

Reetta Kalliovalkama

TERÄSBETONISEN KOTELOPOIKKI- LEIKKAUKSEN TOIMINTA JA HCT-YH- DISTELMIEN VAIKUTUKSET RASI- TUKSIIN

Diplomityö
Rakennetun ympäristön tiedekunta
Tarkastajat: Professori Anssi Laaksonen
Diplomi-insinööri Olli Asp
Heinäkuu 2022

TIIVISTELMÄ

Reetta Kalliovalkama: Teräsbetonisen kotelopoikkileikkauksen toiminta ja HCT-yhdistelmien vaikutukset rasiin

Diplomityö

Tampereen yliopisto

Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Heinäkuu 2022

HCT-yhdistelmiä on käytetty Suomessa vuodesta 2013 asti poikkeuslupien varaisena. HCT-yhdistelmät ovat painavampia ajoneuvoyhdistelmiä kuin Suomen laki ilman poikkeuslupaa sallii. Yhdistelmien käytöstä aiheutuvia hyötyjä ja haittoja on tutkittu siitä asti, kun niitä on käytetty Suomessa. Tutkimus on kohdistunut esimerkiksi teiden kuntoon, päästöihin ja yhdistelmien vaikutukseen liikenteessä. Tässä työssä tarkastellaan HCT-yhdistelmien siltoihin aiheuttamia rasiin ja verrataan erilaisten HCT-yhdistelmien aiheuttamia rasiin ajoneuvoasetuksen mukaiseen kuormakaavioon AA13/76.

Suomessa on paljon vanhoja siltoja, jotka on suunniteltu nykyistä pienemmille liikennekuormille. HCT-yhdistelmien kannalta haasteita aiheuttavat erityisesti jatkuvat sillat, joissa on pitkät jännemitat. Tarkemmin työssä tarkastellaan teräsbetonisia kotelopalkkisilloja, sillä rakennetyyppi on ollut tyypillinen pitkien jänteiden silloissa rakentamisajankohtanaan. Teräsbetonisia kotelopalkkisilloja on tehty Suomessa 50-luvulta alkaen ja osa niistä on edelleen käytössä. Rakentamisajankodasta johtuen sillat on suunniteltu verrattain alhaiselle kuormalle. Työssä tarkastellaan, kuinka useampi koteloinen poikkileikkaus jakaa kuormia lujuusominaisuuksien muuttuessa.

Työssä hyödynnettiin 100 kN influenssikuormana akselia, joka kuljetettiin kahden eri sillan laskentamallin yli metrin jakovälillä. Influenssikuorman avulla valittiin sillasta kohdat, joihin syntyivät suurimmat taivutusmomentit, leikkausvoiman ja väännön arvot. Nämä osuivat välituelle ja kenttään. Pisteille tehtiin vaikutusviivat, joiden avulla arvioitiin erilaisten HCT-yhdistelmien aiheuttamat rasiin. Pääosin raskaammat ajoneuvoyhdistelmät aiheuttivat suurimpia rasiin ja erot ajoneuvoasetuksen mukaisen kaavion aiheuttamiin rasiin olivat 10 % luokkaa. Erot kaikissa rasiinissa eivät olleet yhtä selkeitä, joten voidaan päätellä, että yhdistelmän massan lisäksi myös muut ajoneuvoyhdistelmän ominaisuudet vaikuttavat sillan rasiin. Painavimmat ajoneuvoyhdistelmät olivat usein pidempiä, jolloin kuorma jakautui tasaisemmin sillalle. Tarkastelluissa HCT-yhdistelmissä yksittäiset akselimassat eivät ylitä valtioneuvoston asetuksessa esitettyjä suurimpia sallittuja massoja. HCT-yhdistelmän aiheuttamiin rasiin vaikuttaa, kuinka kuorma jakautuu eri akseleille ja kuinka ajoneuvoyhdistelmän painavimmat akselit sijoittuvat.

Kotelopoikkileikkauksen toimintaa tarkasteltiin palkkimaisen arinamallin avulla muuttamalla pääpalkkien ja arinasauvojen lujuusominaisuuksia. Työssä tarkasteltiin erilaisia analyyseja, joissa pääpalkkien taivutus- ja vääntölujuudet sekä sauvojen lujuusominaisuudet asetettiin joko täysin halkeilleeksi tai halkeilemattomaksi. Analyysien avulla huomattiin, että poikkileikkaus siirtää rasiin kotelolta toiselle, vaikka lujuusominaisuudet olisivat halkeilun takia heikentyneet. Poikittaisauvojen lujuuksien muutoksella ei juuri ollut merkitystä rasiin jakautumiseen palkkien välillä. Pääpalkkien taivutus- ja vääntölujuuksilla on suuri merkitys poikkileikkauksen rasiin jakautumiseen poikkileikkauksessa.

Rasiin laskettiin tarkemmin 91 tonnin ja 84 tonnin HCT-yhdistelmillä sekä 4,5 kN/m² suuruisella pintakuormalla ja AA13/76 kuormakaaviolla. Näillä kuormituksilla pystyttiin vertailemaan tarkemmin HCT-yhdistelmän ja muun liikenteen aiheuttamia rasiin. Työssä ei tehty kantavuustarkastelua, koska tarkasteltavat sillat eivät olleet oikeita kohteita, eikä yksittäisen sillan kantavuus kerro koko siltatyypin kantavuudesta. Rasiin suuruuksiin vaikuttavat myös sillan ominaisuudet, kuten jännemitta ja poikkileikkausmitat. Näin ollen ei voida yhden sillan perusteella sanoa, kestävätkö sillat HCT-yhdistelmiä vai ei.

Jatkotutkimukset ovat tarpeen, jotta saadaan tietoa siltojen todellisesta käyttäytymisestä. Tarkastelluilla HCT-käytävillä on useita teräsbetonisia kotelopalkkisilloja, joiden todellisesta kapasiteetista olisi hyvä saada lisää tietoa. Seuraavaksi on selvitettävä, millaisia siltoja kuormittamalla saataisiin mahdollisimman kattavasti tietoa mahdollisimman monesta sillasta kerralla. Lisäksi on pohdittava, mitä mitataan, millä kuormitetaan ja kuinka koekuormitukset suoritetaan.

Avainsanat: HCT, ajoneuvoyhdistelmä, kotelopalkki, jatkuva teräsbetonin kotelopalkkisilta, Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -ohjelmalla.

ABSTRACT

Reetta Kalliovalkama: Behaviour of reinforced concrete box-section and HCT- vehicles effects on stresses of bridges

Master of Science Thesis

Tampere University

Master's Degree Program in Civil Engineering

July 2022

HCT, high-capacity transport, vehicle combinations have been used in Finland since 2013 with special permit. HCT combinations are heavier vehicle combinations than the Finnish law allows. There have been studies of the effects of using HCT combinations since they have been in use. The studies have focused on the effects on pollutions, traffic and road conditions. The thesis focuses on how the HCT combinations effects on bridges and what kind of stresses they cause. The stresses of HCT are compared to the stresses of 76-ton vehicle AA13/76 in Finnish vehicle regulations.

In Finland there are lots of bridges that have been designed on smaller traffic load than the traffic causes today. Especially the continuous bridges that have long span lengths are the problem. The thesis focuses on reinforced concrete box-section bridges. Box girder have been used in reinforced concrete bridges since 1950s. Some of the box girder bridges built in 1950s are still in use. Thesis studies how multibox-section can distribute loads among the boxes while the strength properties change. The grid model was used to analyze the bridges.

Stresses caused by HCT trucks were evaluated with influence load and influence lines. The influence load was 100 kN axle that was taken over the bridge model with spacing of 1 m. Points where the bending moment, shearing force and torsional moment are the highest and lowest are in the span and intermediate support. For these points influence lines were made and they were used to evaluate stresses caused by different HCT trucks. Stresses caused by HCT vehicle combinations were about 10 % higher than what AA13/76 caused. The stresses were mainly more intense when the load was heavier. Heavier vehicle combinations were often longer so the load was distributed more equally on the bridge deck and supports. The weight of an individual axle of HCT trucks used in this thesis were not higher than allowed in the Finnish law. The stresses of the bridges depend on how the heaviest axles of vehicle combinations are located.

Box girders cross-sectional operation is studied with grid model by changing the strength properties of main beams and transverse members. There were different analyzes where the bending and torsional strengths of the main beam were either completely cracked or uncracked. Strength properties of the transverse members were also either complete cracked or uncracked but that did not have as much impact on the stresses of the cross section. The cross-section transfers load well among the boxes. Strength properties of the main beams has great impact on intensity of stresses and distribution between boxes.

In the end of the thesis the bridges were loaded with the different HCT trucks, AA13/76 vehicle and 4,5 kN/m² surface load. HCT trucks were 91 tons and 84 tons. With these loads it was possible to compare the stresses from HCT and other traffic. In this thesis the bridge load capacity was not calculated because the used bridges were not real ones and it wouldn't reveal much about the capacity of the bridge type. Bridges span length and dimensions of the cross section effects a lot on the intensity of the stresses.

As the further research there could be test loading of selected bridges. The bridges can be selected from the routes that are used by HCT trucks. There are many reinforced concrete box-section girder bridges in use and we cannot be sure what the real capacity of them are. The bridges for test loading should be chosen so that test loads would give as much information as possible of as many bridges as possible. HCT trucks that should be used in test loads can be chosen based on this thesis but it also depends on the chosen bridges and the trucks that are available.

Keywords: HCT, combination vehicle, box girder, continuous reinforced concrete box-section girder bridge

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

ALKUSANAT

Diplomityöni ohjasivat professori Anssi Laaksonen, DI Olli Asp sekä DI Joonas Tulonen Tampereen yliopistosta. Kiitän heitä saamastani ohjauksesta sekä kaikesta tuesta diplomityöprosessin aikana. Lisäksi kiitän Metsätehoa ja Pirjo Venäläistä sekä Väylävirastoa ja Heini Rauniota diplomityön aiheesta sekä avusta tarvittavien materiaalien hankkimisessa.

Kiitos myös työnantajalleni ja työkavereilleni Swecolla joustavuudesta diplomityön suorittamisen mahdollistamiseksi. Lopuksi kiitän vielä puolisoani, perhettäni ja ystäviäni kaikesta tuesta diplomityön aikana.

Tampereella, 8.7.2022

Reetta Kalliovalkama

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
1.1 Tutkimuksen tausta	1
1.2 Tutkimuksen tavoitteet ja rajaukset	1
1.3 Tutkimuksen toteutus ja rakenne.....	2
2. SUOMEN SILLASTO	4
2.1 Suomen siltakannan ikä	4
2.2 Siltatyypit Suomessa.....	5
2.3 Vanhojen siltojen haasteet kasvavien kuormien kannalta.....	10
2.4 Teräsbetoniset kotelopalkkisillat Suomessa	12
2.5 Olemassa olevien teräsbetonisten kotelopalkkisiltojen kantavuus.....	14
3. HCT-YHDISTELMÄT	16
3.1 Uusi tieliikennelaki HCT-yhdistelmien kannalta	16
3.2 HCT-yhdistelmät Suomessa.....	19
3.3 HCT-yhdistelmien merkitykselliset reitit metsäsektorin kannalta.....	20
3.4 Metsäsektorilla käytössä olevia HCT-yhdistelmiä.....	23
4. TERÄSBETONISEN KOTELOPALKIN RAKENTEELLINEN TOIMINTA	25
4.1 Poikkileikkauksen toiminnan periaatteet.....	25
4.1.1 Päärakenteiden toiminta	26
4.1.2 Rakenteen paikallinen toiminta	33
4.2 Mallinnus ja laskenta.....	35
4.2.1 Laskentamallin valinta.....	35
4.2.2 Liikennekuormien mallintaminen	37
4.2.3 Rakennemallit	39
5. KUORMITUKSET	42
5.1 Suunnittelukuormat ja niiden kehittyminen	42
5.2 Vaikutusviiva	47
5.3 HCT-yhdistelmien aiheuttamat kuormitukset	51
6. RAKENNEANALYYSIN TULOKSET	57
6.1 Täysin halkeilemattomat ja halkeilleet poikkileikkausarvot	57
6.2 Taivutus- ja vääntöjäykkyyksien välisen suhteen vaikutus.....	62
6.3 Valituilla yhdistelmällä kuormittaminen	71
7. YHTEENVETO.....	77
7.1 Yleistä	77
7.2 Tulokset	78
7.2.1 HCT-yhdistelmien muodostamat rasitukset.....	78
7.2.2 Rakenteellinen toiminta.....	79
7.3 Jatkotoimenpiteet.....	80

7.3.1 HCT-reiteillä olevat sillat, joista valitaan koekuormitettavat	80
7.3.2 Koekuormitukseen valittavat HCT-yhdistelmät	84
7.3.3 Koekuormituksessa mitattavat asiat	85
7.3.4 Koekuormituksissa huomioitavia muita asioita	87
LÄHTEET	89
LIITE A: HAKEYHDISTELMÄ 91 T = 91H	92
LIITE B: PIDEMMÄN SILLAN RASITUSTEN KUVAAJAT ANALYYSEILLE 7-9	93

KUVALUETTELO

Kuva 1.	<i>Tieverkolla olevien siltojen ikäjakauma Suomessa, ei sisällä putkisiltoja [5, 14.12.2021]</i>	<i>5</i>
Kuva 2.	<i>Tiesiltojen lukumääräien jakauma siltatyypeittäin [5]</i>	<i>7</i>
Kuva 3.	<i>Siltatyypit jaoteltuna rakenteellisen toiminnan perustella. [2]</i>	<i>8</i>
Kuva 4.	<i>Erilevyisten siltojen poikkileikkaussuositukset jännemitan mukaan. [9]</i>	<i>13</i>
Kuva 5.	<i>Siltasäännössä tarkasteltavat akselivälit suurimman sallitun massan laskemiseksi [16]</i>	<i>19</i>
Kuva 6.	<i>Alustavasti ehdotettuja HCT-reittejä raakapuun, sivutuotehakkeen ja sahatavaran kuljetuksiin [21]</i>	<i>21</i>
Kuva 7.	<i>Metsäteollisuuden kuljetukset tieverkolla. Vasemmanpuoleinen kuljetusvolyymin mukaan ja oikeanpuoleinen kuljetusten arvon mukaan. [6]</i>	<i>22</i>
Kuva 8.	<i>Kuljetusliike Kalevi Huhtala Oy 100 t hakeyhdistelmä. Yhdistelmän kokonaispituus on 34 m ja se koostuu 3-askelisesta puoliperävaunun vetoautosta, 4-askelisestä puoliperävaunusta sekä 5-askelisestä perävaunusta. [24]</i>	<i>24</i>
Kuva 9.	<i>Moilaspoikien HCT-yhdistelmä, joka toimii joko 90-tonnisena terminaaliyhdistelmänä tai 84-tonnisena metsäautona [24]</i>	<i>24</i>
Kuva 10.	<i>Kotelopoikkileikkauksen käyttäytyminen. a) pitkittäissuunnan taipuminen, b) poikittaissuuntainen taipuminen, c) kiertyminen ja d) poikittainen vääristymä [25]</i>	<i>25</i>
Kuva 11.	<i>Yksiaukkoisen laattapalkkirakenteen, jota kuormitetaan voimalla 2F.</i>	<i>26</i>
Kuva 12.	<i>Ykkösvoimamenetelmän taivutusmomentti- ja vääntökuviot</i>	<i>27</i>
Kuva 13.	<i>Ykkösvoimamenetelmän leikkausvoimakuviot</i>	<i>28</i>
Kuva 14.	<i>Yksiaukkoisen laattapalkkirakenteen arinamalli, sen taivutusmomenttikuvio ja taipuma.</i>	<i>29</i>
Kuva 15.	<i>Leikkausvoiman muodostuminen poikkileikkauksessa.</i>	<i>30</i>
Kuva 16.	<i>Leikkausvuo a) suorakaidepoikkileikkaukselle ja b) kotelopoikkileikkauksen osalle. [25]</i>	<i>31</i>
Kuva 17.	<i>Taivutusmomenteista aiheutuvat leikkausvuot kotelopoikkileikkauksessa. [27]</i>	<i>31</i>
Kuva 18.	<i>Bredtin toisella kaavalla huomioon otettava osuus kotelopoikkileikkauksen vääntöjäyhyyttä laskettaessa</i>	<i>32</i>
Kuva 19.	<i>Kotelopalkin toiminta poikittaiskehänä. [9]</i>	<i>33</i>
Kuva 20.	<i>Kotelopoikkileikkauksen eri osiin kohdistuvia taivutusmomentteja [27]</i>	<i>33</i>
Kuva 21.	<i>Tyypillinen kotelopoikkileikkauksen kuormitustapaus. a) epäkeskeinen liikennekuorma b) kotelon eri osiin syntyvät voimat leikkauksesta ja väännöstä c) poikittainen taivutusmomenttikuvio epäkeskeisestä kuormasta d) poikittainen taivutusmomenttikuvio vääntymästä, joka aiheutuu vääntörasituksen aiheuttamasta siirtymästä [30]</i>	<i>34</i>
Kuva 22.	<i>Vasemmalla palkkimainen arinamalli ja oikealla laattamainen arinamalli</i>	<i>35</i>
Kuva 23.	<i>Laatan taivutusjäykkyyden laskemista varten tarvittavat poikkileikkaussuureet</i>	<i>37</i>
Kuva 24.	<i>Kuormakaistan 1 sijainti siltojen poikkileikkausten suhteen. Nuolet kuvaavat sillan kantaa kuormittavia akseleita.</i>	<i>38</i>
Kuva 25.	<i>Kuormituskaistan 2 sijainti</i>	<i>39</i>
Kuva 26.	<i>Siltojen rakennemallien poikkileikkausmitat</i>	<i>40</i>

Kuva 27.	<i>Kaksikoteloisen sillan arinamalli. Sillan jännemitat ovat 28 m + 35 m + 28 m.</i>	41
Kuva 28.	<i>Kolmikoteloisen sillan arinamalli. Sillan jännemitat ovat 32,6 m + 42 m + 32,6 m.</i>	41
Kuva 29.	<i>Kuormakaavio AI [8].</i>	42
Kuva 30.	<i>Kuormakaavio AII [8].</i>	42
Kuva 31.	<i>Kuormakaaviot Ak1 ja Ek1 [8].</i>	43
Kuva 32.	<i>Kuormakaaviot Lk1 ja Ek1 [8].</i>	43
Kuva 33.	<i>Kuormakaaviot LM1, LM2 ja LM3 [8].</i>	44
Kuva 34.	<i>Ajoneuvoasetuksen 2013 mukaiset kuormakaaviot AA 13/27, AA 13/42 sekä AA 13/76. [8].</i>	45
Kuva 35.	<i>Ajoneuvoasetuksen mukaisten kuormien sijoitteluesimerkki. [8].</i>	46
Kuva 36.	<i>Taivutusmomentin vaikutusviivat 100 kN akselikuormalla lyhyemmällä sillalla. Vasemmanpuoleinen kuva taivutusmomenttia välituella ja oikeanpuoleinen taivutusmomenttia keskellä kenttää.</i>	48
Kuva 37.	<i>Taivutusmomentin vaikutusviivat 100 kN akselikuormalla pidemmällä sillalla. Vasemmanpuoleinen kuva taivutusmomenttia välituella ja oikeanpuoleinen taivutusmomenttia keskellä kenttää.</i>	48
Kuva 38.	<i>Leikkausvoiman vaikutusviivat 100 kN akselikuormalla lyhyemmällä sillalla välituella.</i>	49
Kuva 39.	<i>Leikkausvoiman vaikutusviivat 100 kN akselikuormalla pidemmällä sillalla välituella.</i>	49
Kuva 40.	<i>Väännön vaikutusviivat 100 kN akselikuormalla koko poikkileikkaukselle lyhyemmällä sillalla välituella.</i>	50
Kuva 41.	<i>Väännön vaikutusviivat 100 kN akselikuormalla koko poikkileikkaukselle pidemmällä sillalla välituella.</i>	50
Kuva 42.	<i>Taivutusmomentin arvot kentässä lyhyemmälle sillalle eri analyyseille. Vasemmanpuoleinen kuvaaja on kuorman puoleiselle palkille ja oikeanpuoleinen toiselle palkille.</i>	58
Kuva 43.	<i>Leikkausvoiman arvot kentässä lyhyemmälle sillalle eri analyyseille. Vasemmanpuoleinen kuvaaja on kuorman puoleiselle palkille ja oikeanpuoleinen toiselle palkille.</i>	59
Kuva 44.	<i>Väännön arvot kentässä lyhyemmälle sillalle eri analyyseille. Vasemmanpuoleinen kuvaaja on kuorman puoleiselle palkille ja oikeanpuoleinen toiselle palkille.</i>	60
Kuva 45.	<i>Taivutusmomentin arvot välituella lyhyemmälle sillalle eri analyyseille. Vasemmanpuoleinen kuvaaja on kuorman puoleiselle palkille ja oikeanpuoleinen toiselle palkille.</i>	61
Kuva 46.	<i>Leikkausvoiman arvot välituella lyhyemmälle sillalle eri analyyseille. Vasemmanpuoleinen kuvaaja on kuorman puoleiselle palkille ja oikeanpuoleinen toiselle palkille.</i>	61
Kuva 47.	<i>Väännön arvot välituella lyhyemmälle sillalle eri analyyseille. Vasemmanpuoleinen kuvaaja on kuorman puoleiselle palkille ja oikeanpuoleinen toiselle palkille.</i>	62
Kuva 48.	<i>Taivutusmomentin arvot välituella lyhyemmälle sillalle. Vasemmanpuoleinen kuvaaja on kuorman puoleiselle palkille ja oikeanpuoleinen toiselle palkille.</i>	64
Kuva 49.	<i>Leikkausvoiman arvot välituella lyhyemmälle sillalle. Vasemmanpuoleinen kuvaaja on kuorman puoleiselle palkille ja oikeanpuoleinen toiselle palkille.</i>	64
Kuva 50.	<i>Väännön arvot välituella lyhyemmälle sillalle. Vasemmanpuoleinen kuvaaja on kuorman puoleiselle palkille ja oikeanpuoleinen toiselle palkille.</i>	65
Kuva 51.	<i>Palkkien taipumat ja kiertymät.</i>	66

