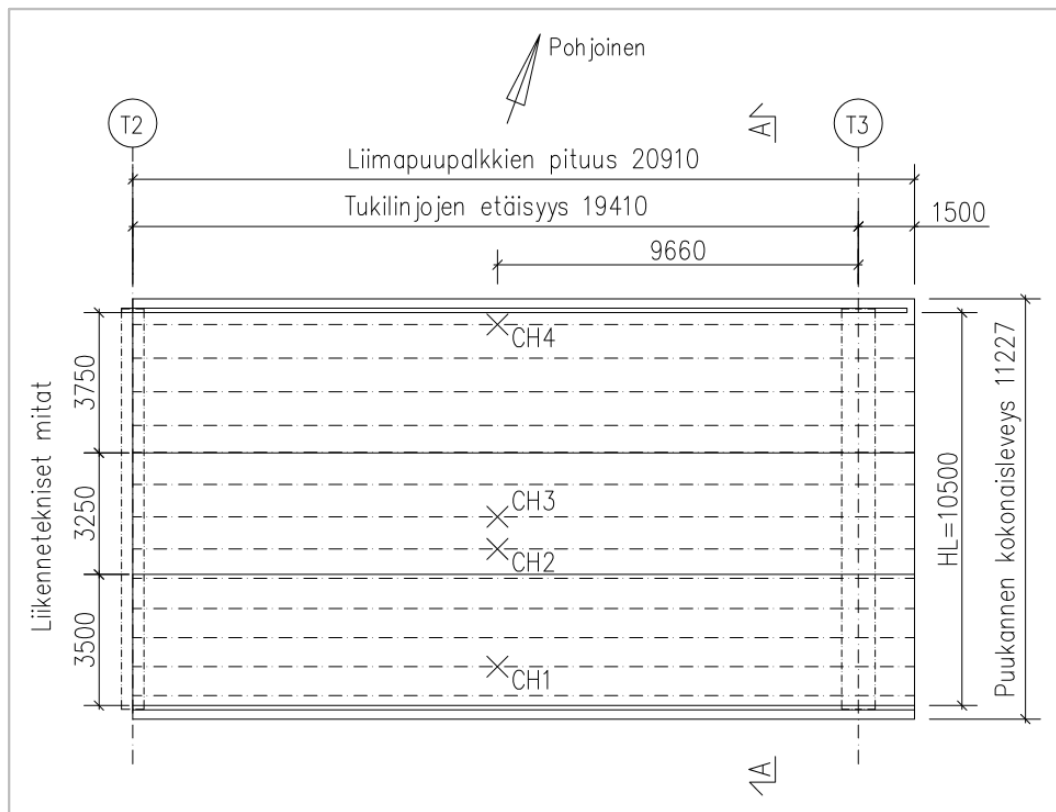


KUVA 17. Kertopuusta rakennettu teline, jonka varaan siirtymäanturit asennettiin.

Mittauspisteet sijoitettiin sellaisiin pääkannattajiin, jotka ovat suurten liikennekuormitusten alaisina. Yksi mittauspiste sijoitettiin kevyen liikenteen väylän reunimmaiseen palkkiin, joka on alttiimpana säärasituksille. Mittauspisteet nimettiin tunnuksilla CH1, CH2, CH3 ja CH4 mittauskanavien mukaan. Mittauspisteet sijaitsivat tukivälillä T2-T3 pääkannattajissa 2, 6, 7 ja 13 sillan eteläreunasta lukien. Mittalaitteet asennettiin pääkannattajien jännevälän puolivälistä lukien noin 50 mm tuelle T3 päin, koska jännevälän puolivälissä sijaitsi pääkannattajien poikkisiteet. Kuvissa 18 ja 19 näkyy mittauspisteiden sijainti sillan poikkileikkauksessa ja tasokuvassa.



KUVA 18. Tervassillan pääkannattajat, joista taipumat mitattiin



KUVA 19. Mittauspisteiden sijainti sillan tasokuvassa

#### 4.5 Kuormitustapaukset

Tervassiltaa kuormitettiin sekä staattisilla että dynaamisilla kuormilla yhteensä 10:llä eri kuormitustapauksella. Staattisissa kuormituksissa ajoneuvo ajettiin hitaasti sillalle ja pysäytettiin määrättyihin kohtiin. Ajoneuvojen asema sillalla on tarkemmin esitetty liitteen 3 kuvissa. Dynaamisissa kuormituksissa ajoneuvo ajettiin sillan yli niin, että nopeus oli tasainen koko sillan matkalla. Tasaisen ajonopeuden takaamiseksi käytettiin autojen vakionopeudensäädintä. Dynaamisten kuormitusten suunnitellut ajonopeudet olivat 20 ja 50 km/h mutta jäisen tienpinnan vuoksi Tervassilta 08 -kuormitustapaus ajettiin nopeudella 40 km/h. Yliajaminen tehtiin Vuoreksen keskustasta Harjanteen suuntaan eli tuen T3 suunnasta tuen T1 suuntaan.

Taulukkoon 6 on koottu yhteenveto koekuormitustapauksista. Taulukon Kuormitettu kaista -sarakeessa A1 ja A2 kuvaavat ajoneuvoliikenteen kaistoja, joista A1 on sillan eteläreunan puoleinen kaista. KLV tarkoittaa kevyen liikenteen väylää. Jos kuormitetun kaistan merkintä on sulkeissa, ajoneuvo ei kuormita kokonaisuudessaan kyseistä kaistaa.

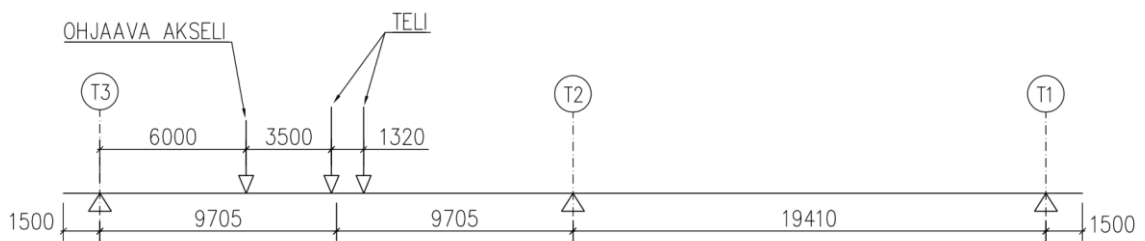


Keskisyys-sarake kuvaa ajoneuvon sijaintia sillan poikkisuunnassa verrattuna kaistojen puukannen keskilinjaan. Jos sijainti on keskinen, tarkoittaa se sitä, että ajoneuvon keskilinja on kyseisen kaistan puukannen leveyden keskilinjalla. Kuormitustapaukset on esitetty kuvin liitteessä 3.

TAULUKKO 6. Koekuormitustapaukset

Kuormitustapaus	Ajoneuvojen lukumäärä	Kuormitettu kaista			Keskisyys	Ajonopeus
		A1	A2	KLV		
<b>Tervassilta</b>		A1	A2	KLV		
<b>01</b>	2	×	×		keskinen	
<b>02</b>	1	×	×		keskinen	
<b>03</b>	2	×	×		keskinen	20 km/h
<b>04</b>	2	×		×	keskinen	
<b>05</b>	2	×	×		keskinen	50 km/h
<b>06</b>	2			×	epäkeskinen	
<b>07</b>	1	(×)	(×)		epäkeskinen	
<b>08</b>	1	(×)	(×)		epäkeskinen	40 km/h
<b>09</b>	1		(×)		epäkeskinen	
<b>10</b>	1		(×)		epäkeskinen	20 km/h

Ennen koekuormitusta haettiin FEM-mallin avulla kuormitusajoneuvon sijainnille sillan pituussuunnassa sellainen paikka, joka antoi määrävimmän vaikutuksen sillan pääkantajille. FEM-tarkastelun perusteella päädyttiin siihen, että staattisissa tapauksissa, joissa yksi ajoneuvo kuormittaa kaistaa, ajoneuvon ohjaava akseli sijoitettiin 6 metrin päähän tuelta T3 kuvan 20 mukaisesti.



KUVA 20. Ajoneuvon sijoittuminen sillan pituussuunnassa staattisissa kuormitustapauksissa, joissa kaistaa kuormittaa vain yksi ajoneuvo

Kuva 21 otettiin kuormitustapauksen Tervassilta 03 aikana. Kuvassa vasemmalla näkyvä ajoneuvo kuormitti siltaa staattisesti, kun toinen ajoneuvo ylitti sillan nopeudella 50 km/h. Kuvan alareunassa näkyy myös merkintämaalilla merkityt ajolinjat kannen lumi- ja jääkerroksessa.



KUVA 21. Kuormitustapaus Tervassilta 03 (Kuva: Heli Viljanen 2016)

Mittausdatan tallentaminen aloitettiin staattisissa tapauksissa melko nopeasti sen jälkeen, kun ajoneuvot oli saatu oikeisiin asemiin sillalle. Dynaamisissa kuormituksissa tallentaminen aloitettiin, kun ajoneuvo lähti liikkeelle riittävän etäisyyden päästä sillalta. Siirtymäanturien mittauskärjen asema nollattiin 6. ja 8. kuormitustapauksen jälkeen. Tervassilta 06 -kuormitustapauksen jälkeen CH4-anturi näytti 2 mm:n taipumaa kuormituksen poistuttua sillalta. Kuormitustapauksessa 06 molemmat ajoneuvot kuormittivat staattisesti kevyen liikenteen kaistaa. Mittauspiste CH4 sijaitsi kevyen liikenteen kaistan reunimmaisessa pääkannattajassa. On mahdollista, että mittauspisteen teline on siirtynyt kuormituksen aikana, eikä kuormitustuloksiin voi luottaa. Tätä mahdollisuutta tutkittiin tarkemmin FEM-mallin avulla luvussa 7.4. Kuvassa 22 on kuormitustapaus TS06.



KUVA 22. Kuormitustapaus Tervassilta 06 (Kuva: Heli Viljanen 2016)

Koekuormituksessa toteutuneet taipumat tallentuivat Excel-taulukkoon, jossa jokaisella ajanhetkellä on neljä eri taipuman arvoa mittauspisteiden mukaisesti. Liitteessä 4 on yhteenveito jokaisen kuormitustapauksen eri mittauspisteiden taipuma-arvoista. Yhteenveitoon kerättiin tallennetusta datasta suurin ja pienin taipuma-arvo mittauspisteellä sekä laskettiin tulosten keskiarvo.

#### 4.6 Mittausvirheen määrittäminen

Koekuormitustuloksille voidaan laskea muun muassa sellainen virhe, joka johtuu siirtymäanturin mittauksen tarkkuudesta. Mittausvirhettä lisäävät kuitenkin sellaiset tekijät, joiden vaikutusta tulokseen ei voida laskennallisesti määrittää. Tällaisia tekijöitä ovat esimerkiksi anturien telineen epävakaus ja koekuormitusajoneuvojen ajolinjojen tarkkuus.

Siirtymäanturien tekniset tiedot on esitetty liitteessä 5. DTS-A-100 -siirtymäanturin tarkkuus ilmoitetaan mittaustuloksen (*RO* eli rated output) suhteellisena virheenä. Anturin epätarkkuuden aiheuttama kokonaisvirhe muodostuu eri tekijöistä, joita ovat

- epälineaarisuusvirhe  $\pm 0,3 \% RO$
- hystereesivirhe  $\pm 0,3 \% RO$
- toistettavuusvirhe  $\pm 0,1 \% RO$
- lämpötilan aiheuttama virhe siirtymäanturin nollakohdalle  $\pm 0,05 \% RO / ^\circ C$
- lämpötilan aiheuttama virhe mitatulle taipuma-arvolle  $\pm 0,05 \% / ^\circ C$  (Kyowa Electronic Instruments).

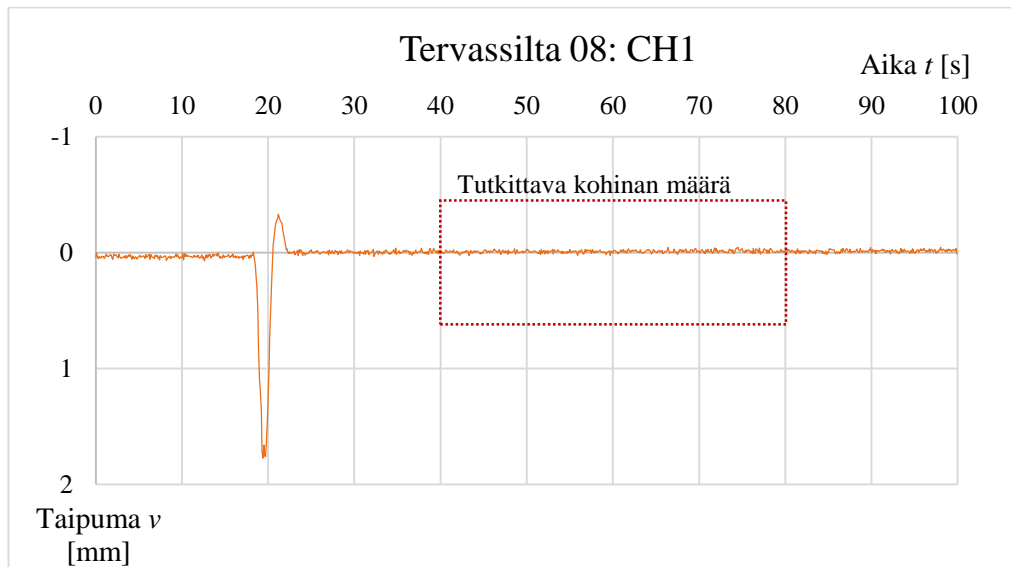
Lämpötilan aiheuttamaa virhettä ei näissä mittaustuloksissa tarvitse huomioida, sillä paikalleen asennettujen siirtymäanturien mittauskärjen asema nolattiin ennen kuormitustilannetta. Siirtymäanturista aiheutuva suhteellinen virhe on siten

$$\pm (0,3 + 0,3 + 0,1) \% RO = \pm 0,7 \% RO \quad (9)$$

Siirtymäanturin tarkkuudesta aiheutuva absoluuttinen virhe esimerkiksi 10 mm:n mitatulle taipuma-arvolle olisi siten

$$\pm 0,007 * 10 \text{ mm} = \pm 0,07 \text{ mm}$$

Mittaustuloksista tarkasteltiin lisäksi kohinan määrä siirtymäanturin nollakohdassa sellaiselta hetkeltä, jolloin ajoneuvoista ei aiheutunut kuormitusta sillalle. Dynaamisen kuormitustapauksen Tervassilta 08 ajanhetkellä  $t = 40 \dots 80$  s silta oli kuormittamaton. Kuvassa 23 on kuormitustapauksen Tervassilta 08 mittauskanavan CH1 taipumakuvaaja, johon on merkitty miltä ajanjaksolta kohinan vaikutusta tutkittiin.



KUVA 23. Kuormitustapauksen Tervassilta 08 mittauskanavan CH1 taipumakuvaaja

Kohinan vaikutus tarkasteltiin laskemalla mittausarvojen vaihteluvälin puolikas eli suurimman ja pienimmän mittausarvon keskiarvo kuormitustapauksen Tervassilta 08 jokaiselta neljältä mittauskanavalta. Keskimääräinen kohinan vaikutus määritettiin neljän mittauskanavan arvojen keskiarvona. Laskelmat on esitetty taulukossa 7.

TAULUKKO 7. Siirtymäanturin nollakohdan vaihteluväli kuormitustapauksessa Tervassilta 08

Tervassilta 08: ajanhetkellä $t = 40 \dots 80$ s					
	CH1	CH2	CH3	CH4	
Max	0,02525	0,1811	0,2538	-0,158	mm
Min	-0,0456	0,10725	0,18912	-0,2277	mm
Vaihteluvälin puolikas	0,0354	0,0369	0,0323	0,0348	mm
Keskiarvo CH1...CH4				0,0349	mm

Kohinan vaikutus siirtymäanturin nollakohtaan on siis keskimäärin  $\pm 0,035$  mm.

## 5 LIITTOVAIKUTUS KANNEN JA PÄÄKANNATTAJIEN VÄLILLÄ

### 5.1 Puisen liittorakenteen teoria

Sillan kansilaatan ja pääkannattajien välille saattaa syntyä liittovaikutusta, joka parantaa rakenteen jäykkyyttä ja kestävyyttä. Tässä lasketaan sillan teoreettinen liittorakennevai-  
 kutus EN 1995-1-1:n liitteen B mukaisesti. Liite B käsittelee mekaanisin liittimin koottuja  
 palkkeja. Tällaiselle palkille kuormituksen aiheuttamat taipumat lasketaan käyttämällä  
 tehollista taivutusjäykkyyttä  $(EI)_{ef}$ . Sillan FEM-mallin avulla tutkitaan, saadaanko viit-  
 teitä siitä, että liittovaikusta todellisuudessa olisi Tervassillan kannen ja pääkannattajien  
 välillä.

Leikkausvoimat aiheuttavat siirtymää mekaanisten liittimien avulla koottujen poikkileik-  
 kausten liitoskohdassa, jolloin liitosta ei voida tarkastella jäykkänä eikä liittorakennevai-  
 kutus ole täydellinen. Liitoskohdassa tapahtuvaa siirtymää kuvataan siirtymäkertoimella  
 $K$ . (Puurakenteet - STEP 1 1996, B11/1–2). SFS-EN 1995-1-1:n (2014, 50) mukaan siir-  
 tymäkerrointa käytetään tarkasteltaessa puikkotyypin liittimin tehdyn liitoksen osien  
 välistä siirtymää. Käyttörajatilatakalustelussa  $K$ :n arvona käytetään  $K_{ser}$ -arvoa, joka mää-  
 ritetään taulukon 8 mukaisesti. Taulukon kaavoissa  $\rho_m$  on puun keskimääräinen tiheys  
 $[\text{kg}/\text{m}^3]$ ,  $d$  on liittimen paksuus  $[\text{mm}]$  ja  $d_c$  on liittimen halkaisija  $[\text{mm}]$ .  $K_{ser}$ -kertoimen  
 yksikkö on  $\text{N}/\text{mm}$ .

TAULUKKO 8.  $K_{ser}$ -arvot eri liittimille (SFS-EN 1995-1-1 2014, 50)

Liittintyyppi	$K_{ser}$
Tappivaarnat Välykselliset tai välyksettömät pultit <sup>a</sup> Ruuvit Naulat (reikä esiporattuna)	$\rho_m^{1,5}d/23$
Naulat (ilman esiporausta)	$\rho_m^{1,5}d^{0,8}/30$
Hakaset	$\rho_m^{1,5}d^{0,8}/80$
Standardin EN 912 tyyppin A mukaiset rengasvaarnat Standardin EN 912 tyyppin B mukaiset lautasvaarnat	$\rho_m d_c/2$
Hammasvaarnat	
– Standardin EN 912 tyyppien C1...C9 mukaiset hammasvaarnat	$1,5\rho_m d_c/4$
– Standardin EN 912 tyyppien C10...C11 mukaiset hammasvaarnat	$\rho_m d_c/2$
<sup>a</sup> Välys lisätään erikseen liittimen kohdalla syntyvään osien väliseen siirtymään.	

Murtorajatilatarkastelussa  $K$ :n arvona käytetään hetkellistä siirtymäkerrointa  $K_u$ , joka saadaan kaavalla (10).

$$K_u = \frac{2}{3} K_{ser} \quad (10)$$

Jos yhdistetyn poikkileikkauksen osien keskimääräiset tiheydet poikkeavat toisistaan, lasketaan tiheydelle arvo kaavalla

$$\rho_m = \sqrt{\rho_{m,1}\rho_{m,2}}, \quad (11)$$

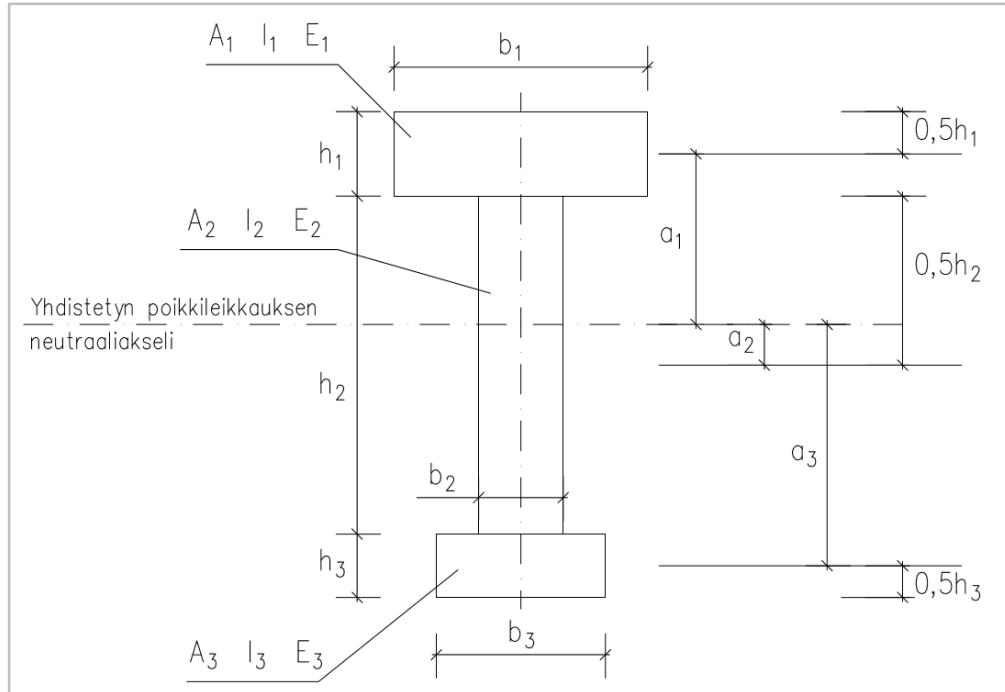
jossa  $\rho_{m,1}$  on osan 1 keskimääräinen tiheys ja  $\rho_{m,2}$  on osan 2 keskimääräinen tiheys (SFS-EN 1995-1-1 2014, 50).

Eurokoodi 5:n mukainen siirtymäkerroin  $K_{ser}$  liittyy liitossiirtymien lisäksi kimmoteorian mukaisen liitosjäykkyyden tarkasteluun. Liitossiirtymillä tarkoitetaan liitoksessa tapahtuvia muodonmuutoksia eli liitoksen osien liikettä toisiinsa nähden. Liitosjäykkyydellä eli liitoksen kiertymäjäykkyydellä tarkoitetaan liitoksen kykyä siirtää momenttia osien välillä. Liitoksen jäykkyys vaikuttaa kuormien jakautumiseen liitettävien rakenneosien välillä. (Kovanen 2014, 34.) Kiertymäjäykkyyden perusteella puikkoliitos määritellään joko niveleksi, puolijäykäksi tai jäykäksi.

Eurokoodi 5:n suunnittelumenetelmän käyttö mekaanisin liittimin kootuille palkeille edellyttää seuraavia perusolettamuksia:

- Palkit ovat vapaasti tuettuja jänneväliillä  $l$ . Laskelmissa jännevälille käytetään jatkuvien palkkien tapauksessa arvoa  $0,8l$ . Ulokepalkille käytetään arvoa  $2,0l$ .
- Yksittäiset osat ovat joko jatkamattomia tai sormijatkettuja.
- Liitinväli  $s$  on vakio palkin pituussuunnassa tai muuttuu leikkausvoiman mukaisesti arvosta  $s_{min}$  arvoon  $s_{max}$  siten, että  $s_{max}$  on korkeintaan 4-kertainen  $s_{min}$ -arvoon nähden.
- Kuorma vaikuttaa pystysuorassa suunnassa. (SFS-EN 1995-1-1 2014, 102.)

Kuvassa 24 on tehollisen taivutusjäykkyyden laskemiseen tarvittavat mitat ja materiaaliarvot kolmesta osasta koostuvalle palkille SFS-EN 1995-1-1:n (2014, 102) mukaan. Poikkileikkauksen osat määritetään samalla periaatteella, mikäli yhdistettäviä osia on vain kaksi.



KUVA 24. SFS-EN 1995-1-1:n mukainen mekaanisin liittimin kootun palkin poikkileikkaus

Tehollista taivutusjäykkyyttä laskettaessa sovelletaan Steinerin sääntöä. Yleisen Steinerin säännön mukaan poikkileikkauksen neliömomentti tietyn akselin *ref* suhteen on sama, kuin kyseisen poikkileikkauksen neliömomentti  $I_o$  oman neutraaliakselinsa suhteen lisätynä termillä  $A \cdot e_{ref}^2$  eli

$$I_{ref} = I_o + A \cdot e_{ref}^2, \quad (12)$$

jossa  $I_{ref}$  on poikkileikkauksen neliömomentti referenssiakselin *ref* suhteen,  $A$  on poikkileikkauksen pinta-ala ja  $e_{ref}$  on poikkileikkauksen neutraaliakselin etäisyys tarkasteltavasta referenssiakselista. Taivutusjäykkyyttä  $EI$  laskettaessa otetaan materiaalin kimmo kerroin  $E$  kertoimeksi kumpaankin termiin, jolloin saadaan taivutusjäykkyys referenssiakselin suhteen kaavalla

$$(EI)_{ref} = (EI)_o + (EA) \cdot e_{ref}^2, \quad (13)$$

jossa  $(EI)_{ref}$  on poikkileikkauksen taivutusjäykkyys referenssiakselin suhteen,  $(EI)_o$  on poikkileikkauksen taivutusjäykkyys oman neutraaliakselinsa suhteen ja  $(EA)$  on poikkileikkauksen aksiaalijäykkyys. (Liittorakenteiden suunnittelu ja mitoitus 2012, 17.)

Kuvan 24 mukaisen mekaanisin liittimin kootun palkin teholliselle taivutusjäykkyydelle  $(EI)_{ef}$  annetaan SFS-EN 1995-1-1:ssä (2014, 104) kaava

$$(EI)_{ef} = \sum_{i=1}^3 (E_i I_i + \gamma_i E_i A_i a_i^2), \quad (14)$$

jossa  $E_i$  on osan  $i$  kimmokerroin,  $I_i$  on osan  $i$  neliömomentti,  $A_i$  on osan  $i$  pinta-ala ja  $a_i$  on osan  $i$  neutraaliakselin etäisyys yhdistetyn poikkileikkauksen neutraaliakselista kuvan 24 mukaisesti. Kimmokertoimen arvoina käytetään materiaalien keskimääräisen kimmokertoimen  $E_{mean}$  -arvoja. Kaavassa (14) on siis poikkileikkauksen osien taivutusjäykkyydet yleisen Steinerin säännön mukaan ja lisäksi kerroin  $\gamma_i$ , jolla otetaan huomioon liitoksen siirtymä.  $\gamma_i$  -kertoimen laskennassa tarvitaan liitoksen siirtymäkerrointa  $K$  ja liittinten välistä etäisyyttä  $s$ . Kaavan (14) tekijät lasketaan SFS-EN 1995-1-1:n mukaisilla kaavoilla (15–17).