Kuva 52.	<i>Lyhyemmän sillan taipumat keskellä keskimmäistä kenttää 100 kN painoisesta akselista. Vasemmanpuoleinen kuvaaja on kuorman puoleiselle palkille ja oikeanpuoleinen kuvaaja toiselle palkille.....</i>	<i>67</i>
Kuva 53.	<i>Lyhyemmän sillan kiertymät keskellä keskimmäistä kenttää 100 kN painoisesta akselista. Vasemmanpuoleinen kuvaaja on kuorman puoleiselle palkille ja oikeanpuoleinen kuvaaja toiselle palkille.....</i>	<i>68</i>
Kuva 54.	<i>Lyhyemmän sillan kiertymän suhde taipumaan keskellä keskimmäistä kenttää 100 kN painoisesta akselista. Vasemmanpuoleinen kuvaaja on kuorman puoleiselle palkille ja oikeanpuoleinen kuvaaja toiselle palkille.....</i>	<i>69</i>
Kuva 55.	<i>Lyhyemmän sillan palkin taipuman suhde palkkien taipumaeroon keskellä keskimmäistä kenttää 100 kN painoisesta akselista. Vasemmanpuoleinen kuvaaja on kuorman puoleiselle palkille ja oikeanpuoleinen kuvaaja toiselle palkille.....</i>	<i>70</i>
Kuva 56.	<i>Taivutusmomentin vaikutusviiva lyhyemmälle sillalle. Kuvassa vihreällä AA13/76 akselit ja sinisellä HCT-yhdistelmän 91 H akselit.....</i>	<i>73</i>
Kuva 57.	<i>Taivutusmomentin vaikutusviiva pidemmälle sillalle. Kuvassa vihreällä AA13/76 akselit ja sinisellä HCT-yhdistelmän 91 H akselit.....</i>	<i>74</i>
Kuva 58.	<i>Leikkausvoiman vaikutusviiva lyhyemmälle sillalle. Kuvassa vihreällä AA13/76 akselit ja sinisellä HCT-yhdistelmän 91 H akselit.....</i>	<i>74</i>
Kuva 59.	<i>Leikkausvoiman vaikutusviiva pidemmälle sillalle. Kuvassa vihreällä AA13/76 akselit ja sinisellä HCT-yhdistelmän 91 H akselit.....</i>	<i>75</i>
Kuva 60.	<i>Väännön vaikutusviiva lyhyemmälle sillalle. Kuvassa vihreällä AA13/76 akselit ja sinisellä HCT-yhdistelmän 91 H akselit.....</i>	<i>75</i>
Kuva 61.	<i>Väännön vaikutusviiva pidemmälle sillalle. Kuvassa vihreällä AA13/76 akselit ja sinisellä HCT-yhdistelmän 91 H akselit.....</i>	<i>76</i>
Kuva 62.	<i>Tarkasteltavilla reiteillä olevat 1950–1980 valmistuneet teräsbetoniset kotelopalkkisillat, joiden jännemitta on suurempi tai yhtä suuri kuin 20 m. Punainen neliö sinisen pallon vieressä tarkoittaa, että silta on vahvennettu jälkijännittämällä. [4].....</i>	<i>81</i>
Kuva 63.	<i>Kiertymän suhde taipumaan kuvaajat kuorman puoleisille palkeille. Vasemmanpuoleinen kaksikoteloiselle lyhyemmälle sillalle ja oikeanpuoleinen kolmikoteloiselle pidemmälle sillalle.....</i>	<i>86</i>
Kuva 64.	<i>Palkin taipuman suhde palkkien taipumaeroon kuvaajat kuorman puoleisille palkeille. Vasemmanpuoleinen kaksikoteloiselle lyhyemmälle sillalle ja oikeanpuoleinen kolmikoteloiselle pidemmälle sillalle.....</i>	<i>87</i>

LYHENTEET JA MERKINNÄT

AA13/76	Siltojen kantavuuslaskentaohjeen mukainen 76 tonnin kuormakaa- vio
A	Poikkileikkauksen pinta-ala
A_v	Ajoneuvoyhdistelmän äärimmäisten akseleiden välinen etäisyys
b	Kappaleen leveys
E	Betonin kimmokerroin
F	Voima
G	Betonin liukumoduuli
h	Kappaleen korkeus
HCT	High capacity transport, kansainvälisesti vakiintunut termi normaalia pidemmille ja raskaammille yhdistelmille tieliikenteessä. Uuden tie- liikennelain myötä HCT yhdistelmät ovat nykyään sallitun pituisia mutta edelleen sallittua raskaampia
I_v	Vääntöjäyhyysmomentti
I_y	Neliömomentti
L	Jännemitta
l_b	Etäisyys uumien keskiöiden välillä
l_z	Etäisyys ylemmän ja alemman laatan keskiöiden välillä
M	Taivutusmomentti
m	Massa
m_{kok}	Ajoneuvoyhdistelmän suurin sallittu massa
q_t	Leikkausvuo
T	Vääntömomentti
t	Tarkasteltavan profiilin osan paksuus
t_{inf}	Kotelo-poikkileikkauksen alalaatan paksuus
t_{sup}	Kotelo-poikkileikkauksen päällilaatan paksuus
s	Tarkasteltavan profiilin osan pituus
V	Leikkausvoima
Z_0	Kappaleen pintakeskiön etäisyys koko poikkileikkauksen pintakeski- östä

1. JOHDANTO

1.1 Tutkimuksen tausta

Suomessa on käytössä HCT-yhdistelmiä. HCT-yhdistelmät olivat alun perin pidempiä ja painavampia ajoneuvoyhdistelmiä, kuin Suomen tieliikennelaki salli. Ajoneuvoyhdistelmien kokonaispituutta kuitenkin nostettiin 2019, joten suurin osa yhdistelmistä on sallitun pituisia, mutta massaltaan edelleen sallittua suurempia. Raskaammat yhdistelmät aiheuttavat haasteita Suomen pääverkolla teiden ja siltojen kantavuuden kannalta. [1] Tutkimusta on tehty jo jonkin verran etenkin teiden kantavuuden ja liikenneturvallisuuden kannalta, ja on tarve löytää keinoja, joilla siltojen laskennallista kapasiteettia voidaan kasvattaa turvallisesti todellisen käyttäytymisen perusteella.

Suomessa on paljon siltoja, jotka on rakennettu eri vuosikymmenillä ja edelleen on käytössä esimerkiksi 50- ja 60-luvuilla rakennettuja siltoja. Vanhat sillat ovat haasteellisia kasvavien kuormien kannalta. Aikaisemmin liikennekuormat ovat olleet pienempiä, jolloin myös osa käytössä olevista silloista on suunniteltu nykyistä liikennekuormaa pienemmille kuormille. Siltojen kannalta haasteellisia ovat myös suuret yksittäiset ajoneuvoyhdistelmät. Ajoneuvoyhdistelmän kokonaisuudessa ja -pituus ovat sillan kantavuuden kannalta kriittisiä. Kuorman lisäksi sillan kapasiteettiin vaikuttaa mm. siltatyyppi ja jännemitat. Pidemmät jännemitat ovat haastavia HCT-yhdistelmien aiheuttamien rasitusten kannalta. Pidemmät jännemitat vaativat usein myös järeämmän poikkileikkauksen, jolloin myös siltojen omat painot kasvavat ja siitä aiheutuvat haasteet näkyvät usein vasta pitkäaikaisvaikutusten myötä.

Teräsbetonisia kotelopalkkisiltoja on Suomessa rakennettu 1950-luvulta alkaen. Niitä on edelleen paljon käytössä, vaikka niiden rakentaminen on vähentynyt. Kantavuuslaskentoja tehdään silloille tarpeen mukaan, mutta niitä ei ole. Rakenteessa voi esimerkiksi olla kantavuutta parantavia liittovaikutuksia, joita ei laskennassa voida huomioida. Koe-kuormitusten avulla on mahdollista selvittää tarkemmin rakenteen toimintaa ja kykyä jakaa rasituksia. [2]

1.2 Tutkimuksen tavoitteet ja rajaukset

Tutkimuksen aiheena on HCT-yhdistelmien aiheuttamat kuormitukset nykyisille silloille sekä teräsbetonisen kotelopoikkileikkauksen toiminta. Teräsbetonisia kotelopalkkisiltoja

on tehty 1950-luvulta alkaen [3], ja se on ollut tyypillinen pitkien jänteiden silloissa rakentamisajankohtanaan. Rakentamisajankohdastaan johtuen, kyseiset sillat on usein suunniteltu verrattain alhaiselle kuormalle. Työssä pyritään selvittämään, kuinka poikkileikkaus jakaa kuormia ja rasituksia koteloiden välillä.

Tutkimuksesta rajataan pois jännitetyt teräsbetoniset kotelopalkkisillat. Työssä on tarkasteltujen siltojen joukossa muutama jälkijännitetty silta, mutta niitä ei huomioida vahventamisen osalta, vaan ne ovat mukana tarkastelussa alkuperäisenä rakenteena. Jälkijännittämällä rakenteiden taivutusmomenttikapasiteettia pystytään lisäämään merkittävästi ja se on kallis korjaustoimenpide. Jälkijännittämällä pystytään helpottamaan huomattavasti omienpainojen aiheuttamia rasituksia ja muutenkin lisäämään kapasiteettiä. Jälkijännittäminen on kuitenkin niin suuri ja kallis korjaustoimenpide, ettei siihen ole kannattava ryhtyä, mikäli sillan todellinen kapasiteetti on tarpeille riittävä.

Työssä keskitytään metsäteollisuuden kuljetusvirtoihin ja sen myötä rajataan tarkasteltavat sillat ja HCT-yhdistelmät. Näistä rajataan vielä erityisesti puutavaran ja hakkeen HCT-yhdistelmiin.

Tutkimuksen tavoitteena on selvittää alustavasti, millaisia rasituksia HCT-yhdistelmät aiheuttavat silloille. HCT-yhdistelmiä on liikenteessä jonkin verran, ja niiden aiheuttamia rasituksia siltojen kannalta ei ole tutkittu. Työssä selvitetään, minkälaiset HCT-yhdistelmät ovat huonoimpia siltojen kestävyyskannalta. Tarkoituksena selvittää myös, että vaikuttaako kokonaisuudessaan lisäksi myös esimerkiksi yhdistelmän kokonaispituus tai akselipainot ja -välit.

1.3 Tutkimuksen toteutus ja rakenne

Tutkimuksen aluksi tehdään kirjallisuustutkimusta. Ensimmäisessä luvussa perehdytään Suomen sillastoon, siltojen ikäjakaumaan Suomessa sekä erilaisiin siltatyyppeihin. Sen jälkeen perehdytään tarkemmin HCT-yhdistelmiin ja niiden käyttöön Suomessa. Perehdytään myös jonkin verran ehdotettuihin HCT-käytäviin. Luvussa 5 tarkastellaan Suomessa käytettyjä suunnittelukuormia sekä HCT-yhdistelmien aiheuttamia rasituksia, joita verrataan keskenään sekä kantavuuslaskentaohjeen mukaiseen AA13/76 kuormakaavioon. Tarkastelut tehdään vaikutusviivojen avulla.

Kotelopalkkisiltoihin ja poikkileikkauksen toimintaan perehdytään tarkemmin luvuissa 2 ja 4. Teräsbetonisiin kotelopalkkisiltoihin perehdytään aluksi kirjallisuustutkimuksen avulla. Lisäksi selvitetään Taitorakennerekisterin avulla, millaisia teräsbetonisia kotelopalkkisilloja Suomessa on ja erityisesti, millaisia osuu ehdotetuille HCT reiteille. Taitorakennerekisterissä ei ole merkittynä kaikkia kaupunkien omistuksessa olevia siltoja, joten

ne eivät ole myöskään tässä työssä tarkasteltuna. Työn taustamateriaaliksi saatiin jonkin verran olemassa oleville teräsbetonisille kotelopalkkisilloille tehtyjä kantavuustarkasteluja. Kantavuuslaskelmien avulla selvitetään alustavasti, mitkä rasiustyyppit ovat kriittisimpiä siltatyyppin kannalta.

Kotelopoikkileikkauksen toimintaa tarkastellaan tarkemmin laskentamallin avulla numeerisesti tarkastellen. Numeerista tarkastelua on käytettävä, koska rakenteet ovat monimutkaisia, sillat jatkuvia ja muuttujia useampia. Koska jatkotutkimusmahdollisuutena on siltojen koekuormittaminen, pyritään selvittämään, mitkä mitattavat suureet antavat parhaiten tietoa rakenteen todellisesta toiminnasta. Laskentamalli tehdään kahdesta erilaisesta teräsbetonisesta kotelopalkkisillasta, joiden jäykkyysominaisuuksia muuttamalla pyritään mallintamaan rakenteen tilaa. Itse kantavuuteen ei työssä oteta tarkemmin kantaa, sillä tarkasteltavat laskentamallit ovat yksinkertaistettuja siltoja eivätkä täysin vastaa mitään olemassa olevaa kohdetta.

Lopuksi työssä tarkastellaan, millä perustein mahdollisiin koekuormituksiin valitaan siltoja ja HCT-yhdistelmiä. Siltoja tai yhdistelmiä ei valita, sillä koekuormitusten laajuutta ei vielä tiedetä. Tarkastellaan kuitenkin, että millaisia HCT-yhdistelmiä ja siltoja kannattaisi jatkotutkimuksiin valita. Haasteena on tehdä sellaiset valinnat, että koekuormituksista saaduista tiedoista olisi hyötyä mahdollisimman monen sillan kannalta.

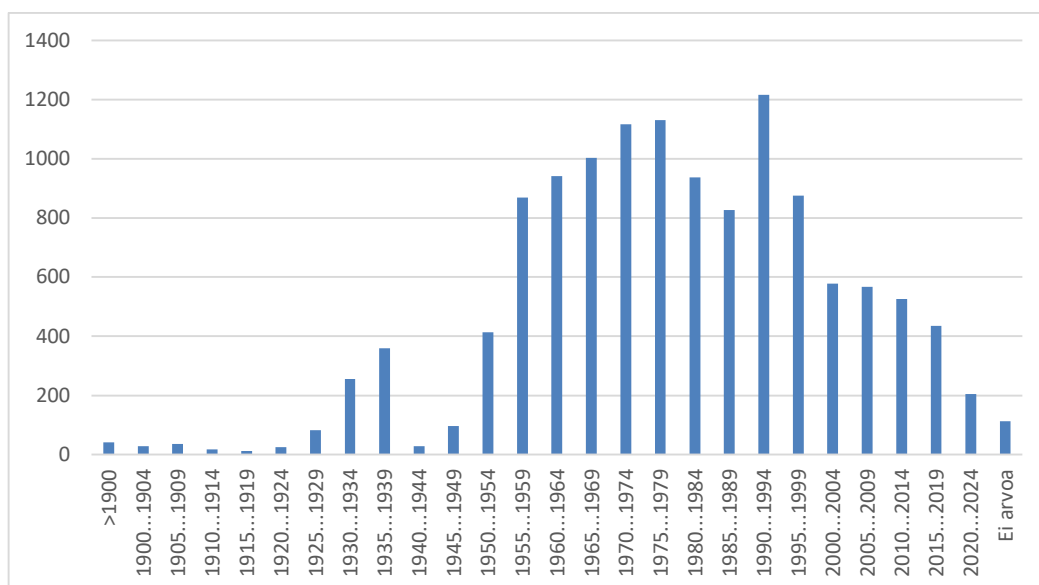
2. SUOMEN SILLASTO

Taitorakennerekisterin mukaan Suomen tieverkolla on tällä hetkellä (14.12.2021) 15 838 siltaa, joista 15 122 on väyläviraston omistuksessa. Lisäksi 1.1.2020 Väyläviraston omistuksessa oli 2 495 rautatieverkon siltaa ja taitorakennerekisterin mukaan luku on tällä hetkellä 2 514. Yhteensä rataverkolla on siltoja 2 603 kpl [4]. Vilkkainta sillanrakentaminen oli Suomessa 1960-luvulta 1990-luvun loppupuolelle. [5] Näin ollen Suomessa on käytössä olevia siltoja useilta eri vuosikymmeniltä. Siltoja on tehty useista eri materiaaleista kuten puu, kivi, teräs ja betoni. Materiaalien vaihtelun lisäksi myös siltatyypejä on useita. Lisäksi esimerkiksi siltojen jännemitat ja hyötyleveydet vaihtelevat merkittävästi siltapaikasta ja käyttötarkoituksesta riippuen.

2.1 Suomen siltakannan ikä

Suomessa autoistuminen ajoittuu suurilta osin 1920- ja 1930-luvuille. Tämä ja maanteiden siirtyminen valtion haltuun vaikutti voimakkaasti tie- ja katusiltojen kehittymiseen ja rakentamiseen. Haasteita aiheuttivat mm. se, että Suomen taloudellinen tilanne oli vaikea ja se, että tie- ja vesirakennushallitukselta puuttuivat tarpeelliset insinöörit ja rakennusmestarit. Haasteita aiheutti myös se, että noin 70 % valtion haltuun ottamista silloista oli puusiltoja, jotka eivät rakenteensa ja kantokykynsä puolesta enää vastanneet ajan vaatimuksia. Vain muutamat kivi-, teräs- ja betonisilloista olivat käyttökelpoisia kehityvälle tieliikenteelle. [6]

Suurin osa Suomen tiesilloista on rakennettu kymmeniä vuosia sitten. Kuten kuvasta 1 havaitaan, vuosien 1955 ja 2000 välillä rakennettuja siltoja on Suomessa paljon. 2000-luvulla uusia siltoja on tehty huomattavasti vähemmän. Uusien puu- ja teräsputkisiltojen käyttöikätaavoite on 50 vuotta, kun muilla silloilla tavoite on 100 vuotta.



Kuva 1. Tieverkolla olevien siltöjen ikäjakauma Suomessa, ei sisällä putkisiltoja [5, 14.12.2021]

Nykyisessä siltakannassa on myös melko vähän ennen vuotta 1950 valmistuneita siltoja. Luonnollisesti osa vanhoista silloista on purettu ja uudelleen rakennettu. Yksi syy vanhempien siltöjen puuttumiseen on myös se, että toisessa maailmansodassa saksalaiset tuhosivat perääntyessään 675 siltaa, mikä oli noin 90 % Lapin läänin maantiesilloista. Suurin osa toisen maailmansodan jälkeen uudelleenrakennetuista silloista oli puusiltoja, joita on myöhemmin vähitellen uusittu. Sodan jälkeen liikenne oli saatava nopeasti käyttöön, jolloin käytettiin sitä materiaalia, mitä oli helpoiten saatavilla. [6]

2.2 Siltatyypit Suomessa

Suomessa siltöjen rakennusmateriaalina on käytetty ajan saatossa kiveä, puuta betonia ja terästä. Ensimmäiset kivisillat Suomessa on rakennettu ympäristöstä kerätyistä kivistä. Kivistä rakennetut holvit eivät kestä vetojäännityksiä ja pysyvät koossa holvissa vaikuttavan puristavan voiman ansiosta. Ensimmäiset kivihovit tehtiin ilman laastia, mutta 1800-luvun puolivälissä alettiin käyttää rivimuuraustekniikkaa. Uusi tekniikka mahdollisti pidemmät jännevälit sekä useampiaukkoiset sillat. 1900-luvun alun jälkeen kivisiltöjen rakentamisen vähentyi merkittävästi. [2]

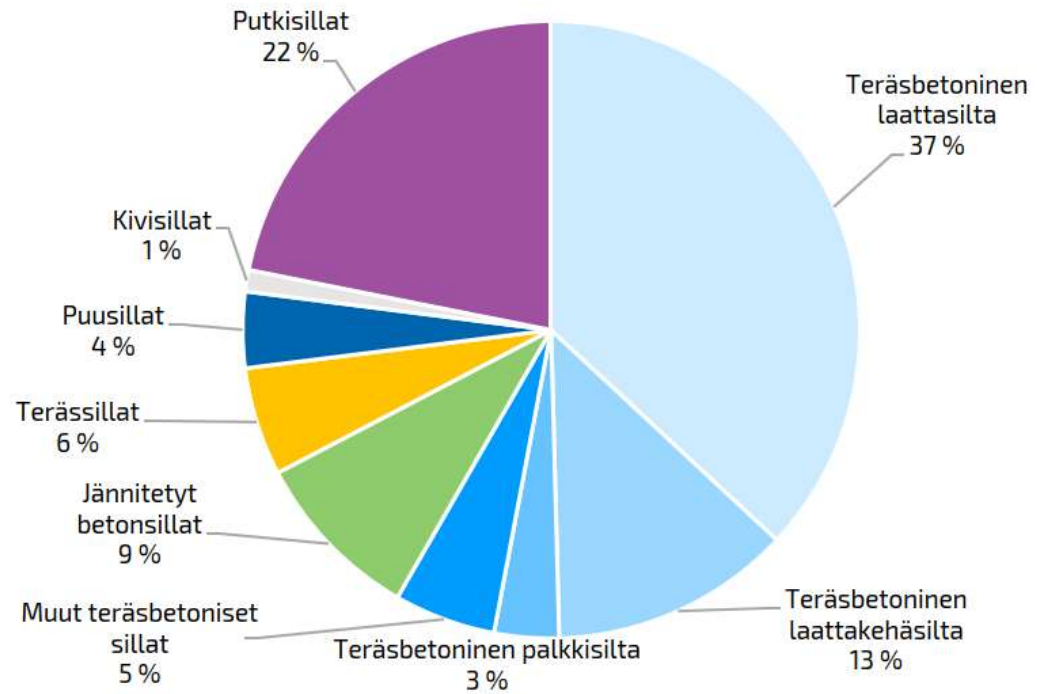
Puusiltoja on tehty Suomessa niin kauan kuin asutusta on ollut, koska sitä on ollut aina saatavilla. 1800-luvulla ja 1900-luvun alussa puusilta kivisillä tuilla oli yleisin silta isojen vesistöjen ylityksessä. Tällöin päällysrakenteena käytettiin yleensä tukiansasta, joka pi-

densi jännemittaa taloudellisesti pääosin puristettuna rakenteena. Puun vahvuus silta-materiaalina oli sen saatavuus, mutta heikkoutena sen heikohko pitkäaikaiskestävyys. [2]

Terässiltojen rakentaminen lähti liikkeelle rautatierakentamisen alettua. Ensimmäisten terässiltojen osat tuotiin muualta laivoilla Euroopasta. Aluksi käytettiin keittorautaa ja myöhemmin siirryttiin käyttämään valantaterästä, jolla oli parempi lujuus. Aluksi tehtiin levypalkkisiltoja ja sen jälkeen siirryttiin ristikkosiltoihin. Maanteillä terässiltojen rakentaminen eteni huomattavasti hitaammin. [2]

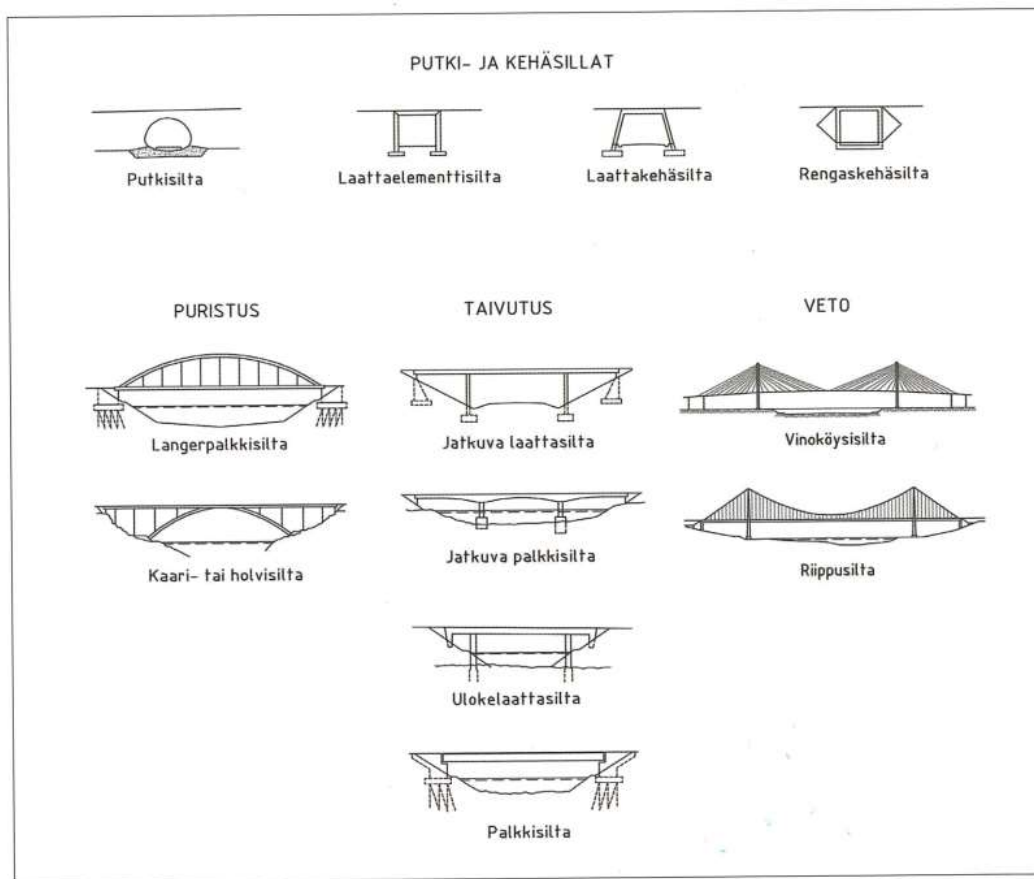
Betonisillat tulivat Suomeen 1800- ja 1900-lukujen vaihteessa Saksasta. Ensimmäiset betonisillat olivat radan ylittäviä, raudoittamattomia betoniholvisiltoja. Teräsbetonisia siltoja alettiin tehdä 1900-luvun alussa, jolloin ensimmäiset olivat radan ylittäviä jatkuvia laattapalkkikehäsiltoja. Nykyisin noin 60 % rakennetuista silloista Suomessa on betonisiltoja. [2]

Kuvasta 2 havaitaan, että nykyisistä tiesilloista suurin osa on betonisia, joista osa on jännitettyjä. Teräsbetonisia siltoja, jotka näkyvät kuvassa 2 vaalean sinisellä, on yli puolet kaikista tiesilloista. Kivisiltoja on kaikista vähiten, sillä se osoittautui jo 1900-luvun alussa kalliiksi rakennusmateriaaliksi verrattuna betoniin. 1920-luvun lopussa betoniholvi oli noin puolet halvempi kuin kiviholvi. [3] Puusiltojen osuus väheni merkittävästi vuoden 1927 jälkeen ja edellisenä vuonna 1926 betoni ohitti puun rakennusmateriaalina [3].