Poikkileikkauksen osalle 2 liitoksen siirtymän huomioiva kerroin  $\gamma_i$  saa arvon 1 eli

$$\gamma_2 = 1,0 \quad (15)$$

Poikkileikkauksen osille 1 ja 3 kerroin  $\gamma_i$  lasketaan kaavalla

$$\gamma_i = \left( 1 + \frac{\pi^2 E_i A_i s_i}{K_i l^2} \right)^{-1} \quad \text{arvoilla } i = 1 \text{ ja } i = 3, \quad (16)$$

jossa  $s_i$  on liittinväli,  $K_i$  on osan  $i$  siirtymäkerroin ja  $l$  on mekaanisin liittimin kootun palkin jänneväli. Osan 2 neutraaliakselin ja yhdistetyn poikkileikkauksen neutraaliakselin välinen etäisyys  $a_2$  saadaan kaavalla

$$a_2 = \frac{\gamma_1 E_1 A_1 (h_1 + h_2) - \gamma_3 E_3 A_3 (h_2 + h_3)}{2 \sum_{i=1}^3 (\gamma_i E_i A_i)}, \quad (17)$$

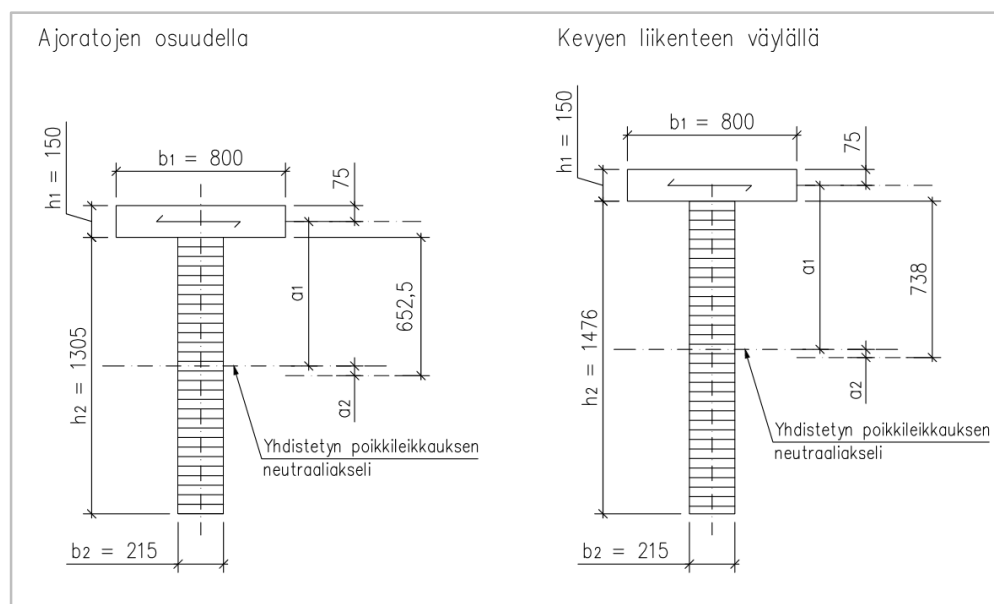


jossa  $h_i$  on osan  $i$  korkeus. (SFS-EN 1995-1-1:n 2014, 104.) Liittorakennevaikutusta puuosien välillä laskettaessa on osien syysuunta otettava huomioon. Tarkasteltaessa esimerkiksi syrjälantukannen ja pääkannattajan välistä liittovaikutusta, on otettava huomioon, että syrjälantukannen syysuunta on  $90^\circ$ :n kulmassa pääkannattajien syysuuntaan nähden, jolloin laskelmissa käytetään syitä vastaan kohtisuoran kimmokertoimen keskimääräistä  $E_{90,mean}$  -arvoa.

## 5.2 Liittovaikutus Tervassillassa

Tarkastellaan syrjälantukannen ja pääkannattajien välistä liittovaikutusta Tervassillassa. Liittovaikutus jää ennalta arvioituna pieneksi syrjälantukannen ja pääkannattajien syysuunnan ollessa kohtisuorassa toisiinsa nähden mutta pienikin liittovaikutus voidaan siten ottaa huomioon arvioitaessa pääkannattajien taipumia sillan FEM-mallissa. Tervassilta esiteltiin tarkemmin luvussa 4.1.

Ajoratojen osuus ja kevyen liikenteen väylä tarkastellaan erikseen, sillä sillan pääkannattajien poikkileikkaus vaihtuu näiden kaistojen välissä. Ajoradoilla pääkannattajien keskinäinen etäisyys on noin 800 mm. Oletetaan yksinkertaistaen kannen toimivan leveyden ulottuvan molemmissa suunnissa pääkannattajien jaon puoliväliin eli 400 mm kumpaankin suuntaan. Kevyen liikenteen kaistalla pääkannattajien keskinäinen etäisyys on 900 mm mutta käytetään siltäkin samaa tehollista leveyttä kuin ajoradoilla. Kuvassa 25 on laskennassa tarkasteltavien poikkileikkauksien mitat.



KUVA 25. Tervassillan pääkannattajien ja syrjälantukannen tarkasteltava liittorakenne

Pääkannattajien materiaali on GL32h, jonka kimmokertoimen  $E_{0,mean}$  -arvo on 13 700 N/mm<sup>2</sup>. Kannen syrjälankut ovat sahatavaraa C30. Kansilankutuksen kimmokertoimelle käytetään  $E_{90,mean}$  -arvoa, joka C30:lle on 400 N/mm<sup>2</sup>. Kannen jokainen lankku on nauhattu kiinni pääkannattajiin 150x4,5 -nauloilla, joten liitinväli  $s$  on 50 mm lankkujen leveyden mukaisesti. Käytetään siirtymäkertoimen  $K$  arvona käyttörajatilan arvoa  $K_{ser}$ . Kerroin  $K_{ser}$  ilman esiporausta tehdyille naulaliitokselle on taulukon 8 (sivu 37) mukaan

$$K_{ser} = \rho_m^{1,5} d^{0,8} / 30, \quad (18)$$

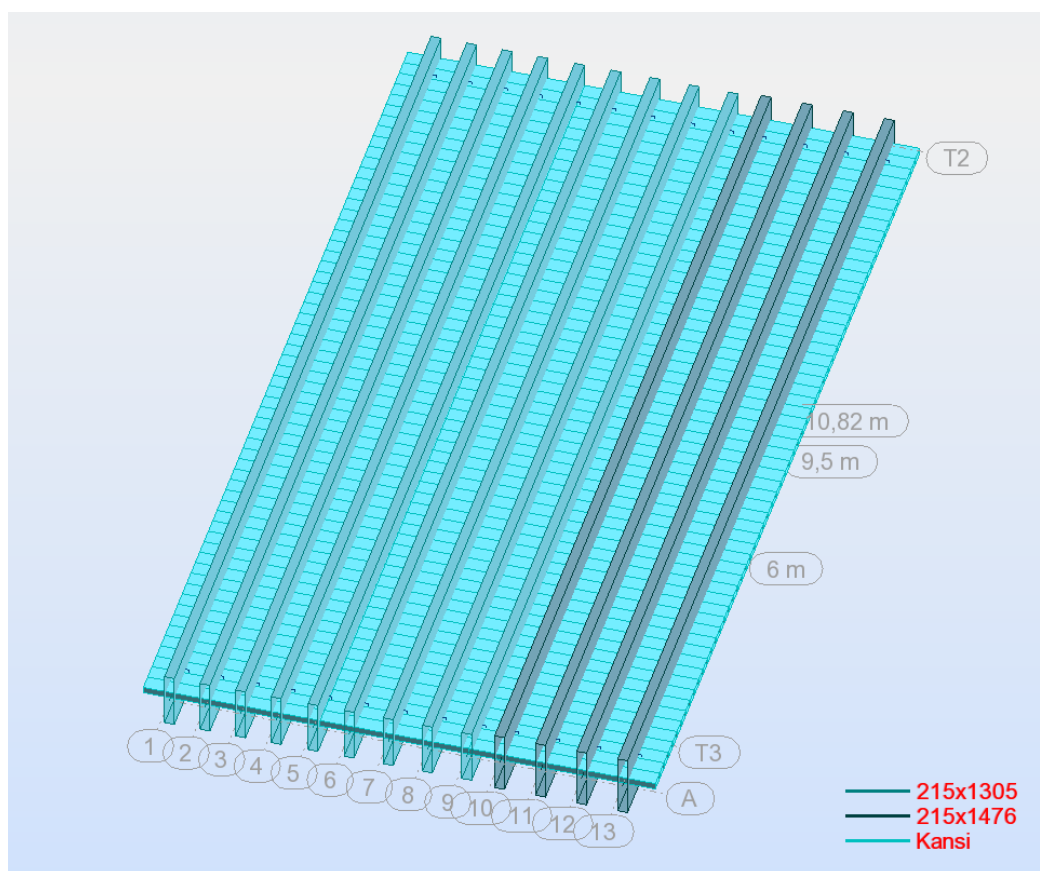
jossa  $\rho_m$  on materiaalien keskimääräisen tiheyden yksikkö ja  $d$  on liittimen paksuus. Liittorakennevaikutuksen laskelmat on esitetty liitteessä 2. Laskelmissa saatiin molempien kaistojen osuudella mitan  $a_2$  arvoksi noin 8 mm, mikä tarkoittaa, että yhdistetyn poikkeileikkauksen neutraaliakseli sijaitsee 8 mm ylempänä kuin pelkän liimapuupalkin neutraaliakseli. Tehollisia taivutusjäykkyyksiä  $(EI)_{ef}$  verrattiin pelkkien pääkannattajien taivutusjäykkyyksiin. Ajoinen osuudella liittovaikutuksen huomioon ottaminen paransi rakenteen taivutusjäykkyyttä 4,38 %. Kevyen liikenteen väylän osuudella vastaava paranus oli 3,78 %. Liittovaikutuksesta saatava hyöty on siis tällaisessa rakenteessa pieni. Suurin syy tähän on syrjälankutuksen eri syysuunta pääkannattajiin nähden.

Tervassillan kannen ja pääkannattajien välinen teoreettinen liittovaikutus tarkasteltiin, jotta tässä opinnäytetyössä pystytään analysoimaan tekijät, jotka vaikuttavat sillan koe-kuormituksessa mitattuihin taipuma-arvoihin. Liikenneviraston silta-asiantuntijan Sami Noposen mukaan tämän tyyppistä liittorakennetarkastelua ei voida suoraan hyödyntää sillan mitoituksessa, sillä puukannen kosteuselämisellä on suuri vaikutus mahdolliseen liittovaikutukseen. Esimerkiksi puun kuivuessa syrjälankkujen väliin jää rakoja, joka heikentää liittovaikutusta. Myös puun pitkäaikaisominaisuudet, kuten viruminen, tulee ottaa huomioon puisia liittorakenteita suunniteltaessa. (Noponen 2016.)

## 6 Tervassillan FEM-MALLINNUS

### 6.1 Mallinnuksen periaatteet

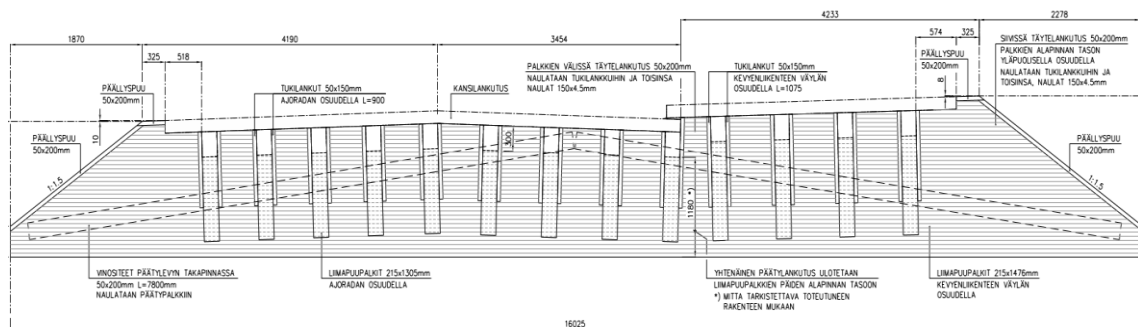
Tervassillan FEM-laskentaan käytettiin Autodeskin Robot Structural Analysis -ohjelmaa. Ennen varsinaista Tervassillan mallintamista sillan eri osien vaikutusta taipumiin tutkittiin erillisillä malleilla. Erillismallien perusteella päädyttiin tekemään Tervassillasta kaksi mallia: arinamalli ja 3D-malli. Arinamallissa (grillage) sillasta mallinnettiin pääkannattajat ja syrjälankkukansi. Arinamallissa ei mallinnettu sillankaiteita. 3D-malli pidettiin muuten samanlaisena kuin arinamalli mutta siinä mallinnettiin myös sillankaiteet. Erillismallien avulla oli todettu, että kaiteella saattaa olla merkittävä sillan reunaan jäykistävä vaikutus. FEM-mallin avulla tutkittiin pääkannattajien taipumaa ilman kiepahdustarkastelua. Tästä syystä pääkannattajien poikkisiteitä ei otettu huomioon mallissa. Sillasta mallinnettiin koekuormituksessa kuormitettu tukiväli T2-T3. Kuvassa 26 on Tervassillasta luotu arinamalli, jossa kevyen liikenteen kaistan poikkileikkaukseltaan korkeammat pääkannattajat erottuvat tummemmalla sävyllä.



KUVA 26. Tervassillasta luotu arinamalli

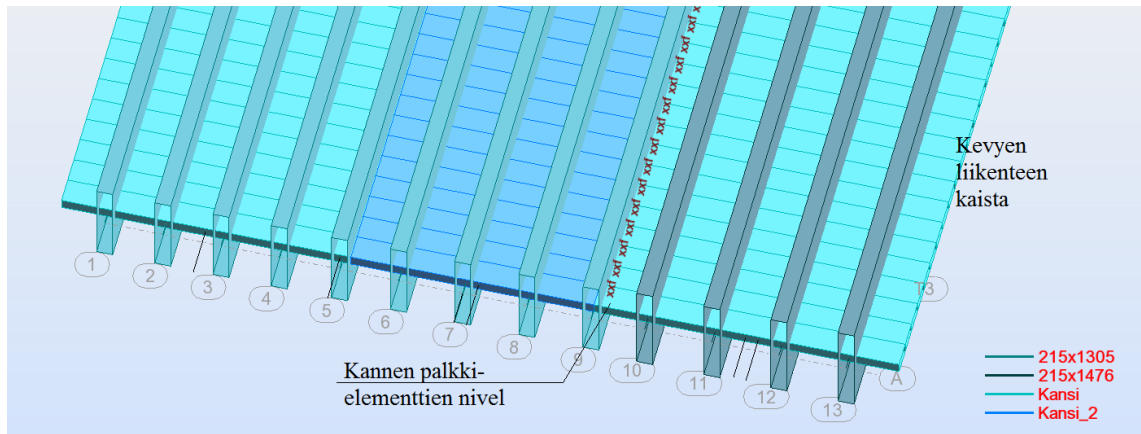
## Kannen palkkielementit

Syrjälankkukansi mallinnettiin palkkielementeillä, joiden korkeus oli 150 mm, leveys 340 mm ja materiaalina C30. Kannen palkkielementtien leveys vastaa SFS-EN 1995-2:n määrittelemällä yksinkertaistetulla menettelyllä laskettua palkin tehollista leveyttä, joka tarkasteltiin luvussa 5.1. Kansi mallinnettiin pääkannattajien neutraaliakselin tasoon. Kevyen liikenteen kaistan kannen palkkielementit mallinnettiin samaan tasoon kuin ajoratojen kannen palkkielementit. Todellisuudessa Tervassillan kevyen liikenteen kaistan kansi on 150 mm ylempänä ajoratoja mutta FEM-mallin rakennemalliksi oli valittu arina. Arinamallissa palkkielementtien tulee sijaita samassa xy-tasossa. Kuvassa 27 on Tervassillan piirustusten leikkauskuva sillan päätypalkin edestä tuella T1. Kuvassa näkyy kansilankutuksen periaate ja sillan päätypalkki. Kuvassa oikeanpuoleinen kaista on kevyen liikenteen kaista.



KUVA 27. Tervassillan kansilankutuksen ja päätypalkin rakenne (Tervassillan piirustukset)

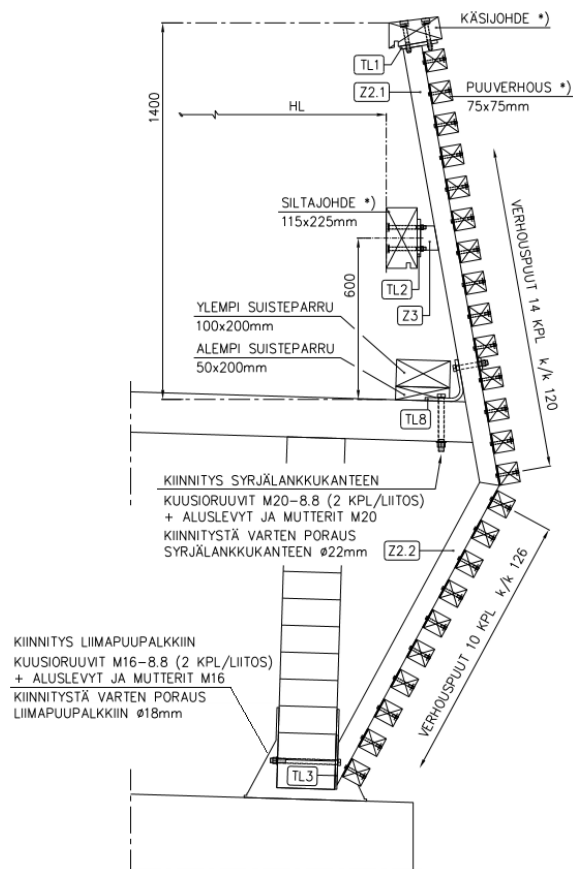
Kannen palkkielementit mallinnettiin kaistan levyisinä eli sillan poikkisuunnassa kannen palkkielementtejä oli peräkkäin kolme: kaksi ajoratojen kohdalla ja yksi kevyen liikenteen väylällä. Todellisessa kansirakenteessa on epäjatkuvuuskohta ajoradan kaistojen ja kevyen liikenteen kaistan välillä. Momentin ei oletettu siirtyvän epäjatkuvuuskohtaan yli, joten kevyen liikenteen kaistan osuudella kannen palkkielementtien päähän laitettiin nivel. Nivelen kohdalla kannen palkkielementille annettiin vapaus kiertyä kannen poikkisuunnassa. Kuvassa 28 on erotettu keskimmäisen kaistan kannen palkkielementit eri värillä. Kuvassa näkyy punaisella merkinnällä kevyen liikenteen kaistan kannen palkkielementeille lisättyjen nivelien sijainti. Todellisessa kansirakenteessa on sauma myös ajoneuvoliikenteen kaistojen välissä. Sen vaikutuksia kuorman jakautumiseen analysoidaan luvussa 7.2.



KUVA 28. Tervassillan kannen palkkielementit FEM-mallissa

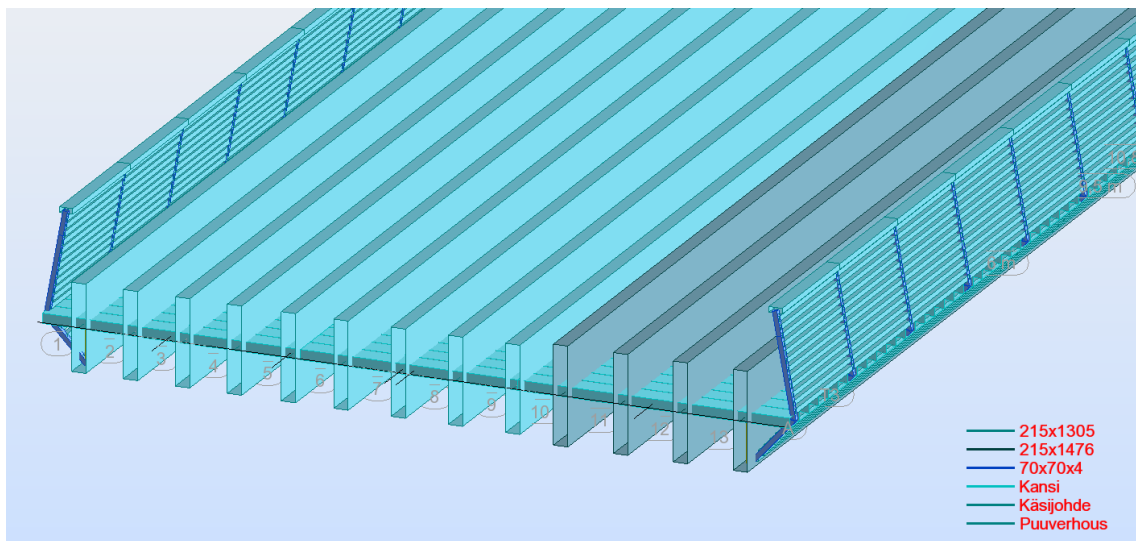
### Sillankaide

Sillankaiteen vaikutus tutkittiin 3D-mallin avulla. 3D-mallissa rakennemalliksi Robotissa valittiin kuori (shell), koska sillä saadaan mallinnettua myös kolmiulotteisia rakenteita. Kuvassa 29 on kaiderakenteen periaate sillan rakennepiirustusten mukaisesti. Kaide kiinnittyy sekä syrjälankkukanteen että pääkannattajien alareunaan.



KUVA 29. Tervassillan piirustusten mukainen kaiderakenne sillan eteläreunalla (Tervassillan piirustukset)

Sillan pääkannattajien ja kannen malli pidettiin muuten samanlaisena kuin arinamallissa, joten kannen palkkielementit mallinnettiin 3D-mallissakin pääkannattajien kanssa samaan xy-tasoon. Sillankaiteesta mallinnettiin teräsosat, puuverhous ja käsijohde. Teräsosien ja puuverhouksen poikkileikkauskoot vastaavat Tervassillan kaiteen todellisia poikkileikkauskokoja. Käsijohteen poikkileikkausta yksinkertaistettiin todelliseen poikkileikkaukseen verrattuna. Teräsosat mallinnettiin CFRHS 70x70x4 -putkiprofiilina, jonka teräslaatu oli S355. Puuverhouksen materiaalina käytettiin C30:tä ja poikkileikkauskokona 75x75 mm<sup>2</sup>. Käsijohteen materiaalina oli GL32h ja poikkileikkauskokona 200x83 mm<sup>2</sup>. Periaate kaiteen mallintamisesta on nähtävissä kuvasta 30.

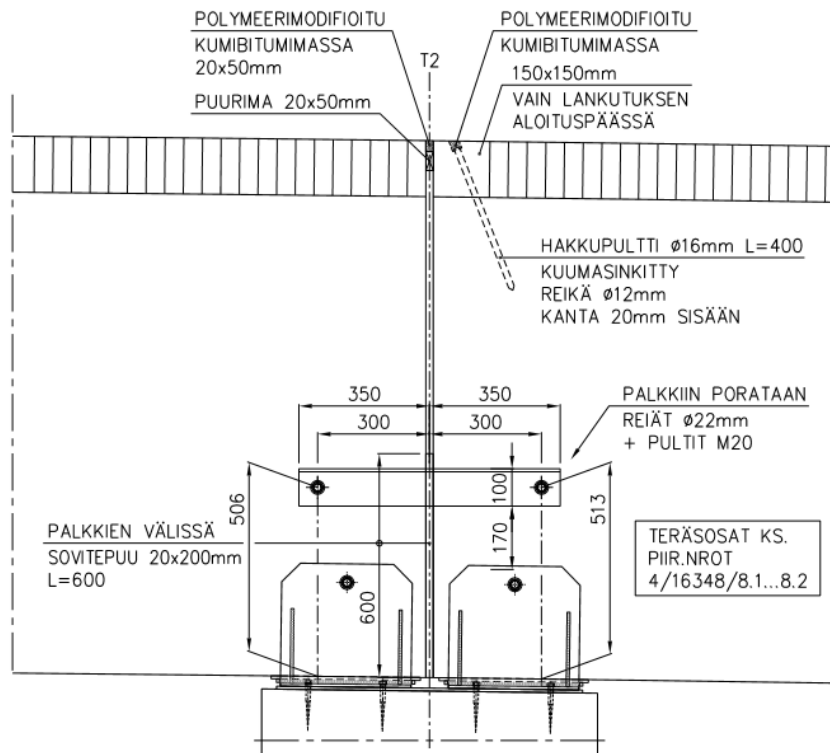


KUVA 30. Sillankaiteen mallintaminen 3D-mallissa

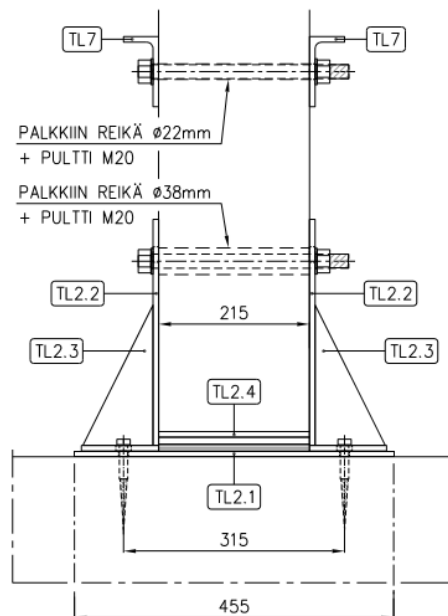
Kaiteen mitat mallissa eivät täysin vastaa Tervassillan kaiteen todellisia mittoja, sillä mallissa kannen palkkielementit sijaitsevat samassa xy-tasossa kuin pääkannattajat. Kaiteen mallintamisen tavoitteena oli tutkia, saadaanko viitteitä siitä, että kaide jäykistää sillan kansilaatan reunaa.

## 6.2 Pääkannattajien tuennat

Tervassillan pääkannattajat on tuettu kulmateräskiinnikkein molemmilla tukilinjalla T3 ja T2. Sen lisäksi tukilinjalla T2 sillan pituussuunnassa peräkkäiset liimapuupalkit on yhdistetty kulmateräksellä toisiinsa. Kuvissa 31 ja 32 on Tervassillan piirustusten mukainen pääkannattajien liitos välituella T2. Tukilinjalla T3 liitos on muuten samanlainen mutta ilman palkkeja yhdistävää kulmaterästä.



KUVA 31. Tervassillan liitos välituella T2 (Tervassillan piirustukset)



KUVA 32. Välituen T2 liitos sivusta (Tervassillan piirustukset)

Laskentamallissa molemmilla tukilinjoilla käytettiin pääkannattajien tukisolmuissa piste-  
mäisiä niveltukia, joille annettiin vapaus kiertyä sillan poikkisuuntaisen akselin ympäri.

### 6.3 Liittovaikutuksen tarkastelu mallin avulla

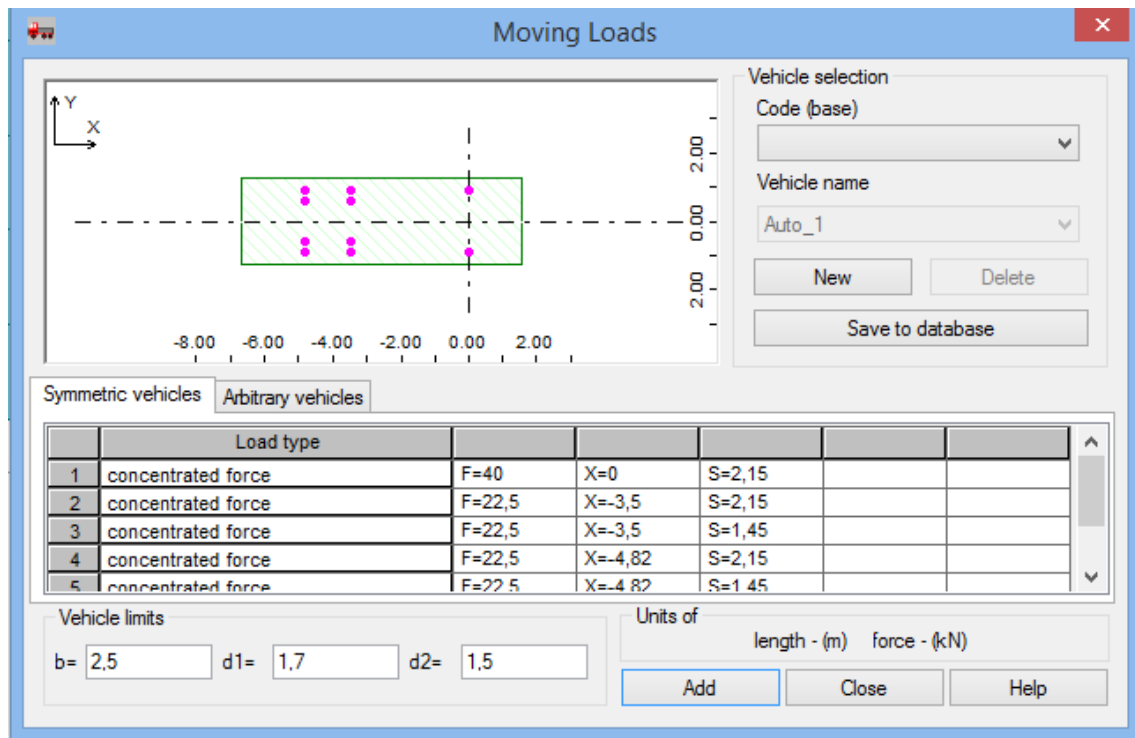
Kannen ja pääkannattajien välinen teoreettinen liittovaikutus huomioitiin mallissa korottamalla pääkannattajien materiaalin kimmokerrointa vastaamaan luvussa 5.2 määritetyn ja liitteessä 2 lasketun liittorakenteen tehollisen taivutusjäykkyyden  $(EI)_{ef}$  suhdetta pelkän pääkannattajan taivutusjäykkyyteen  $(EI)_{gl}$ . Ajoneuvokaistojen kohdalla liittovaikutuksen laskettiin parantaneen taivutusjäykkyyttä 4,38 % ja kevyen liikenteen kaistalla 3,78 %. GL32h:n modifioitu kimmokerroin mallissa oli siis ajoneuvokaistojen osuudella 14 300 N/mm<sup>2</sup> ja kevyen liikenteen kaistalla 14 217 N/mm<sup>2</sup>, kun GL32h:n modifioimattoman kimmokertoimen arvo on 13 700 N/mm<sup>2</sup>.

### 6.4 Liikkuvat kuormat

Sillan FEM-mallin kuormituksena otettiin huomioon ainoastaan koekuormitusajoneuvot. Koekuormituksessa käytettyjen ajoneuvojen aiheuttama kuormitus sillalle mallinnettiin Robotissa liikkuvien kuormien (moving loads) avulla. Rakenteelle kohdistuva liikkuva kuorma määritetään antamalla ajoneuville mittasuhteet, pyöräkuormien etäisyydet ja pyöräkuormien suuruudet. Liikkuva kuorma lisätään rakenteelle staattisina kuormina, joita kuljetetaan rakenteen yli määrättyjä ajolinjoja pitkin. Kuormalle valitaan askelpituus eli matka, jonka verran staattiset kuormat siirtyvät ajolinjalla eteenpäin eri kuormitustapausten välillä. Mitä pienemmällä askeleella kuorma vaikuttaa ajolinjalla, sitä useampia kuormitustapauksia liikkuvasta kuormasta muodostuu.

Tervassillan FEM-mallissa oletettiin kuormitusajoneuvojen akselikuormien jakautuvan suhteessa 80–90–90 kN, joista ensimmäinen luku kuvaa ohjaavaa akselia. Telin akselien paripyörät otettiin huomioon jakamalla pyöräkuormat kahdeksi pistekuormaksi, jolloin telin akselien yhden pistekuorman arvoksi tuli 22,5 kN. Kuormille määritettiin ajolinjat sillan poikkisuunnassa koekuormituksen ajolinjojen mukaisesti. Liikkuvan kuorman kuormitustapauksista haettiin ne tapaukset, joissa kuormien sijainti sillan pituussuunnassa vastasi ajoneuvojen sijaintia koekuormitustapauksissa. Kuvassa 33 on Robotiin määritetty liikkuva kuorma, jonka mitat ja pyöräkuormat vastaavat todellisia koekuormituksessa käytettyjä ajoneuvoja.



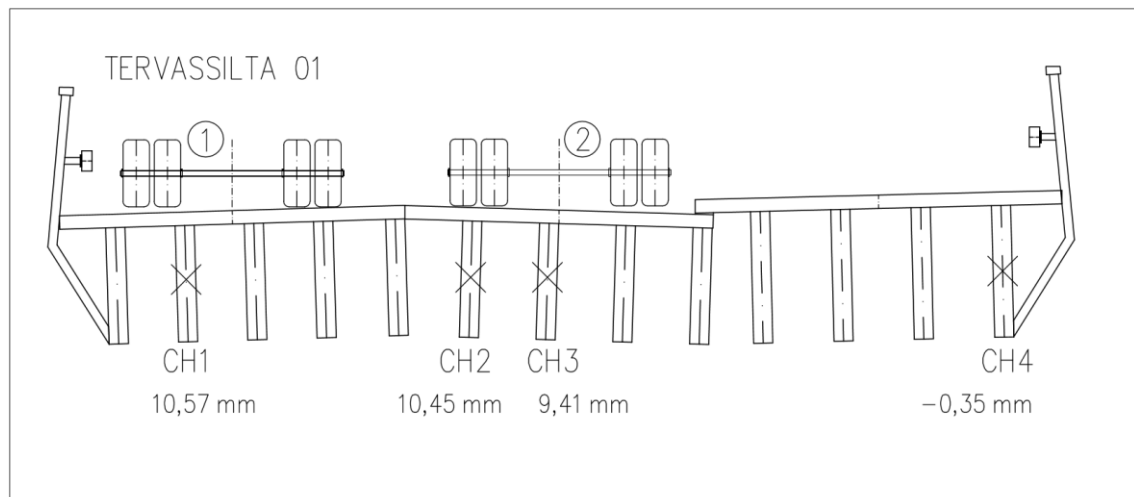


KUVA 33. Robotissa määritelty ajoneuvo, jota käytettiin Tervassillan FEM-mallissa

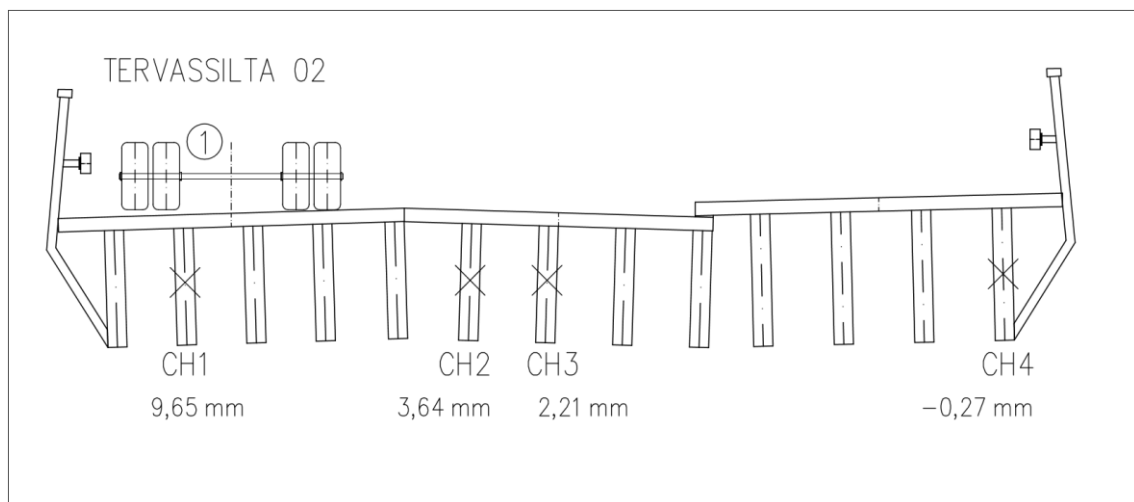
## 7 TULOSTEN ANALYSOINTI

### 7.1 Koekuormituksessa mitatut taipuma-arvot

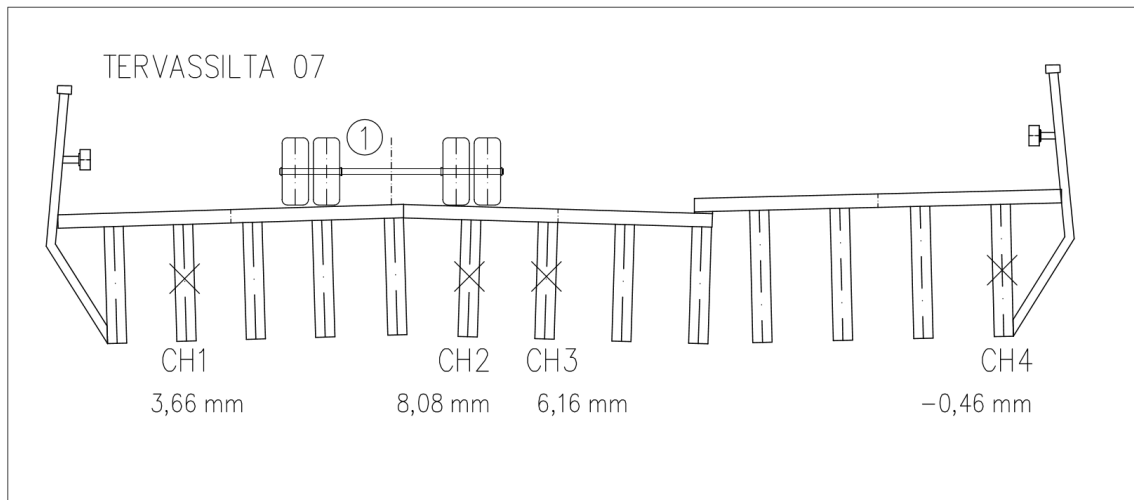
Tässä työssä analysoitiin koekuormituksessa mitattujen taipumien ja FEM-laskennalla saatujen tulosten kannalta pääasiassa neljää kuormitustapausta: Tervassilta 01, 02, 07 ja 09. Käsiteltävät tapaukset olivat staattisia ajoneuvoliikenteen kaistojen kuormitustapauksia, joista kolmessa kuormitus toteutettiin vain yhdellä ajoneuvolla. Koekuormituksissa saaduista taipuman arvoista käytettiin 100 sekunnin mittausjakson keskiarvoa. Kuvissa 34–37 esitellään tutkittavat kuormitustapaukset ja koekuormituksessa mitattujen taipumien keskiarvo kyseisillä mittauspisteillä. Taipuman arvot ovat positiivisia alaspäin.



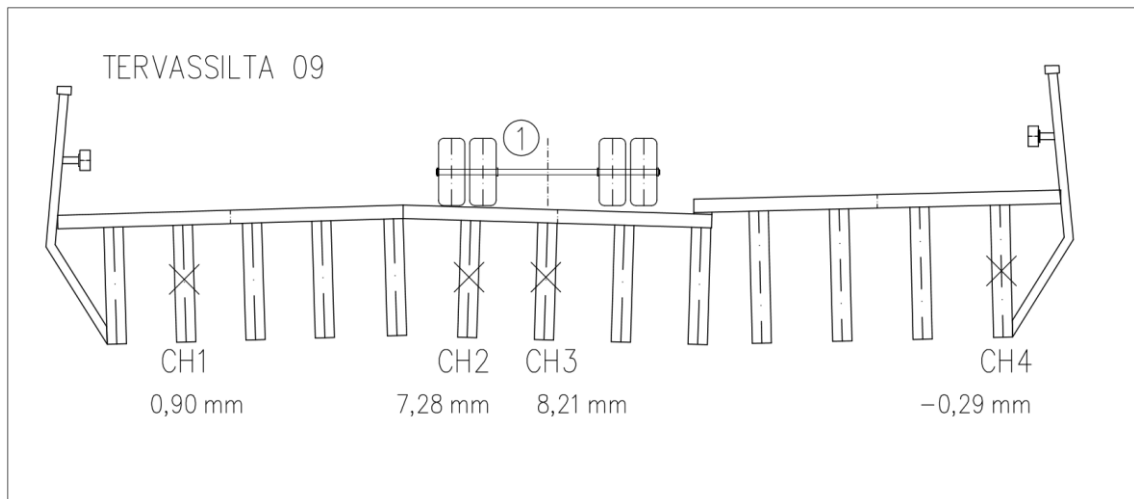
KUVA 34. Kuormitustapaus Tervassilta 01



KUVA 35. Kuormitustapaus Tervassilta 02



KUVA 36. Kuormitustapaus Tervassilta 07

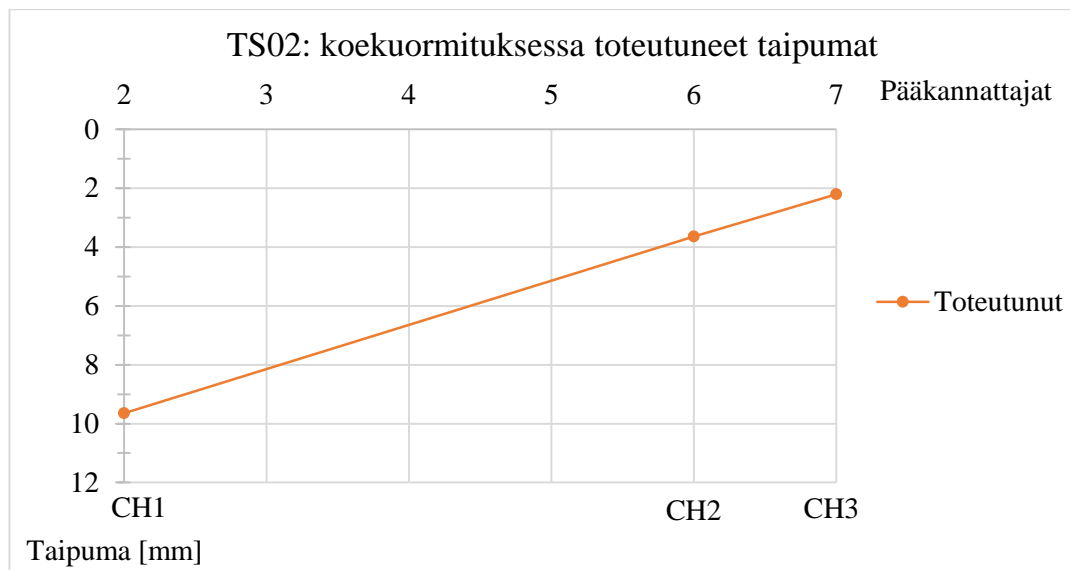


KUVA 37. Kuormitustapaus Tervassilta 09

Kevyen liikenteen kaistalla sijaitsevan mittauspisteen CH4 taipuma tapahtui näissä neljässä kuormitustapauksessa ylöspäin ja suurin taipuma oli alle puoli millinä. CH4-mittausturinin paikallaan pysyvyydestä oli kokeen aikana myös hieman epävarmuutta, joten sen mittaustulokset jätettiin huomioimatta tässä vertailussa. CH4-mittauspisteellä mahdollisesti tapahtunutta mittausrvirhettä analysoidaan luvussa 7.4 kuormitustapausten Tervassilta 04 ja 06 avulla.

## 7.2 FEM-mallin vastaavuus koekuormitustuloksiin

Koekuormituksessa mitatut taipumat ja FEM-laskennalla saadut taipumat sillan mita-  
tuissa pääkannattajissa koottiin samaan Excel-taulukkoon. Luvussa 4.6 laskettuja koe-  
kuormitustulosten mittausvirheitä ei otettu vertailussa huomioon. Taipuma-arvoista piir-  
rettiin kuvaajat, joissa pystyakselilla on taipuman arvo millimetreinä. Taipuman arvo on  
positiivinen ja kasvava alaspäin. Vaaka-akselille numeroitiin sillan pääkannattajat 2–7  
kuvan 38 mukaisesti.



KUVA 38. Esimerkki taipuma-arvojen kuvaajasta

Mittauspisteet CH1-CH3 sijaitsivat pääkannattajissa 2,6 ja 7. Nämä pisteet on yhdistetty  
suoralla selkeyttämään kuvaajaa mutta on otettava huomioon, että muissa pääkannatta-  
jissa tapahtunutta taipumaa koekuormituksessa ei tiedetä. Arvoja voidaan siis verrata vain  
x-akselin pisteissä 2, 6 ja 7.

FEM-mallin ja koekuormitustulosten vastaavuudella tutkittiin

- ajoneuvoliikenteen kaistojen välisen sauman vaikutusta kannen kuormanjakoky-  
kyyn
- sillankaiteen kannen reunaa jäykistävä vaikutusta
- liittovaikutusta kannen ja pääkannattajien välillä.

Tuloksia käsiteltäessä esitellään tutkituista kuormitustapauksista vain sellaiset, joissa  
edellä lueteltujen tekijöiden vaikutus näkyy selkeimmin.

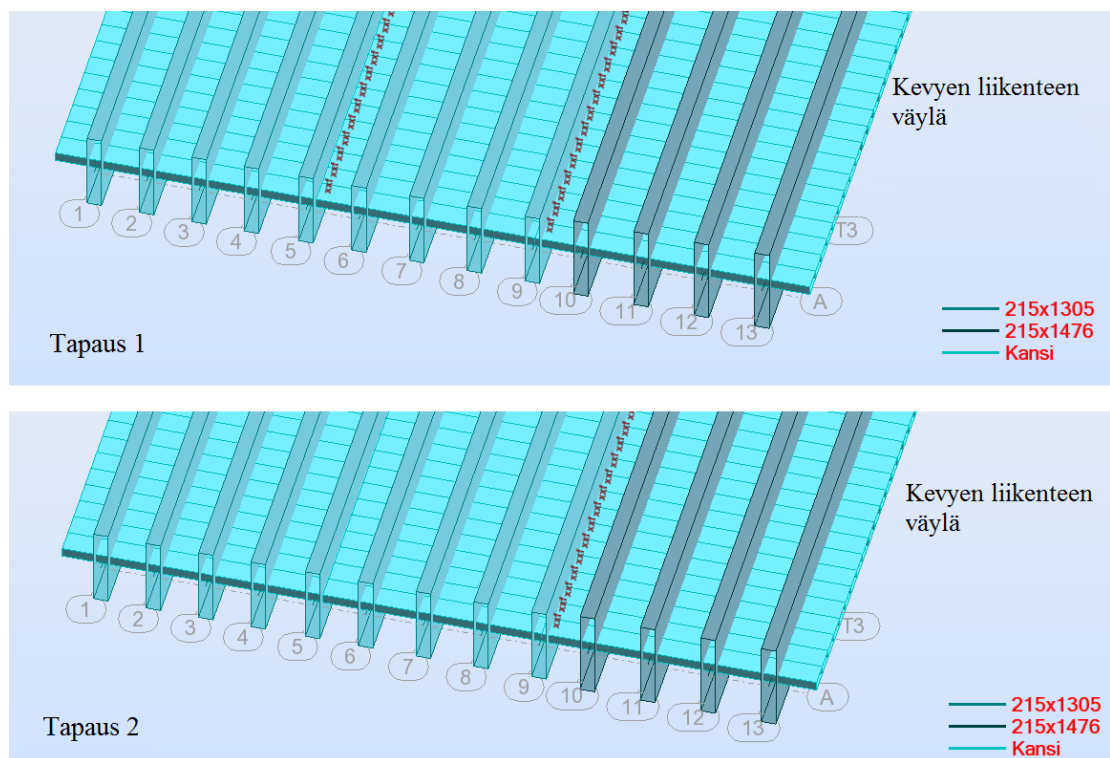
## Kannen yhtenäisyyden vaikutus

Ajoneuvoliikenteen kaistojen kohdalla kansirakenteessa on sauma, joka jakaa ajoradat omiksi kaistoikseen. Kannen yhtenäisyydellä tutkittiin, onko saumalla vaikutusta kuorman jakautumiseen.

Vertailuun otettiin kaksi tapausta:

1. Ajoratojen kannen palkkielementit on erotettu nivelellä toisistaan.
2. Ajoratojen kannen palkkielementit on yhdistetty samaan solmuun ilman vapausasteita.

Molemmissa tapauksissa kevyen liikenteen väylän kannen palkkielementit erotettiin nivelellä ajoneuvoliikenteen kaistoista. Kuvassa 39 on esitetty kuvin tapaukset, joilla tutkittiin ajoneuvoliikenteen kaistojen välisen sauman vaikutusta kuorman jakautumiseen.

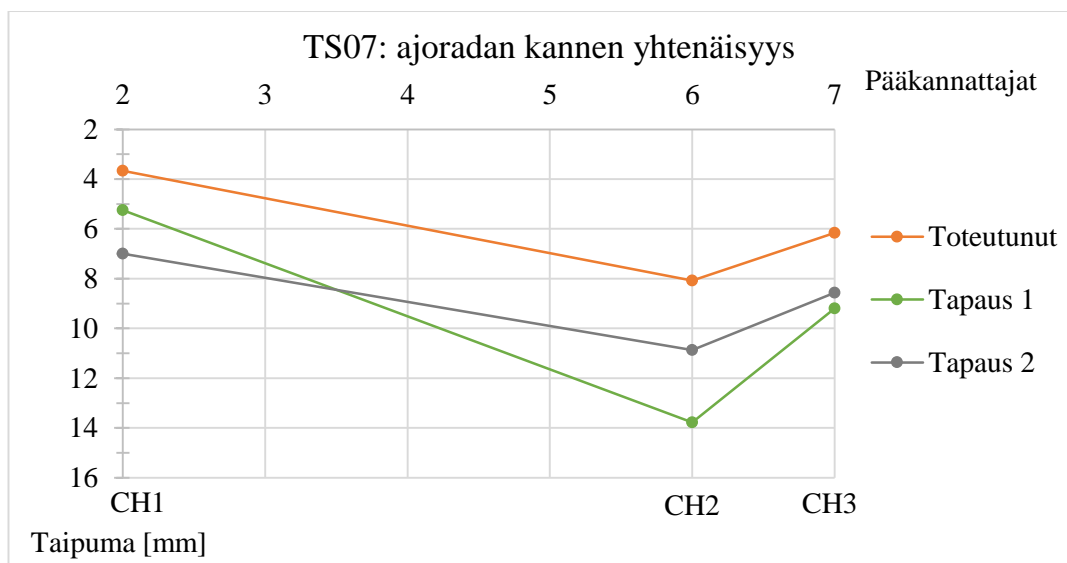


KUVA 39. Tapaukset, joilla tutkittiin kannen yhtenäisyyttä

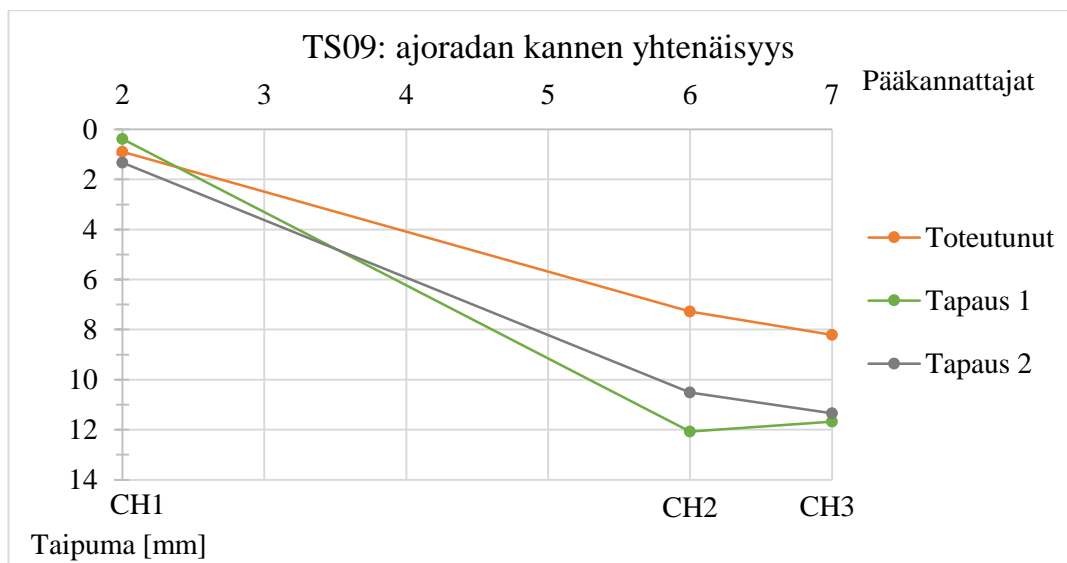
Kannen yhtenäisyyden vaikutus kuorman jakautumiseen näkyy selvimmin kuormitustapauksissa TS07 ja TS09. Näiden kuormitustapausten toteutuneet taipumat sekä laskennallisesti saadut taipumat tapauksissa 1 ja 2 on kirjattu taulukkoon 9. Tuloksista laskettiin myös laskennallisen taipuman prosentuaalinen ero toteutuneeseen taipumaan. Toteutuneista ja laskennallisista taipuma-arvoista piirretyt kuvaajat ovat kuvissa 40 ja 41.

TAULUKKO 9. Ajoratojen kannen yhtenäisyyttä tutkivien tapauksen taipuma-arvot

Ajoradan kannen yhtenäisyys						
		Taipuma-arvot [mm]			Prosentuaalinen ero [%]	
		Toteutunut	Tapaus 1	Tapaus 2	Tapaus 1	Tapaus 2
TS07	CH 1	3,7	5,3	7,0	43	91
	CH 2	8,1	13,8	10,9	70	35
	CH 3	6,2	9,2	8,6	49	39
TS09	CH 1	0,9	0,4	1,3	-58	48
	CH 2	7,3	12,1	10,5	66	44
	CH 3	8,2	11,7	11,3	42	38



KUVA 40. Kannen yhtenäisyyden tarkastelu kuormitustapauksessa TS07

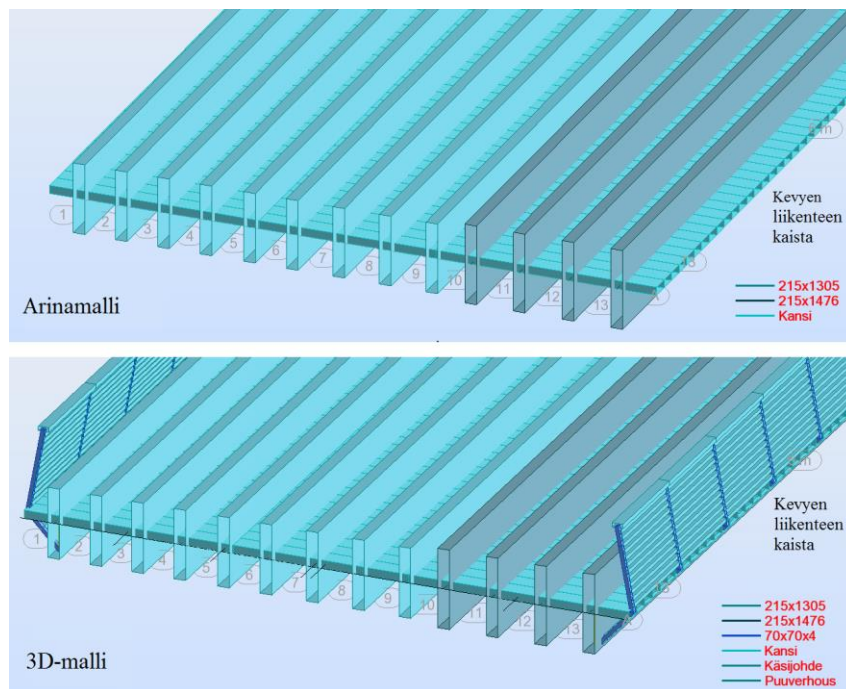


KUVA 41. Kannen yhtenäisyyden tarkastelu kuormitustapauksessa TS09

Kuvista 40 ja 41 nähdään, että tapaus 2:n mukaiset taipuma-arvot noudattelevat tapaus 1 paremmin koekuormituksessa toteutuneita taipuma-arvoja. Tapauksessa 2 kuorman jakautuminen pääkannattajille vastaa siis paremmin koekuormitustuloksia. Tapaus 2:ssa ajoradan kannen palkkielementeille ei annettu vapausasteita. Tuloksista voidaan päätellä, että ajoneuvokaistojen välinen sauma ei heikennä kuorman jakautumista. Kuorman jakautuminen mallissa vastaa hyvin koekuormitustuloksia mutta mallin taipuma-arvot ovat melko paljon suuremmat kuin koekuormituksessa mitatut taipumat. Kuorman kohdalla olevien pääkannattajien laskennallinen taipuma on noin 50 % suurempi kuin toteutunut taipuma.