Kuva 2. Tiesiltojen lukumääräien jakauma siltatyypeittäin [5]

Siltatyyppejä on useanlaisia. Siltatyyppi kuvaa sillan kantavaa rakennetta ja siitä ilmenee sillan pääkannattimen staattinen toimintatapa. Pääkannatin voi olla materiaaliltaan teräsbetonia, jännitettyä betonia, terästä, puuta tai kiveä. Siltatyyppit jaotellaan rakenteellisen toiminnan perusteella. Siltatyyppien jaottelu on esitetty kuvassa 3.



Kuva 3. Siltatyypit jaoteltuna rakenteellisen toiminnan perustella. [2]

Siltatyyppejä ovat putki- ja kehäsillat, puristetut siltatyypit, taivutetut siltatyypit, vedetyt siltatyypit ja erikoissillat. Puristettuihin siltatyyppeihin kuuluvat kaari- ja holvisillat sekä langer-palkkisillat. Taivutettuihin siltatyyppeihin kuuluvat jatkuvat laatta- ja palkkisillat, ulokelaattasilat sekä palkkisillat. Vedettyjä siltatyyppejä ovat vinoköysisillat ja riippusillat ja erikoissiltoihin kuuluvat avattavat sillat sekä ponttonisillat. Siltatyypin valinta perustuu nykyään suurilta osin sillan ja väylän kokonaisrakennuskustannusten optimointiin. Optimointi tehdään vertailemalla erilaisten siltaratkaisujen kantavien rakenteiden tehokkuutta ja vaikutuksia väylän rakennuskustannuksiin. Kustannusten lisäksi rakennetyypin valinnassa huomioidaan sillan ulkonäkö, turvallisuus sekä ylläpitokustannukset. Valintakriteereihin voi kuulua myös sillan ulkonäkö, ympäristöön sopeutuminen tai sillan kaupunkikuvallinen merkitys. Myös materiaalin valinta on oleellista ja vaikuttaa myös siltatyyppiin. [2] Taulukossa 1 on esitetty 1.1.2020 mennessä valmistuneet Suomen tiesillat päärakennusmateriaalin ja staattisen rakenteen mukaan.

Taulukko 1. Tiesillat päärakennusmateriaalin ja staattisen rakenteen mukaan ELY-keskuksittain [5]
Siltöjen lukumäärä 1.1.2020 (kpl)

Päärakennusmateriaali	ELY-keskus										Yhteensä
	UUD	VAR	KAS	PIR	POS	KES	EPO	POP	LAP	Väylä	
Teräsbetoni	1 900	953	484	584	1 207	553	753	1 407	842	101	8 784
holvi	96	84	25	50	105	32	76	178	76	8	730
kaari	1	4	2	1	2						10
kehä	10	4	4	1	4	1	2	6			32
köysi				1							1
laatta	976	667	279	348	836	429	528	896	567	37	5 563
laattakehä	698	140	141	147	193	62	115	226	131	54	1 907
palkki	116	52	32	34	66	28	31	95	55	2	511
palkkikehä	3	1	1	2	1	1	1	6			16
pato									13		13
ponttoni		1									1
Jännitetty betoni	330	170	98	134	136	76	110	113	115	80	1 362
kaari		1			1						2
laatta	19	8	2	5	6	4	7	5	3	1	60
laattakehä							1		1		2
palkki	310	161	96	129	128	72	101	108	111	79	1 295
palkkikehä	1				1		1				3
Teräs	71	99	44	38	108	47	156	144	133	16	856
ansas					1			2			3
kaari			4			1	1	3			9
kalusto	2	2		5		3	7	2	8	1	30
köysi	1					1	1	1	2		6
palkki	65	92	34	28	97	41	135	127	117	12	748
ristikko			3	3	3	1	11	9	5		35
ei tietoa	3	5	3	2	7		1		1	3	25
Puu	54	87	22	48	149	53	24	101	61	2	601
ansas	2	1		2	1			3	2		11
kaari	1			1					1		3
laatta		1									1
palkki	51	85	22	45	148	53	24	98	57	2	585
ei tietoa									1		1
Kivi	20	55	19	27	15	11	7	12	3		169
holvi	19	55	19	27	14	11	6	12	3		166
palkki	1				1		1				3
Putkisillat	626	438	238	283	603	237	354	321	195		3 295
teräsbetoni	1	1		1	1	1	1	2	4		12
teräs	625	437	237	282	602	236	353	319	191		3 282
muu materiaali			1								1
Ei tietoa	3	5	1		3						12
Kaikki yhteensä	3 004	1 807	906	1 114	2 221	977	1 404	2 098	1 349	199	15 079

Taulukossa 1 putkisillat on otettu omaksi osiokseen. Taulukosta näkee myös siltöjen ja-kautumisen ELY-keskuksittain. Eniten siltöja on Uudenmaan ELY:n alueella. Kaari- ja palkkisiltöja tehdään teräsbetonista, jännitetystä betonista, teräksestä sekä puusta. Eniten erilaisia staattisia rakenteita on teräsbetonista tehdyillä silloilla ja vähiten kivisilloilla. Kivisillat ovat joko holvisiltöja tai palkkisiltöja. Teräsbetonisia kotelopalkkisiltöja on 124 [4] ja ne sisältyvät taulukossa 1 teräsbetonisiin palkkisiltöihin. Jännitettyjä kotelopalkkisiltöja on 74 ne sisältyvät taulukossa 1 jännitetyn betonin palkkisiltöihin. Osa jännitetystä kotelopalkkisilloista on alun perin teräsbetonisia kotelopalkkisiltöja, jotka on vahvennettu jälkijännittämällä [4].

2.3 Vanhojen siltojen haasteet kasvavien kuormien kannalta

Suomessa silloille tehdään eri tasoisia tarkastuksia tietyin väliajoin. Ensimmäinen tarkastus on vastaanottotarkistus, jolloin rakenne vastaanotetaan ylläpitoon. Sen jälkeen sillalle tehdään vuosittainen vuositarkastus, jolla seurataan rakenteen kuntoa ja hoidon tasoa. Yleistarkastus, joka tehdään sillan kunnosta riippuen 3–10 vuoden välein, on vuositarkastusta tarkempi. Yleistarkastuksessa käydään rakenteet systemaattisesti silmä-määräisesti läpi ja kirjataan kunto- ja vauriotiedot ylös. Yleistarkastusta voidaan täydentää erikoistarkastuksella tai laajennetulla yleistarkastuksella. Molemmat sisältävät silmä-määräisen tarkastelun lisäksi muita tutkimusmenetelmiä, joista esimerkiksi näytteenotto voi olla yksi. Erikoistarkastus on tarpeellinen esimerkiksi korjaussuunnitelmaa laadittaessa [2]

Vaikka silta olisi tarkastusten mukaan hyvässä kunnossa, se ei välttämättä ole käyttökelpoinen nykyisille liikennekuormille. Väyläverkoston muutosten ja kapasiteetin kasvattamistarpeiden vuoksi siltoja on voinut olla tarve esimerkiksi leventää, jolloin myös toiminnallinen rakenne on muuttunut. Vanhoja siltoja myös vahvennetaan useista syistä, joista merkittävin on juuri kuormituksen kasvaminen. Erilaisia vahventamisperiaatteita ovat rakenteellisen toiminnan muuttaminen, rakenneosan uusiminen tai korjaaminen, stabiiliteetin parantaminen, paikallisen kapasiteetin parantaminen, lisätuennan rakentaminen sekä perustusten vahventaminen. [2]

Siltoja on ajan saatossa suunniteltu erilaisille liikennemäärille ja massoille. Suunnittelu-kuormiin ja niiden käyttöajankohtiin perehdytään tarkemmin luvussa 4.1. Taulukkoon 2 on erilaisia siltatyyppejä suunnittelukuormien mukaan. Taulukko on vuodelta 2015, joten nykyisin LM kuormakaavioiden mukaan suunniteltuja siltoja on enemmän. Taulukosta kuitenkin huomataan, että Suomessa on paljon siltoja, jotka on suunniteltu vanhoille liikennemäärille ja pienemmille massoille. Taulukosta havaitaan, että suunnittelukuormalla Lk1, EK1 suunniteltuja siltoja on Suomessa tällä hetkellä eniten. Taulukossa on erikseen nähtävissä teräsbetoniset kotelopalkkisillat, jotka on taulukkoon nimetty TB kotelopalkkisilloiksi. Kyseisiä siltoja on suunniteltu eniten suunnittelukuormille AI sekä AI+тели. Taulukossa on myös erikseen JB kotelopalkit eli jännitetyt teräsbetoniset kotelopalkit. Niitä on suunniteltu eniten suunnittelukuormille Ak1+Ek1 sekä Lk1+Ek1.

Taulukko 2. *Siltatyytit suunnittelukuorman mukaan. Taulukko vuodelta 2015, joten LM kuormakaavioiden mukaisia siltoja on tällä hetkellä enemmän. [7]*

Siltatyyppiryhmä	Luokittelematon	Kik	9 t auto	12 t auto	Maa 75	All	Suunnittelukuorma										Siltaja yhteensä	
							AJ	Ak1,Ek2	Lk1,Ek2	Al+teili	Ak1,Ek1	Lk1,Ek1	LM1	LM1 (Y)	LM1,LM3	VR1974		Muu
JB kaaret						1	1											2
JB kotelopalkit		3				1	4			13	21	43						85
JB laatat ja laattakehät	1	6				1	1	2	2	7	1	41	1			1	3	67
JB palkit ja palkkikehät	6	132		1	1	1	5	1	18	33	13	885	15		19		32	1 162
Kiviset holvit	111	1	21	10	3	2	12		1	3	5	7					5	181
Kiviset palkit	2																	2
Muut TB sillat	43	1	12	23	1	26	304	5	7	35	31	305		5	1		4	803
Muut terässillat	12	28	7	1	5	7	7	2	10	16	8	244				8	23	378
Puiset liimapalkit	4	58	1		1			39	242		3	42	2	2			16	410
Puiset palkit	16	6	2	27	1	4	47	91	1	3	6						10	214
Puiset ristikot ja ansaat	4	5		1								1						11
TB kotelopalkit	1	6				2	52	1		44	20	7						133
TB laatat ja laattakehät	166	46	252	64	5	55	1575	63	253	738	607	3529	8	1	70	1	64	7 497
TB palkit ja palkkikehät	18	46	24	6		23	98	6	9	36	13	131			2		29	441
Teräksiset kotelopalkit							1				2	3					1	7
Teräksiset putket	207	38			1	356	3	66	81	231	1897	13			58		13	2 964
Teräspalkit	49	56	30	12	78	25	55	50	63	24	16	242	3		1		54	758
Ei tietoa	4							1									1	7
Yhteensä, kpl	644	432	349	145	96	148	2518	263	673	1033	977	7377	42	8	161	1	255	15 122

Siltojen kantavuutta voidaan määrittää useilla eri tarkkuuksilla. Mikäli sillan kantavuus ei ole riittävä ajoneuvoasetuksen mukaisille ajoneuvoille, on sillalle asetettava painorajoitus. Kevyin tapa määrittää sillan kantavuus on sillan perustietojen perusteella. Kyseisessä menetelmässä verrataan siltojen suunnittelukuormien aiheuttamia rasituksia tarvittavaan kantavuuteen. Lisäksi on otettava huomioon sekä rakenteen alkuperäisten suunnitelmien mukaiset, että nykyisten ohjeiden mukaiset erilaiset osavarmuuskertoimet. Menetelmä ei huomioi mm. pysyvissä kuormissa tapahtuneita muutoksia. Mikäli tarvitaan tarkempaa tietoa sillan kantavuudesta, voidaan kantavuuden määrittäminen tehdä laskennallisesti. Laskennallista määrittämistä varten tarvitaan vanhat suunnitelmat sekä ajantasaiset kuntotiedot. Jos voidaan olettaa sillan kapasiteetin poikkeavan laskennan antamasta kapasiteetista, voidaan järjestää siltojen koekuormituksia. Koekuormituksissa saadaan tarkempaa tietoa rakenteen toiminnasta ja kyvystä jakaa rasituksia. Rakenteesta saattaa löytyä esimerkiksi kantavuutta parantavia liittovaikutuksia. Toisaalta koekuormitukset voivat paljastaa myös kantavuutta heikentäviä vaurioita. [2]

Siltojen kantavuutta tarkasteltaessa on otettava huomioon rakennemateriaalin mahdollisesti muuttuneet merkintätavat suunnitelmissa. Vanhoissa suunnitelmissa on käytetty eri merkintöjä esimerkiksi betonin lujuuksille, joten on tarkastettava mitä nykyisten eurokoodien mukaista lujuusluokkaa mikäkin merkintä vastaa. Taulukossa 3 on esitetty Suomessa eri aikaan käytössä olevien normien betonien lujuusluokat sekä betonin lujuusluokitusta vastaavia 28 vuorokauden ikäisiä lujuuksia eri koekappaleille. Rakenteissa käytetyille rakenneteräkselle on tarkistettava, millaista terästä on käytetty ja minkä lujuista sen voidaan olettaa olevan. [8] Esimerkiksi vanhan S235 myötölujuutta vastaavan teräsnäytin vetomurtovarmuudeksi valitaan 400 MPa, ellei tarkemmat tutkimukset osoita toista [8].

Taulukko 3. *Betonin lujuusluokitusta vastaavia 28 vrk ikäisiä lujuuksia eri koekappaleille ja Suomessa eri aikaan käytössä olevien normien betonien lujuusluokat [8]*

Vanhat Normit [kp/cm ²]	Vanhat Normit [kp/cm ²]	Suomen RakMk B4 [N/mm ²]	Nykyinen lujuusluokka CEN (EN) [N/mm ²]	150x300 mm lieriölä määrätty ominaislujuus f_{ck} [N/mm ²]	150 mm kuutiolla määrätty ominaislujuus [N/mm ²]	100 mm kuutiolla määrätty ominaislujuus [N/mm ²]
$\sigma_{b28}=200$	K200	K20	C16/20	16	20	20,5
$\sigma_{b28}=250$	K250	K25	C20/25	20	25	26,0
$\sigma_{b28}=300$	K300	K30	C25/30	25	30	31,0
$\sigma_{b28}=350$	K350	K35	C28/35	28	35	36,0
$\sigma_{b28}=400$	K400	K40	C32/40	32	40	41,0
$\sigma_{b28}=450$	K450	K45	C35/45	35	45	46,5
$\sigma_{b28}=500$	K500	K50	C40/50	40	50	51,5
$\sigma_{b28}=550$	K550	K55	C45/55	45	55	56,5
$\sigma_{b28}=600$	K600	K60	C50/60	50	60	62,0
$\sigma_{b28}=700$	K700	K70	C57/70	57	70	72,0
$\sigma_{b28}=800$	K800	K80	C65/80	65	80	82,5

Betonisilloissa, jotka on rakennettu ennen vuotta 1985, voidaan huomioida betonin lujittuminen ajan myötä ilman tarkempia tarkasteluja. Tällöin vaurioitumattomaksi todetun rakenteen betonin puristuslujuutta voidaan korottaa 5 N/mm². Mikäli sillalle tehdään kantavuuden määrittämistä varten tarkempia tutkimuksia, lujuusluokka voidaan valita tarkasteltavan rakenneosan koekappaleen perusteella Betonisillojen korjaussuunnitteluohjeen mukaisesti. Tällöin myös osavarmuusluvut ovat erilaiset. Mitä enemmän rakenteesta tiedetään, sen pienempiä varmuuskertoimia voidaan käyttää. [8]

Suomessa teräsbetonirakenteissa käytettyjen betoniterästen ominaisuudet ovat vaihdelleet vuosien saatossa. Vaihtelevuutta on tankojen lujuudessa, sitkeydessä, hitsattavuudessa ja tartuntaominaisuuksissa. Ennen harjateräksen käytön yleistymistä, raudoituksessa käytettiin sileää pyöröterästankoa, joka on tartuntaominaisuuksiltaan huomattavasti huonompi harjateräkseen verrattuna. Ennen 1980-lukua teräsbetonissa käytetyn harjateräksen lujuusluokka on pääosin ollut myötölujuudeltaan 400 MPa. Käytetyn harjateräksen myötölujuus selviää pääosin suunnitelmista, mutta saattaa olla eri tavoin merkitty aikakaudesta riippuen. Nykyisin käytettävä raudoitus on pääosin EN 10080 mukaisia eli A500HW, B500B tai B500C1. [8]

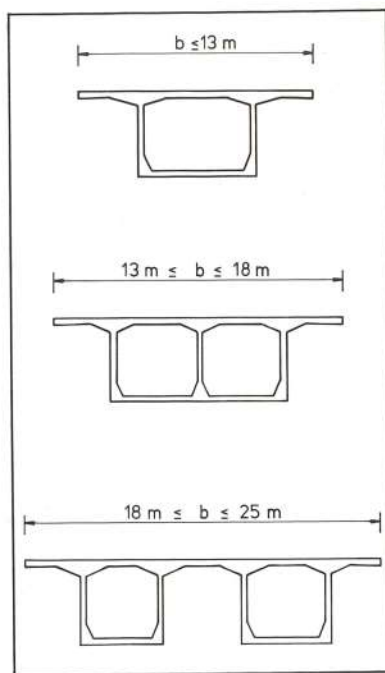
2.4 Teräsbetoniset kotelopalkkisillat Suomessa

Kotelopalkkisilloja alettiin kehittämään Suomessa 1950-luvulla [3]. Toisen maailmansodan jälkeen ajoneuvokuormat kasvoivat ja pääteitä rakennettaessa tarvittiin laattasilloja

suurempijänteisiä siltoja. Matalamaastoiset siltapaikat eivät soveltuneet kaarisilloille, joten kehitettiin teräsbetonipalkkisilta, jota ei aikaisemmin ollut käytetty. Lapin tuhoutujen siltojen jälleenrakentamisen yhteydessä Yrjö Winter joutui pohtimaan erilaisia siltaratkaisuja ja alkoi suunnitella teräsbetonisia kotelopalkkisiltoja. [3]

Kotelopalkkisillan rakentaminen oli työlästä, sillä koteloa jäykistäviä poikkiseiniä oli melko tiheässä. Tätä ei kuitenkaan pidetty liian suurena ongelmana ja ensimmäinen kotelopalkkisilta rakennettiin vuonna 1953 Kolariin. Tämä Äkäsjoen silta oli jännemitaltaan vain 18 m, mikä on melko pieni kotelopalkkisillalle. Seuraavana vuonna 1954 Haukiputaalle rakennettiin Kiiminkijoen kolmijänteinen viisteellinen kotelopalkkisilta, joka oli jännemitaltaan huomattavasti suurempi kuin ensimmäinen kotelopalkkisilta. Sen reunajännteet ovat 41 m ja pääjänne 52 m. [3] Suomessa on myös kaksi muuta samoilla jännemitoilla olevaan teräsbetonista kotelopalkkisiltaa, joista Puodinkosken silta on vahvennettu jännittämällä ja Ahvenisen silta Enossa on edelleen jännittämätön. Kiiminkijoen silta ja Ahvenisen silta ovat edelleen jännemitaltaan suurimmat jännittämättömät teräsbetoniset kotelopalkkisillat. [4]

Kotelopalkkipoikkileikkaus on keskisuurten ja suurten siltojen rakennetyyppi. Se soveltuu kaiken levyisille silloille, sillä koteloita voi olla poikkileikkauksessa vierekkäin yksi tai useampi. Pitkän jännemitan silloille on olemassa jännemitan mukaan suositeltavia kotelopalkkipoikkileikkauksia. Suositeltavat raja-arvot on esitetty kuvassa 4. [9]



Kuva 4. Erilevyisten siltojen poikkileikkaussuositukset jännemitan mukaan. [9]

Kotelopoikkileikkauksen yksi etu on se, että se voidaan tehdä rakennekorkeudeltaan pienemmäksi kuin vastaava laattapalkkisilta. Tällöin omat päällysrakenteen omat painot saadaan pienemmiksi. Pienissä silloissa kotelopoikkileikkaus pyritään pitämään samana koko sillan pituudella. Pidemmillä jännemitoilla kannattaa usein valita sillan pituussuunnassa muuttuva poikkileikkaus. Poikkileikkausta voidaan muuttaa joko pelkästään rakenteen sisäisten viisteiden avulla tai muuttamalla koko poikkileikkauksen korkeutta. Poikkileikkausta valittaessa on otettava huomioon, että pääpalkkien viisteellisyydellä on suuri vaikutus myös sillan ulkonäköön. Visuaalisesti paras viistemuoto on jatkuva paraabeli ja jänteen keskellä olevaa suoraa osaa tulee välttää. Suora osa jänteen keskellä aiheuttaa sen, että silta näyttää alaspäin taipuneelta. [9]

Ajan myötä pitkien jännemittojen teräsbetonirakenteiden heikkoudet alkoivat paljastua. Useissa silloissa havaittiin betonin kutistumisesta, virumisesta sekä muista pitkäaikaismuodonmuutoksista aiheutuneita halkeamia ja taipumia. Monia teräsbetonisia kotelopalkkisilloja on vahvennettu jännittämällä. [3]

Nykyisin teräsbetoniset kotelopalkkisillat yleensä jännitetään, mutta tässä työssä tutkinan kohteena on jännittämättömät teräsbetoniset kotelopalkkisillat. Tämän takia työssä ei perehdytä tarkemmin kotelopoikkileikkauksen jännittämiseen tai jännittämisestä johtuviin ominaisuuksiin. Suurin osa tarkasteltavan aikakauden silloista ei ole jännitettyjä.