### Sillankaiteen vaikutus

Sillankaiteen kannen reunaa jäykistävä vaikutus tutkittiin 3D-mallin avulla. Vertailussa 3D-mallin taipumia verrattiin arinamallin ja koekuormitustapausten taipumiin. Arinamallissa sillankaide oli jätetty mallintamatta. Kuvassa 42 on kaiteen vaikutusta tutkivat mallit. Arinamallissa kannen uloke on vapaana. 3D-mallissa kaiteen teräspotket yhdistävät kannen palkkielementtien päiden solmuja reunimmaisten pääkannattajien alareunaan.

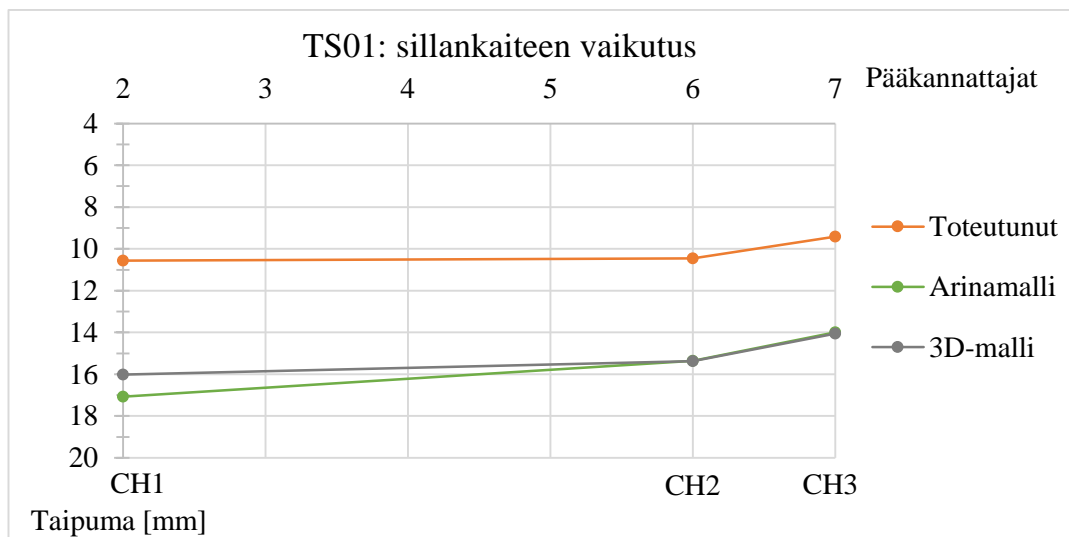


KUVA 42. Sillankaiteen vaikutusta tutkivat mallit

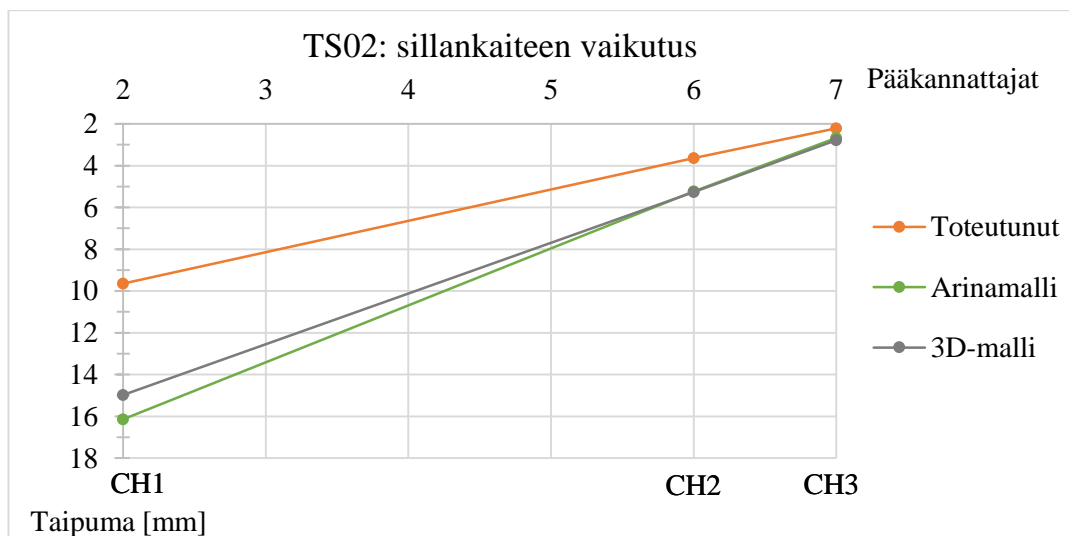
Sillankaiteen vaikutus näkyy selvimmin kuormitustapauksista Tervassilta 01 ja 02, joissa kuormitus on lähellä sillan reunaa. Näiden kuormitustapausten toteutuneet taipumat sekä mallien laskennalliset taipumat on kirjattu taulukkoon 10. Toteutuneista ja laskennallisista taipuma-arvoista piirretyt kuvaajat ovat kuvissa 43 ja 44.

TAULUKKO 10. Sillankaiteen vaikutusta tutkivien mallien taipuma-arvot

Sillankaiteen vaikutus						
		Taipuma-arvot [mm]			Prosentuaalinen ero [%]	
		Toteutunut	Arinamalli	3D-malli	Arinamalli	3D-malli
TS01	CH 1	10,6	17,1	16,0	61	52
	CH 2	10,5	15,4	15,4	47	47
	CH 3	9,4	14,0	14,1	49	49
TS02	CH 1	9,7	16,1	15,0	67	55
	CH 2	3,6	5,2	5,3	44	45
	CH 3	2,2	2,7	2,8	21	26



KUVA 43. Sillankaiteen vaikutus kuormitustapauksessa Tervassilta 01



KUVA 44. Sillankaiteen vaikutus kuormitustapauksessa Tervassilta 02



Kuvista 43 ja 44 nähdään, että sillankaiteen mallintamisella saavutettiin koekuormitustulosta paremmin vastaavat taipuman arvot. Ero ei ole kuitenkaan kovin selkeä, sillä FEM-mallien taipuma-arvot ovat vielä melko paljon suuremmat kuin koekuormituksessa mitatut taipuma-arvot. Sillankaiteen mallintamisella saatiin kuitenkin CH1:n laskennallisen ja toteutuneen taipuman prosentuaalinen erotus vastaamaan paremmin muiden mittauspisteiden prosentuaalisia eroja. Taulukosta 10 nähdään, että mittauskanavalla CH1 sillankaide pienensi taipumaerotusta noin 10 prosenttiyksiköllä. Erotus on vielä jonkin verran suurempi kuin muilla mittauskanavilla. Tähän vaikuttaa luultavasti se, että kaiteen mitat mallissa eivät vastaa täysin sillan todellisen kaiteen mittoja. Tuloksista voidaan päätellä, että sillankaide jäykistää kansirakenteen reunaa. Tulokset viittaavat myös siihen suuntaan, että jäykistävä vaikutus on todellisuudessa vielä suurempi kuin mitä kaiteen mallintamisella saavutettiin.

### Liittovaikutus kannen ja pääkannattajien välillä

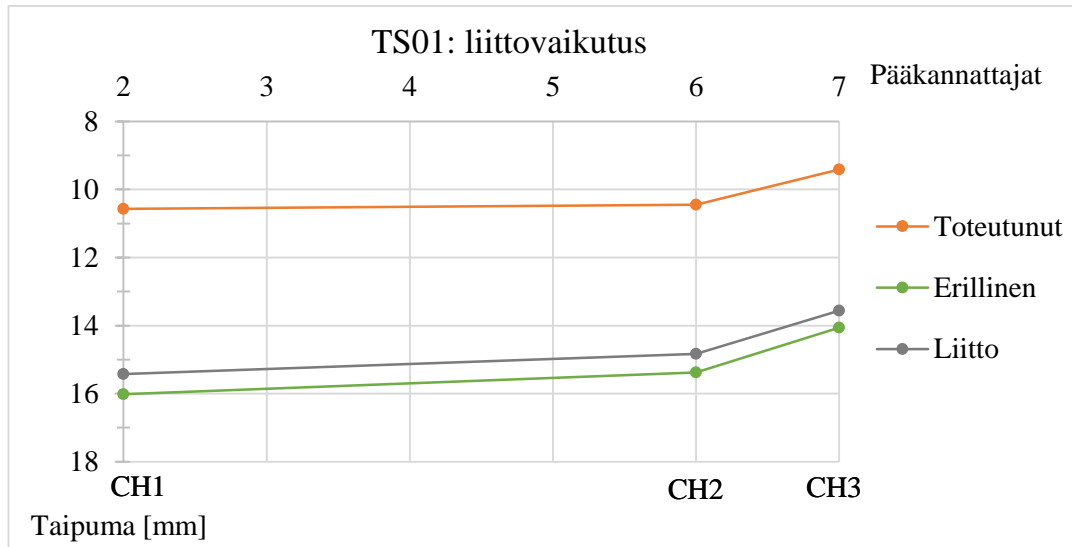
Luvussa 5.2 todettiin teoreettisen liittovaikutuksen parantavan pääkannattajien taiputusjäykkyyttä ajoratojen osuudella 4,38 % ja kevyen liikenteen kaistan osuudella 3,78 %. Teoreettinen liittovaikutus on melko pieni. Pääkannattajien taipumien perusteella ei pystytä varmuudella osoittamaan, että liittovaikutus toteutuu todellisessa rakenteessa. FEM-mallin laskennalliset taipumat ovat suurempia kuin koekuormituksessa mitatut taipumat mutta liittovaikutuksen huomioon ottaminen ei riitä selittämään kuin pienen osan taipumaeroista.

Taulukossa 11 on liittorakenteen vaikutus taipuma-arvoihin kuormitustapauksissa Tervassilta 01 ja 02. Taulukon Erillinen-sarake tarkoittaa mallia, jossa liittorakennetta ei huomioitu. Vertailu tehtiin 3D-mallin avulla.

TAULUKKO 11. Liittorakenteen vaikutus taipuma-arvoihin

Liittovaikutus						
		Taipuma-arvot [mm]			Prosentuaalinen ero [%]	
		Toteutunut	Erillinen	Liitto	Erillinen	Liitto
TS01	CH 1	10,6	16,0	15,4	52	46
	CH 2	10,5	15,4	14,8	47	42
	CH 3	9,4	14,1	13,6	49	44
TS02	CH 1	9,7	15,0	14,5	55	50
	CH 2	3,6	5,3	5,1	45	39
	CH 3	2,2	2,8	2,6	26	19

Kuvassa 45 näkyy liittorakenteen vaikutus taipuma-arvoihin kuormitustapauksessa Tervassilta 01.



KUVA 45. Liittorakenteen vaikutus taipumaan kuormitustapauksessa Tervassilta 01

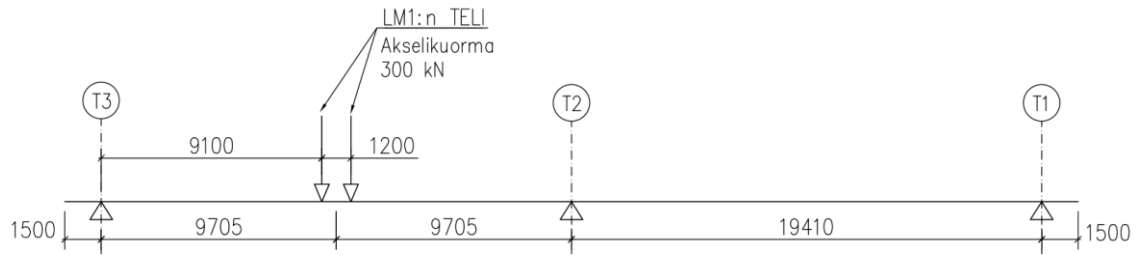
Kuvasta 45 nähdään, että liittovaikutuksen huomioon ottamisella on vain pieni vaikutus FEM-mallin ja koekuormitustulosten väliseen taipuma-arvojen erotukseen. Tuloksista ei voida varmuudella päätellä, toteutuuko liittovaikutus todellisessa rakenteessa.

### 7.3 Vertailu mitoituskuormakaavioiden aiheuttamiin rasituksiin

Tässä luvussa verrataan koekuormituksessa käytettyjen ajoneuvojen aiheuttamia rasituksia siltojen mitoituskuormakaavioiden LM1 ja LM2 aiheuttamiin rasituksiin. Kuormakaaviot esiteltiin tarkemmin luvussa 2.2. Vertailussa tutkitaan FEM-mallin avulla sillan kansirakenteessa vaikuttavaa taivutusjännitystä. Mallin ominaisuudet pidetään sellaisina, joiden todettiin parhaiten vastaavan koekuormitustuloksia edellisen luvun analyysissä. Ajoratojen kannen palkkielementeille ei siis annettu vapausasteita, ja vertailussa käytettiin sillankaiteen vaikutuksen huomioivaa 3D-mallia. Liittovaikutusta ei huomioitu, sillä sen toteutumista todellisessa rakenteessa ei pystytty varmuudella osoittamaan.

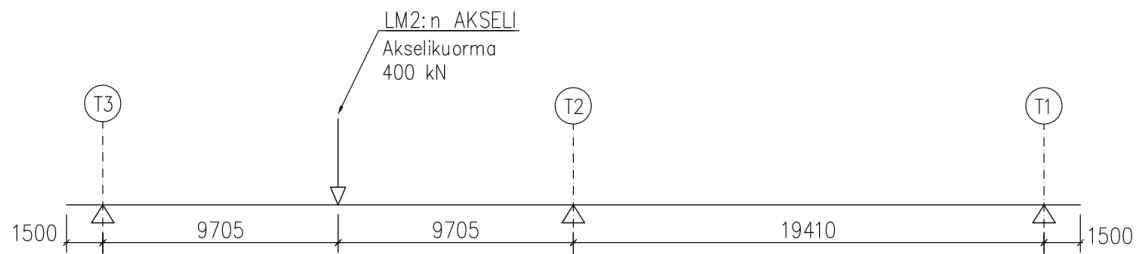
Kuormakaavioissa LM1 ja LM2 käytettävät akselikuormat ja akselivälit eivät vastaa minikään todellisen ajoneuvon mittoja, joten niiden kuormien sijoittelu poikkeaa merkittävästi koekuormitusajoneuvojen sijoittelusta. Vertailussa kuormakaavioiden ajolinjat pidettiin

FEM-mallissa samana kuin koekuormitusajoneuvojen ajolinjat. LM1:n telikuorma sijoitettiin sillan pituussuunnassa keskeisesti jännevälin puoliväliin kuvan 46 mukaisesti.



KUVA 46. Kuormakaavion LM1 sijainti sillan pituussuunnassa

LM2:n akselikuorma sijoitetaan jännevälin puoleenväliin eli noin 9,7 metrin päähän tulta kuvan 47 mukaisesti.



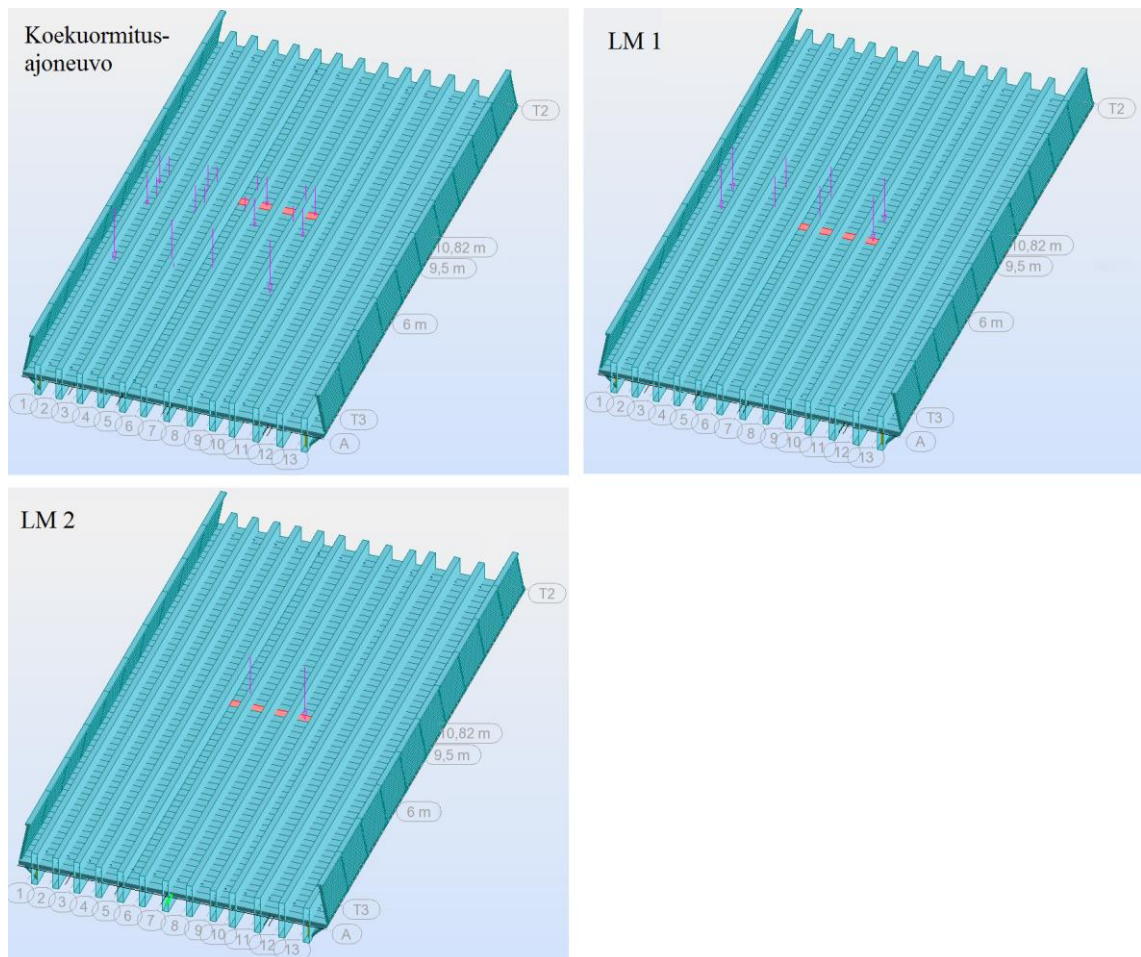
KUVA 47. Kuormakaavion LM2 sijainti sillan pituussuunnassa

Vertailu tehtiin vain koekuormitustapaukselle Tervassilta 01, sillä LM1:n tavoin siinäkin siltaa kuormitettiin kahdella ajoneuvolla. Vertailussa haettiin ajoneuvoliikenteen kaistojen kannen palkkielementeistä sellaiset, joissa kuormitus aiheutti suurimman taivutusjännityksen. Laskennalliset taivutusjännitykset eri kuormituksista koottiin taulukkoon 12. Koekuormitusajoneuvon aiheuttamasta taivutusjännityksestä laskettiin prosentuaalinen suhde LM1:n ja LM2:n kuormien aiheuttamaan taivutusjännitykseen.

TAULUKKO 12. FEM-mallin laskennalliset taivutusjännitykset eri kuormituksilla

Vertailu kuormakaavioiden aiheuttamiin rasituksiin				
Taivutusjännitys [N/mm <sup>2</sup> ]			Suhde [%]	
Koekuormitus-ajoneuvo	LM1	LM2	LM1	LM2
1,58	6,53	9,38	24	17

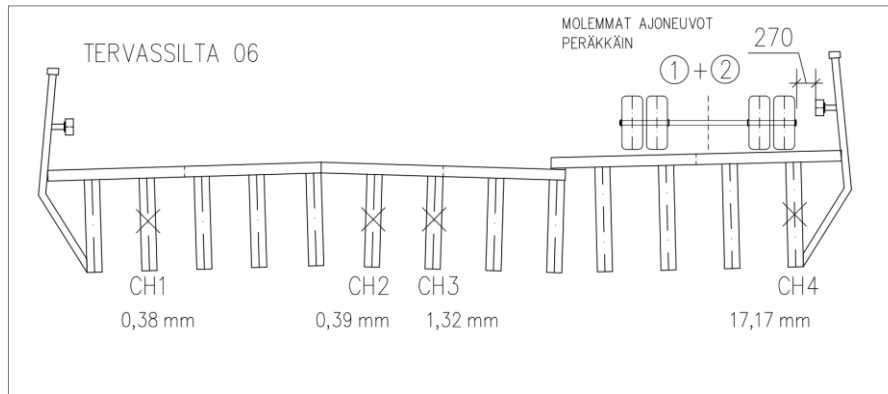
Taulukosta 12 nähdään, että koekuormitusajoneuvojen aiheuttama rasitus kannen syrjä-lankuille on laskennallisesti pieni verrattuna sillan mitoituksessa käytettävien kuorma-kaavioiden aiheuttamiin rasituksiin. Kuormakaavion LM2 todettiin näillä kuormien sijoittelulla olevan mitoittavampi kansirakenteelle. Kuormien vaikutuksia tutkittiin kuitenkin vain yhdellä sijoittelulla, joten toisenlaisella sijoittelulla LM1 olisi voinut tulla määrääväksi. Kuormitusajoneuvon aiheuttama suurin taivutusjännitys oli 17 % LM2:n aiheuttamasta taivutusjännityksestä. Kannen palkkielementtien taivutusjännityksiin vaikutti se, kuinka keskeisesti pistekuorma palkkielementille kohdistui. Kuvassa 48 on merkitty punaisella värillä ne kannen palkkielementit, joissa FEM-mallin mukaisesti oli suurin taivutusjännitys.



KUVA 48. Kuormien sijoittelu ja kannen palkkielementit, joissa oli laskennallisesti suurin taivutusjännitys

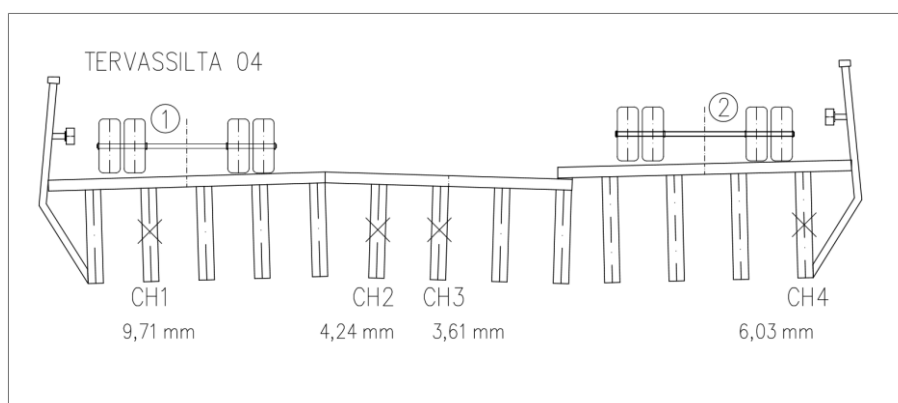
#### 7.4 Analysointi mittauspisteen CH4 mahdollisesta mittausvirheestä

Tervassillan koekuormituksessa kuormitustapauksen Tervassilta 06 jälkeen mittauspisteen CH4 anturi näytti 2 mm:n taipumaa kuormituksen poistuttua. Kuormitustapauksessa TS06 molemmat kuormitusajoneuvot sijoitettiin peräkkäin kevyenliikenteen kaistalle. Kuvassa 49 on kuormitustapauksen TS06 aikana mitatut taipuman arvot.



KUVA 49. Kuormitustapauksen Tervassilta 06 toteutuneet taipumat

Vertaamalla koekuormituksessa saavutettuja taipuma-arvoja FEM-malliin pyrittiin saamaan viitteitä siitä, johtuiko mittauspisteelle jäänyt 2 mm:n taipuma anturin telineen siirtymisestä vai oliko liimapuupalkissa mahdollisesti niin suuria jännityksiä, että palkkiin olisi jäänyt pysyvää muodonmuutosta. Myös kuormitustapauksessa TS04 (kuva 50) kuormitettiin kevyen liikenteen kaistaa, joten myös sen taipuma-arvoja verrattiin FEM-laskennalla saatuihin tuloksiin.



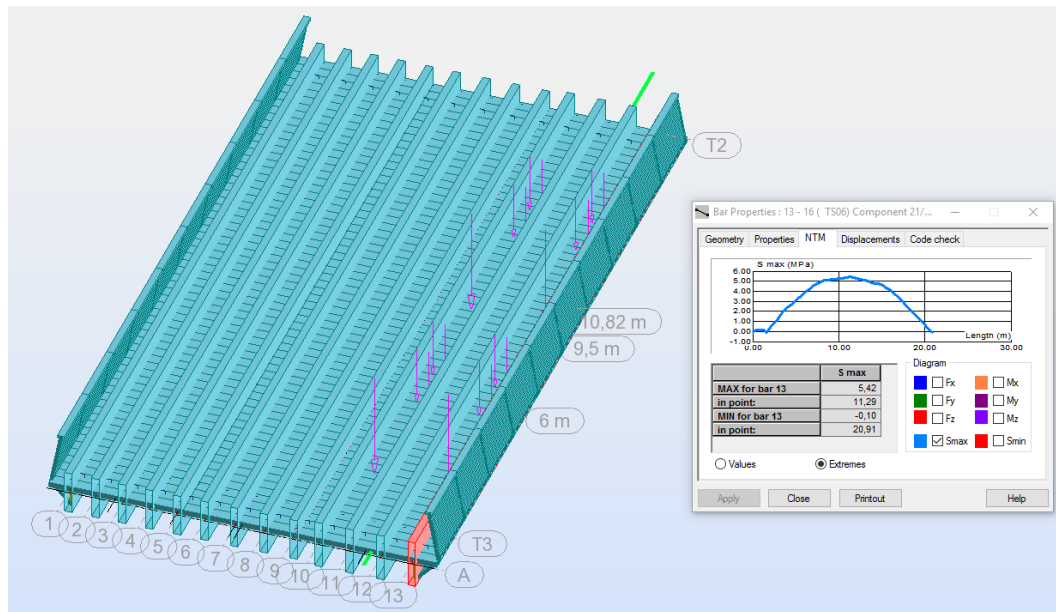
KUVA 50. Kuormitustapauksen Tervassilta 04 toteutuneet taipumat

Taulukkoon 13 koottiin koekuormitustapausten Tervassilta 04 ja 06 toteutuneet taipumat ja FEM-mallin laskennalliset taipumat mittauspisteellä CH4. Laskennallisen taipuman erotus toteutuneeseen taipumaan laskettiin millimetreinä ja prosentteina.