2.5 Olemassa olevien teräsbetonisten kotelopalkkisiltojen kantavuus

Taustamateriaaliksi saatiin olemassa oleville silloille tehtyjä kantavuuslaskelmia, jotka eivät ole julkista tietoa, joten niitä ei voida tarkasti työssä esittää. Tarkastellaan niiden avulla pääpiirteittäin, millaisia havaintoja kotelopalkkisiltojen kantavuudesta ja suunnittelusta voidaan alustavasti tehdä. Kantavuuslaskelmia saatiin silloista, joissa oli yksi tai useampi kotelo. Eniten kantavuuslaskelmia saatiin kolmiaukkoisista, sillä ne ovat myös työn kannalta kiinnostavimpia.

Kantavuustarkasteluissa on käytetty erilaisia kuormitusyhdistelmiä. Pääosin kantavuutta on tarkasteltu pysyvien kuormien lisäksi kantavuuslaskentaohjeen mukaisesti ajoneuvoasetuksen 2013 mukaisilla kuormakaavioilla ja pintakuormalla. Jonkin verran tarkasteluissa on käytetty myös erikoiskuormakaavioita, mikäli ne on sillan sijainnin kannalta olleet tarpeellisia.

Useissa kotelopalkkisiltojen kantavuuslaskelmissa ensimmäisenä tulee vastaan ulokkeen kestävyys. Joissakin silloissa uloke on alun perin suunniteltu kevyelle liikenteelle, eikä ulokkeen ole tarkoituskaan kestää ajoneuvoasetuksen mukaisia ajoneuvoja. Tällöin

ulokkeelle ajo voidaan estää. Osa tarkastelluista silloista on painorajoitettuja, joka on aina siltakohtainen päätös, eikä sitä tehdä pelkän laskentatuloksen perusteella. Uloketta ei koeta kotelon toiminnan kannalta tässä työssä oleelliseksi, joten sitä ei tarkastella erikseen sen enempää. Oletettavasti, mikäli ulokkeet ovat suunniteltu kevyelle liikenteelle tai eivät muuten kestä ajoneuvoasetuksen mukaisia kuormia, ne tuskin kestävätkään myöskään erikoiskuljetuksia.

Taivutuskestävyys on yleisin, joka tarkasteluissa ensimmäisenä ylittyi. Osassa silloista murtorajatilan taivutusmomenttikestävyys riittää, mutta käyttörajatilassa taivutushalkeilu ylittyy. Useimmin mitoittavaksi kohdaksi tulivat välitukialueet, mutta joissakin kohteissa myöskään taivutusmomenttikestävyys kentässä ei ollut riittävä. Erään sillan kohdalla oli tarkasteltu eri akselimäärillä kansirakenteen kestävyyttä. Huomattiin, että suuremmilla akselimäärillä mitoittavaksi tekijäksi muodostui sillan pituussuuntainen momenttikestävyys välituilla, kun taas pienemmillä akselimäärillä mitoittava tekijä on kotelon yläpinnan laatan poikkisuuntainen momenttikestävyys. Tämä johtuu todennäköisesti siitä, että tukimomentti tulee kahdesta kentästä, kun kenttämomentti saadaan, kun kuorma asetetaan vain kentän alueelle.

3. HCT-YHDISTELMÄT

High Capacity Transport on kansainvälisesti vakiintunut termi sallittua pidemmille tai raskeammille yhdistelmille tieliikenteessä. Yhdistelmille käytetään yleisesti lyhennettä HCT. HCT-yhdistelmiä ei pidetä erikoiskuljetuksina, sillä erikoiskuljetuksissa suurempi massa tai mitta syntyy yksittäisen kappaleen suuresta koosta tai painosta. HCT-kuljetusten suurempi pituus tai paino syntyvät suuremmasta tavaramäärästä. HCT-kuljetuksia on kehitetty Suomessa poikkeusluvilla vuodesta 2013 lähtien. [10] Nykyisin HCT-termiä käytetään laajemmin, kuin alun perin ja sillä viitataan usein vanhan tieliikennelain mukaisen pituuden ylittäviin ajoneuvoyhdistelmiin. Tässä työssä käytetään HCT-termiä yhdistelmistä, jotka ovat pituutensa mukaan uuden tieliikennelain mukaisia, mutta ylittävät lain massaltaan.

3.1 Uusi tieliikennelaki HCT-yhdistelmien kannalta

Uusi tieliikennelaki tuli voimaan 1.6.2020 [11]. Lakiin tehtiin useita muutoksia edelliseen verrattuna, mutta tässä työssä keskitytään muutoksiin ja määräyksiin HCT-yhdistelmien kannalta. Aikaisemmat mitta- ja massavaatimukset olivat ajoneuvoasetuksessa. HCT-yhdistelmiin vaikuttavia määräyksiä on mm. yhdistelmän massa, pituuteen ja kääntövyöteen liittyen. [12]

Uuden tieliikennelain myötä ajoneuvoyhdistelmän suurin sallittu pituus muuttui. Tällä hetkellä suurin sallittu pituus kuorma-auton ja yhden tai useamman perävaunun yhdistelmälle on 34,5 m [1]. Aikaisemmin ajoneuvoyhdistelmän suurin sallittu pituus tieliikennelaisissa oli 25,25 m [13]. Yli 22,0 m pitkän ajoneuvoyhdistelmän, joka ei ole lämpöeristetty, suurin sallittu leveys on 2,55 m [1]. Suurin sallittu yhdistelmän korkeus ei muuttunut ja se on 4,4 m. Korkeus ei saa ylittyä ajoneuvon ollessa kuormaamaton tai akselinostolaitteen ollessa yläasennossa. [1]

Massan suurin sallittu arvo ei muuttunut uuteen tieliikennelakiin. Tällä hetkellä tieliikennelaisissa ajoneuvoyhdistelmälle suurin sallittu massa on 76 t. Jotta ajoneuvoyhdistelmä saa saavuttaa 76 t suuruisen massan, tulee sen täyttää liikennelain mukaiset ehdot. Yhdistelmän tulee olla joko vähintään 11-akselinen tai yhdeksän akselinen, jossa vähintään 65 prosenttia perävaunun tai perävaunujen massasta yhteensä kohdistuu paripyörin varustelluille akseleille. [1]

Tieliikennelaissa on erikseen suurimmat sallitut massat autoille ja perävaunuille. Kaksiakselisen varsinaisen tai keskiakseliperävaunun suurin sallittu massa on 18 t ja kolmiakselisen 24 t. Myös autojen massarajoitukset ovat riippuvaisia akseleista. [12] Autojen suurimmat sallitut massat on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. *Tieliikennelain mukaiset auton suurimmat sallitut massat [12]*

	Auto	tonnia
a	Kaksiakselinen auto	18
b	Kolmiakselinen auto	25
c	Kolmiakselinen auto, jos sen vetävä akseli on varustettu paripyörin ja ilmajousitettu tai varustettu ilmajousitusta vastaavaksi tunnustetulla jousituksella taikka jos kukin vetävä taka-akseli on varustettu paripyörin eikä yhdellekään akselille kohdistuva massa ylitä 9,5:tä tonnia	26
d	Kolmiakselinen nivellinja-auto	28
e	Neliakselinen auto, jossa on kaksi ohjaavaa akselia, jos sen vetävä akseli on varustettu paripyörin ja ilmajousitettu tai varustettu ilmajousitusta vastaavaksi tunnustetulla jousituksella taikka jos kukin vetävä akseli on varustettu paripyörin eikä yhdellekään akselille kohdistuva massa ylitä 9,5:tä tonnia	35

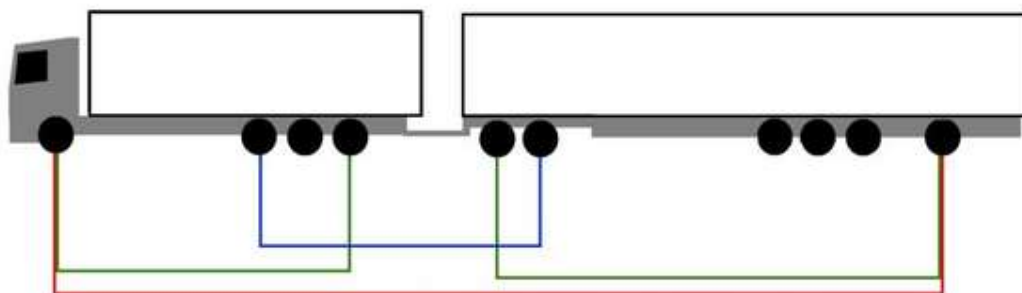
Yhdistelmän kokonaismassan lisäksi tieliikennelaissa annetaan määräykset erikseen myös akseli- ja telimassoille. Suurin sallittu massa vetävälle akselille on 11,5 t ja ei vetävälle akselille 10 t. Erilaisten telien suurimmat sallitut massat on esitelty taulukossa 5. Lisäksi vaikka peräkkäiset etu- tai taka-akselit eivät muodostaisikaan teliä, niiden yhteismassa ei saa ylittää vastaavalle telille sallittua massan arvoa.

Taulukko 5. Suurimmat sallitut telille kohdistuvat massat moottorikäyttöiselle ja hinattavalle ajoneuvolle.
[12]

a	Kaksiakselinen teli, jos akseliväli on pienempi kuin 1,0 metriä	11,5 t
b	Kaksiakselinen teli, jos akseliväli on vähintään 1,0 metriä, mutta pienempi kuin 1,3 metriä	16 t
c	Kaksiakselinen teli, jos akseliväli on vähintään 1,3 metriä, mutta pienempi kuin 1,8 metriä	18 t
d	Kaksiakselinen teli, jossa vähintään toinen akseleista on vetävä, jos akseliväli on vähintään 1,3 metriä, mutta pienempi kuin 1,8 metriä ja kukin vetävä akseli on varustettu paripyörin eikä yhdellekään akselille kohdistuva massa ylitä 9,5 tonnia	19 t
e	Kaksiakselinen teli, jossa vähintään toinen akseleista on vetävä, jos akseliväli on vähintään 1,3 metriä mutta pienempi kuin 1,8 metriä ja vetävä akseli on varustettu paripyörin ja ilmajousitettu tai varustettu ilmajousitusta vastaavaksi tunnustetulla jousituksella	20 t
f	Kaksiakselinen teli, jossa vähintään toinen akseleista on vetävä, jos akseliväli on vähintään 1,3 metriä mutta pienempi kuin 1,8 metriä ja telin kumpikin akseli on varustettu paripyörin sekä ilmajousitettu tai varustettu ilmajousitusta vastaavaksi tunnustetulla jousituksella taikka jos telin kumpikin akseli on vetävä ja varustettu paripyörin eikä yhdellekään akselille kohdistuva massa ylitä 10,5 tonnia	21 t
g	Kahden etuakselin muodostama kaksiakselinen teli, jos akseliväli on vähintään 1,8 metriä	20 t
h	Kolmiakselinen teli, jos peräkkäisten akselien välinen etäisyys on pienempi kuin 1,3 metriä	21 t
i	Kolmiakselinen teli, jos peräkkäisten akselien välinen etäisyys on vähintään 1,3 metriä	24 t
j	Kolmiakselinen teli, jos peräkkäisten akselien välinen etäisyys on vähintään 1,3 metriä ja jos vähintään kaksi telin akseleista on varustettu paripyörin	27 t
	Hinattavan ajoneuvon teli	
k	Kaksiakselinen teli, jos akseliväli on pienempi kuin 1,0 metriä	11 t
l	Kaksiakselinen teli, jos akseliväli on vähintään 1,0 metriä mutta pienempi kuin 1,3 metriä	16 t
m	Kaksiakselinen teli, jos akseliväli on vähintään 1,3 metriä mutta pienempi kuin 1,8 metriä	18 t
n	Kaksiakselinen teli, jos akseliväli on vähintään 1,8 metriä	20 t
o	Kolmiakselinen teli, jos peräkkäisten akselien välinen etäisyys on enintään 1,3 metriä	21 t
p	Kolmiakselinen teli, jos akselien etäisyys on suurempi kuin 1,3 metriä	24 t
q	Neli- tai useampiakselinen teli	24 t
r	Neli- tai useampiakselinen teli, jos peräkkäisten akselien välinen etäisyys on suurempi kuin 1,3 metriä	27 t
s	Neli- tai useampiakselinen teli, jos peräkkäisten akselien välinen etäisyys on suurempi kuin 1,3 metriä ja telin äärimmäisten akselien välinen etäisyys on suurempi kuin 4,7 metriä	30 t
t	Viisi- tai useampiakselinen teli, jos peräkkäisten akselien välinen etäisyys on suurempi kuin 1,3 metriä ja telin äärimmäisten akselien välinen etäisyys on suurempi kuin 6,7 metriä	36 t

Tieliikennelain lisäksi Traficomilla on erilaisia muita määräyksiä. Yksi näistä on siltasääntö. Siltasääntö koskee 4–5 akselisia autoja, sekä ajoneuvoyhdistelmiä, joiden

massa ylittää 44 t [14]. Yhdistelmän massa ei saa ylittää siltasäännön mukaista massaa. [1] Siltasääntöön vaikutti aikaisemmin auton sekä yhdistelmän ääriakselivälit. Uutena vaikuttavina tekijöinä ovat myös perävaunun ääriakseliväli sekä vetävän ajoneuvon viimeisen telin ja vedettävän auton ensimmäinen telin ääriakselien etäisyys. Uudet vaatimukset lasketaan samalla kaavalla kuin viisiakselisen auton siltasääntö. [15] Kuvassa 5 on havainnollistettu mitä akselivälejä siltasäännössä tarkoitetaan. Vihreällä viivalla on esitetty vetoauton ja perävaunun omat ääriakselien etäisyydet ja punaisella koko yhdistelmän ääriakselien etäisyydet. Sinisellä viivalla esitetään kytkennän siltasääntöä, jossa tarkastellaan vetävän ajoneuvon takimmaisen telin ja perävaunun etummaisesta telin ääriakselien etäisyyttä. [16]



Kuva 5. Siltasäännössä tarkasteltavat akselivälit suurimman sallitun massan laskemiseksi [16]

Suurin kokonaispaino perävaunulle tai 5 akseliselle ajoneuvolle määritetään lisäämällä 20 tonniin 350 kilogrammaa jokaiselta 0,10 metriltä, jonka perävaunun tai auton äärimmäisten akselien välinen etäisyys ylittää 1,8 m. Laskentakaavana siltasäännön mukainen suurin kokonaispaino saadaan kaavalla

$$m_{kok} = (A_v - 1,8) \times 10 \times 350 \text{ kg} + 20\,000 \text{ kg}, \quad (1)$$

missä m_{kok} on ajoneuvoyhdistelmän suurin sallittu massa ja A_v on äärimmäisten akselien välinen etäisyys. Neljäakseliselle ajoneuvolle 350 kg korvataan 320 kg. [16]

3.2 HCT-yhdistelmät Suomessa

Liikenteessä pitkän HCT-yhdistelmän tunnistaa ajoneuvoyhdistelmän viimeisen perävaunun perässä oleva kilpi, jossa on merkintä "PITKÄ", "LÅNG" tai "LONG". Lisäksi kilpessä saattaa olla musta kuva ajoneuvoyhdistelmästä. Kilpeä saa käyttää kaikissa yli 25,5 m pitkissä ajoneuvoyhdistelmissä ja se on pakollinen kaikissa yli 28 m pituisissa ajoneuvoyhdistelmissä. [17]

Kuljetusyhdistelmien mittojen kasvattaminen tuo kuljetuksiin kustannussäästöjä sekä on ympäristöystävällisempää. Hyötyjä on huomattu erityisesti merikonttien kuljetuksessa,

kappaletavaraliikenteessä ja elintarvikekuljetuksissa. HCT-kuljetusten tarkoitus on kuljettaa sama tavaramäärä pienemmillä ajoneuvomäärillä. Suuremmilla eli HCT yhdistelmillä hyötykuorman suhde kokonaisuudessaan saadaan paremmaksi, jolloin tierasitukset voivat laskea, vaikka yhdistelmien massat kasvavat. [10] Eniten hyötyjä on saatu polttoaine- ja henkilöstökuluissa pitkillä matkoilla [18].

HCT-yhdistelmien käytöllä on huomattu olevan kustannusten vähenemisen lisäksi muitakin positiivisia vaikutuksia. Massatavaran kuljetuksessa, joihin esimerkiksi hake ja puru kuuluvat, pidemmät autot ovat mahdollistaneet ympäri vuoden tasaisemman kuormajakauman ja paremman painojakauman. Paremmasta painojakaumasta on hyötyä etenkin talvella heikommissa keliolosuhteissa. [18]

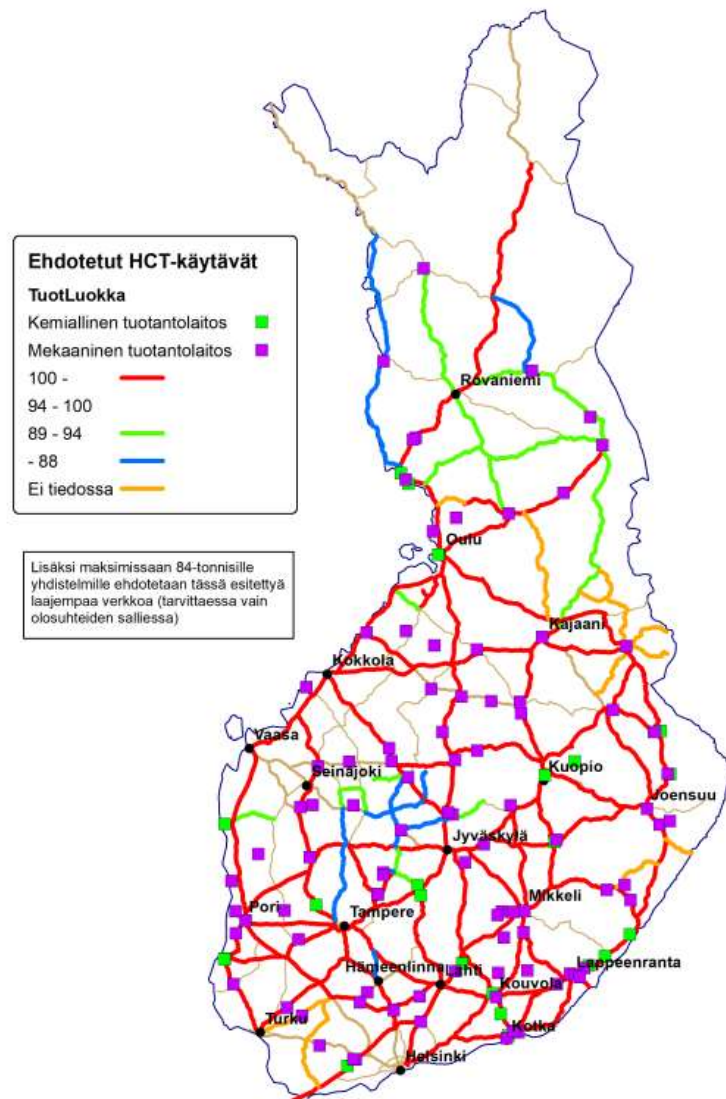
HCT-yhdistelmien aiheuttamia tierasituksia on tutkittu. Liikennevirasto on tilannut tutkimuksia, joissa on tehty koekuormituksia yli 76 tonnin HCT-yhdistelmillä vuosina 2015–2017. Tutkimuksen kohteena oli muutama eri kanta- ja maanteitä eri puolilta Suomea. Tutkimuksen mukaan esimerkiksi ohutpäällysteisillä teillä, joissa päällysteen paksuus on alle 150 mm, 9–14-akseliset yhdistelmät aiheuttavat enemmän urautumista, kuin 7-akseliset yhdistelmät pohjamaan ollessa sulaa turvetta tai pehmeää savea, tai esimerkiksi silttiä roudan sulamisen aikana. Paksupäällysteisillä teillä päällysteen paksuuden ollessa yli 200 mm 9–14-akseliset yhdistelmät eivät todennäköisesti aiheuta enempää urautumista, kuin 7-akseliset yhdistelmät kuljetettavan massan ollessa samansuuruinen. Urien kasvunopeuteen vaikuttaa myös merkittävästi raskaiden ajoneuvojen ajolinjat. [19]

Tieliikenteen ja liikenneturvallisuuden kannalta HCT-yhdistelmien ei ole huomattu aiheuttavan merkittävää haittaa. Liikenneturvallisuuden kannalta suurin hyöty on se, että raskaan liikenteen vuosittainen ajosuorite vähenee. Risteyksissä yhdistelmien pituuden kasvu leventää ajolinjoja ja hidastaa yhdistelmän liikkumista. Yhdistelmille on asetettu kääntyvyysvaatimuksia, joiden avulla pyritään minimoimaan turvallisuuden heikkeneminen. Pitkissä yhdistelmissä perävaunujen tai puoliperävaunujen takakulman suuri sivuttainen liike ulkokaaren suuntaan tiukoissa käänöksissä menee joissakin tilanteissa oman ajokaistan ulkopuolelle. [18] Autoilijan on huomattava, että pidemmän yhdistelmän ohittamiseen kuluu enemmän aikaa ja vastaantulijan kaistalla on ajettava pidempään [20]

3.3 HCT-yhdistelmien merkitykselliset reitit metsäsektorin kannalta

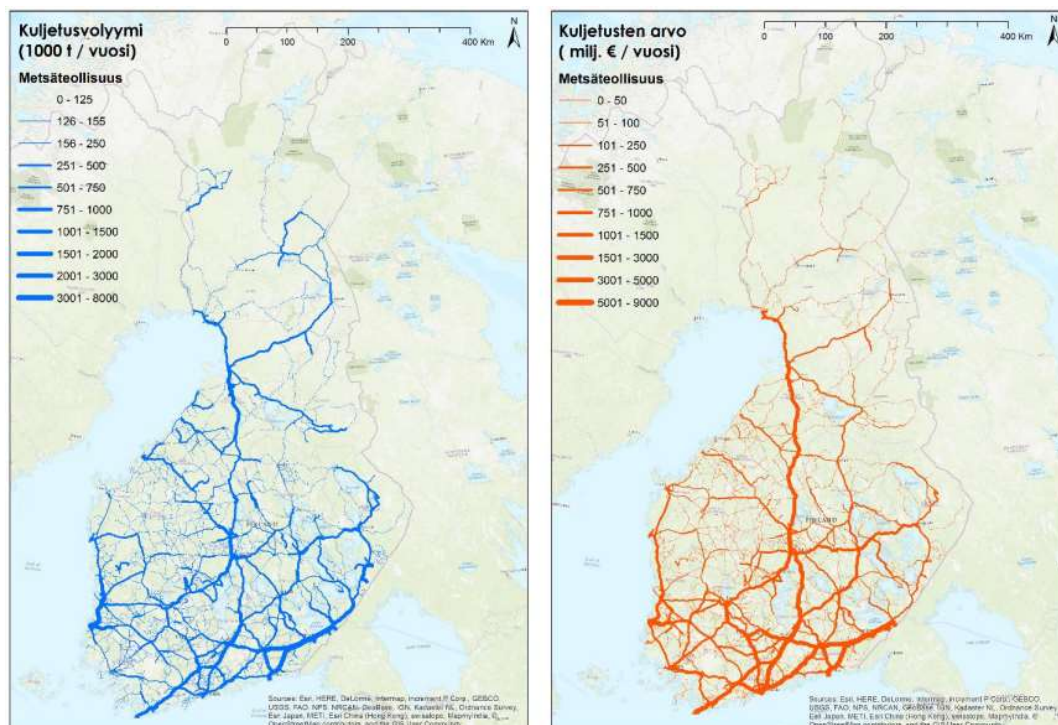
Suurempaa massaa kuin nykyinen suurin sallittu 76 t yhdistelmämassa, ei ole mahdollista korottaa koko tieverkolle. Tästä johtuen on tehty selvitystä HCT-yhdistelmien kulje-

tusreittitarpeista mm. Metsäteollisuus ry:n jäsenkyselyssä sekä Metsätehon Oy:n osakyselyssä. Kyselyissä metsäyhtiöt ovat alustavasti tunnistaneet HCT kuljetusreittejä pyöreälle puulle, sivutuotehakkeelle ja sahatavaralle. [21] Potentiaalisia HCT käytäviä yksittäisen tuotantolaitoksen ja kuljetusyrityksen kannalta ovat ne, joita pitkin on tehtaalle säännöllisesti kuljetuksia [21]. Kuvassa 6 on esitetty alustavasti ehdotettuja HCT-reittejä. Reitit on jaettu yhdistelmien painojen mukaan siten, että kuvassa punaisella olevat reitit olisi tarkoitettu yli 100-tonnisten yhdistelmille, vihreät reitit 89–94-tonnisille yhdistelmille ja siniset reitit enintään 88-tonnisille yhdistelmille. Punaiset reitit kohdistuvat pääosin valtateille, vihreät reitit valta- ja kantateille ja siniset reitit kanta- ja seututeille. [21]



Kuva 6. Alustavasti ehdotettuja HCT-reittejä raakapuun, sivutuotehakkeen ja sahatavaran kuljetuksiin [21]

WSP on tehnyt Elinkeinoelämän kuljetukset tieverkolla -volyymi- ja arvoanalyysin. Analyysissä on eritelty eri alojen kuljetuksia Suomen tieverkolla ja tarkastelua on tehty sekä kuljetusvolyymien että kuljetusten arvon suhteen. [6] Kuvassa 14 on esitetty yhteenveto metsäteollisuuden kuljetukset tieverkolla. Kuten huomataan, kuvan 7 ehdotetut HCT-käytävät mukailevat melko hyvin tämänhetkistä metsäteollisuuden kuljetusten tieverkostoa. Vasemmanpuoleinen kuva, jossa reitit ovat sinisiä, kuvaa tieverkoston käyttöä kuljetusvolyymien perusteella. Oikeanpuoleinen kuva, jossa reitit ovat punaisia, kuvaa tieverkoston käyttöä kuljetusten arvon perusteella. Erona voidaan huomata, että kuljetusten arvo keskittyy enemmän pääverkolle ja kuljetusvolyymi jakautuu laajemmin tieverkolle.



Kuva 7. Metsäteollisuuden kuljetukset tieverkolla. Vasemmanpuoleinen kuljetusvolyymien mukaan ja oikeanpuoleinen kuljetusten arvon mukaan. [6]

Painorajoitetut sillat aiheuttavat haasteita HCT-reiteille, mutta eivät välttämättä estä HCT-käytävien tehokasta hyödyntämistä. Myös monet muut reiteillä olevat sillat aiheuttavat haasteita HCT-yhdistelmien kannalta. Esimerkiksi useamman moduulin yhdistelmän perävaunut on mahdollista kuljettaa sillan yli erikseen ja koota yhdistelmä kokonaisuutena sillan jälkeen. On myös mahdollista, että painorajoitettu silta voidaan välttää toimivalla kiertoreitillä. 76-tonninen yhdistelmä voidaan myös täydentää HCT-painoiseksi painorajoitetun sillan jälkeen riippuen tienvarsivarastojen, terminaalien ja toimituskohteiden sijainnista. [21]

3.4 Metsäsektorilla käytössä olevia HCT-yhdistelmiä

Metsäsektorilla HCT-kuljetuksia on tarkasteltu esimerkiksi puutavara- ja hakekuljetusten kannalta. HCT-yhdistelmiä hyödynnetään myös metsäsektorin tuotekuljetuksissa. HCT-yhdistelmissä kokonaispituuden kasvun lisäksi myös vetoauto voi olla pidempi. Aikaisemmin vetoauton sallittu pituus on ollut 12 m. 13 metrinen vetoauto mahdollistaa esimerkiksi kuuden sellupaalin kuljettamisen. Puutavarakuljetuksessa vetoauton ja perävaunun pituudet perustuvat tyypillisiin puutavaran keskipituuksiin. Vetoauton ollessa 13 m pitkä, se mahdollistaa kahden pitkän kuitupuunipun kuljettamisen. Puutavarakuljetuksessa perävaunun pituuden ollessa yli 12 m, on mahdollista kuljettaa kolmea 5,0 metristä kuitunippua tai 4,7 metristä tukkinippua. [22]

Metsäsektorilla on ollut käytössä useita erilaisia HCT-yhdistelmiä. Käytössä on ollut eripainoisia ja pituisia hake- ja puutavarayhdistelmiä sekä terminaali- ja metsäautoja. Autojen ja yhdistelmien leveys on lähtökohtaisesti ollut 2,55 m, eli suurin sallittu. Kaikki käytössä olevat HCT-yhdistelmät ovat massaltaan yli 76 tonnia, eli ne eivät ole massansa puolesta uudenkaan tieliikennelain mukaisia, vaikka pituutensa mukaan olisivatkin. Tällä hetkellä metsäsektorilla ei ole käytössä sellaista yhdistelmää, jossa yksittäisten akselien sallitut massat ylittyisivät, mutta joissakin yhdistelmissä telimassat ovat laissa sallittua suurempia. [23]

Tällä hetkellä kokeiluvalla käytössä olevia hakeyhdistelmiä on useita erilaisia. Yhdistelmien massat vaihtelevat 84–100 t välillä. Pituudeltaan käytössä olevat hakeyhdistelmät ovat yli aikaisemman suurimman sallitun pituuden, sillä lyhin on 27,260 m. Pisin yhdistelmä pysyy alle nykyisen tieliikennelain mukaisen rajan. Akselien määrä yhdistelmissä vaihtelee 10 ja 12 akselin välillä. [23] Kuvassa 8 on esimerkki käytössä olevasta hakeyhdistelmästä, jolla kuljetetaan sahalla syntyvää sivutuotehaketta paperitehtaan raaka-aineeksi [24].



Kuva 8. Kuljetusliike Kalevi Huhtala Oy 100 t hakeyhdistelmä. Yhdistelmän kokonaispituus on 34 m ja se koostuu 3-akselisesta puoliperävaunun vetoautosta, 4-akselisesta puoliperävaunusta sekä 5-akselisesta perävaunusta. [24]

Tällä hetkellä kokeilussa olevat terminaaliyhdistelmät ovat massaltaan 84–100 t. Terminaaliyhdistelmällä tarkoitetaan puutavarayhdistelmää, joka ajaa tuotantolaitosten ja terminaalien välillä, eli ei lähde suoraan metsästä. Yhdistelmät ovat myöskin eri pituisia ja koostuvat eri pituisista vetoautoista ja perävaunuista. Yhdistelmien pituudet kuitenkin alle nykyisen sallitun pituusrajan. Akseleita käytössä olevissa terminaaliyhdistelmissä on 10, 11 tai 12. Osa yhdistelmistä koostuu lyhyemmästä vetoautosta ja pituus tulee perävaunusta, ja osassa yhdistelmän pituus on jakautunut tasaisemmin vetoauton ja perävaunun välillä. [23] Kuvassa 9 on esimerkki terminaliyhdistelmästä, joka voi olla käytössä myös metsäautona [24]



Kuva 9. Moilaspoikien HCT-yhdistelmä, joka toimii joko 90-tonnisena terminaaliyhdistelmänä tai 84-tonnisena metsäautona [24]

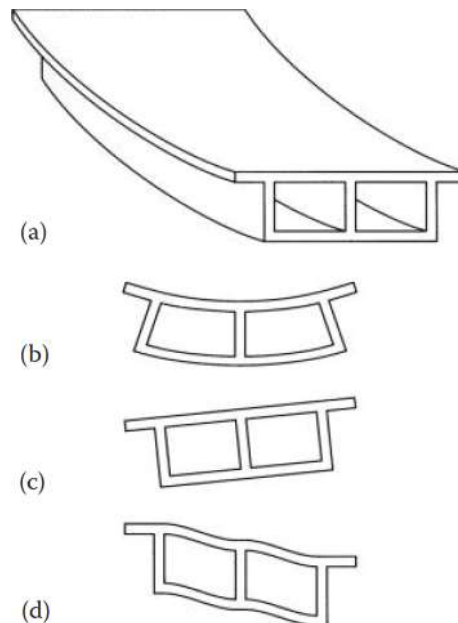
Tällä hetkellä käytössä on kaikkien muiden painoluokkien terminaaliautoja paitsi 104 tonnin. Käytössä olevat metsäautot ovat pääosin 84 t yhdistelmiä lukuun ottamatta yhtä 85 t metsäautoa. Kaikki metsäautot ovat 10-telisiä ja pituudeltaan selvästi alle 30 m. [23]

4. TERÄSBETONISEN KOTELOPALKIN RAKENTEELLINEN TOIMINTA

Teräsbetoninen kotelopalkkisilta toimii rakenteena palkkina ja kotelona. Palkkina toimiessa kuormitus aiheuttaa koko poikkileikkaukseen esimerkiksi taivutusmomenttia, leikkausvoimia sekä vääntömomenttia. Koteloon kuormitukset aiheuttavat paikallisia rasituksia, jolloin kotelon eri uumiin voi syntyä samasta kuormituksesta erilaiset rasitukset. Tässä luvussa tarkastellaan, kuinka pää rakenne toimii, kuinka kotelo välittää rasituksia sekä kuinka rakennetta voidaan analysoida rakennemallin avulla.

4.1 Poikkileikkauksen toiminnan periaatteet

Kotelopoikkileikkaus on vääntöjäykkä rakenne. Tästä syystä poikkileikkaus sopii hyvin myös kaarevaan siltaan, sillä se kestää sillan kaarevuuden aiheuttamia vääntörasituksia. Hyvän vääntöjäykkyyden ansiosta kapean kotelopalkkisillan välitukena voidaan jopa käyttää yhtä yläpäästään nivelöityä pilaria. [9] Kuvassa 10 on esitetty kotelopoikkileikkauksen käyttäytymistä. Kotelopoikkileikkaus voi taipua pitkittäis- tai poikittaissuunnassa, kiertyä tai vääristyä poikittaissuunnassa.

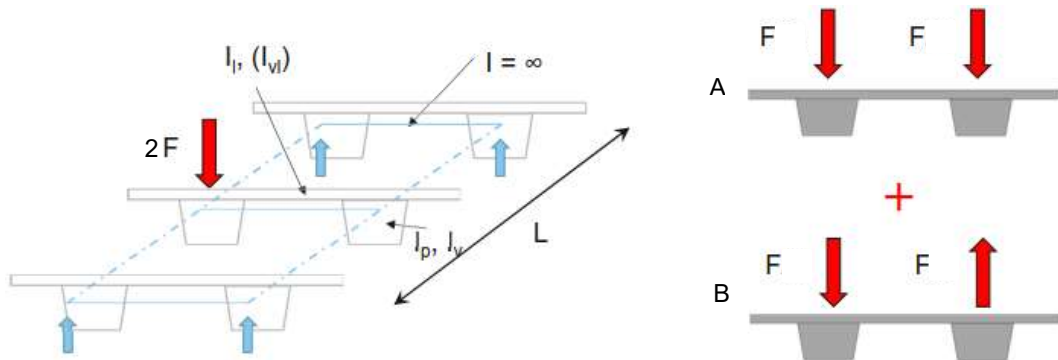


Kuva 10. Kotelopoikkileikkauksen käyttäytyminen. a) pitkittäissuunnan taipuminen, b) poikittaissuuntainen taipuminen, c) kiertyminen ja d) poikittainen vääristymä [25]

Kotelopalkkisillan kansilaatan kuormittaminen aiheuttaa rasituksia myös muihin kotelosiin, sillä rakenne toimii poikkisuunnassa kehänä. Tämä on otettava huomioon kansilaattaa ja uumia mitoittaessa. Kuormituksen epäkeskeisyys aiheuttaa koteloon muodon vääristymistä ja kiertymää. Muodon vääristymistä voidaan rajoittaa sijoittamalla sillan tukien kohdalle ja riittävän tiheällä jaolla jänteiden matkalle jäykistävät poikkitaiteet. Tällöin muodon vääristymien voidaan saada merkityksettömän pieneksi, jolloin silta voidaan mitoittaa poikkileikkaukseltaan kotelon muotoisena jatkuvana palkkina. [9]

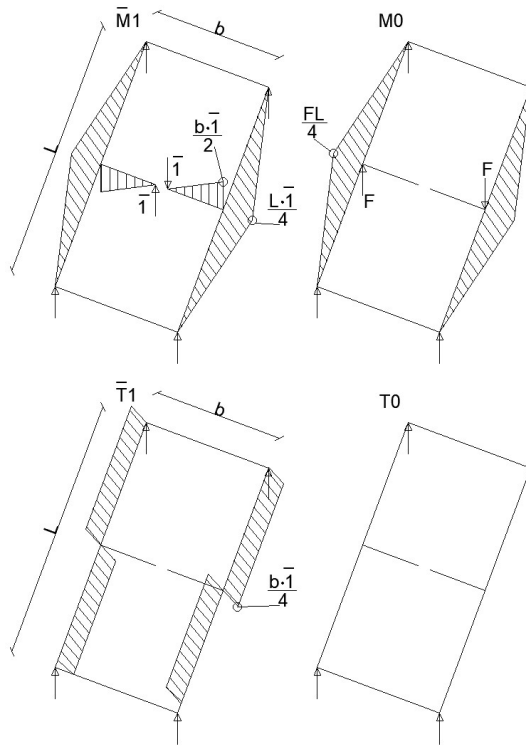
4.1.1 Päärakenteiden toiminta

Kotelopoikkileikkauksia tarkastellaan usein arinamallin avulla. Arinamallissa kuormat pääpalkkien välillä jakautuvat arinasauvojen kautta. Tarkastellaan yksiaukkoista laattapalkkirakennetta, jossa kaksi palkkia on kytketty toisiinsa keskeltä arinasauvalla. Kotelopalkkipoikkileikkaus toimii samankaltaisesti, sillä kotelon ylä- ja alalaatta siirtävät rasituksia koteloiden välillä. Esimerkin avulla näytetään, että laattapalkkirakenteen mallintamisen periaatteita voidaan hyödyntää kotelopalkkirakennetta tarkastellessa. Käytetään ratkaisussa ykkösvoima periaatetta ja hyödynnetään ratkaisussa kuormitusten symmetristä ja antimetristä osuutta. Kuvassa 11 on esitetty tarkasteltava tilanne, jossa yksiaukkoista laattapalkkirakennetta kuormitetaan voimalla $2F$.



Kuva 11. Yksiaukkoinen laattapalkkirakenne, jota kuormitetaan voimalla $2F$.

Kuvan 11 jaetaan kahteen tapaukseen, joista B kohdassa laatan keskellä taivutusmomentti on nolla ja leikkausvoima on yhtä suuri koko laatalla. Kuvassa 12 on taivutusmomentti- ja vääntökuviot B kohdalle ykkösvoimamenetelmää varten.



Kuva 12. Ykkösvoimamenetelmän taivutusmomentti- ja vääntökuviot.

Seuraavaksi ratkaistaan ykkösvoima periaatteella laatan toiselle palkille siirtyvä kuorma tilanteessa B. Aloitetaan yhtälöstä, jossa x on ratkaistava voima eli leikkausvoima V .

$$x\sigma_{11} + \sigma_{10} = 0 \Rightarrow xEI_p\sigma_{11} + EI_p\sigma_{10} = 0 \Rightarrow x = V = -\frac{EI_p\sigma_{10}}{EI_p\sigma_{11}} \quad (2)$$

Ykkösvoima periaatteen mukaan voimaa lähdetään laskemaan jännitysten kautta. Kaavassa $2\sigma_{11}$ on kuvan 12 momentin M_1 aiheuttama jännitys ja σ_{10} on kuvan 12 momentin M_0 aiheuttama jännitys. Kaavoissa taivutusjäykkyyttä kuvaava termi on EI ja vääntöjäykkyyttä GI .

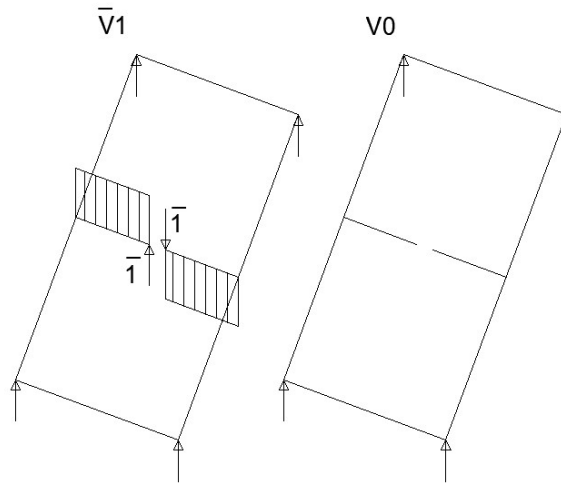
$$\sigma_{ik} = \int \frac{M_i M_k}{EI} + \frac{T_i T_k}{GI} \Rightarrow EI_p \sigma_{ik} = \int M_i M_k + \frac{EI_p}{GI_v} \int T_i T_k \quad (3)$$

$$x = V = \frac{2L \frac{\bar{1}^2 L^2}{4^2} \frac{F}{3}}{2L \frac{\bar{1}^2 L^2}{4^2} \frac{1}{3} + \frac{EI_p}{EI} b \frac{\bar{1}^2 b^2}{2^2} \frac{1}{3} + \frac{EI_p \bar{1}^2 b^2}{GI_v 4^2} 2L} = \frac{F}{1 + 2 \frac{EI_p b^3}{EI_l L^3} + 3 \frac{EI_p b^2}{GI_v L^2}} \quad (4)$$

Kaavassa 4 sillan pituutta kuva termi L ja sillan leveyttä termi b . Koska kuormituksen suuruus on $2F$, kaava 4 saa muodon

$$V = \frac{F}{2 + 4 \frac{EI_p b^3}{EI_l L^3} + 6 \frac{EI_p b^2}{GI_v L^2}} \quad (5)$$

Tarkastellaan seuraavaksi kuvan 11 A kohtaa ja ratkaistaan se ykkösvoimaperiaatteella. Kuvassa 13 on esitetty leikkausvoima kyseisessä tilanteessa.