TAULUKKO 13. Mittauspisteen CH4 taipuma-arvot

Mittauspisteen CH4 analyysi					
		Taipuma-arvot [mm]		Erotus	
		Toteutunut	FEM-malli	[mm]	[%]
TS04	CH 4	6,0	13,1	7,1	117
TS06	CH 4	17,2	22,7	5,5	32

Taulukosta 13 nähdään, että kuormitustapauksessa Tervassilta 04 laskennallinen taipuma-arvo on 117 % suurempi kuin koekuormituksessa mitattu taipuma. Kuormitustapauksen Tervassilta 06 ero laskennallisen ja toteutuneen taipuman välillä on 32 % eli huomattavasti pienempi kuin kuormitustapauksen TS04 erotus. FEM-mallista tutkittiin myös sillan reunimmaisessa pääkannattajassa vaikuttavan taivutusjännityksen suuruus. Taivutusjännitykseksi saatiin  $5,42 \text{ N/mm}^2$ . Kuvassa 51 näkyy kuormitustapauksen Tervassilta 06 kuormien sijoittelu ja sillan reunimmaisen pääkannattajan taivutusjännityksen kuvaaja FEM-mallissa.



KUVA 51. Kuormitustapaus Tervassilta 06 FEM-mallissa

Laskennallinen taivutusjännitys pääkannattajassa on pieni, joten on melko epätodennäköistä, että pääkannattajaan olisi jäänyt pysyvää muodonmuutosta. Lisäksi kuormitustapauksen Tervassilta 04 ja 06 välillä on suuri ero, kun verrataan FEM-mallin vastaavuutta koekuormitustuloksiin. Tulokset viittaisivat siihen suuntaan, että mittauspisteen CH4 mittaustulokset saattavat olla epäluotettavia. Tämän työn luvussa 9 pohditaan tarkemmin tekijöitä, jotka saattoivat aiheuttaa mittaustuloksiin jääneen 2 mm:n taipuman.

## 8 CLT SILTARAKENTEISSA

### 8.1 CLT materiaalina

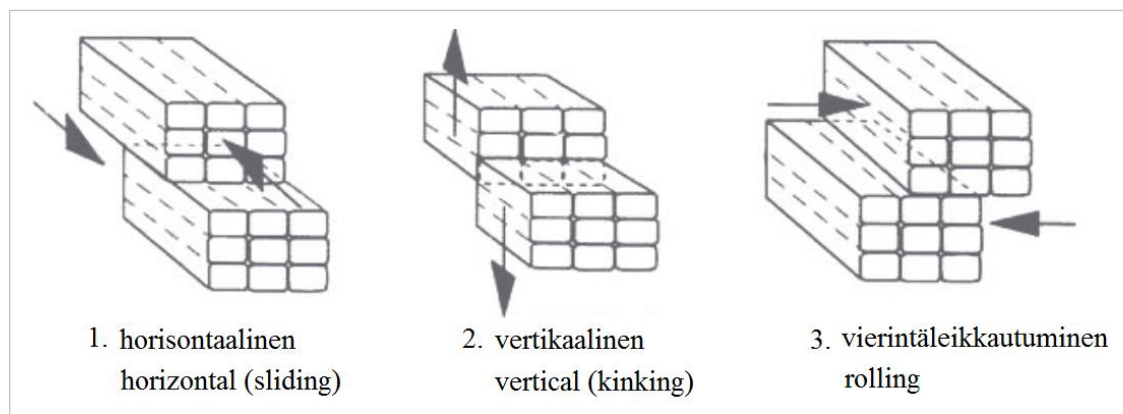
CLT (cross laminated timber) koostuu ristiinliimatuista, massivipuisista lamellikerrokista. Lamellien materiaalina on useimmiten kuusi tai mänty. Levyjen maksimikoko vaihtelee valmistajakohtaisesti ja on esimerkiksi Stora Ensolla 2,95 m x 16 m (Puuinfo 2015, 67). CLT-levyn rakenteellisiin ominaisuuksiin vaikuttaa muun muassa lamellikerrosten lukumäärä sekä lamellien paksuus ja leveys. Yleensä levyssä on 3–8 kerrosta. Esimerkiksi Stora Enson vakiorakenteisissa CLT-levyissä lamellien paksuus on 20–40 mm. Usein lamellikerroksia on pariton määrä, jolloin uloimpien kerrosten lamellien syysuunta on sama ja kuorma jakautuu pääasiassa kyseisessä suunnassa.

Vakuumiliimatusta CLT:ssä liimaus tehdään tyhjiön avulla. Uudempi tapa liimaukselle on prässätä levyt kiinni toisiinsa. Syrjäliimatusta CLT:ssä kerrokset kootaan ensin liimaamalla lamellit syrjästään toisiinsa, jonka jälkeen liima levitetään lapepuolelle ja kerrokset liimataan yhteen. Tällainen CLT on täysin ilmatiivis. Syrjäliimaus voidaan myös jättää tekemättä, jolloin lamellit vain ladotaan vierekkäin ja liima levitetään lapepuolelle seuraavaa kerrosta varten. Tällöin levy ei ole täysin ilmatiivis ja kosteuseläminen tapahtuu saumojen kohdilla. Syrjäliimatusta levyssä kosteuseläminen voi aiheuttaa halkeilua lamelleissa. Suomessa CLT:tä valmistaa Oy CrossLam Kuhmo Ltd, jonka levyt eivät ole syrjäliimattuja. Syrjäliimattua CLT:tä Suomeen tuo Stora Enso. (Puuinfo 2015, 67.)

Puu on ortotrooppinen materiaali eli sillä on erilaiset lujuusominaisuudet eri suunnissa. Syiden suunnassa puulla on selvästi korkeimmat lujuusarvot. Koska CLT:ssä kerrosten syysuunta on ristikkäin toisiinsa nähden, saadaan levyille kahteen suuntaan hyvät lujuusominaisuudet ja kuormat jakautuvat molempiin suuntiin. CLT:n lujuus- ja jäykkyysominaisuuksiin voidaan vaikuttaa muun muassa lamellien paksuutta ja kerrosten lukumäärää vaihtelemalla. CLT-levyjen tekniset ominaisuudet ja mitoitusparametrit ovat valmistajakohtaisia. CLT:n tuotestandardi SFS-EN 16351 vahvistettiin marraskuussa 2015 (SFS-EN 16351 2015, 1). Standardi on saatavilla tällä hetkellä vain englanninkielisenä.

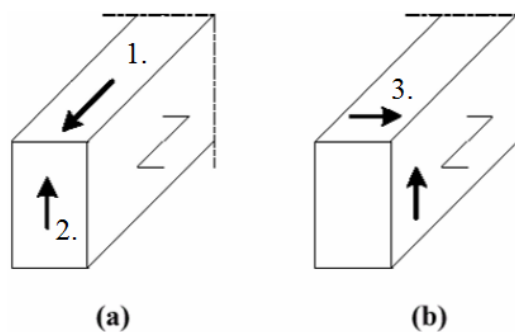
## 8.2 Leikkausvoimat CLT:ssä

Puumateriaalissa voi tapahtua kolmen tyyppistä leikkautumista: horisontaalista leikkautumista, vertikaalista leikkautumista ja vierintäleikkautumista (NZ Wood 2014). Horisontaalinen leikkautuminen aiheuttaa puun syiden liukumista syysuunnassa. Vertikaalinen leikkautuminen katkaisee puun syyt. Vierintäleikkautumisessa puun syytasot liukuvat toistensa yli eli liukuma tapahtuu syitä vastaan kohtisuorassa suunnassa. Kuvassa 52 on kuvattu puun erityyppiset leikkautumiset.



KUVA 52. Puumateriaalissa tapahtuvat erityyppiset leikkautumiset (NZ Wood 2014, muokattu)

Eurokoodissa vierintäleikkautumista käsitellään nimellä *vuosilustopinnan leikkautuminen*. Kuvan 52 sauvassa (a) toinen leikkausjännityskomponentti on syiden suuntainen. Sauvassa (b) molemmat leikkausjännityskomponentit vaikuttavat syitä vastaan kohtisuorassa suunnassa. Kuvan 53 leikkausjännityskomponenttien numerointi vastaa kuvan 52 numerointia.

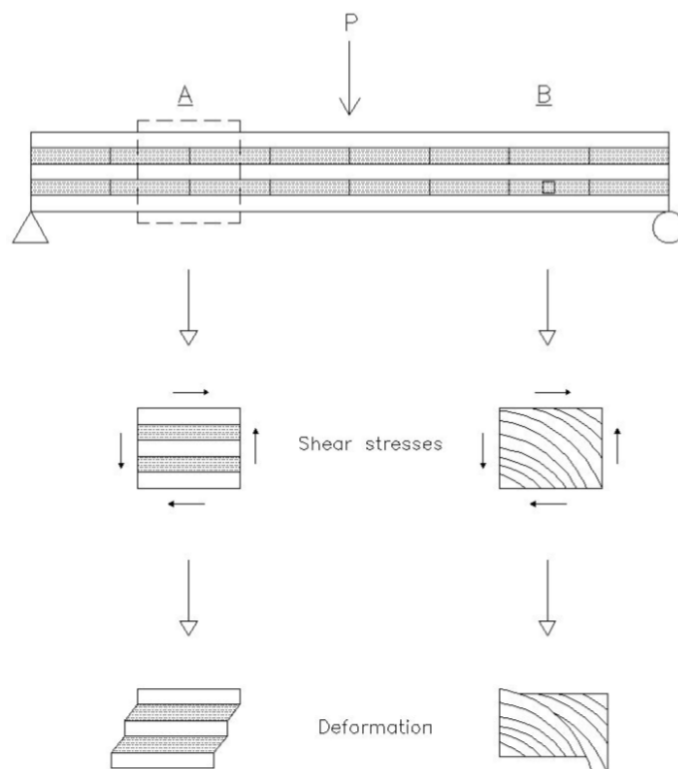


KUVA 53. Sauva, jossa toinen leikkausjännityskomponentti on syiden suuntainen (a) sekä sauva, jossa molemmat komponentit ovat syitä vastaan kohtisuorassa (b) (SFS-EN 1995-1-1 2014, 39, muokattu)



CLT:n kestävyystarkastelussa vierintäleikkautuminen nousee merkittäväksi tekijäksi levyn kerrosten ristikkäisestä syysuunnasta johtuen. Vierintäleikkausjännitykset vaikuttavat CLT-levyn poikittaisten kerrosten tason suuntaisesti. (Gagnon & Pirvu 2011, luku 3, 5.) CLT:n poikittaisissa kerroksissa vaikuttavat leikkausjännityskomponentit ovat siis kuvan 53 sauvan (b) mukaiset.

Kuvassa 54 tarkastellaan vierintäleikkautumista CLT:n poikittaisissa lamellikerroksissa. Detalji A kuvaa leikkausjännityskomponentteja ja niiden aiheuttamaa leikkausmuodonmuutosta eli liukumaa elementin tasolla. Kuvan CLT-elementissä on kolme lamellikerrosta pääsuunnassa ja kaksi kerrosta pääsuuntaa vastaan kohtisuorassa suunnassa. Detalji B kuvaa näissä kahdessa poikittaisessa kerroksessa vaikuttavia leikkausjännityskomponentteja ja niistä aiheutuvaa vierintäleikkautumista. (Behrens & Benner 2015, 6.)



KUVA 54. CLT-levyssä vaikuttavat leikkausjännityskomponentit, kun kuormitus vaikuttaa levyn tasoa vastaan kohtisuorassa suunnassa (Behrens & Benner 2015, 6)

CLT:n vierintäleikkauskestävyyteen vaikuttaa muun muassa puulaji, kosteuspitoisuus ja lamellikerrosten paksuus. Puun syitä vastaan kohtisuoran liukukertoimen  $G_R$  määrittämiseksi ei ole vakiintunut yhtä yleisesti hyväksyttyä metodia. Yleisperiaatteena on, että liukukerros syitä vastaan kohtisuorassa  $G_R$  on noin 1/10 syyn suuntaisesta liukukerros-

mesta  $G_0$ . (Gagnon & Pirvu 2011, 5-6.) Esimerkiksi Stora Enson CLT-levyjen ETA-hyväksynnässä voiman vaikuttaessa kohtisuorassa CLT-levyn tasoa vastaan, liukukertoimen arvoksi syitä vastaan kohtisuorassa eli  $G_{9090,mean}$  -arvoksi on määritetty  $50 \text{ N/mm}^2$  (ETA-14/0349 2014, 11).

Eurokoodi 5 määrittelee vuosiluston leikkautuessa leikkauslujuuden olevan noin kaksinkertainen verrattuna puun syitä vastaan kohtisuoraan vetolujuuteen (SFS-EN 1995-1-1, 38). Kuten liukukertoimelle syitä vastaan kohtisuorassa suunnassa, myös poikittaisten kerrosten vierintäleikkauslujuudelle annetaan arvot CLT-levyjen valmistajakohtaisissa ETA-hyväksynnöissä. Esimerkiksi Stora Enson ETA-hyväksynnässä annetaan eri arvot, joilla määritetään kyseinen leikkauslujuus levyssä käytetyn puulajin ja poikittaisten lamellikerrosten paksuuden perusteella. Stora Enson CLT-levylle tämä leikkauslujuuden arvo  $f_{v,9090,k}$  on  $1,70 \text{ N/mm}^2$ , kun lamellien materiaali on mäntyä ja poikittaisten lamellien paksuus  $t$  on enintään 20 mm (ETA-14/0349 2014, 11).

### 8.3 CLT:n käyttö sillan kansirakenteena

CLT:illä on toteutettu sillankansia muun muassa Keski-Euroopassa ja Norjassa. Koska Suomessa CLT:tä on käytetty lähinnä talonrakennustekniikassa, CLT-levyjen käytöstä ulkona ilman kosteuden ja lämpötilan vaihteluille alttiina ei ole kokemusta. CLT-levyjen mitoitukselle ei myöskään ole tällä hetkellä standardisoitua ohjeistusta Eurokoodeissa, vaan levyt mitoitetaan pitkälti valmistajien ohjeiden mukaisesti.

CLT:tä saa käyttää Eurokoodin mukaisissa käyttöluokissa 1 ja 2. Puurakenteen suunnitteleminen käyttöluokassa 2 edellyttää puun kyllästämisen lisäksi rakenteellista suojausta, esimerkiksi puisen siltakannen päällystämistä vesieristeellä ja kumibitumiasfaltilla (NCCI 5 2013, 14). Paineekyllästettävien CLT-levyjen materiaalina on käytettävä mäntyä. Kuusi ei sovellu kyllästettäväksi, sillä kuusen kuivussa solujen huokoset sulkeutuvat eli koko puuaines aspiroituu. Tällöin solut eivät pysty vastaanottamaan kyllästysainetta. Sama ilmiö tapahtuu männyn sydänpuulle, joka on luonnostaan lahonkestävämpää kuin pintapuu. (Pro Puu ry 2012.)

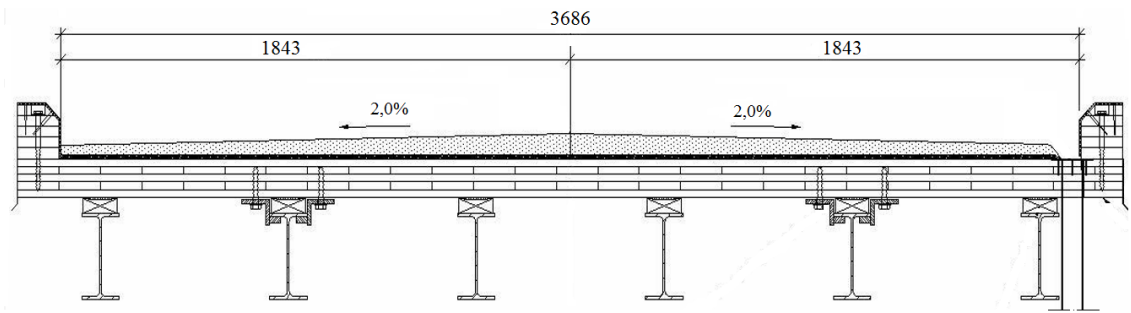
## Hundorp Bridge, Norja

Hundorp Bridge sijaitsee 70 km Lillehammerista pohjoiseen, ja se rakennettiin vuonna 1924. Silta on 5-aukkoinen vesistösilta, jonka pääkannattajina toimivat teräsristikot. Sillan yhteispituus on 200 metriä ja hyötyleveys noin 3,7 metriä, joten sillalla on vain yksi ajokaista. Alkuperäinen, teräsbetoninen kansilaatta oli jo kertaalleen vaihdettu vuonna 1980 asfalttipintaiseen, teräksisestä poimulevytyksestä muodostuneeseen kansirakenteeseen. Vuonna 2009 kannen kulutuskerros todettiin vaurioituneeksi ja kansi päätettiin vaihtaa. Silta haluttiin suunnitella kantamaan mahdollisimman suuria liikennekuormia, joten uuden kannen tuli olla aiempaa kevyempi. Sillan kansirakenteessa päädyttiin käyttämään CLT-elementtejä. Päätökseen vaikutti muun muassa se, että CLT-elementtien kanssa pystyttiin hyödyntämään sillan olemassa olevat, pituussuuntaiset IPE-kannattajat. Samalla Hundorpin sillasta tuli ensimmäinen silta Norjassa, jossa käytettiin CLT:tä. (Abrahamsen & Nyløkken 2010, 372–373, 376.) Kuvassa 55 on Hundorp Bridge.



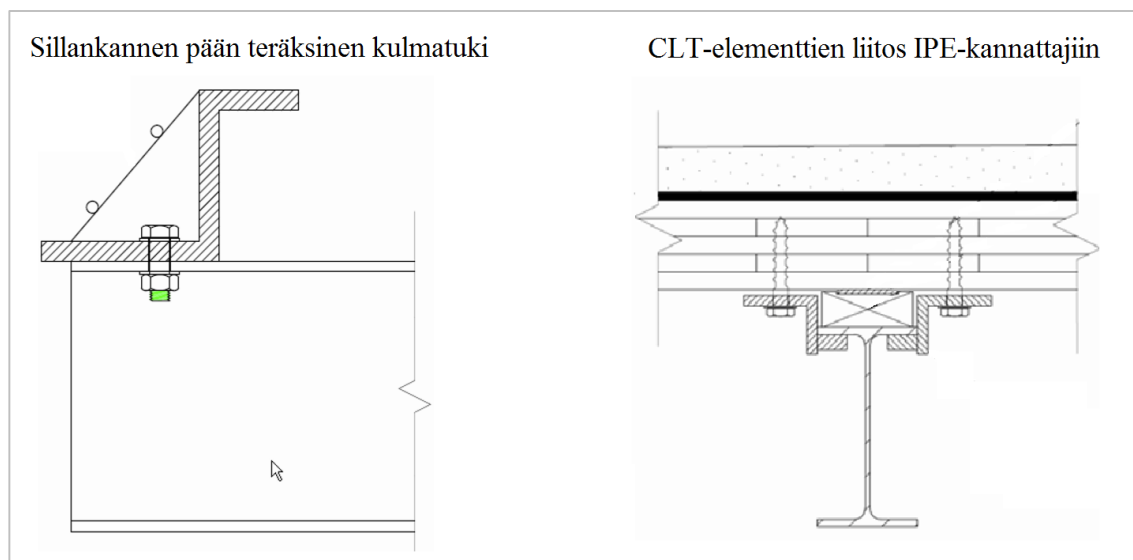
KUVA 55. Hundorp Bridge Norjassa (Abrahamsen & Nyløkken 2010, 372)

CLT-elementtien paksuus on 120 mm, leveys 1200 mm ja pituus 4000 mm. 5-kerroksiset elementit koottiin kuparikyllästetyistä lamelleista. Valmiit elementit käsiteltiin lisäksi kreosotilla. Säärasituksille alttiit elementtien reunat peitettiin kuparilevyillä ja kansi pinnoitettiin vedenpitävällä kermillä ja asfalttibetonilla. Sadevesi johdetaan pois kannelta 10 metrin välein sijaitsevien pintavesiputkien kautta, joten sillan poikkisuunnassa asfalttikerros tehtiin 2 %:n kaltevuuteen. CLT-elementit mitoitettiin käyttöluokassa 2. Kansi suunniteltiin kelluvaksi pituussuuntaisten teräskannattajien päällä, jottei puun ja teräksen erisuuruudesta lämpölaajenemisesta aiheutu jännityksiä CLT-elementeissä. (Abrahamsen & Nyløkken 2010, 374–377.) Kuvassa 56 on poikkileikkauskuva Hundorpin sillan uudesta kansirakenteesta.



KUVA 56. Hundorpin sillan uuden kansirakenteen poikkileikkaus (Abrahamsen & Nyløkken 2010, 376, muokattu)

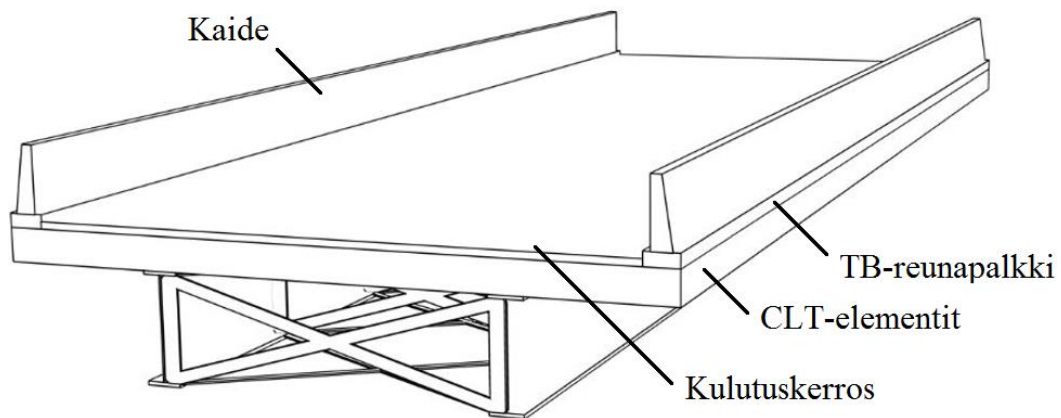
Kannen CLT-elementit on kiinnitetty toisiinsa 45 asteen kulmaan asennetuilla ruuveilla, jotka vastaanottavat liitoksessa vaikuttavat leikkausvoimat. Sillan liimapuiset reunapalkit yhdistävät elementtejä sillan pituussuunnassa ja estävät CLT-elementtien irtautumisen toisistaan ajoneuvojen jarrutuskuormien vaikutuksesta. Sillankannen päihin suunniteltiin teräksiset kulmatuet, joiden kautta ajoneuvojen jarrutuskuormat siirretään sillan pituussuuntaisille teräskannattajille. Kuvassa 57 on Hundorpin sillan liitosdetaljeja. Kuvassa vasemmalla on sillankannen pään teräksinen kulmatuki. Oikealla on kannen liitos pituussuuntaisiin kannattajiin. Kannen ja IPE-palkin välissä on lankku, jolla CLT-kansi nostettiin haluttuun korkoon, sekä teflonkaista, joka vähentää kitkaa kannen ja kannattajien välillä. (Abrahamsen & Nyløkken 2010, 377, 379.)



KUVA 57. Hundorpin sillan detaljeja (Abrahamsen & Nyløkken 2010, 377, muokattu)

## Lundin yliopiston tutkielma

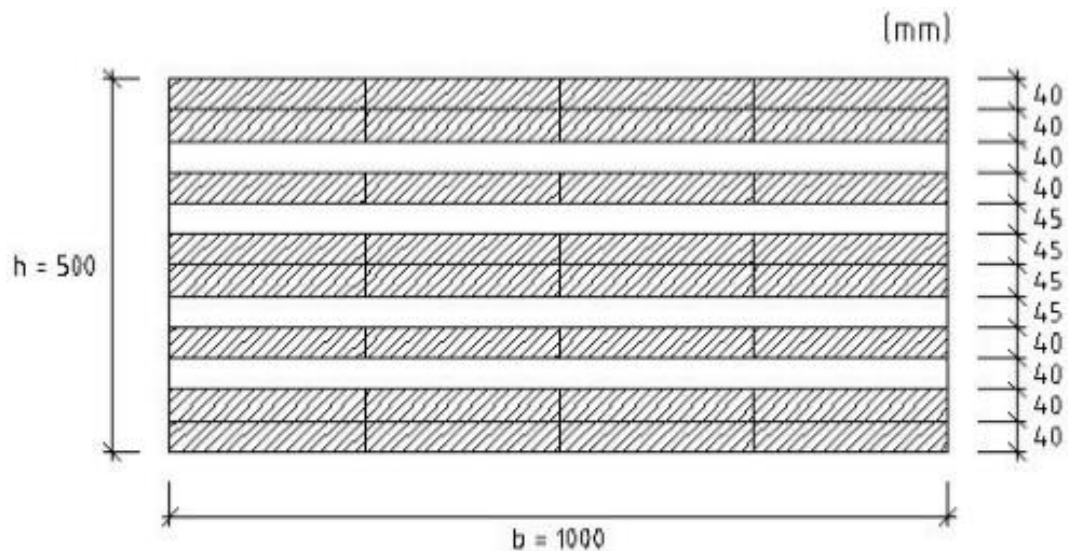
Lundin yliopistossa Ruotsissa on julkaistu vuonna 2015 tutkielma uudesta siltatyypistä. Siltatyypin on yksiaukkoinen ajoneuvoliikenteen palkkisilta, jänneväliltään 26 metriä. Pääkannattajat ovat terästä, ja sillan kansirakenne on koottu CLT-elementeistä. Tutkielmassa on muun muassa pyritty selvittämään, olisiko kyseinen siltatyypin kilpailukykyinen kohteissa, joissa nopea asennusaika on tärkeää. Tällainen kohde olisi esimerkiksi rautatien ylittävä silta, sillä niiden rakennusaikaiset häiriöt junaliikenteelle pyritään pitämään mahdollisimman vähäisinä. Tutkielmassa sillan vertailukohteena oli samantyyppinen, olemassa oleva silta, jonka kantana on paikallavalettu teräsbetonilaatta. Referenssisillassa teräsbetonikansi on suunniteltu liittorakenteena teräksisten pääkannattajien kanssa. Referenssisillan jänneväliä, leveyttä ja suunniteltuja liikennemääriä käytettiin uuden siltatyypin laskelmien pohjatietona. (Behrens & Benner 2015, 2.) Kuvassa 58 on uuden siltatyypin viitteellinen rakenne.



KUVA 58. Lundin yliopistossa suunnitellun sillan periaate (Behrens & Benner 2015, 41, muokattu)

Kannen CLT-elementit on mitoitettu itävaltalaisen KLH:n ETA-hyväksynnän saaneiden mitoitusohjeiden mukaan. KLH on yksi Euroopan suurimmista CLT-elementtien toimittajista. Sillan rakennelaskelmat tehtiin kannelle, pääkannattajille sekä pääkannattajien välisille siteille. Liitoksiin ja detaljeihin otetaan työn puitteissa kantaa vain lyhyesti. Rakennelaskelmien lisäksi tutkielmassa tehtiin kustannusarvio sillan materiaaleista ja rakennus- töistä. Tätä arviota verrattiin referenssisillan kustannuksiin. Siltatyypin tarkastelu on rajoitettu rakenteelliseen käyttäytymiseen. Sääolosuhteiden vaikutukset on jätetty tarkastelematta, joten muun muassa CLT:n viruma- ja kutistumisominaisuuksiin ei oteta kantaa. (Behrens & Benner 2015, 1–3.)