Kuva 13. Ykkösvoimamenetelmän leikkausvoimakuviot

Lähdetään ratkaisemaan leikkausvoimaa V ykkösvoimaperiaatteella seuraavasti.

$$\sigma_{ik} = \int \frac{M_i M_k}{EI} + \int \frac{T_i T_k}{GI_v} + \int \frac{V_i V_k}{GA} \Rightarrow EI \sigma_{ik} = \int M_i M_k + \frac{EI}{GI} \int T_i T_k + \frac{EI}{GA} \int V_i V_k \quad (6)$$

GA on leikkauslujuutta kuvaava termi.

$$\sigma_{11} = \frac{EI}{GA} b \bar{1}\bar{1} = \frac{EI}{GA} b \quad (7)$$

$$V = \frac{\frac{FL^3}{24}}{\frac{L^2}{24} + \frac{EI_p b^3}{EI_l 12} + \frac{EI_p L b^2}{GI_v 8} + \frac{EI}{GA} b} \quad (8)$$

Kun supistetaan ja sijoitetaan voiman suuruus $2F$, leikkausvoima saa muodon

$$V = \frac{F}{2 + 4 \frac{EI_p b^3}{EI_l L^3} + 6 \frac{EI_p b^2}{GI_v L^2} + 48 \frac{EI_p b}{GA L^3}} \quad (9)$$

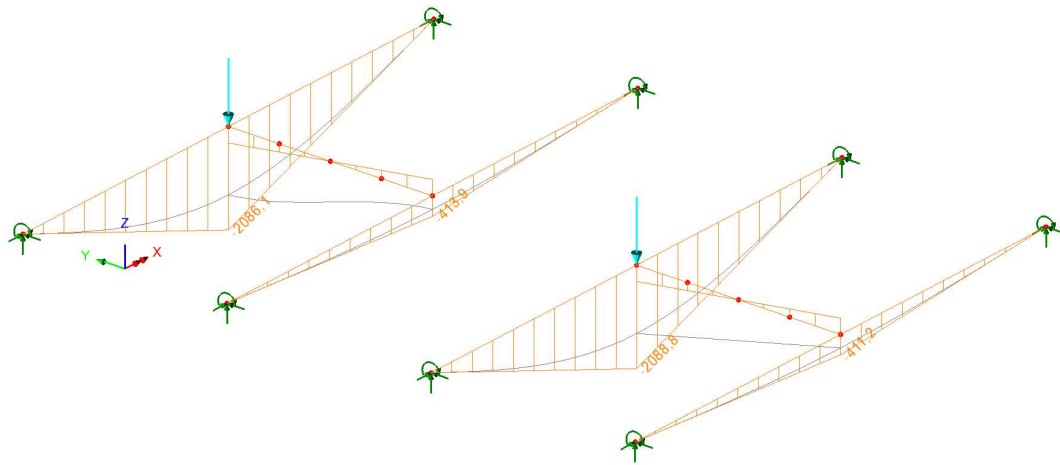
Kun asetetaan GA siten, että sen jäykkyys vastaa laattojen taivutusjäykkyyden vaikutusta niin GA saa muodon

$$GA = \frac{V b_i}{\Delta} = \frac{V b 12 E_l}{V b^3} = \frac{12 E_l}{b^2}. \quad (10)$$

Sijoitetaan kaavaan 9 GA , jolloin saadaan

$$V = \frac{F}{2 + 4 \frac{EI_p b^3}{EI_l L^3} + 6 \frac{EI_p b^2}{GI_v L^2} + 4 \frac{EI_p b^3}{EI_l L^3}} \quad (11)$$

Tarkastelun päätteeksi voidaan todeta, että vääntömomentin arvot ovat molemmilla palkkeilla yhtä suuret. Tämä tarkoittaa sitä, että arinasauvan päätymomentit ovat yhtä suuria, mutta eri pintaa vetäviä. Tällöin pääkannattimet kiertyvät yhtä paljon, mutta taipumaeroa muodostuu, kuten vääristymän yhteydessä kuvan 10 c) ja d) yhdistelmässä. Tämän perusteella mallin periaatteet soveltuvat myös kotelopalkin arinamallin muodostamiseen. Lisäksi tarkastellaan kahta eri tapausta. Ensimmäisessä arinasauvalle määritetään oikea taivutusjäykkyys ja asetetaan vääntöjäykkyys todella jäykäksi. Toisessa taivutusjäykkyys asetetaan todella jäykäksi ja vääntöjäykkyys määritetään siten, että se määritetään arinasauvan taivutusjäykkyydestä. Tulokset ovat kummallekin tapaukselle samat, mikä on havainnollistettu LUSAS-ohjelman avulla kuvassa 14. Taivutusmomenttikuvio on kuvassa oranssilla näkyvät raidoitetut alueet ja taipuma on kuvattu harmaalla viivalla.

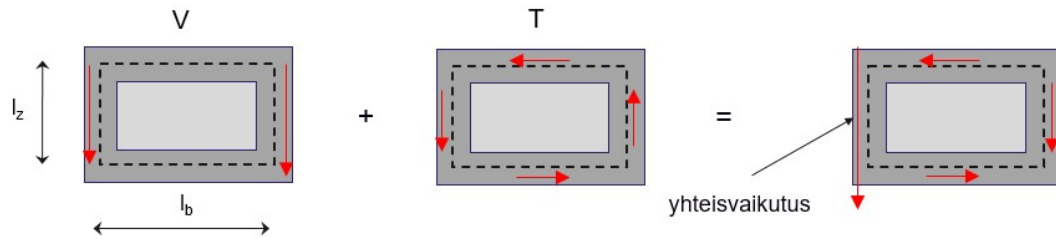


Kuva 14. Yksiaukkoisen laattapalkkirakenteen arinamalli, sen taivutusmomenttikuvio ja taipuma.

Kuvassa 14 havaitaan kuinka kaksi edellä mainittua tapausta aiheuttavat samanlaisen taivutusmomenttikuvion. Pitkittäiset palkit taipuvat samalla tavalla, mutta arinasauvan taipumaviivassa on eroa. Taipumaa on sauvan päissä molemmissa tapauksissa yhtä paljon. Kuvan vasemmanpuoleisessa tilanteessa myös sauva taipuu myös sauvan mitalta, sillä taivutusjäykkyys on asetettu poikkileikkauksmittojen mukaiseksi. Oikeanpuoleisessa tilanteessa arinasauva taipuu jäykkänä kappaleena. Tässä työssä ei oteta huomioon arinasauvan taivutusjäykkyyttä vaan tehdään tarkastelut huomioiden vain arinavaiutus, eli kuvan 14 oikeanpuoleisen tilanteen tapaisesti.

Eri voimasuureet vaikuttavat poikkileikkauksessa samanaikaisesti, jolloin yhdistettyjä rasituksia on tarkasteltava. Mitoituksessa tarkastellaan väännön ja leikkauksen yhteisvaikutusta sekä väännön ja taivutuksen yhteisvaikutusta. Kotelopoikkileikkauksen uumiin ja laattoihin muodostuu leikkausvoimia leikkauksesta ja väännöstä. Taivutuksesta aiheutuu

uumille ja laatoille normaalivoimia. Kuvassa 15 on havainnollistettu poikkileikkaukseen syntyviä leikkausvoimia.



Kuva 15. Leikkausvoiman muodostuminen poikkileikkauksessa.

Kuvassa 15 vasemmanpuoleisen kotelon leikkausvoima on leikkauksesta aiheutuvaa ja keskimmaisessä kotelossa on väännöstä aiheutuva leikkaus. Väännöstä aiheutuu kotelon jokaiselle paneelille leikkausta, joka kiertää poikkileikkauksessa. Oikeanpuoleisessa kotelossa on leikkauksen ja väännön yhteisvaikutus. Toisessa uumassa leikkaus ja vääntö aiheuttavat samansuuntaista leikkausvoimaa ja tämä on se yhteisvaikutus, mitä mitoituksessa tarkastellaan. Toisessa uumassa leikkausvoimat ovat erisuuntaiset, jolloin ne kumoavat toisiaan. Väännöstä aiheutuva leikkausvuo q_T lasketaan kaavalla

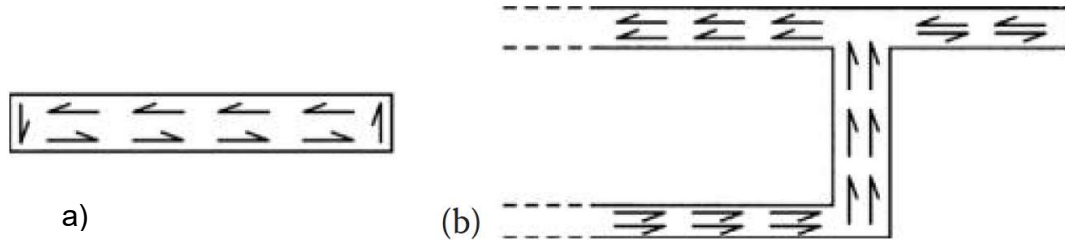
$$q_T = \frac{T}{2l_z l_b}, \quad (12)$$

missä T on vääntömomentti, l_z on pituus ylemmän laatan keskeltä alemman laatan keskelle ja l_b on pituus uuman keskeltä toisen uuman keskelle. Leikkausvoimat uumalle ja laatalle lasketaan kaavalla

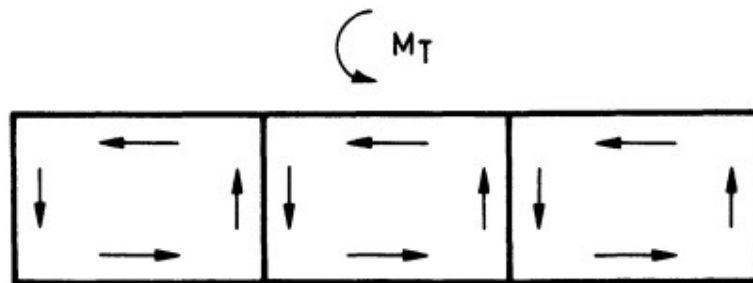
$$V = \frac{T}{2l_z l_b} l_{z/b}, \quad (13)$$

missä $l_{z/b}$ on laatan leikkausvoimaa laskettaessa l_b ja uuman leikkausvoimaa laskettaessa l_z .

Leikkausvuolla tarkoitetaan poikkileikkauksipinnalla vaikuttavaa sen keskiviivan suuntaista leikkausvoimaa piirin pituutta kohti. Ohutseinäiselle suljetulle profiilille leikkausvuo on yksinkertainen ja se kulkee saman suuntaisena koko poikkileikkauksessa sen keskiviiva pitkin. [26] Suorakaiteen muotoisella poikkileikkauksella leikkausvuo kiertää myös poikkileikkauksessa samaan suuntaan kuten kuvan 16 a-kohdassa havainnollisestaan. Monikoteloiselle poikkileikkaukselle leikkausvuo voi laatan ulokkeissa olla ylä- ja alareunoissa erisuuntainen, ja keskimmäisten uumien vasemmassa ja oikeassa reunassa erisuuntainen. Tämä johtuu siitä, että taivutusmomentista aiheutuva leikkausvuo kulkee kotelossa kuten kuvassa 17 esitetään. Kuvan 16 b-kohdassa näkyy ulokkeen leikkausvuon erisuunnat. Uloke toimii leikkausvuon kannalta omana suorakaidepoikkileikkauksenaan.



Kuva 16. Leikkausvuo a) suorakaidepoikkileikkaukselle ja b) kotelopoikkileikkauksen osalle. [25]



Kuva 17. Taivutusmomenteista aiheutuvat leikkausvuot kotelopoikkileikkauksessa. [27]

Useampi kotelaisen poikkileikkauksen leikkausvuot ovat ulokkeiden ja laattojen osalta koko poikkileikkauksessa samalla tavalla kuin kuvassa 16 b näkyy. Toisen reunan uumassa leikkausvuo on päin vastaisen suuntainen verrattuna kuvassa näkyvään uumaan. Uumien ja laattojen leikkausvuot ovat siten, että leikkausvuo ikään kuin kiertää kotelon aukkoa, kuten kuvassa 17. Keskimmaisissä uumissa on siis samalla tavalla eri suuntaista leikkausvuota kuin suorakaidepoikkileikkauksessa ja laatan ulokkeissa.

Kotelopoikkileikkauksen toiminnan tarkastelua varten poikkileikkaukselle tulee laskea erilaisia poikkileikkauksuureita. Poikkileikkauksen taivutus- ja vääntöjäykkyys ovat rakennemallissa käytettäviä ominaisuuksia, joita varten tulee määrittää poikkileikkauksen neliömomentti ja vääntöjäyhyys. Kotelopoikkileikkauksen kokonaisneliömomentti I_y lasketaan suorakaiteiden neliömomentin kaavalla, yhteenlaskuperiaatteella sekä Steinerin säännön avulla. Suorakaiteelle neliömomentin kaava on

$$I_y = \frac{1}{12}bh^3, \quad (14)$$

missä b on kappaleen leveys ja h kappaleen korkeus. Steinerin termin avulla kappaleet voidaan yhdistää ja neliömomentit eri kappaleille saadaan koko poikkileikkauksen painopisteen mukaan. Tällöin poikkileikkauksen kokonaisneliömomentti saa muodon

$$I_{y.tot} = \sum \frac{1}{12}bh^3 + bhz_0^2, \quad (15)$$

missä z_0 on tarkasteltavan kappaleen pintakeskiön etäisyys koko poikkileikkauksen pintakeskiöstä. [28]

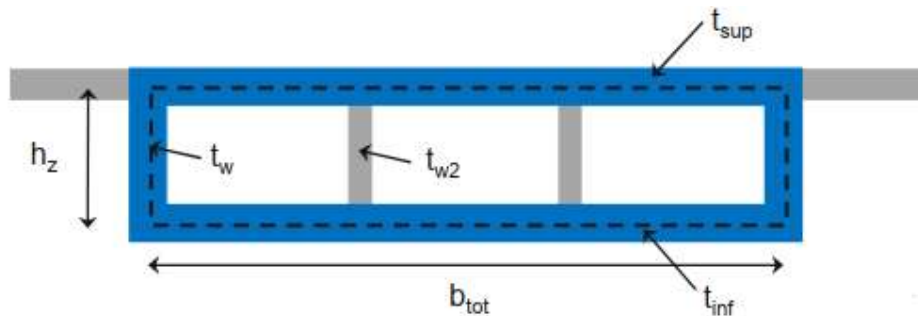
Ohutseinäiselle suljetulle profiilille saadaan vääntöjäyhyys Bredtin toisen kaavan avulla. Vääntöjäyhyyden laskemiseksi käytetään hyväksi vääntymän ja vääntömomentin yhteyttä, jolloin vääntöjäyhyydsmomentti saadaan muotoon [26]

$$I_v = \frac{4A^2}{\oint \frac{ds}{t}} \cdot \quad (16)$$

Kotelopoikkileikkauksissa poikkipinta muodostuu tasapaksuista osista, jolloin yllä olevan kaavan viivaintegraali saa muodon [26]

$$\oint \frac{ds}{t} = \sum \frac{s_i}{t_i} \cdot \quad (17)$$

Yhtälöissä t on tarkasteltavan profiilin osan paksuus ja s on tarkasteltavan osan pituus. Yhtälön A on profiilin keskiviivan rajaaman alueen pinta-ala. [26] Yksinkertaisuuden vuoksi kotelopoikkileikkauksen vääntöjäyhyyttä laskettaessa Bredtin toisen kaavan avulla, huomioidaan kotelosta vain kuvan 18 mukainen alue.

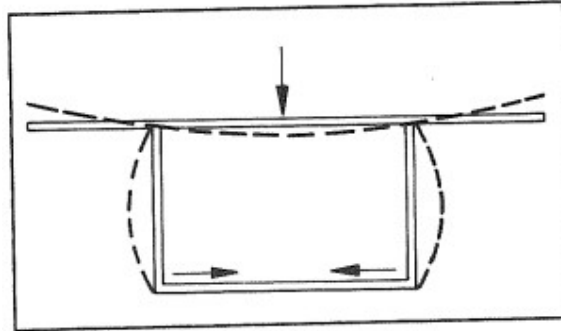


Kuva 18. Bredtin toisella kaavalla huomioon otettava osuus kotelopoikkileikkauksen vääntöjäyhyyttä laskettaessa.

Poikkileikkauksen laipat voidaan huomioida Föpplin kaavalla, joka soveltuu avoimille ohutseinäisille poikkileikkauksille, ja yhteenlaskuperiaatteella. Uumille ja laipoille tulee kuitenkin merkityksettömän pieni vääntöjäyhyys verrattuna Bredtin toisella kaavalla laskettavaan kotelon vääntöjäyhyyteen, sillä ohutseinäisten suljettujen ja avointen poikkileikkausten vääntöjäykkyydellä on merkittävän suuri ero. Vääntöjäyhyys suljetulla poikkileikkauksella on suurimmillaan sen ohuimmassa kohdassa ja avoimella poikkileikkauksella suurin arvo on poikkileikkauksen paksuimmassa kohdassa. Vääntöjäyhyyskenttä suljetulla poikkileikkauksella on paksuussuunnassa lähes vakio. Avoimella poikkileikkauksella vääntöjäyhyyskenttä muuttuu paksuussuunnassa likimain lineaarisesti vastakkaiseen arvoonsa. [29] Näistä syistä laippoja ja uumia ei oteta huomioon vääntöjäyhyyden osalta.

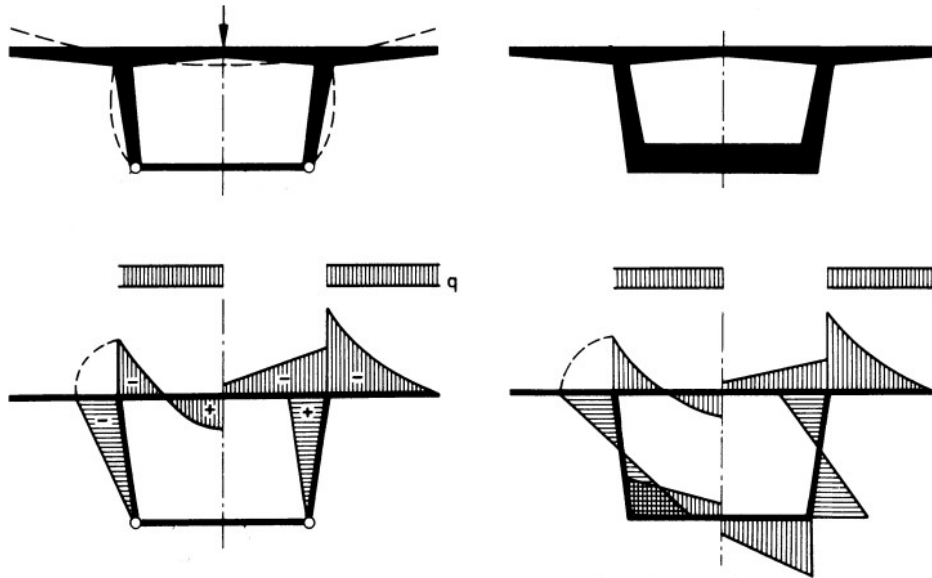
4.1.2 Rakenteen paikallinen toiminta

Kotelopoikkileikkausta suunniteltaessa on otettava huomioon kotelopoikkileikkauksen toiminta poikittaiskehänä. Kansilaatan mitoituksessa on otettava huomioon, että kansilaatan kuormittaminen aiheuttaa rasituksia myös muihin kotelon osiin. Kuva 19 kuvastaa kotelopalkin toimintaa poikittaiskehänä. Tästä syystä osa kansilaatan vaatimista teräk-sistä on hyvä ankkuroida kotelon uumaa. Kansilaatan kuormituksesta aiheutuu poikittaista taivutusta uumiin, joka näkyy kuvassa 19 katkoviivana.



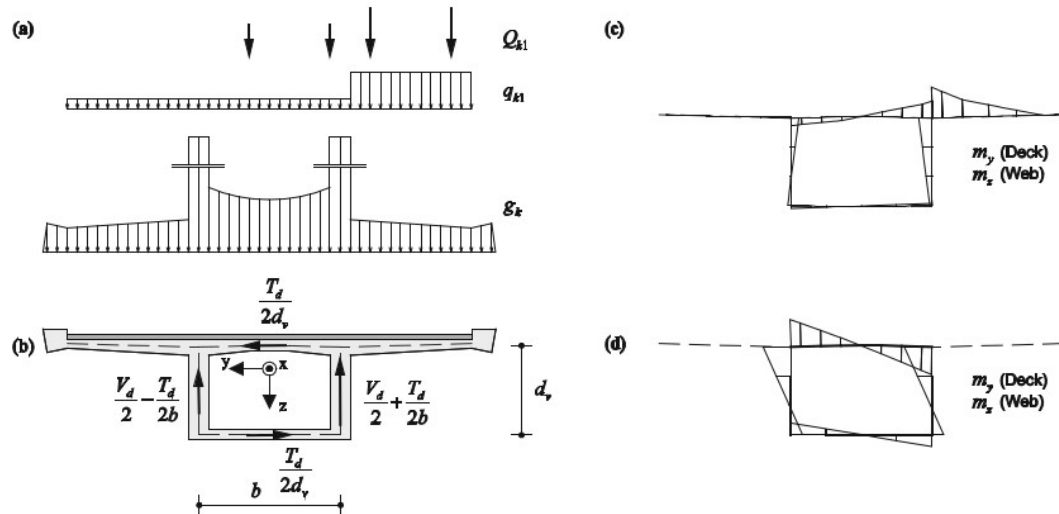
Kuva 19. Kotelopalkin toiminta poikittaiskehänä. [9]

Koteloon syntyy erilaisia paikallisia rasituksia. Paikalliset rasitukset riippuvat esimerkiksi kotelon poikkileikkausmitoista sekä kuorman sijainnista. Kuvassa 20 on esitetty kaksi erilaista tapausta ja tapauksista aiheutuvat taivutusmomenttikuviot kotelon eri osille ja kuvassa 21 tyypillisiä kotelon kuormitustapauksia.



Kuva 20. Kotelopoikkileikkauksen eri osiin kohdistuvia taivutusmomenteja [27]

Kuten kuvasta 20 huomataan, sisäiset taivutusmomentit ovat hyvin erilaisia eri kotelon osille. Oikeanpuoleisessa kaukalossa on huomattavasti paksumpi alalaippa, jonka takia uumien ja alalaipan taivutusmomentit ovat erilaiset kuin vasemmanpuoleiselle kotelolle. Vasemmanpuoleisessa kotelossa on ohut alalaippa, jolloin alalaipan ja uumien väliset nurkat oletetaan niveliksi. Nivelissä taivutusmomentti on 0.



Kuva 21. Tyypillinen kotelopoikkileikkauksen kuormitustapaus. a) epäkeskeinen liikennekuorma b) kotelon eri osiin syntyvät voimat leikkauksesta ja väännöstä c) poikittainen taivutusmomenttikuvio epäkeskeisestä kuormasta d) poikittainen taivutusmomenttikuvio vääntymästä, joka aiheutuu vääntörasituksen aiheuttamasta siirtymästä [30]

Kuvan 21 a kohdassa on tyypillinen epäkeskeinen liikennekuorma, joka kotelopoikkileikkaukseen voi kohdistua. Kuvan 21 b kohdassa esitetään poikkileikkauksen eri osiin syntyvät rasitukset leikkauksesta ja väännöstä. Leikkaus on molemmille uumille saman suuntaista. Koko poikkileikkaukseen kohdistuva leikkausvoima jakautuu tasaisesti uumille. Vääntö aiheuttaa eri uumiin erisuuntaista rasitusta, sillä se vääntää poikkileikkausta kuvassa x-akselin ympäri. Tällöin toiseen uumaan kohdistuu leikkauksen kanssa saman suuntainen rasitus ja toiseen uumaan leikkausvoimaa vastaan oleva rasitus. Tästä johtuen kuvan 21 b toisessa uumassa väännön ja leikkauksen aiheuttamat uuman rasitukset lasketaan yhteen ja toisessa väännön aiheuttama rasitus vähennetään leikkauksen aiheuttamasta rasituksesta. Väännöstä laattoihin aiheutuvat rasitukset on esitetty myös kuvan 21 b kohdassa. [30]

Kuvan 21 c kohta on epäkeskeisestä kuormasta poikkileikkaukseen aiheutuva taivutusmomenttikuvio. Poikittainen vääntökuormitus aiheuttaa poikkileikkaukseen vääristymää. Tästä vääristymästä poikkileikkaukseen aiheutuva taivutusmomenttijakauma on esitetty kuvan 21 d kohdassa. [30]

Työssä tarkastellaan vain päärakenteen toimintaa. Paikalliset rasitukset jätetään tarkasteluista pois, jotta muuttujien määrä ei kasva hallitsemattomaksi. Päärakenteen tarkastelujen avulla saadaan tarkoituksen mukaista tietoa työn tavoitteiden kannalta.

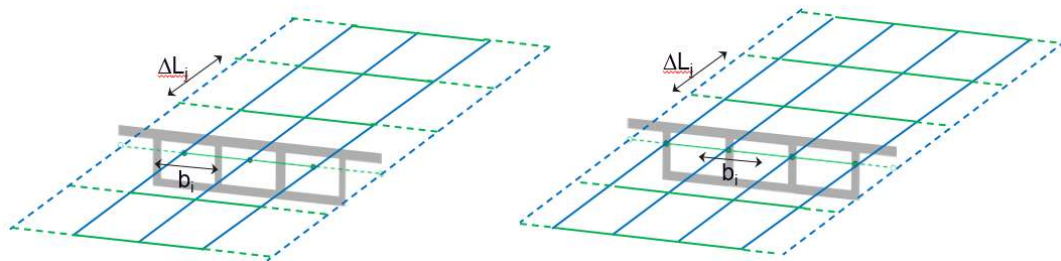
4.2 Mallinnus ja laskenta

Työssä käytetään LUSAS Modelleria laskentamallin tekemiseen. Työssä mallinnetaan kaksi eri siltaa peräkkäin samaan malliin, jotta kuormien tarkastelussa säästetään käsin tehdyn työn määrää. Näin säästetään aikaa ja vähennetään virheen mahdollisuutta. Laskentamallista saatuja tuloksia käsitellään Microsoft Excelin ja Mathcadin avulla, jotta tulokset saadaan tarkasteltavaan muotoon.

4.2.1 Laskentamallin valinta

Laskentamalliksi valittiin arinamalli. Arinamalli koostuu pitkittäissuunnan pääpalkeista sekä poikkipalkeista, joilla pitkittäispalkit sidotaan toisiinsa. Arinamallissa reunapalkit eivät ole mukana poikkileikkaussuureissa vaan ainoastaan omana painona. Poikittaisten palkkien eli laattakaistojen pituudeksi otaksutaan pääkannattimien keskiöväli. Kun lasketaan laattakaistan jäykkyyksarvoja, jäykkyyden muutos huomioidaan koko laattakaistan pituudella. Kun laatta on teräsbetonirakenne, rakenne otaksutaan halkeilleeksi ja jäykkyydeksi asetetaan usein puolet halkeilemattoman poikkileikkauksen toiminnasta. Laatan voimasuureita laskettaessa laatta oletetaan kuitenkin halkeilemattomaksi. [31]

Laskentamallin kohdalla valittiin palkkimaisesta ja laattamaisesta arinamallista palkkimainen arinamalli. Arinamallin valinta vaikuttaa poikkileikkaussuureiden laskentaan ja tarkasteluun, sillä mallien toiminnassa on jonkin verran eroja. Kuvassa 22 on esitetty arinamallien ero mallinnustavassa.



Kuva 22. Vasemmalla palkkimainen arinamalli ja oikealla laattamainen arinamalli

Palkkimaisessa arinamallissa pääosassa ovat pääsuunnan palkit. Arinamallin pituus-suuntaisia palkkeja on yhtä monta kuin poikkileikkauksessa on koteloita ja palkki on kotelon uumien puolivälissä. Laattamaisessa arinamallissa palkkeja on yksi enemmän kuin

koteloita, ja ne ovat jokaisen kotelon uuman kohdalla. Palkkimaisessa arinamallissa palkin poikkileikkaus on kotelo ja laattamaisessa arinamallissa palkki on poikkileikkaukseltaan I-palkki.

Laattamaisessa arinamallissa vääntöä käsitellään kuten laattamallissa ja vääntöjäykkyys jaetaan palkkielementeille ja arinasauvoille. Palkkimaisessa arinamallissa koko poikkileikkauksen vääntöjäykkyys jaetaan kunkin kotelon palkkielementille ja arinasauvojen vääntöjäykkyys on nolla. Palkkimainen arinamalli koetaan kotelopoikkileikkauksen toiminnan tarkasteluun paremmaksi vaihtoehdoksi.

Palkkimaisen arinamallin pääpeleille tarvitaan taivutusjäykkyys sekä vääntöjäykkyys. Lisäksi poikkitaipaleille tarvitaan laatan taivutus- ja leikkauskestävyys.

Pääpalkkien taivutusjäykkyys $EI_{y,i}$ lasketaan kaavalla

$$EI_{y,i} \cong \frac{b_i}{b_{tot}} EI_{y,tot}, \quad (18)$$

missä E on betonin kimmokerroin, b_i on yhden kotelon leveys, b_{tot} on koko poikkileikkauksen leveys ilman laatan ulokkeita ja $I_{y,tot}$ on koko poikkileikkauksen neliömomentti, joka on laskettu kaavalla 15.

Pääpalkkien vääntöjäykkyys $GI_{v,i}$ lasketaan kaavalla

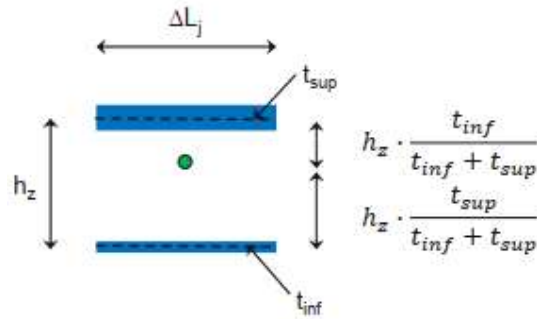
$$GI_{v,i} \cong \frac{b_i}{b_{tot}} GI_{v,tot}, \quad (19)$$

missä G on betonin liukumoduuli ja $I_{v,tot}$ on koko poikkileikkauksen vääntöjäykkyys, joka on laskettu kaavalla 16.

Laatan taivutuskestävyys $EI_{y,T}$ lasketaan kaavalla

$$EI_{y,T} = E\Delta L_j \left(\frac{t_{sup}^3 + t_{inf}^3}{12} + t_{sup} \frac{t_{inf}^2 h_z^2}{(t_{inf} + t_{sup})^2} + t_{inf} \frac{t_{sup}^2 h_z^2}{(t_{inf} + t_{sup})^2} \right) \cong E\Delta L_j h_z^2 \frac{t_{inf} t_{sup}}{t_{inf} + t_{sup}}, \quad (20)$$

missä t_{sup} on kotelopoikkileikkauksen päälilaatan paksuus ja t_{inf} alalaatan paksuus, h_z on ylälaatan ja alalaatan keskilinjojen välinen etäisyys ja ΔL_j on laatan leveys. Kuvassa 23 on esitetty kaavassa 10 käytetyt poikkileikkausarvot.



Kuva 23. Laatan taivutusjäykkyyden laskemista varten tarvittavat poikkileikkauksuureet.

Laatan leikkaukskestävyyttä tarkastellaan tehollisen poikkileikkauksen avulla, johon käytetään kaavaa

$$GA_{y,T} = \frac{V}{\gamma} = \frac{Vb_i}{\Delta} = \frac{E\Delta L_i}{b_i^2} (t_{sup}^3 + t_{inf}^3). \quad (21)$$

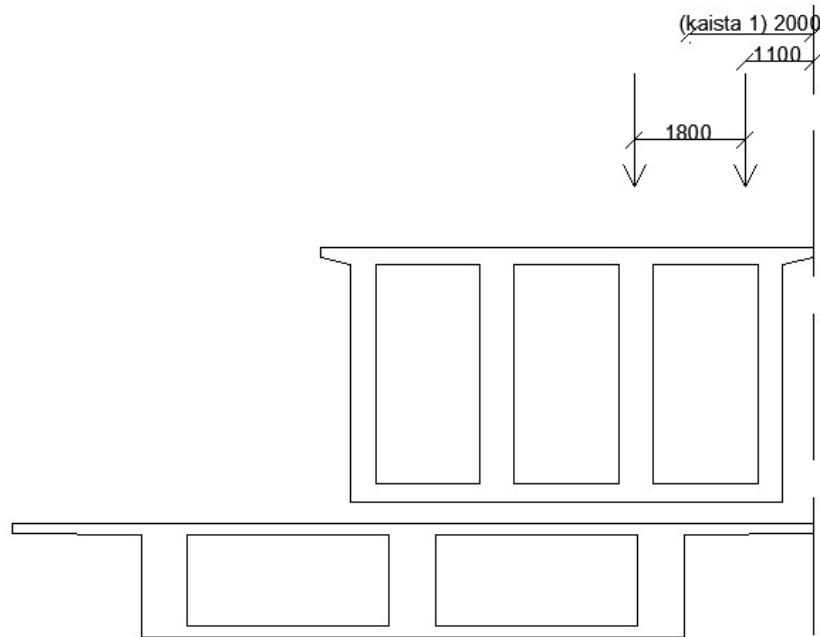
Ratkaistaan kaavasta pinta-ala $A_{y,T}$, jolloin kaava saa muodon

$$A_{y,T} = \frac{E}{G} \frac{\Delta L_i}{b_i^2} (t_{sup}^3 + t_{inf}^3). \quad (22)$$

Kaikista yllä olevista ominaisuuksista tehdään myös halkeilleet arvot joko käyttämällä halkeilleen poikkileikkauksen ominaisuuksia tai ottamalla pienempi osuus kimmoisesta arvosta. Halkeilleen poikkileikkauksen laskennassa oletetaan betoni täysin halkeilleeksi, jolloin vain teräkset ottavat enää rasituksia vastaan.

4.2.2 Liikennekuormien mallintaminen

Laskentamallia kuormitetaan eri tavoin, jotta saadaan halutut tarkastelut tehtyä. Pääosin mallin siltoja on kuormitettu kuormituskaisalla 1, jonka sijainti on esitetty kuvassa 24. Kuormituskaisaa ei ole sijoitettu aivan reunaan, koska ei haluta laittaa koko kuormaa ulokkeelle. Kuten aiemmin luvussa 2.5 käy ilmi niin aikaisemmin kotelopalkkien kantavuuslaskelmissa usein uloke ei kestä suurempia ajoneuvokuormia tai ne saattavat olla suunniteltu kevyenliikenteen kuormille. Työssä ei myöskään ole tarkoitus tuottaa yksittäisen sillan kantavuuslaskelmia, vaan selvittää erilaisten ajoneuvoyhdistelmien aiheuttamia rasituseroja sekä perehtyä teräsbetonisen kotelopoikkileikkauksen toimintaan.

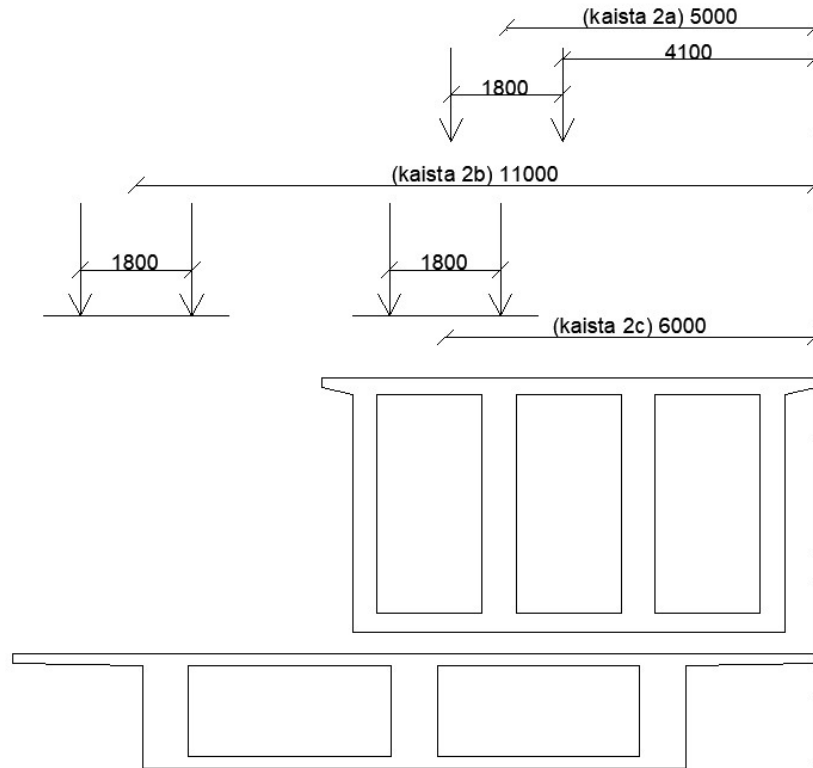


Kuva 24. Kuormakaistan 1 sijainti siltojen poikkileikkausten suhteen. Nuolet kuvaavat sillan kantta kuormittavia akseleita.

Kuten aikaisemmissa luvuissa on käynyt ilmi, mallissa olevia siltoja on aluksi kuormitettu ajoneuvoasetuksen mukaisella 76 tonnin painoisella AA13/76 ajoneuvolla, joka on esitetty luvussa 5.1. Kuorma kuljetettiin mallissa molempien siltojen yli yhden metrin hypäyksin, jotta saatiin selville, missä kohtaa sillan pituussunnassa kuorma aiheuttaa suurimmat rasitukset.

Siltoja kuormitettiin myös 100 kN suuruisella akselilla, jota käytettiin kuormana influenssiivojen määrittämiseen. Akseli jaettiin kahteen 50 kN suuruisen pistekuormaan ja raidelevytenä on käytetty 1,8 metriä, mikä on sama kuin aikaisemmin käytetyssä AA13/76 kuormakaaviossa. Raidelevydeällä tarkoitetaan akselin renkaiden välistä etäisyyttä sillan poikkisuunnassa.

Lopuksi siltoja kuormitetaan vielä valituilla HCT- yhdistelmillä. HCT yhdistelmien aiheuttamia rasituksia arvioidaan ja verrataan luvussa 5.3. Tämän perusteella valitaan kuormitusta varten jokin tai jotkin yhdistelmät. HCT-yhdistelmät ajetaan kuormituskaistaa 1 pitkin ja tämän lisäksi siltaa kuormitetaan sillan kantavuuslaskentaohjeiden mukaisella pintakuormalla ja 76 tonnin painoisella AA13/76 ajoneuvolla. Pintakuorman suuruus on 4,5 kN/m², kuten luvussa 5.1 esitetään. Kuormituskaistan 2 sijainti on esitetty kuvassa 25.



Kuva 25. Kuormituskaistan 2 sijainti

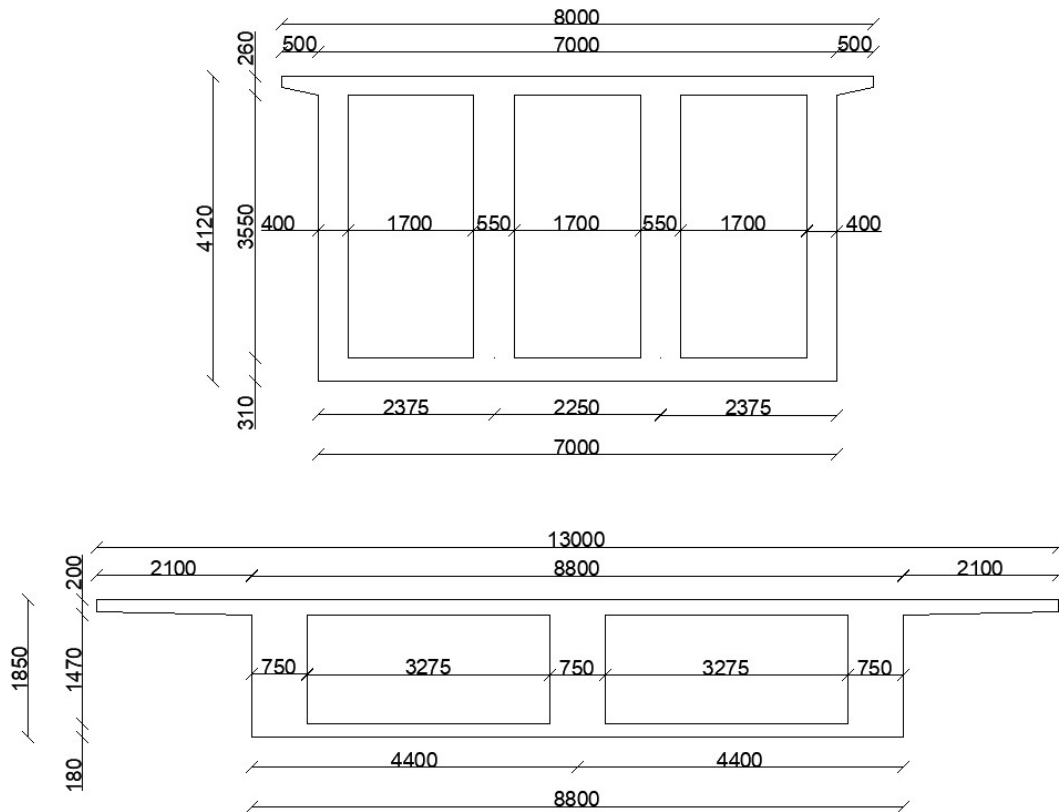
Kuormituskaista asetettiin sillan kannelle siten, että se aiheuttaisi yhdessä kuormituskaistan 1 kanssa mahdollisimman suuren vääntörasituksen. Kuormituskaista 2 olisi näin ollen sijoitettava joko aivan kuormituskaistan 1 viereen tai mahdollisimman kauaksi toiselle reunalle kantta. Molemmat tilanteet tarkasteltiin molemmille silloille ja tarkemmin tarkasteluun valittiin kummallekin sillalle kaistan sijainniksi toinen reuna. Kuvasta 25 kuormituskaistoiksi valittiin siis kaistat 2b ja 2c.

4.2.3 Rakennemallit

Työssä on tehty kahdesta eri sillasta rakennemallit, joita tarkastellaan. Rakennemallit eivät kuvaa suoraan mitään olemassa olevaa siltaa, mutta ne ovat yksinkertaistetut ja yleistetyt sillat. Työssä tarkasteltava siltatyyppe on jatkuva teräsbetoninen kotelopalkkisilta. Erityisesti kiinnostavia siltoja ovat ne, jotka ovat metsäsektorin luvussa 3.3 esitetyillä HCT-yhdistelmien reiteillä. Reiteillä olevat sillat on kerätty Taitorakennerekisterin avulla ja ne esitetään tarkemmin luvussa 7.2.1.

Reiteillä on eniten kaksi- ja kolmikoteloisia siltoja, joista suurin osa on kolmiaukkoisia. Tästä syystä tehdään kaksi eri rakennemallia, joista toinen on kaksikoteloisen ja toinen kolmikoteloisen. Koteloiden poikkileikkausmitat on esitetty kuvassa 26. Poikkileikkaus

on samanlainen koko sillan mitalta ja arvot ovat valittu olemassa olevien kohteiden perusteella.

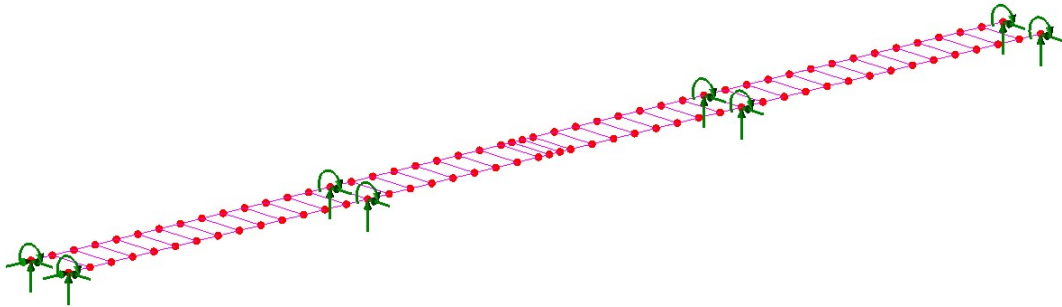


Kuva 26. Siltojen rakennemallien poikkileikkausmitat

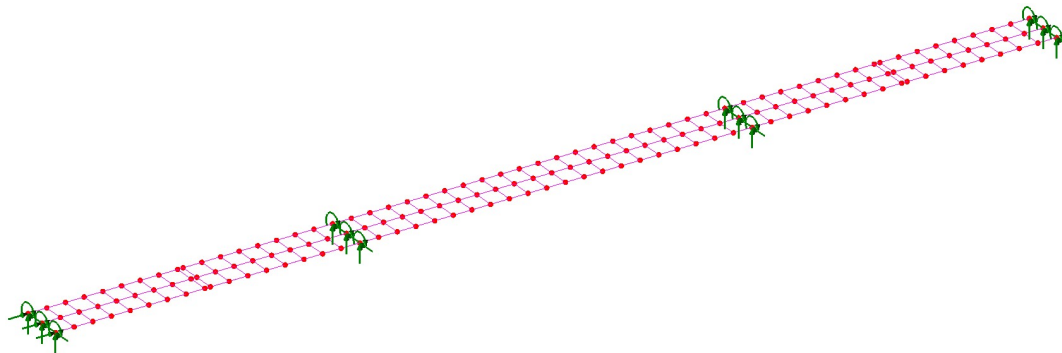
Rakennemallit ovat kolmeaukkoisia, sillä tarkoituksena on tarkastella jatkuvia siltoja. Kolmi-aukkoisia oli tarkastellussa joukossa eniten, eikä useampi aukkoisen sillan tarkastelusta saada työn kannalta lisäarvoa. Jännemitat valittiin olemassa olevien kohteiden perusteella. Tavoiteltiin jännemittojen suhdetta $0,8 + 1 + 0,8$. Tämä on tavoiteltu suhde myös todellisissa siltakohteissa, ja tätä suhdetta lähellä olevia siltoja oli tarkasteltavassa joukossa useita. Jännemitat valittiin siten, että saadaan kaksi selvästi eri pituista siltaa. Työn aluksi jännemitalle esitettiin myös ehdoksi, että sen on oltava pitkä eli vähintään 20 m. Kaksikoteloisen silta on lyhyempi ja sen jännemitat ovat $28 + 35 + 28$ m. Kolmikoteloisen jännemitat ovat $32,6 + 42 + 32,6$ m.