Silta on suunniteltu ilman liittovaikutusta pääkannattajien ja kannen välillä, jotta teräs-kannattajien erisuuruinen lämpölaajeneminen ei aiheuta ylimääräisiä jännityksiä CLT:ssä. Elementtien korkeus on rajoitettu 500 mm:iin KLH:n tuotantokapasiteetin mukaisesti. Elementit ja pääkannattajat uudessa siltatyypissä suunniteltiin asennettavaksi vaakasuoraan. Sillankaiteet suunniteltiin kiinnitettäväksi teräsbetonisiin reunapalkkeihin. CLT:tä ei saa suunnitella käyttöluokassa 3, joten elementtien rakenteellinen säältä suojaus on tärkeää. (Behrens & Benner 2015, 41–42, 45, 50.) Koska suunnitellussa siltatyypissä CLT-elementit on suunniteltu asennettavaksi vaakasuoraan, on ajoratojen kallistukset hoidettava pintakerroksilla. Kuvassa 59 on esitetty CLT-elementtien suunniteltu poikkileikkaus metrin leveydeltä. Elementin poikkileikkauksessa lamellien syysuunta ei vaihdu jokaisessa kerroksessa vaan elementin keskellä ja ulkopinnoissa on niin sanotut tuplakerrokset. Tämä on yksi tapa optimoida CLT-levylle halutut ominaisuudet.



KUVA 59. Suunnitellun sillan CLT-elementtien poikkileikkaus pääsuunnassa metrin leveydeltä (Behrens & Benner 2015, 46)

Uuden siltatyypin arvioitu kustannus neliömetriä kohden oli 61 % suurempi kuin referenssisillassa. Kustannusarviossa otettiin huomioon materiaalit ja rakennustyöt vain päällysrakenteen osalta. Kustannuksia referenssisilltaan nähden nosti erityisesti teräksen suurempi menekki. Esimerkiksi pääkannattajien poikkileikkausta jouduttiin kasvattamaan, koska uutta siltatyyppeä ei suunniteltu liittorakenteena. Referenssisillassa kansi ja pääkannattajat on suunniteltu liittorakenteena. CLT-sillan pääkannattajien teräsmenekin laskettiin olevan 46 % enemmän kuin referenssisillassa. On kuitenkin huomattava, että re-

ferenssisillan pääkannattajien muoto on optimoitu pienentämällä niiden poikkileikkauskokoa tukien läheisyydessä. CLT-sillan pääkannattajien poikkileikkaus pidettiin samana koko sillan pituudella. Teräsmenekki olisi luultavasti pienentynyt, jos pääkannattajien poikkileikkaus olisi optimoitu. (Behrens & Benner 2015, 86–87, 91.)

Tutkielman johtopäätöksenä on, että silta CLT-kannella ja teräksisillä pääkannattajilla on rakenteellisesti mahdollista toteuttaa. Suurin käyttöaste (99 %) rakennelaskelmissa saatiin vierintäleikkauskestävyyden tarkastelussa. Siltatyypin kilpailuetuna olisi erityisesti nopea rakennusaika. Uuden siltatyypin päällysrakenteen arvioitu rakentamisaika on kaksi viikkoa, kun referenssisillan arvioitu rakentamisaika on kolme kuukautta. Tietynlaisissa projekteissa etu kustannuksissa saattaa kääntyä uuden siltatyypin puolelle, kun otetaan huomioon rakentamisen kokonaisvaikutukset. (Behrens & Benner 2015, 88.) Esimerkiksi rakentamisen aiheuttamat katkot junaliikenteelle nostavat rakentamiskustannuksia merkittävästi. Koska CLT on merkittävästi kevyempää kuin teräsbetoni, voidaan myös olettaa, että perustuksille tuleva kuorma ja siten myös perustusten koko pienenee uudessa siltatyypissä (Behrens & Benner 2015, 88–89).

Jatkotutkimusta aiheesta pitäisi kohdentaa erityisesti keinoihin suojata CLT-elementit säärasituksilta. Hyvä sääsuojaus vähentää korjaustarvetta ja voi pienentää sillan elinkaarikustannuksia. Uuden siltatyypin liitosten ja yksityiskohtien suunnitteluun tulisi panostaa, jotta ne voitaisiin toteuttaa järkevästi ja kustannustehokkaasti. Myös teräksisten pääkannattajien poikkileikkauskoon optimointi alentaisi kustannuksia ja parantaisi siten siltatyypin kilpailukykyä. (Behrens & Benner 2015, 93.)

## 9 POHDINTA

### 9.1 Tervassillan syrjälankkukannen toiminta

Tässä työssä Tervassillan ensimmäisen koekuormituksen tuloksia analysoitiin neljän staattisen kuormitustapauksen osalta. Koekuormituksessa mitattuja taipuma-arvoa verrattiin sillasta luodun FEM-mallin laskennallisiin taipuma-arvoihin. Vertailulla tutkittiin sillan syrjälankkukannen rakenteellista toimintaa seuraavien tekijöiden osalta:

- ajoneuvoliikenteen kaistojen välisen sauman vaikutus kannen kuormanjakokykyyn
- sillankaiteen kannen reunaa jäykistävä vaikutus
- liittovaikutus syrjälankkukannen ja pääkannattajien välillä.

Vertaamalla laskennallisia ja toteutuneita taipuma-arvoja pääteltiin, että Tervassillassa ajoneuvokaistojen välinen sauma ei heikennä kannen kykyä jakaa kuormitusta pääkannattajien kesken. Laskennallisten ja toteutuneiden taipumien kuvaajien muotojen yhteneväisyys viittaa siihen, että mallissa kuormitus jakautuu sillan pääkannattajille samalla tavalla kuin todellisessa siltarakenteessa. Toisaalta ei ole täysin yksiselitteistä, että todellisen sillan kuormajakauma johtuisi yksinomaan kannen kyvystä jakaa kuormaa sillan poikkisuunnassa. Esimerkiksi pääkannattajien poikkisiteitä ei FEM-mallissa huomioitu ja ne saattavat osaltaan vaikuttaa pääkannattajissa mitattuihin taipuma-arvoihin.

Vertailulla pääteltiin myös, että sillankaide jäykistää kansilaatan reunoja. Kaide on kiinnitetty sekä kansilaatan reunaan että reunimmaisen pääkannattajan alareunaa. Tämän kiinnitystavan takia kansilaatan uloke ei pääse taipumaan vapaasti. FEM-mallissa kaiteen jäykistävä vaikutus pienensi sillan reunaa lähellä olevien pääkannattajien taipumia noin 10 prosenttiyksiköllä. Ennen kaiteen mallintamista sillan reunalla sijaitsevien pääkannattajien laskennallisen ja toteutuneen taipuman erotus oli huomattavasti suurempi kuin sisempänä sijaitsevien pääkannattajien. Kaiteen mallintamisella tämä erotus saatiin paremmin vastaamaan sisempiä pääkannattajia mutta oli vielä jonkin verran suurempi. FEM-mallissa syrjälankkukansi oli mallinnettu samaan tasoon pääkannattajien kanssa, joten kaiteen mitat mallissa eivät täysin vastanneet todellisen kaiteen mittoja. Tästä pääteltiin, että kaiteen jäykistävä vaikutus saattaa todellisuudessa olla vieläkin suurempi kuin mallintamalla todettu vaikutus.



Syrjälankkukannen ja pääkannattajien välinen mahdollinen liittovaikutus laskettiin käytämällä mekaanisin liittimin koottujen palkkien laskentakaavoja. Laskennalla todettiin, että liittovaikutuksesta saatava hyöty tällaisessa rakenteessa on pieni, sillä taivutusjäykkyyden laskettiin parantuneen alle 5 %. Puurakenteessa liittovaikutusta tarkasteltaessa osien syysuunnalla on suuri merkitys, sillä puun jäykkyyssominaisuudet ovat selvästi paremmat syiden suunnassa. Esimerkiksi sahatavaralla C30:llä kimmokerroin syiden suunnassa on 30-kertainen verrattuna syitä vastaan kohtisuoraan suuntaan.

Koekuormitustuloksista on vaikea päätellä, toteutuuko teoreettinen liittovaikutus Tervasillan todellisessa rakenteessa. 5 %:n parantunut taivutusjäykkyys voi selittyä myös puun luontaisella kimmokertoimen vaihtelulla. Tässä työssä lasketun liittovaikutuksen periaatteita ei voida myöskään soveltaa suoraan todellisen sillan mitoituksessa, sillä esimerkiksi puun kosteuseläminen ja viruma vaikuttavat liittorakenteen osien välisen leikkausliitoksen jäykkyyteen. Liittovaikutus myös pienenee entisestään, mikäli puun kosteuselämisestä syntyy rakoja syrjälankkukannen lamellien väliin. Koska syrjälankkukansi on lisäksi päällystämätön, kannen kulumisen pienentää lamellien korkeutta ja tällöin sillan kannen ja pääkannattajien liittorakenteen taivutusjäykkyys ei ole yhtä suuri kuin tässä työssä laskettiin.

FEM-mallissa kuorman suhteellinen jakautuminen pääkannattajille noudatteli koekuormitustuloksia hyvin mutta laskennalliset taipumat olivat keskimäärin 50 % suuremmat kuin koekuormituksessa mitatut taipumat. Kannen ja pääkannattajien välinen liittovaikutus voi selittää noin 5 prosenttiyksikköä tästä erotuksesta. Tässä opinnäytetyössä tutkittiin sillan syrjälankkukannen rakenteellista toimintaa, joten pääkannattajien laskennallisten ja toteutuneiden taipuma-arvojen erotuksen syytä ei tämän työn puitteissa tarkemmin tutkittu. Erotukseen mahdollisesti vaikuttaneita tekijöitä pohdittiin kuitenkin lyhyesti.

Taipuma-arvojen erotuksen saattoi vaikuttaa muun muassa pääkannattajien todellisen ja laskennallisen kimmokertoimen ero ja kuormitusajoneuvojen akselikuormien todellinen jakauma. FEM-mallissa pääkannattajien kimmokertoimenä käytettiin Eurokoodin mukaisesti GL32h:n keskimääräisen kimmokertoimen  $E_{0,mean}$  arvoa eli  $13\,700\text{ N/mm}^2$ . On mahdollista, että pääkannattajien kimmokertoimen arvo on todellisuudessa tätä suurempi. Liimapuun kimmokertoimen vaihtelu ei kuitenkaan ole niin suurta, että sillä yksinään voitaisiin selittää taipuma-arvojen erotus. Kuormitusajoneuvojen akselikuormalle oletettiin

FEM-mallia varten tietty jakauma. Jakauman muuttaminen vaikutti jonkin verran laskennalliseen taipuma-arvoon mutta vaikutus oli niin pieni, ettei se riitä selittämään laskennallisesti saatuja suurempia taipuma-arvoja, vaikka huomioitaisiin myös kimmokertoimen vaikutus.

FEM-mallin avulla tutkittiin myös koekuormitusajoneuvojen pyöräkuormista aiheutuvaa taivutusjännitystä syrjälankkukannessa. Jännityksen tasoa verrattiin NCCI 1:n mukaisiin kuormakaavioihin LM1 ja LM2. Vertailussa käytettiin vain kuormakaavioiden pistekuormia eli LM1:n tasainen kuorma jätettiin huomioimatta. Jännitykset tarkasteltiin vain yhdellä kuormien sijoittelulla. Kyseisellä sijoittelulla kuormakaavion LM2 mukaisella akselikuormalla saatiin määräävämpi vaikutus syrjälankkukannelle. LM2:n mukaisen akselikuorman aiheuttaman taivutusjännityksen arvoksi saatiin laskennallisesti  $9,4 \text{ N/mm}^2$ . Koekuormitusajoneuvoista syrjälankkukannelle kohdistuva laskennallinen taivutusjännitys oli  $1,6 \text{ N/mm}^2$ , joka on 17 % LM2:n aiheuttamasta taivutusjännityksestä.

## 9.2 Koekuormituksen tulokset

Koekuormituksessa pääkannattajien taipumat mitattiin siirtymäantureilla. Siirtymäanturien ongelmana oli, että mittauksia varten antureille jouduttiin rakentamaan erillinen teline siltapaikalle. Telineen epävakaus ja tuulinen sää saattoivat lisätä mittaustuloksiin virhettä, jonka suuruutta ei pystytä määrittämään. Sillan tutkittaviin pääkannattajiin asennetaan myöhemmin venymäliuskat, joita voidaan hyödyntää sillan seuraavissa koekuormituksissa. Venymäliuskat liimataan pääkannattajien alapintaan, joten erillisen telineen epävakaudesta aiheutuvaa mittausrvirheen mahdollisuutta ei silloin ole.

Dynaamisissa kuormitustapauksissa Tervassilta 05 ja 08 suunniteltu ja toteutunut ajolinja saattoivat poiketa toisistaan, sillä kuormitustilanteessa ajolinja oli hankala pitää suurehkon ajonopeuden ja jäisen tien pinnan vuoksi. Näitä kuormitustapauksia ei analysoitu tämän työn puitteissa. Ajolinjan mahdollinen poikkeama tulee kuitenkin ottaa huomioon, mikäli sillan tulevien koekuormitusten tuloksia halutaan verrata tämän ensimmäisen koekuormituksen mitattuihin taipuma-arvoihin.

Koekuormitustulosten mittausvirheistä tarkasteltiin siirtymäanturien tarkkuudesta aiheutuva virhe ja kohinasta aiheutuva keskimääräinen virhe anturin nollakohdassa. Koekuormitustilanteessa ei toistettu samoja kuormitustapauksia. Toistojen avulla olisi voitu arvioida satunnaisten virheiden vaikutusta mittaustulokseen. Satunnaisten virheiden osuutta ei voida laskennallisesti tarkastella, sillä ne johtuvat muun muassa mittalaitteiden käyttäjästä ja tutkimuskohteesta. Esimerkiksi edellä esitetyt anturien telineen epävakaas sekä ajolinjojen tarkkuus kuormitustapauksissa aiheuttavat satunnaista virhettä, jonka suuruutta voitaisiin arvioida vain toistamalla sama koekuormitus tarpeeksi monta kertaa.

Tervassillan seuraavissa koekuormituksissa tulee kiinnittää erityisesti huomiota taipumaan kevyen liikenteen väylän reunimmaisessa pääkannattajassa, joka tässä koekuormituksessa oli mittauspiste CH4. Koekuormitustapauksen Tervassilta 06 jälkeen mittausanturi näytti 2 mm:n taipumaa pääkannattajassa kuormituksen poistuttua. Pääkannattajan taipumaa analysoitiin vertaamalla kuormitustapausten Tervassilta 04 ja 06 tuloksia FEM-malliin. Koekuormituksen taipuma-arvon ja FEM-mallista saadun laskennallisen taivutusjännityksen arvon todettiin olevan niin pieniä, ettei niiden pitäisi aiheuttaa pysyvää muodonmuutosta pääkannattajassa. Siirtymäanturiin jääneelle 2 mm:n taipumalle oletettiin olevan kaksi mahdollista selitystä. Mittausanturin teline on saattanut siirtyä kuormituksen aikana. Anturi sijaitsi kaukana muista mittauspisteistä ja telineen tuenta saattoi olla riittämätön. On myös mahdollista, että koekuormituksessa kevyen liikenteen väylää kuormitettiin ensimmäistä kertaa näin suurella kuormalla, jolloin kuormitus on saanut pääkannattajan ikään kuin asettumaan kohdalleen.

### **9.3 CLT:n käyttömahdollisuudet**

Tässä opinnäytetyössä pohdittiin myös kirjallisuusselvityksen avulla CLT:n eli ristiinliimatun massiivipuun käyttöä siltojen kansirakenteena. CLT:n etu esimerkiksi syrjälantukanteen verrattuna on sen lamellien ristikkäisessä syysuunnassa. CLT toimii rakenteellisesti kahdessa suunnassa, jolloin kuorma jakautuu kansilaatassa tehokkaammin. Suomessa on käytetty jonkin verran betonia puusiltojen kansirakenteena. Teräsbetoni-laatan tavoin kuorma jakautuu CLT:ssä kahteen suuntaan, joten CLT-kansilaatta saattaisi olla vaihtoehto puu-betoniliittorakenteiselle sillalle. Betonirakenteiseen kansilaattaan verrattuna CLT:n etuna olisi lisäksi materiaalin keveys.

Työssä esiteltiin kaksi siltakohdetta, joissa CLT:tä on käytetty tai suunniteltu käytettäväksi kansirakenteena. Molemmissa siltakohteissa pääkannattajien materiaali on terästä, joten CLT-kantta ja pääkannattajia ei ollut suunniteltu toimimaan liittorakenteena materiaalien erilaisen lämpölaajenemisen vuoksi. Puulla lämpölaajeneminen on huomattavasti pienempää kuin teräksellä. Puusilloissa kannen ja pääkannattajien välinen liittovaikutus voitaisiin hyödyntää. Tällöin CLT:llä saavutettaisiin etua syrjälankkukanteen verrattuna, sillä osa lamellikerroksista olisi syysuunnaltaan yhteneväisiä pääkannattajien kanssa.

CLT-rakenteita saadaan suunnitella vain käyttöluokissa 1 ja 2. Siltojen puurakenteet suunnitellaan joko käyttöluokassa 2 tai 3. Liikenneviraston NCCI 5 -julkaisun (2013, 14) mukaan suunnittelu käyttöluokassa 2 edellyttää, että puu on painekyllästämisen lisäksi suojattu rakenteellisin keinoin. Puusiltojen päällysrakenteen suunniteltu käyttöikä on yleensä 50 vuotta. Pidempi käyttöikä vaatii suunnittelua käyttöluokassa 2. (NCCI 5 2013, 10–11.) CLT-kansirakennetta ei siis voida suunnitella päällystämättömänä kuten syrjälankkukantta. Päällystämättömälle syrjälankkukannelle ei kuitenkaan voida suunnitella kovin pitkää käyttöikää.

Rakenteellisen toimintansa kannalta CLT sopisi sillan kansirakenteen materiaaliksi, ja sillä on myös selviä etuja esimerkiksi syrjälankkukanteen verrattuna. CLT on materiaalina melko uusi. Keski-Euroopassa CLT:tä on käytetty aiemmin kuin Suomessa, ja esimerkiksi Itävallassa on useita siltoja, joiden kansirakenne on CLT:tä. Viime vuosina myös Norjassa ja Ruotsissa on kehitetty CLT-rakenteisia sillan kansiratkaisuja. CLT:n pitkäaikaiskestävyydestä vaihtelevissa olosuhteissa olisi kuitenkin hyvä saada lisää tutkimustietoa, koska kokemusta siitä ei vielä ole. Myös CLT-kansirakenteen liitosten ja detaljien suunnittelussa olisi aihetta kehitystyölle. Kansirakenteen detaljien ja kuivatusratkaisujen toimivuuteen vaikuttaa suunnittelun lisäksi rakennustyön huolellinen toteutus. Siltojen puuosien altistuminen kosteusrasituksille on yksi merkittävimmistä tekijöistä, jotka lyhentävät puusiltojen elinkaarta.

## LÄHTEET

Abrahamsen R. & Nyløkken T. 2010. Bridge deck rehabilitation using cross-laminated timber. Esitelmä. Teoksessa Malo K., Kleppe O. & Dyken T. (toim.) 2010. Proceedings of the International Conference Timber Bridges ICTB2010. Trondheim: Tapir Academic Press, 371–382.

Behrens H. & Benner P. 2015. A New Bridge Proposal - Road Bridge with a Cross-Laminated Timber Slab. Lunds Tekniska Högskola. Lunds Universitet. Avdelningen för Konstruktionsteknik. Examensarbete.

ETA-14/0349. 2014. European Technical Assessment 2.10.2014. Tulostettu 10.3.2016. <http://www.clt.info/wp-content/uploads/2013/06/European-Technical-Assessment-ETA-english.pdf>

Gagnon, S. & Pirvu C. (toim.) 2011. CLT handbook: cross-laminated timber. Canadian ed. Pointe-Claire, Canada: FPInnovations.

Kevyt ja kestävä puusilta. 2015. Puuinfo. Esite. Tulostettu 2.4.2016. <http://www.puuinfo.fi/sites/default/files/Puusiltaesite.pdf>

Kovanen, H. 2014. Mitoitusohjelman rakenne ja käyttöliittymä puurakenteiden liitoksille. Aalto-yliopisto, Espoo. Rakennustekniikan laitos. Diplomityö.

Kyowa Electronic Instruments. DTT-A/DTS-A. Displacement Transducers. Specifications. Tekniset tiedot. PDF-versio. Tallennettu 29.2.2016. Tampereen ammattikorkeakoulu. Tieto saatavilla myös <http://www.kyowa-ei.com/eng/product/category/sensors/dts-a/index.html>

Liittorakenteiden suunnittelu ja mitoitus. 2012. Eurocode 4 -oppikirja, by 58. 1. painos. Helsinki: BY-Koulutus Oy & Teräsrakenneyhdistys ry.

NCCI 1 - Eurokoodin soveltamisohje. Siltojen kuormat ja suunnitteluperusteet. 2014. Liikenneviraston ohjeita 24/2014. Helsinki: Liikennevirasto.

NCCI 5 - Eurokoodin soveltamisohje. Puurakenteiden suunnittelu. 2013. Liikenneviraston ohjeita 25/2013. Helsinki: Liikennevirasto.

Noponen, S. TkL, silta-asiantuntija. 2016. Liittovaikutus syrjälankkukannen ja pääkannattajien välillä. Sähköpostiviesti. [sami.noponen@liikennevirasto.fi](mailto:sami.noponen@liikennevirasto.fi). Luettu 18.3.2016.

NZ Wood. 2014. Stresses in plywood components. Infomaatioesite. Tulostettu 5.4.2016. <http://www.nzwood.co.nz/wp-content/uploads/2013/06/plystresses.pdf>

Pro Puu ry. 2012. Puutieto. Luettu 10.3.2016. [http://www.puuproffa.fi/Puu-Proffa\\_2012/fi/puun-rakenne/lujuus](http://www.puuproffa.fi/Puu-Proffa_2012/fi/puun-rakenne/lujuus)

Puuinfo. 2015. CLT Ristiinliimattu massiivipuu. Puu-lehti 3/15, 66–69.

Puurakenteet - STEP 1. 1996. Tampere: Rakennustieto Oy. Alkuperäinen teos 1995.

Puurakenteet - STEP 2. 1998. Suom. Suortti-Suominen T. Tampere: Rakennustieto Oy. Alkuperäinen teos 1995.

Saarivirta, K. 2006. Siltojen pystysuorien liikennekuormien kansalliset valinnat Eurocodeen. Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennetekniikan laitos. Diplomityö.

SFS-EN 16351. Timber structures. Cross laminated timber. Requirements. 9.11.2015. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.

SFS-EN 1991-2. Eurokoodi 1. Rakenteiden kuormat. Osa 2: Siltojen liikennekuormat. 29.3.2004. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.

SFS-EN 1995-1-1. Eurokoodi 5. Puurakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. 16.6.2014. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.

SFS-EN 1995-2. Eurokoodi 5: Puurakenteiden suunnittelu. Osa 2: Sillat. 21.12.2004. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.

Siltojen kantavuuslaskentaohje. 2015. Liikenneviraston ohjeita 36/2015. Helsinki: Liikennevirasto.

Tekes. 2014. Suomi maailmanluokan innovaatiokeskittymäksi. INKA-ohjelmaesite. Luettu 1.4.2016. [http://www.tekes.fi/globalassets/julkaisut/inka\\_ohjelmaesite\\_2014.pdf](http://www.tekes.fi/globalassets/julkaisut/inka_ohjelmaesite_2014.pdf)

Tervassillan piirustukset. Piirustusnumerot 4/16348/1, 4/16348/6, 4/16348/8.1 ja 4/16348/9.1. Insinööritoimisto Suunnittelukide Oy.

Valtioneuvoston asetus ajoneuvojen käytöstä tiellä annetun asetuksen muuttamisesta 6.6.2013/407.

Vuorio, V. rakennesuunnittelija. 2015. Haastattelu 18.11.2015. Haastattelija Viljanen, H.

## LIITTEET

### Liite 1. Ominaislujuudet materiaaleille GL32h ja C30

Taulukossa lujuusominaisuuksien, kimmomodulin ja liukumodulin yksikkö on [N/mm<sup>2</sup>].  
Tiheyden yksikkö on [kg/m<sup>3</sup>].

Ominaisuus	Symboli	GL32h	C30
taivutuslujuus	$f_{m,k}$	32	30
vetolujuus	$f_{t,0,k}$	22,5	18
	$f_{t,90,k}$	0,5	0,4
puristuslujuus	$f_{c,0,k}$	29	23
	$f_{c,90,k}$	3,3	2,7
leikkauslujuus	$f_{v,k}$	3,8	4,0
kimmomoduli	$E_{0,mean}$	13 700	12 000
	$E_{90,mean}$	460	400
liukumoduli	$G_{mean}$	850	750
tiheys	$\rho_k$	430	380
	$\rho_{mean}$	500	460

(NCCI 5 2013, 24–25.)

1(3)

Liite 2. Tehollisen taivutusjäykkyyden laskenta

Tiheyden keskiarvo  $\rho_{m,1}$  syrjälankuille on  $460 \text{ kg/m}^3$  ja  $\rho_{m,2}$  pääkannattajille  $500 \text{ kg/m}^3$ .

$$\rho_m = \sqrt{460 \text{ kg/m}^3 * 500 \text{ kg/m}^3} = 479,58... \text{ kg/m}^3$$

$$K_{ser} = 479,58...^{1,5} * 4,5^{0,8} / 30 = 1166,12... \text{ N/mm}$$

**Tehollinen taivutusjäykkyys  $(EI)_{ef,1}$  ajoneuvokaistojen osuudella**

Pääkannattajat:  $215 \times 1305 \text{ mm}^2$

$$A_1 = 800 \text{ mm} * 150 \text{ mm} = 120\,000 \text{ mm}^2$$

$$I_1 = \frac{800 \text{ mm} * (150 \text{ mm})^3}{12} = 225 * 10^6 \text{ mm}^4$$

$$A_2 = 215 \text{ mm} * 1305 \text{ mm} = 280\,575 \text{ mm}^2$$

$$I_2 = \frac{215 \text{ mm} * (1305 \text{ mm})^3}{12} = 398,18... * 10^8 \text{ mm}^4$$

$$\gamma_1 = \left( 1 + \frac{\pi^2 * 400 \text{ N/mm}^2 * 120\,000 \text{ mm}^2 * 50 \text{ mm}}{1166,12... \text{ N/mm} * (19\,410 \text{ mm})^2} \right)^{-1} = 0,948...$$

$$a_2 = \frac{0,948... * 400 \text{ N/mm}^2 * 120\,000 \text{ mm}^2 * (150 \text{ mm} + 1305 \text{ mm})}{2 * (0,948... * 400 \text{ N/mm}^2 * 120\,000 \text{ mm}^2 + 1,0 * 13\,700 \text{ N/mm}^2 * 280\,575 \text{ mm}^2)}$$

$$= 8,518... \text{ mm}$$

(jatkuu)



2(3)

$$a_1 = \left( \frac{1305 \text{ mm}}{2} + \frac{150 \text{ mm}}{2} \right) - 8,518 \dots \text{mm} = 718,98 \dots \text{mm}$$

$$(EI)_{ef,1}$$

$$= \left( 400 \text{ N/mm}^2 * \left( 225 * 10^6 \text{ mm}^4 \right) + 0,948 \dots * 400 \text{ N/mm}^2 * 120\,000 \text{ mm}^2 * \left( 718,98 \dots \text{mm} \right)^2 \right) +$$

$$\left( 13\,700 \text{ N/mm}^2 * \left( 398,18 \dots * 10^8 \text{ mm}^4 \right) + 1,0 * 13\,700 \text{ N/mm}^2 * 280\,575 \text{ mm}^2 * \left( 8,518 \dots \text{mm} \right)^2 \right)$$

$$= 5,6943 \dots * 10^{14} \text{ Nmm}^2 = 569,43 \dots \text{MNm}^2$$

Pelkän liimapuupalkin taivutusjäykkyys  $(EI)_{gl,1}$

$$(EI)_{gl,1} = 13\,700 \text{ N/mm}^2 * 398,18 \dots * 10^8 \text{ mm}^4 = 5,4551 \dots * 10^{14} \text{ Nmm}^2 = 545,51 \dots \text{MNm}^2$$

$$\frac{(EI)_{ef,1}}{(EI)_{gl,1}} = \frac{569,43 \dots \text{MNm}^2}{545,51 \dots \text{MNm}^2} = 1,04383 \dots$$

Taivutusjäykkyys ajoratojen osuudella on 4,38 % parempi, kun liittovaikutus otetaan huomioon.

**Tehollinen taivutusjäykkyys  $(EI)_{ef,2}$  kevyen liikenteen väylän osuudella**

Pääkannattajat:  $215 \times 1476 \text{ mm}^2$

$$A_1 = 800 \text{ mm} * 150 \text{ mm} = 120\,000 \text{ mm}^2$$

$$I_1 = \frac{800 \text{ mm} * (150 \text{ mm})^3}{12} = 225 * 10^6 \text{ mm}^4$$

$$A_2 = 215 \text{ mm} * 1476 \text{ mm} = 317\,340 \text{ mm}^2$$

3(3)

$$I_2 = \frac{215 \text{ mm} * (1476 \text{ mm})^3}{12} = 576,12... * 10^8 \text{ mm}^4$$

$$\gamma_1 = 0,948...$$

$$a_2 = \frac{0,948... * 400 \text{ N/mm}^2 * 120\,000 \text{ mm}^2 * (150 \text{ mm} + 1476 \text{ mm})}{2 * (0,948... * 400 \text{ N/mm}^2 * 120\,000 \text{ mm}^2 + 1,0 * 13\,700 \text{ N/mm}^2 * 317\,340 \text{ mm}^2)}$$

$$= 8,428... \text{ mm}$$

$$a_1 = \left( \frac{1476 \text{ mm}}{2} + \frac{150 \text{ mm}}{2} \right) - 8,428... \text{ mm} = 804,57... \text{ mm}$$

$$(EI)_{ef,2}$$

$$= (400 \text{ N/mm}^2 * 225 * 10^6 \text{ mm}^4 + 0,948... * 400 \text{ N/mm}^2 * 120\,000 \text{ mm}^2 * (804,57... \text{ mm})^2) +$$

$$(13\,700 \text{ N/mm}^2 * 576,12... * 10^{12} \text{ mm}^4 + 1,0 * 13\,700 \text{ N/mm}^2 * 317\,340 \text{ mm}^2 * (8,428... \text{ mm})^2)$$

$$= 8,1917... * 10^{14} \text{ Nmm}^2 = 819,17... \text{ MNm}^2$$

Pelkän liimapuupalkin taivutusjäykkyys  $(EI)_{gl,2}$

$$(EI)_{gl,2} = 13\,700 \text{ N/mm}^2 * 576,12... * 10^8 \text{ mm}^4 = 7,8929... * 10^{14} \text{ Nmm}^2 = 789,29... \text{ MNm}^2$$

$$\frac{(EI)_{ef,2}}{(EI)_{gl,2}} = \frac{819,17... \text{ MNm}^2}{789,29... \text{ MNm}^2} = 1,03785...$$

Taivutusjäykkyys kevyen liikenteen väylän osuudella on 3,78 % parempi, kun liittovai-  
kutus otetaan huomioon.

## Liite 3. Koekuormitustapaukset

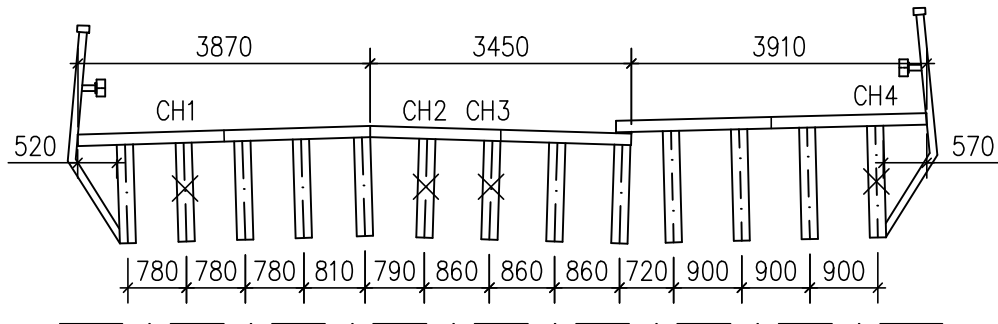
Projekti <b>TERVASSILLAN KOEKUORMITUS</b>	Sisältö <b>KUORMITUSTAPAUKSET</b>	Mittakaava 1:100 1:200
Suunnittelija <b>HELI VILJANEN TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU</b>	Työ <b>OPINNÄYTETYÖ</b> Päiväys 10.02.2016	<b>TERVASSILTA TASOKUVA JA POIKKILEIKKAUS</b>

Koekuormitus toteutetaan tukivälillä T2–T3. Apuviivat sijaitsevat sillan pituussuunnassa kaistojen keskilinjalta ja poikittaissuunnassa 6 metrin etäisyydellä tuen keskilinjalta.

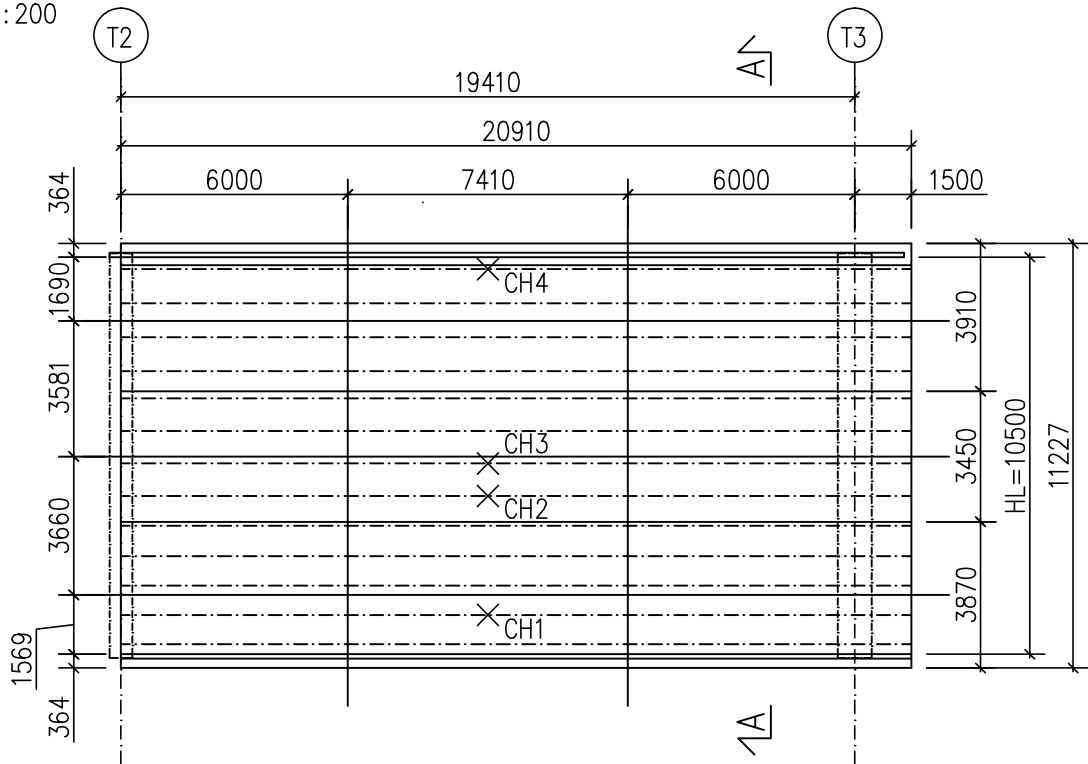
1:100

A–A

X = PÄÄKANNATAJA, JOSSA MITTAUSPISTE



1:200



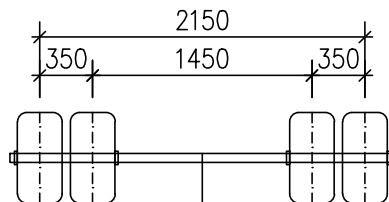
(jatkuu)

Projekti <b>TERVASSILLAN KOEKUORMITUS</b>	Sisältö <b>KUORMITUSTAPAUKSET</b>	Mittakaava 1:50 1:100
Suunnittelija <b>HELI VILJANEN TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU</b>	Työ <b>OPINNÄYTETYÖ</b> Päiväys 10.02.2016	<b>TERVASSILTA KUORMITUS- AJONEUVOT</b>

Sillan kuormitus toteutetaan kahdella 3-akselisella kuorma-autolla, jotka lastataan täyteen sorakuormaan. Tyhjän auton massa on noin 11 tn ja sorakuorman massa on noin 15 tn. Yhden ajoneuvon kokonaismassa on tällöin noin 26 tn.

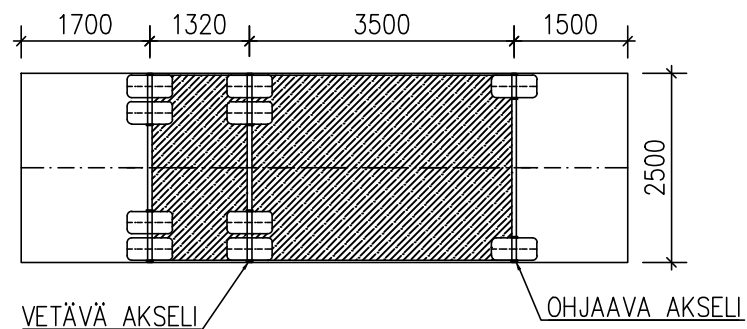
1:50

PARIYÖRÄLLISEN AKSELIN RENKAIDEN KESKIÖ-  
LINJOJEN ETÄISYYDET.



1:100

AUTOJEN ULKOMITAT JA AKSELIVÄLIT. KUORMITUSTAPAUKSISSA  
ON ESITETTY VAIN AKSELISTON RAJAAMA VIIVOITETTU ALUE.

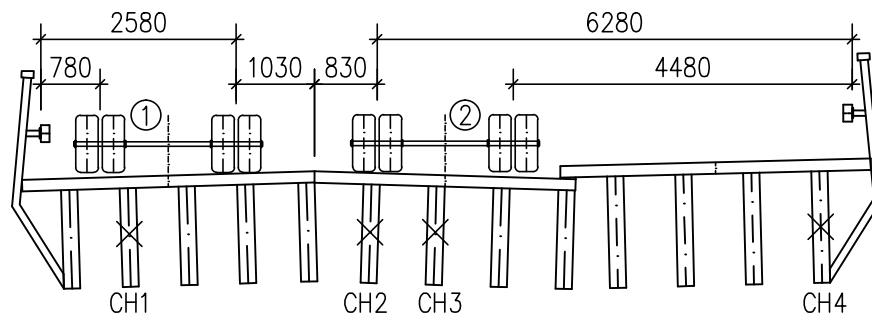


Projekti <b>TERVASSILLAN KOEKUORMITUS</b>	Sisältö <b>KUORMITUSTAPAUKSET</b>	Mittakaava 1:100 1:200
Suunnittelija <b>HELI VILJANEN TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU</b>	Työ <b>OPINNÄYTETYÖ</b> Päiväys 10.02.2016	<b>TERVASSILTA_01</b>

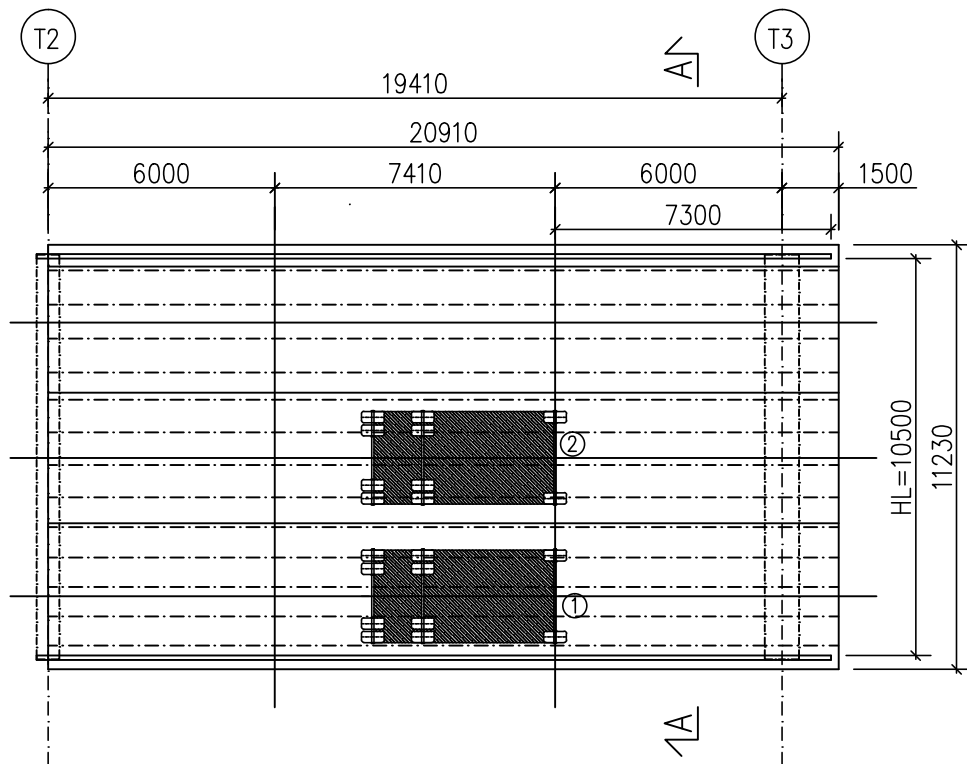
Ajoneuvoliikenteen kaistat kuormitettu keskeisesti.  
Staattinen kuormitus.

1:100 MITAT SILTAJOHTEEEN TAKAPINNASTA SEKÄ KAISTOJEN SAUMASTA.

A-A



1:200

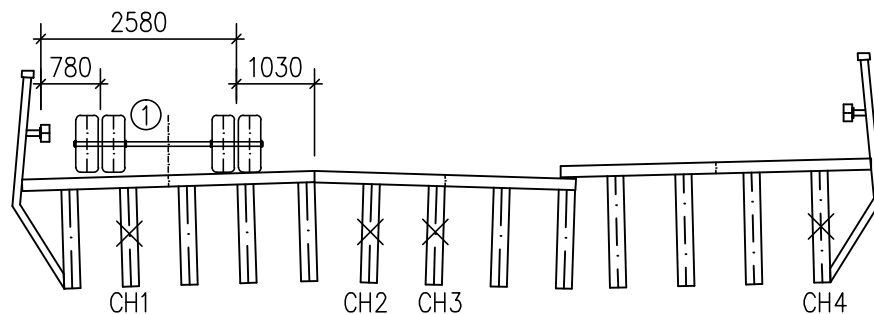


Projekti <b>TERVASSILLAN KOEKUORMITUS</b>	Sisältö <b>KUORMITUSTAPAUKSET</b>	Mittakaava 1:100 1:200
Suunnittelija <b>HELI VILJANEN TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU</b>	Työ <b>OPINNÄYTETYÖ</b> Päiväys <b>10.02.2016</b>	<b>TERVASSILTA_02</b>

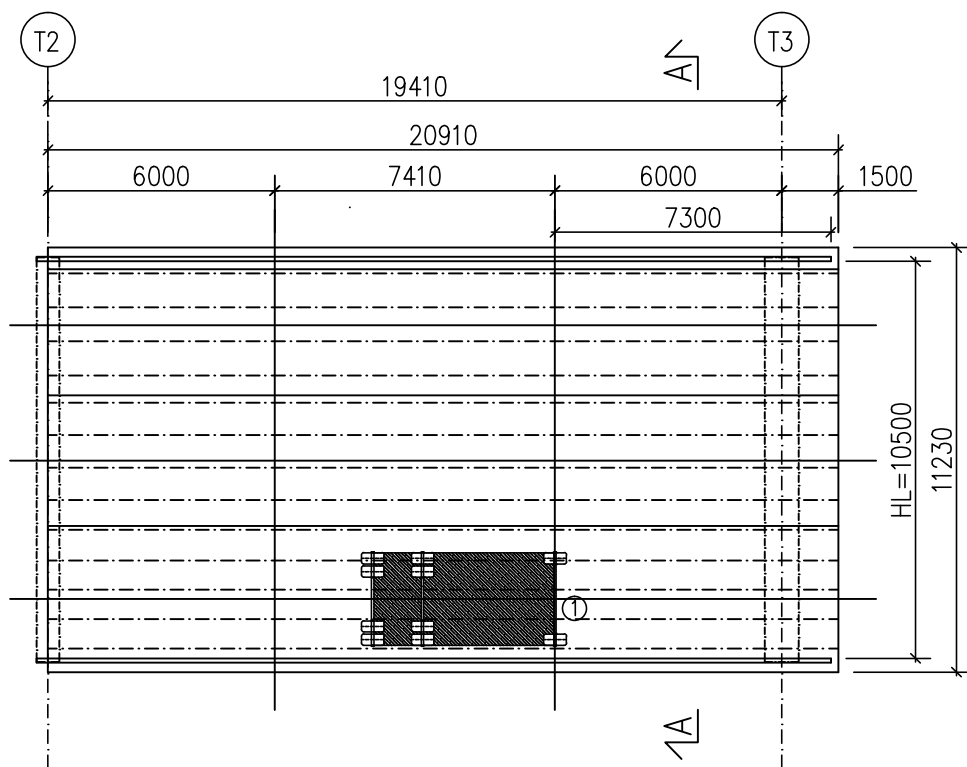
Reunimmainen ajoneuvoliikenteen kaista kuormitettu keskeisesti.  
Staattinen kuormitus.

1:100 MITAT SILTAJOHTEEN TAKAPINNASTA SEKÄ KAISTOJEN SAUMASTA.

A-A



1:200



Projekti <b>TERVASSILLAN KOEKUORMITUS</b>	Sisältö <b>KUORMITUSTAPAUKSET</b>	Mittakaava 1:100 1:200
Suunnittelija <b>HELI VILJANEN TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU</b>	Työ <b>OPINNÄYTETYÖ</b> Päiväys <b>10.02.2016</b>	<b>TERVASSILTA_03</b>

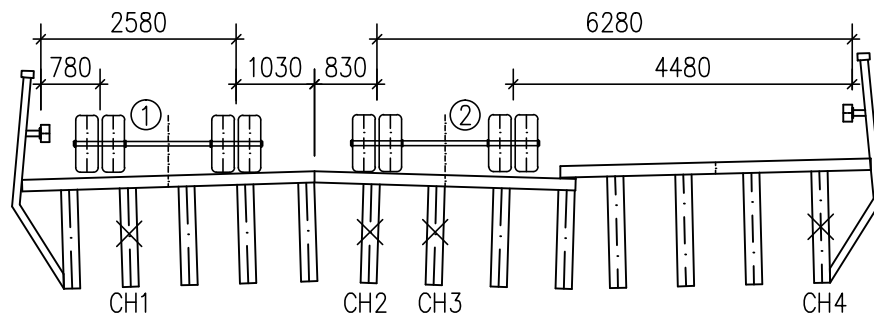
Ajoneuvoliikenteen kaistat kuormitettu keskeisesti.  
Staattinen ja dynaaminen kuormitus 20 km/h.

1:100 MITAT SILTAJOHTEEN TAKAPINNASTA SEKÄ KAISTOJEN SAUMASTA.

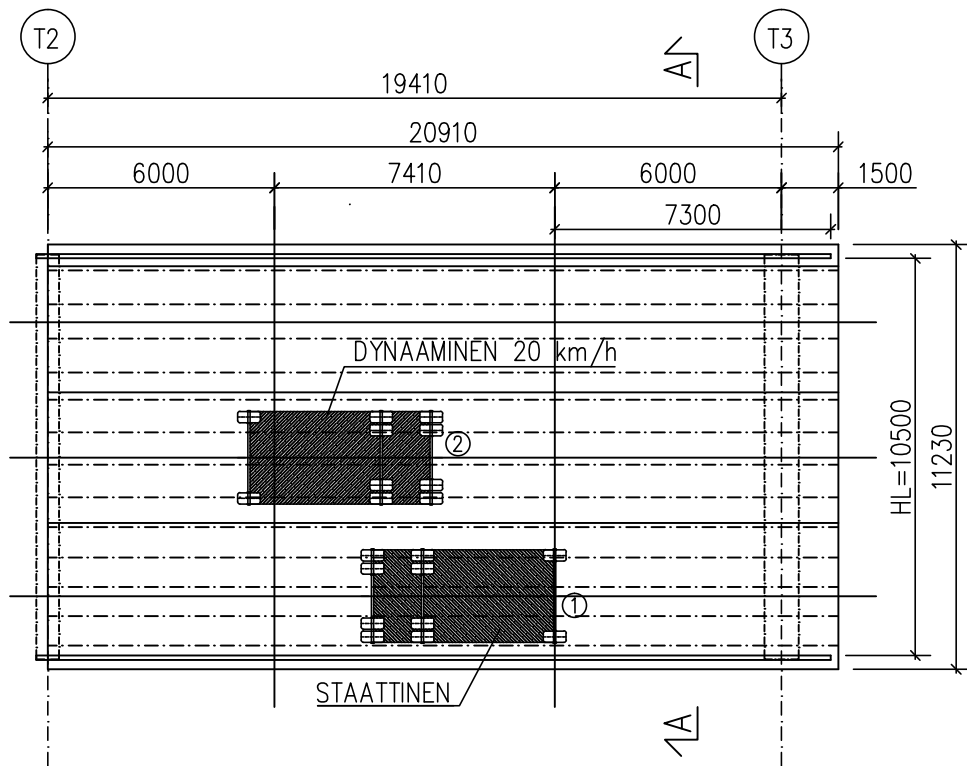
A-A

1. STAATTINEN

2. DYNAAMINEN 20 km/h



1:200

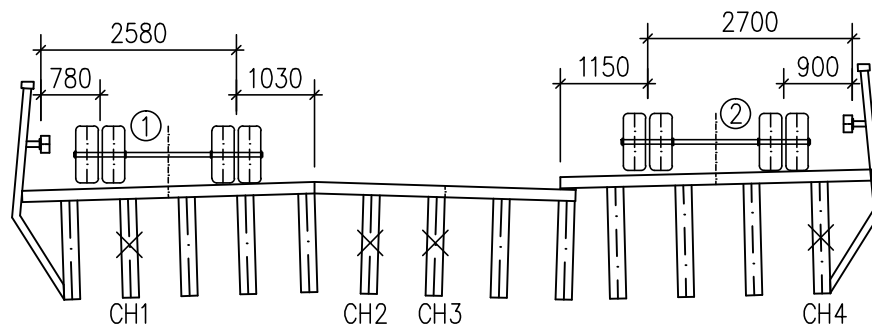


Projekti <b>TERVASSILLAN KOEKUORMITUS</b>	Sisältö <b>KUORMITUSTAPAUKSET</b>	Mittakaava 1:100 1:200
Suunnittelija <b>HELI VILJANEN TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU</b>	Työ <b>OPINNÄYTETYÖ</b> Päiväys <b>10.02.2016</b>	<b>TERVASSILTA_04</b>

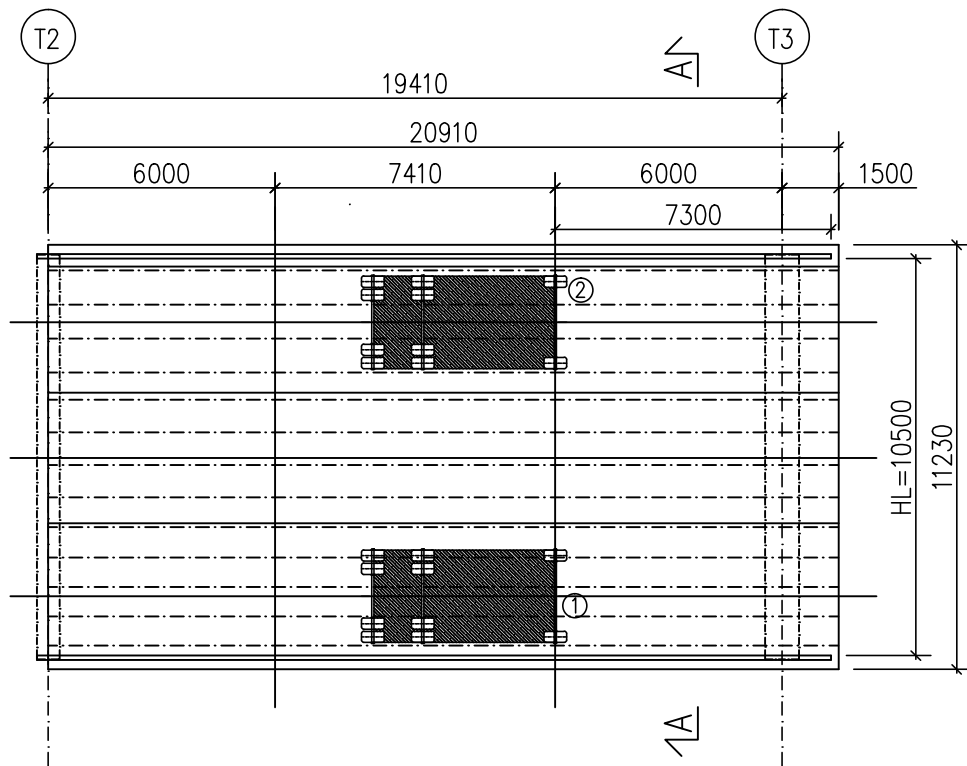
Reunimmainen ajoneuvoliikenteen kaista ja kevyen liikenteen kaista kuormitettu keskeisesti. Staattinen kuormitus.

1:100 MITAT SILTAJOHTTEEN TAKAPINNASTA SEKÄ KAISTOJEN SAUMASTA.

A-A



1:200

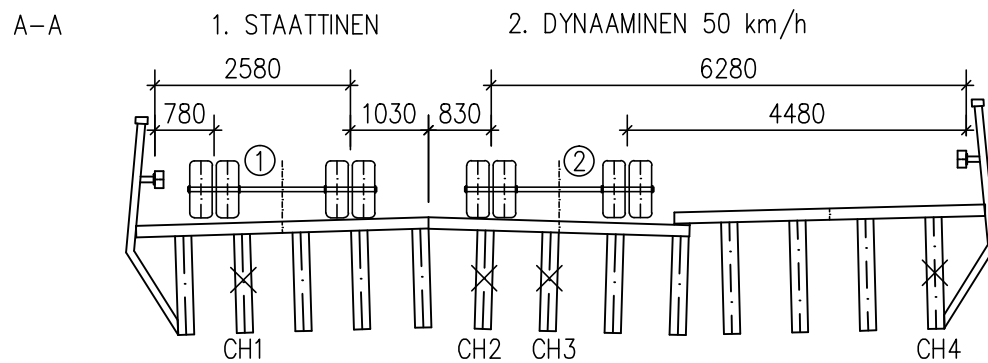




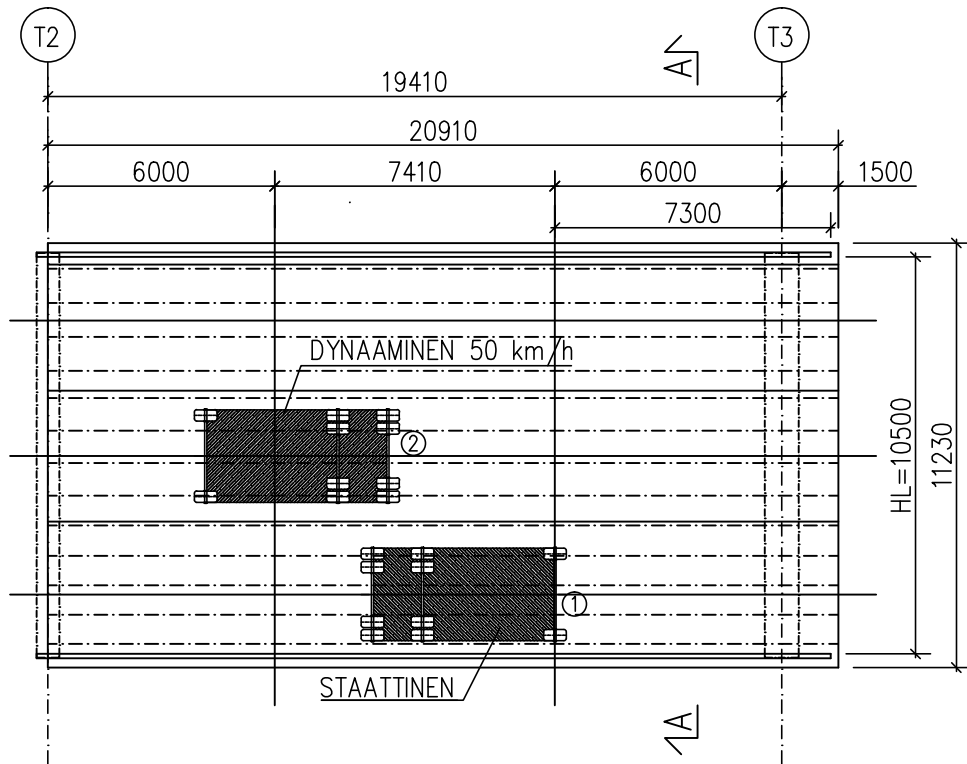
Projekti <b>TERVASSILLAN KOEKUORMITUS</b>	Sisältö <b>KUORMITUSTAPAUKSET</b>	Mittakaava 1:100 1:200
Suunnittelija <b>HELI VILJANEN TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU</b>	Työ <b>OPINNÄYTETYÖ</b> Päiväys <b>10.02.2016</b>	<b>TERVASSILTA_05</b>

Ajoneuvoliikenteen kaistat kuormitettu keskeisesti.  
Staattinen ja dynaaminen kuormitus 50 km/h.

1:100 MITAT SILTAJOHTEEN TAKAPINNASTA SEKÄ KAISTOJEN SAUMASTA.



1:200



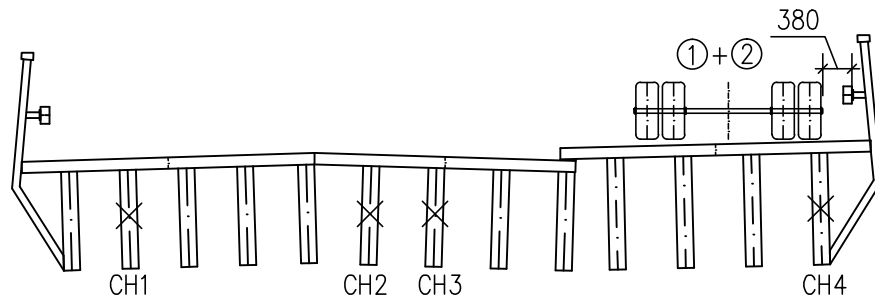
Projekti <b>TERVASSILLAN KOEKUORMITUS</b>	Sisältö <b>KUORMITUSTAPAUKSET</b>	Mittakaava 1:100 1:200
Suunnittelija <b>HELI VILJANEN TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU</b>	Työ <b>OPINNÄYTETYÖ</b> Päiväys 10.02.2016	<b>TERVASSILTA_06</b>

Kevytliikenteen kaista kuormitettu molemmilla ajoneuvoilla. Ajoneuvot mahdollisimman lähellä toisiaan ja sillankaidetta. Toteutuneet etäisyydet näkyvät kuvissa. Staattinen kuormitustilanne.

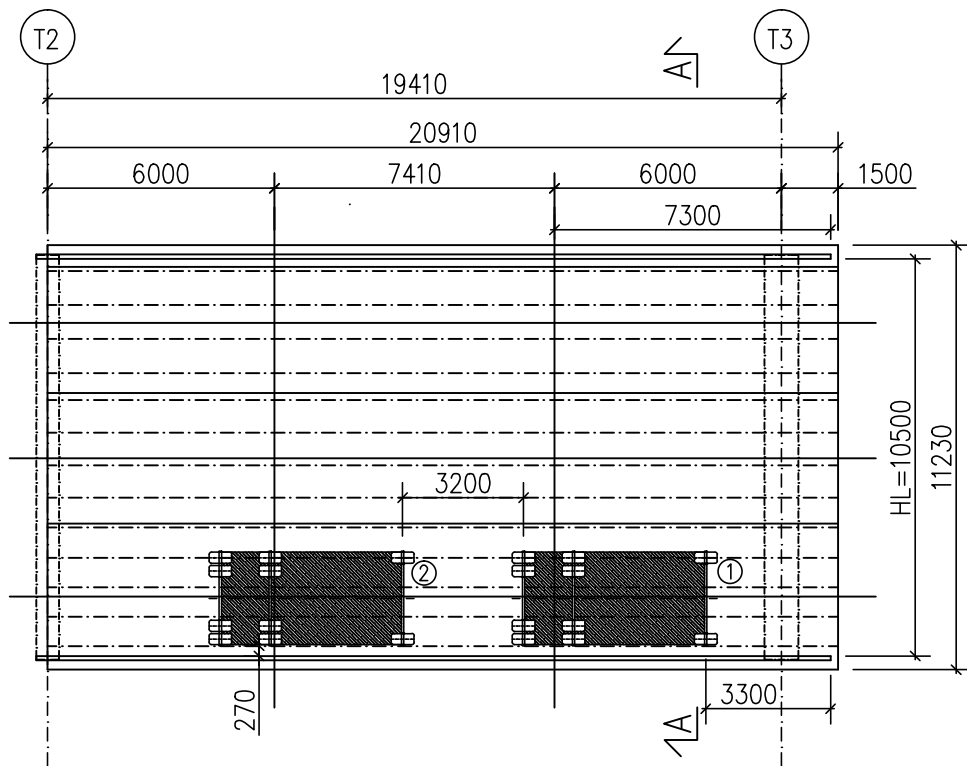
1:100 MITTA SILTAJOHTEEN TAKAPINNASTA.

A-A

MOLEMMAT AJONEUVOT PERÄKKÄIN



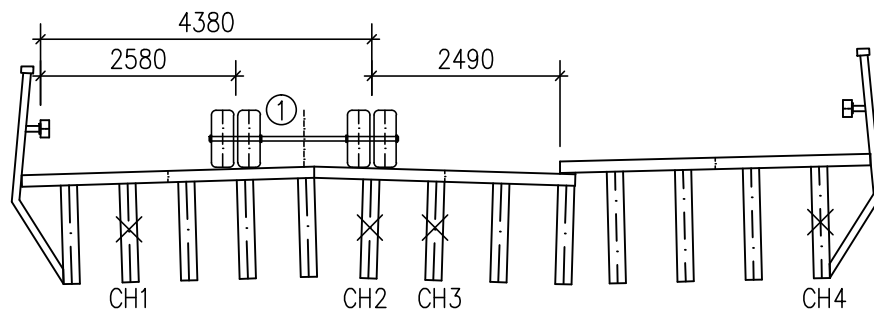
1:200



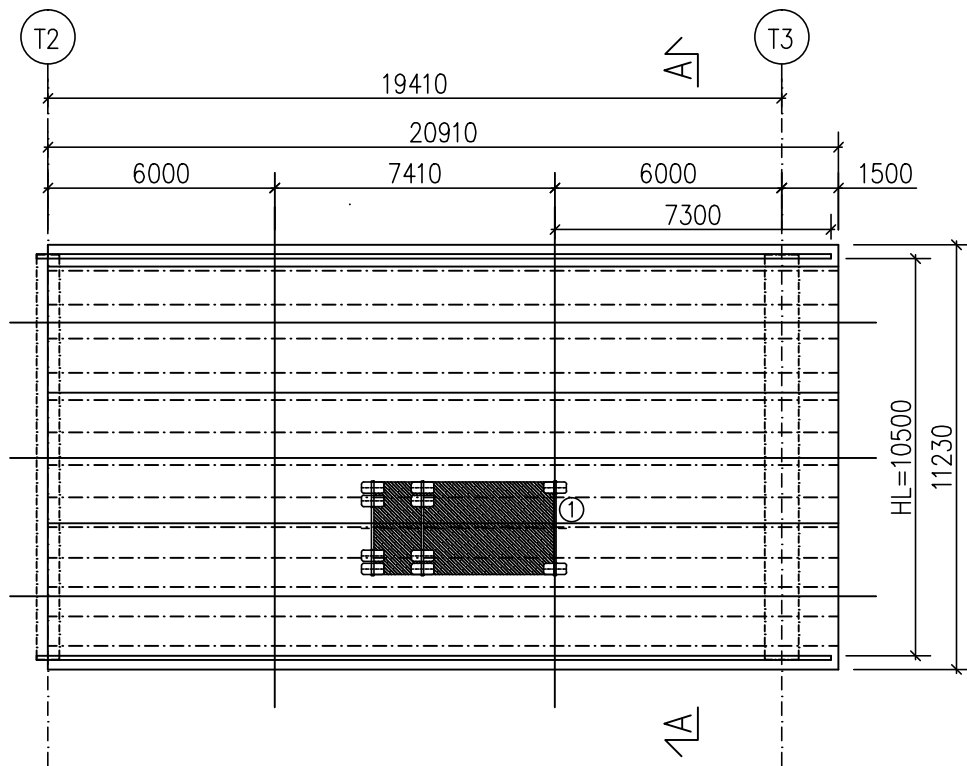
Projekti <b>TERVASSILLAN KOE KUORMITUS</b>	Sisältö <b>KUORMITUSTAPAUKSET</b>	Mittakaava 1:100 1:200
Suunnittelija <b>HELI VILJANEN TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU</b>	Työ <b>OPINNÄYTETYÖ</b> Päiväys 10.02.2016	<b>TERVASSILTA_07</b>

Kuormitus ajoneuvokaistojen välissä, leikkauskuvasta katsottuna oikea paripyörä eteläreunalta laskien 6. pääkannattajan kohdalla. Staattinen kuormitus.

1:100 MITAT SILTAJOHTEEEN TAKAPINNASTA SEKÄ KAISTOJEN SAUMASTA.  
A-A



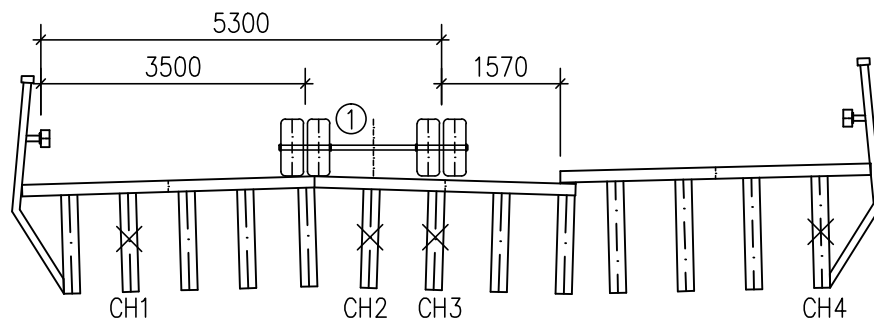
1:200



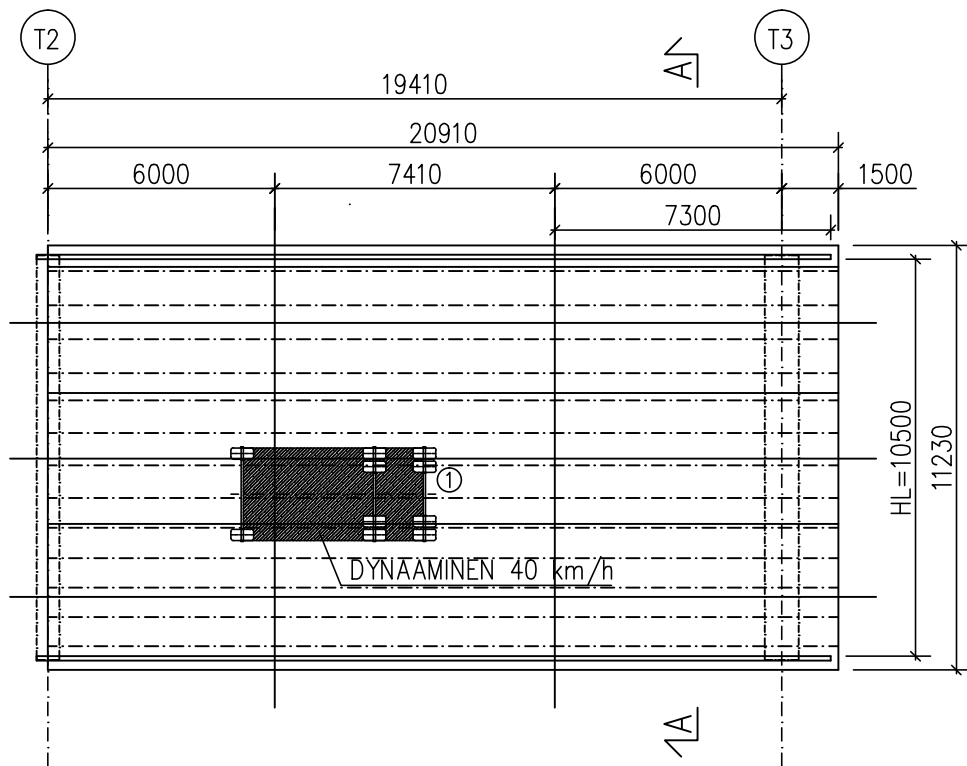
Projekti <b>TERVASSILLAN KOE KUORMITUS</b>	Sisältö <b>KUORMITUSTAPAUKSET</b>	Mittakaava 1:100 1:200
Suunnittelija <b>HELI VILJANEN TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU</b>	Työ <b>OPINNÄYTETYÖ</b> Päiväys <b>10.02.2016</b>	<b>TERVASSILTA_08</b>

Kuormitus ajoneuvokaistojen välissä, leikkauskuvasta katsottuna vasen paripyörä eteläreunalta laskien 5. pääkannattajan kohdalla. Dynaaminen kuormitus 40 km/h.

1:100 MITAT SILTAJOHTEEN TAKAPINNASTA SEKÄ KAISTOJEN SAUMASTA.  
A-A



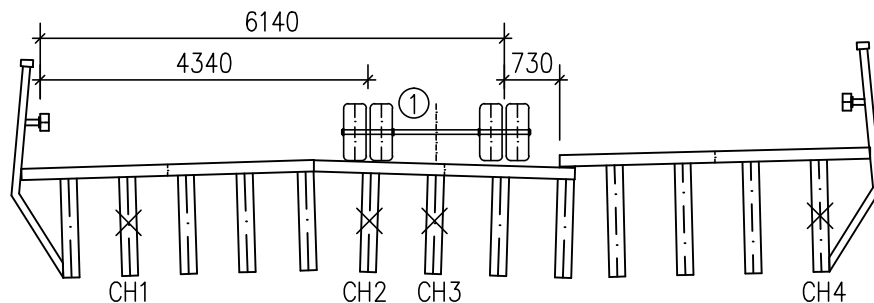
1:200



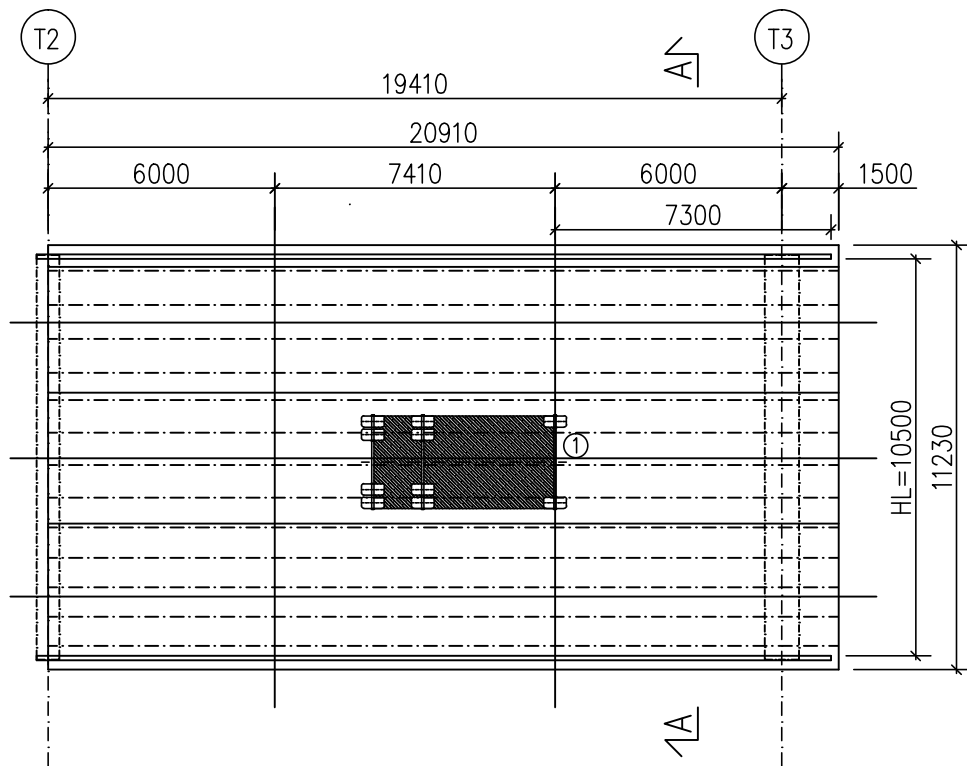
Projekti <b>TERVASSILLAN KOEKUORMITUS</b>	Sisältö <b>KUORMITUSTAPAUKSET</b>	Mittakaava 1:100 1:200
Suunnittelija <b>HELI VILJANEN TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU</b>	Työ <b>OPINNÄYTETYÖ</b> Päiväys 10.02.2016	<b>TERVASSILTA_09</b>

Kuormitus keskimmaisella kaistalla, molemmat paripyörät keskeisesti pääkannattajien kohdalla, eteläreunasta lukien 6. ja 8. pääkannattaja. Staattinen kuormitus.

1:100 MITAT SILTAJOHTEEN TAKAPINNASTA SEKÄ KAISTOJEN SAUMASTA.  
A-A



1:200



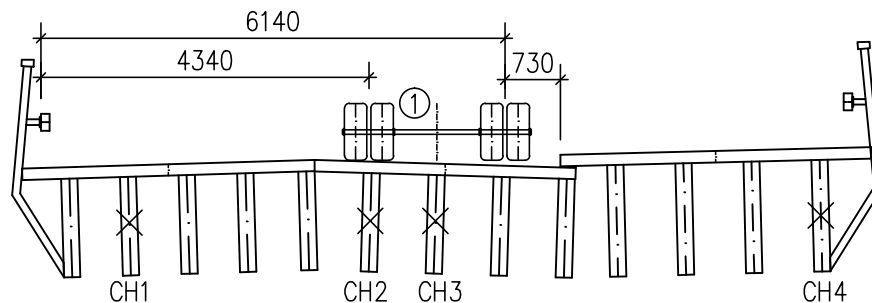
Projekti <b>TERVASSILLAN KOEKUORMITUS</b>	Sisältö <b>KUORMITUSTAPAUKSET</b>	Mittakaava 1:100 1:200
Suunnittelija <b>HELI VILJANEN TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU</b>	Työ <b>OPINNÄYTETYÖ</b> Päiväys 10.02.2016	<b>TERVASSILTA_10</b>

Kuormitus keskimmaisella kaistalla, molemmat paripyörät keskeisesti pääkannattajien kohdalla, eteläraunasta lukien 6. ja 8. pääkannattaja. Dynaaminen kuormitus 20 km/h.

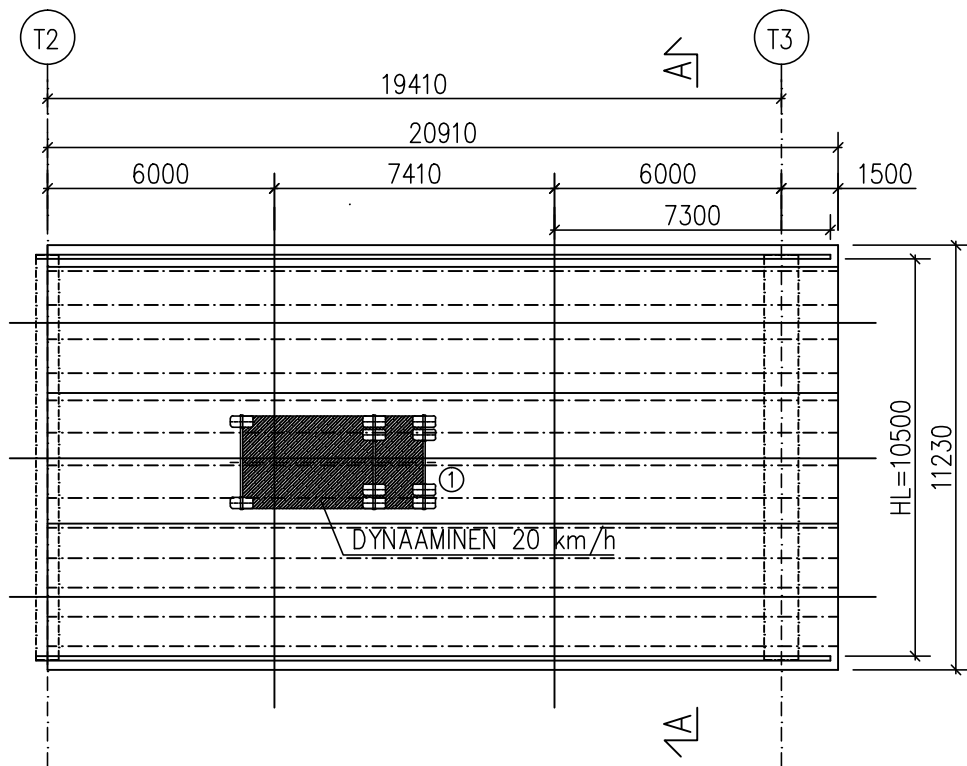
1:100

MITAT SILTAJOHTEEN TAKAPINNASTA SEKÄ KAISTOJEN SAUMASTA.

A-A



1:200



## Liite 4. Koekuormitustulosten yhteenveto

Taulukkoon on koottu yhteenveto koekuormituksen aikana mitatuista suurimmasta ja pienimmästä taipuma-arvosta mittauspisteillä. Lisäksi staattisista kuormitustapauksista laskettiin taipuma-arvojen keskiarvo. Taipuman arvot ovat positiivisia alaspäin.

		Taipuman arvo [mm]			
		CH1	CH2	CH3	CH4
<b>Tervassilta_01</b>	Suurin	10,66	10,54	9,49	- 0,39
	Pienin	10,45	10,36	9,30	-0,30
	Keskiarvo	10,57	10,45	9,41	-0,35
<b>Tervassilta_02</b>	Suurin	9,71	3,71	2,29	-0,30
	Pienin	9,60	3,58	2,15	-0,23
	Keskiarvo	9,65	3,64	2,21	-0,27
<b>Tervassilta_03</b>	Suurin	11,06	10,80	9,43	-0,44
	Pienin	9,42	3,09	1,70	-0,21
<b>Tervassilta_04</b>	Suurin	9,74	4,28	3,64	6,15
	Pienin	9,67	4,21	3,57	5,87
	Keskiarvo	9,71	4,24	3,61	6,03
<b>Tervassilta_05</b>	Suurin	11,11	10,53	9,68	0,28
	Pienin	9,55	2,99	1,60	0,10
<b>Tervassilta_06</b>	Suurin	0,45	0,45	1,36	17,42
	Pienin	0,32	0,33	1,27	16,83
	Keskiarvo	0,38	0,39	1,32	17,17
<b>Tervassilta_07</b>	Suurin	3,70	8,18	6,24	-0,51
	Pienin	3,61	7,94	6,06	-0,42
	Keskiarvo	3,66	8,08	6,16	-0,46
<b>Tervassilta_08</b>	Suurin	1,77	7,84	7,20	-0,43
	Pienin	-0,33	-0,35	-0,23	-0,12
<b>Tervassilta_09</b>	Suurin	0,95	7,37	8,33	-0,32
	Pienin	0,86	7,17	8,09	-0,25
	Keskiarvo	0,90	7,28	8,21	-0,29
<b>Tervassilta_10</b>	Suurin	1,04	7,05	7,60	0,07
	Pienin	-0,29	-0,61	-0,57	-0,12


## Liite 5. Siirtymäanturin DTS-A-100 tekniset tiedot


## DTS-A

### Displacement Transducers

DTS-A: Strain type

Move into the future with reliable measurements





### Specifications

Model	DTS-A-100
Type	Strain
<b>Performance</b>	
Rated capacity	100mm
Nonlinearity	Within $\pm 0.3\%RO$
Hysteresis	Within $\pm 0.3\%RO$
Repeatability	0.1%RO or less
Rated output	2.5 mV/V $\pm 10\%$ (5000 $\mu m/m \pm 10\%$ )
<b>Environmental characteristics</b>	
Safe temperature range	-10 to 70 °C(Noncondensing)
Compensated temperature range	0 to 60 °C(Noncondensing)
Temperature effect on zero balance	Within $\pm 0.05\% RO / ^\circ C$
Temperature effect on output	Within $\pm 0.05\% / ^\circ C$
<b>Electrical characteristics</b>	
Safe excitation voltage	10 VAC or DC
Recommended excitation voltage	1 to 5 VAC or DC
Resistance	Input resistance: 350 $\Omega \pm 3\%$ Output resistance: 255 $\Omega \pm 10\%$
Cable	4-conductor(0.08 mm <sup>2</sup> ) vinyl shielded cable, 3.2 mm diameter by 1 m long, terminated with connector plug (Shielded wire is not connected to mainframe)
<b>Mechanical properties</b>	
Frequency response range	DC to approx.6 Hz (When the gage head is touching to the testing machine, displacement: 100mm) (Reference: DC to approx. 50Hz) (When the gage head is fixed,displacement:30 mm)
Measuring force	Approx. 5N
Weight	Approx. 110g (excluding cable)
Protection rating	IP40 equivalency (JIS C 0920)

(Kyowa Electronic Instruments, muokattu)