Rakennemallin tuenta on tehty olemassa olevien siltojen mukaan. Kaikki tuet ovat vääntöjäykkiä, sillä laakerit on usein asennettu jokaisen kotelon alle, jolloin poikkileikkaus ei pääse tuen kohdalta kiertymään. Tukien kohdalla monissa kotelopalkkisilloissa on myös poikkituenta väännön estämiseksi. Kaikissa tuissa on myös pystykomponentit sekä vaa-

kakomponentit sillan poikkisuunnassa. Lisäksi toiselle maatuelle on asetettu myös pitkittäissuuntaiset vaakakomponentit. Kuvassa 27 on esitetty kaksikoteloisen, lyhyemmän sillan rakennemalli ja kuvassa 28 kolmikoteloisen, pidemmän sillan rakennemalli.



Kuva 27. Kaksikoteloisen sillan arinamalli. Sillan jännemitat ovat $28\text{ m} + 35\text{ m} + 28\text{ m}$.



Kuva 28. Kolmikoteloisen sillan arinamalli. Sillan jännemitat ovat $32,6\text{ m} + 42\text{ m} + 32,6\text{ m}$.

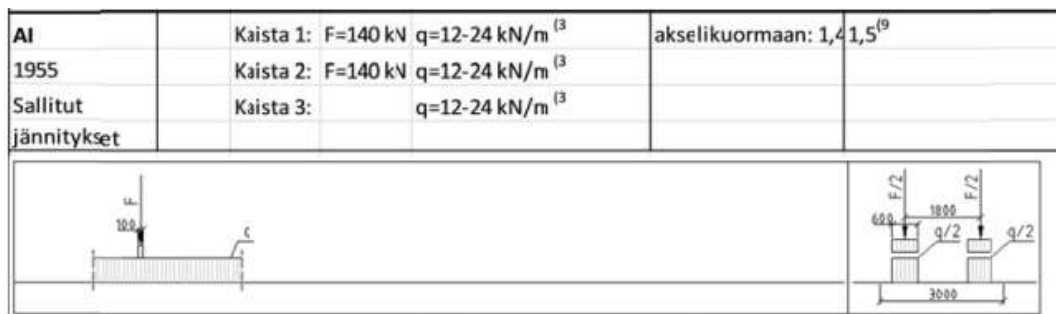
Kuvissa 27 ja 28 on esitetty tarkasteltavien siltojen arinamallit palkkeineen ja tuentoinen. Pitkittäiset pääpalkit kuvaavat koteloiden ja ovat kotelon painopisteessä. Poikittaiset arinasauvat ovat näin ollen kotelon keskeltä toisen kotelon keskelle. Arinasauvat ovat 2 m välein. Mikäli jännemitta ei ole kahdella jaollinen, sauvat ovat tiheämmin jännemitan keskellä.

5. KUORMITUKSET

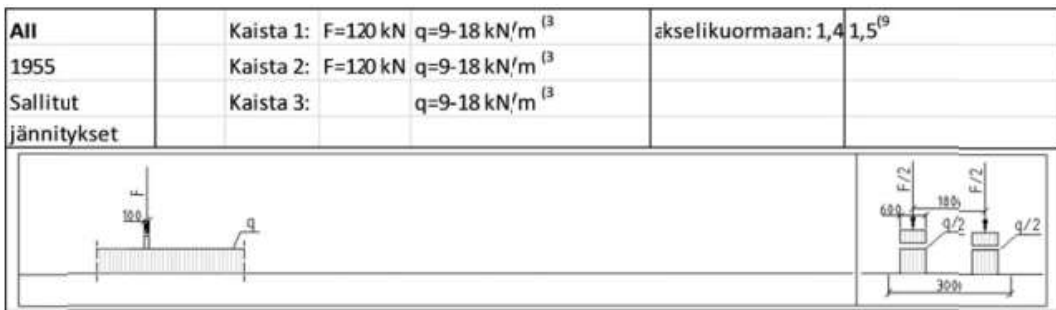
Maantiesiltojen analysoinnissa käytettävät kuormakaaviot voidaan jakaa kahteen alakategoriaan. Varsinaisia suunnittelukuormia käytetään uusien rakenteiden suunnittelussa ja ajoneuvoasetuksen mukaisia kuormia sekä erikoiskuljetuskaavioita käytetään pääosin jo olemassa olevien siltarakenteiden kantavuuslaskennassa tai väliaikaisten siltarakenteiden suunnittelussa. [2]

5.1 Suunnittelukuormat ja niiden kehittyminen

Ennen 1950-lukua suunnittelukuorma oli merkittävästi riippuvainen sillan rakennusmateriaalista ja sijainnista tieverkolla. 1950-luvun alussa otettiin käyttöön AII-kuormakaavio, joka koostui akselikuormasta ja nauhakuormasta, jonka suuruus riippui jännemitasta. Vuonna 1953 kuormaa kasvatettiin jonkin verran, jolloin kuorman nimeksi vaihdettiin AI. Kuvassa 29 on esitetty kuormakaavio AI ja kuvassa 30 kuormakaavio AII.

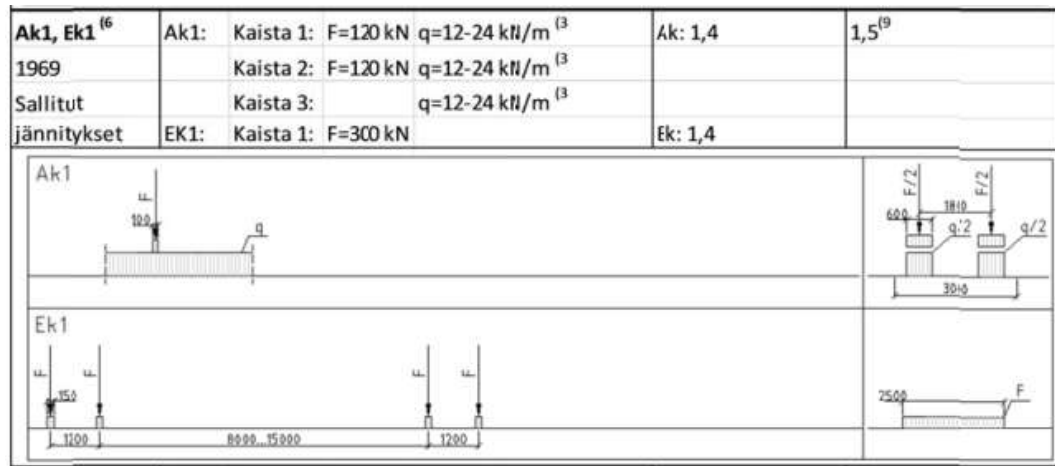


Kuva 29. Kuormakaavio AI [8]



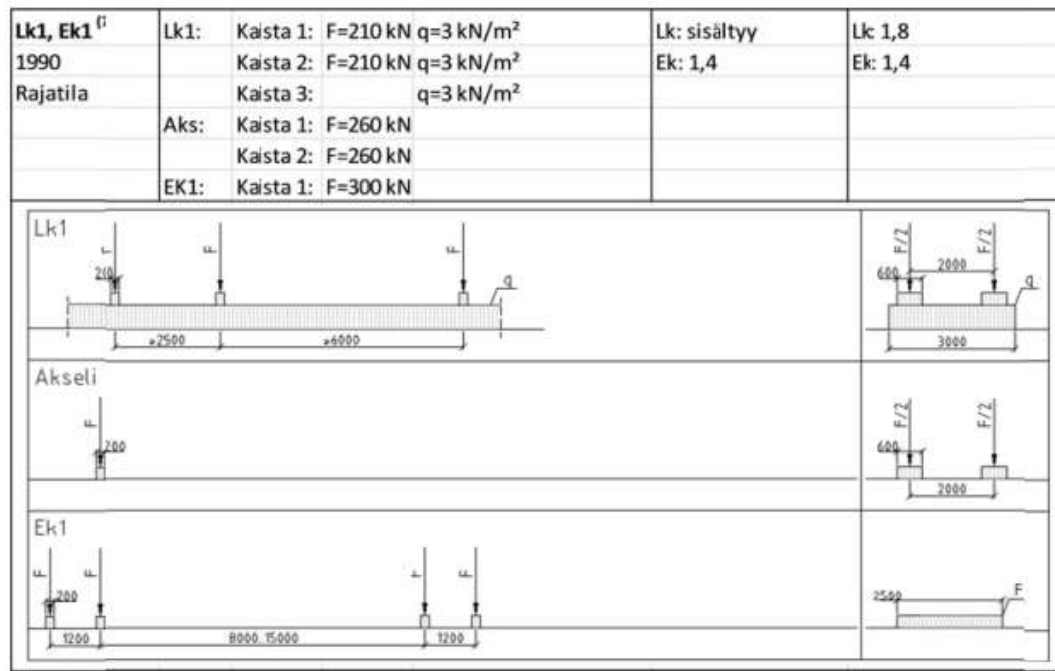
Kuva 30. Kuormakaavio AII [8]

Kuormakaavion AI rinnalle lisättiin kokonaispainoltaan 1340 kN erikoiskuormakaavio tarkastuskuormaksi vuonna 1961. Myöhemmin vuonna 1969 erikoiskuorma muutettiin kokonaispainoltaan 1200 kN ajoneuvoksi. [2] Tällöin kuormakaaviot olivat nimeltään Ak1 ja Ek1, jotka on esitetty kuvassa 31.



Kuva 31. Kuormakaaviot Ak1 ja Ek1 [8]

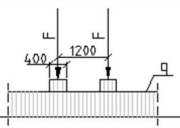
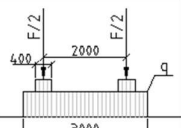
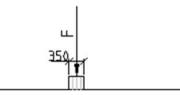
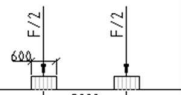

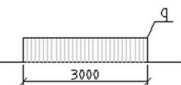
Vuonna 1971 otettiin käyttöön kuormakaavio, joka sisälsi tasaista pintakuormaa ja kolmiakselisen ajoneuvon. Tämä oli yhteispohjoismainen mitoituskuorma PKM71, joka nimettiin myöhemmin Lk1-kaavioksi. Tätä kuormakaaviota käytettiin uusien siltojen suunnittelussa erilaisissa yhdistelmissä vuoteen 2010 saakka. [2] Kuormakaaviot Lk1 ja Ek1 on esitetty kuvassa 32.



Kuva 32. Kuormakaaviot Lk1 ja Ek1 [8]

Eurokoodit ja niiden kansalliset liitteet otettiin Suomessa käyttöön vuonna 2010. Tällöin otettiin käyttöön maantieliikenteen kuormakaaviot LM1, LM2 ja LM3, jotka esiteltiin liikenneviraston eurokoodin soveltamisohjeessa NCCI 1. Vuonna 2014 LM1-kuormakaa-

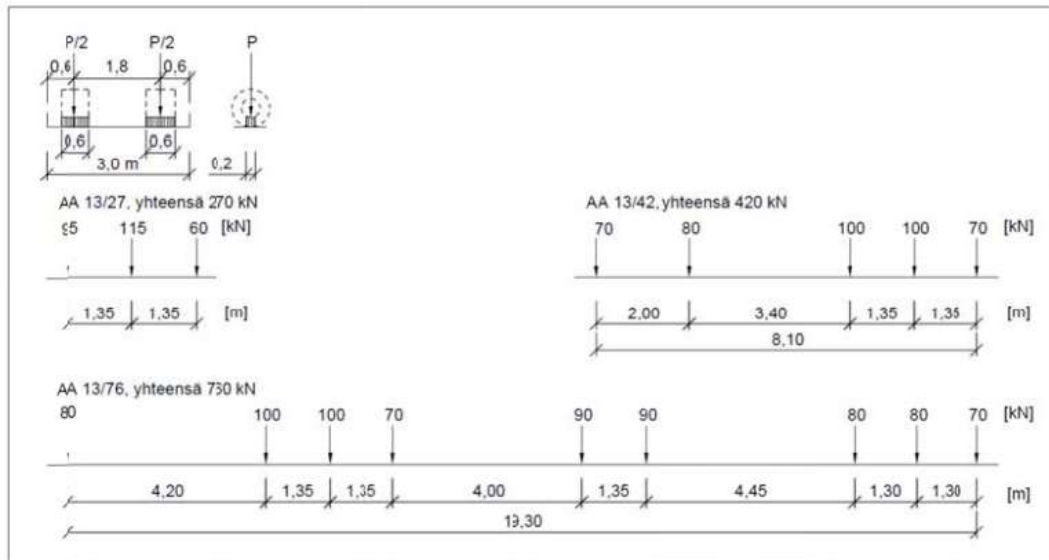
vio päivitettiin kattamaan uuden ajoneuvoasetuksen AA13 vaatimukset. LM3-kuormakaavio on kehitetty kansalliseen käyttöön. Sen tarkoituksena on mitoittaa jatkuvien silta-rakenteiden tukialueita. Kuormakaavio LM1 sisältää liikennekuorman dynaamisen vaikutuksen. [2] Kuvassa 33 on esitetty kuormakaaviot LM1, LM2 ja LM3.

NCCI 1 ⁽⁸⁾ 2014 Rajatila	LM1: Kaista 1: F=300 kN q=9 kN/m ² Kaista 2: F=200 kN q=6 kN/m ² Kaista 3: q=3 kN/m ²	LM2: Kaista 1: F=400 kN	LM3: q=45 kN/m ²	sisältyy kuormaan	1,35
LM1					
LM2					
LM3					

Kuva 33. Kuormakaaviot LM1, LM2 ja LM3 [8]

Kuva 33 havainnollistaa, mistä kuormakaaviot LM1, LM2 ja LM3 koostuvat. Kuormakaavio LM1 koostuu tasaisesti jakautuneesta kuormasta, jonka suuruus vaihtelee kuormituskaistasta riippuen, sekä telikuormasta, jonka suuruus on sama ensimmäisellä ja toisella kuormituskaistalla. Telikuormaa ei sijoiteta muille kaistoille eikä kaistojen ulkopuoliselle alueelle. Kuormakaavio LM3 on tasainen kuorma, joka voi sijaita yhdellä kolmen metrin levyisellä kuormakaistalla kerrallaan. Se koostuu kahdesta peräkkäisestä tasaisesti jakautuneesta kuormasta, joiden pituus on enintään 10 metriä.

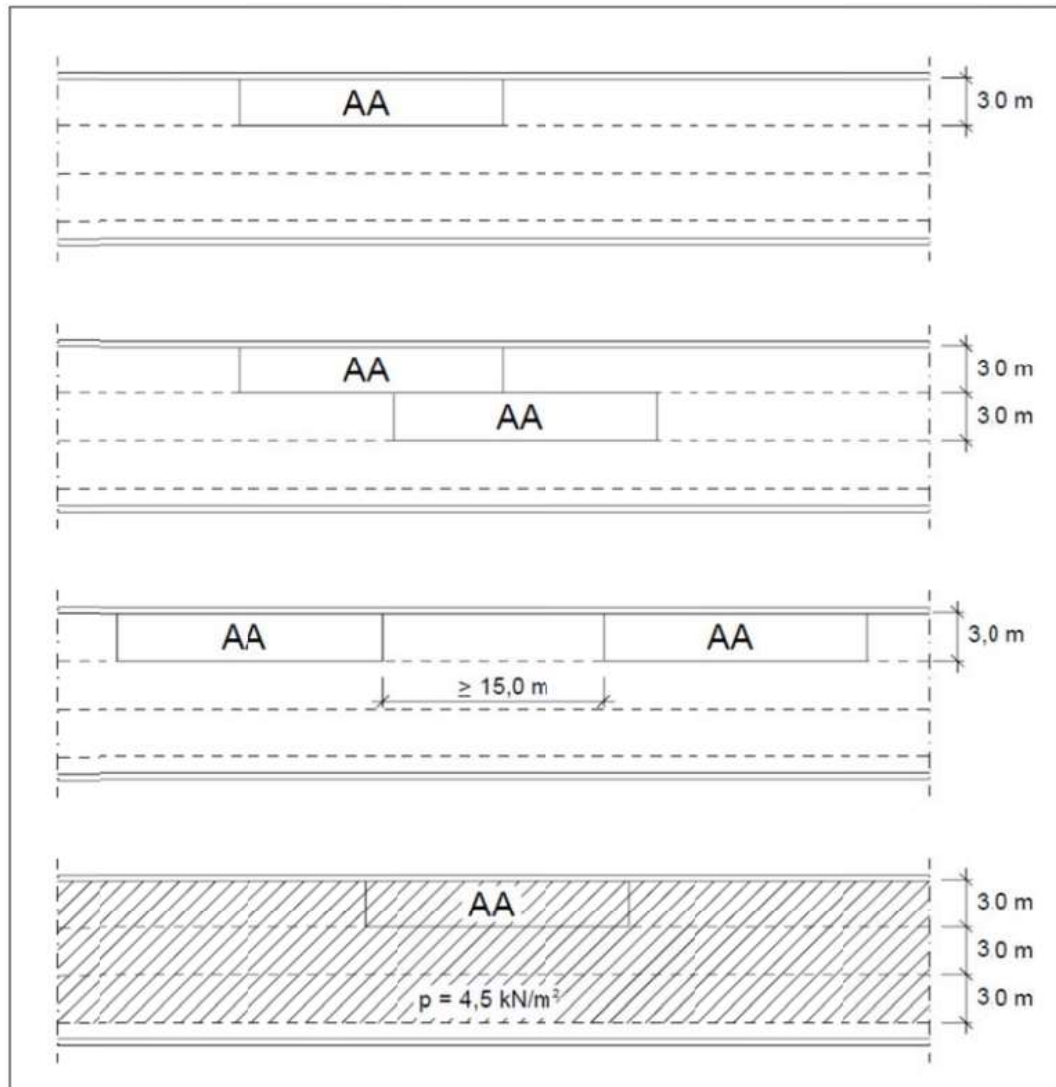
Jo olemassa olevien siltojen kantavuutta tarkastellessa voidaan hyödyntää ajoneuvoasetuksen mukaista kuormakaaviota. Kuormakaavion vaikutus sillan rakenteisiin vastaa vuonna 2013 voimaan tulleen ajoneuvoasetuksen mukaisen suurimman sallitun ajoneuvoyhdistelmän kokonaispainoja sekä akseli-, ja telipainoja. Ajoneuvoasetuksen mukaisia kuormia voidaan käyttää, kun arvioidaan sillan kantavuutta raskaiden ajoneuvojen ja muun liikenteen kannalta. Tällä tarkastelulla sillalle voidaan asettaa painorajoitus, mikäli sille on kantavuustarkastelun mukaan tarve. Kuvassa 34 on esitetty ajoneuvoasetuksen mukaiset kuormakaaviot. [8]



Kuva 34. Ajoneuvoasetuksen 2013 mukaiset kuormakaaviot AA 13/27, AA 13/42 sekä AA 13/76. [8]

Asetuksen mukaisen kuormakaistan leveys on 3,0 m. Sillan poikkisuunnassa pyörän kosketuspinta on 0,6 m ja sillan pituussuunnassa 0,2 m. Tämän kuorman lisäksi siltaa voi kuormittaa kevyttä ajoneuvoliikennettä kuvaava tasainen kuorma, joka on suuruudeltaan $4,5 \text{ kN/m}^2$. Liikennekuormat voidaan sijoittaa sillalle kolmella eri tavalla, joista valitaan se, joka aiheuttaa tarkasteltavalle rakenteelle määräävän vaikutuksen.

Ajoneuvoasetuksen mukainen kuormakaavio voi sijaita sillan poikkisuunnassa ajoradalla sekä pientareella, joka liittyy ajorataan samassa tasossa. Kuormakaavioita voi esiintyä sillalla samanaikaisesti korkeintaan kaksi. Kaaviot voidaan asettaa välittömästi rinnakkain tai peräkkäin siten, että kaavioiden välissä on vähintään 15,0 m. Kuvassa 35 on esitetty esimerkkejä kuormakaavion sijoittamisesta sillalle.



Kuva 35. Ajoneuvoasetuksen mukaisten kuormien sijoitteluesimerkki. [8]

Ajoneuvoasetuksen mukaisen kuormakaavion lisäksi käytetään erikoiskuljetuskaavioita, joilla haetaan suurin sallittu akselipaino, jonka silta kestää. Erikoiskuormakaavioita on yhteensä 17 erilaista. Ne voidaan asettaa sillalle yksin, yhdessä ajoneuvoasetuksen mukaisen kuorman kanssa tai yhdessä tasaisen pintakuorman kanssa. Erikoiskuormakaavioita käytetään, kun tarkastellaan, voidaanko silta ylittää ylliraskaalla erikoiskuljetuksella. Siltojen kantavuuden arvioinnissa, ylliraskaat erikoiskuljetukset jaetaan kahteen luokkaan, yleiskuljetus ja valvottu kuljetus. Yleiskuljetuksessa ylliraskas kuljetus voi ylittää sillan luvan voimassaoloaikana useamman kerran. Valvotussa kuljetuksessa ylliraskas kuljetus ylittää sillan vain kerran, jolloin kuljetus ohjataan sillalle edullisinta ajolinjaa pitkin. [8]

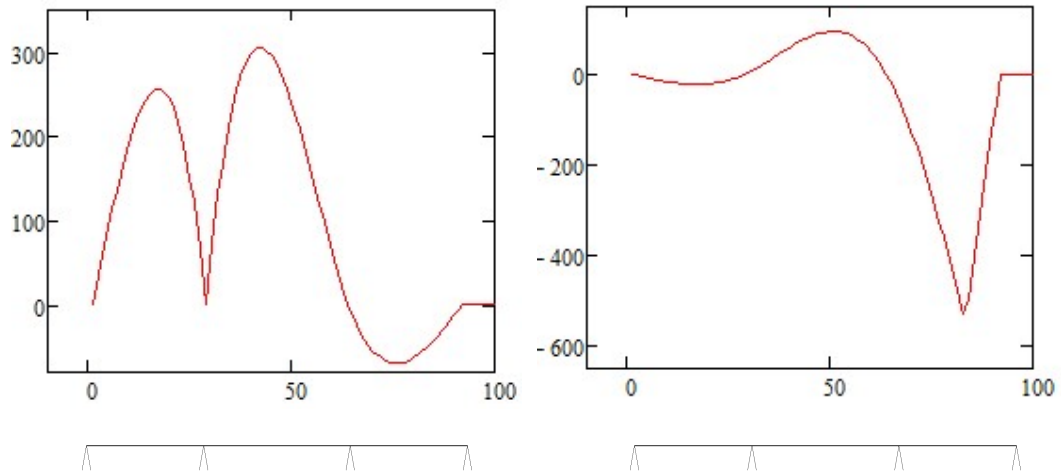
5.2 Vaikutusviiva

Influenssikuorman avulla voidaan arvioida melko vaivattomasti erilaisten ajoneuvojen aiheuttamia rasituksia silloille. Influenssikuorman avulla saadaan kuorman aiheuttama rasitus tietyssä pisteessä siltaa. Esimerkiksi taivutusmomentti keskellä kenttää tai tukireaktio välituella. Vaikutusviivojen avulla tarkastellaan yhteen pisteeseen kuormista muodostuvia voimasuureita. Näin ei saada kuitenkaan kuormitusten verhoikäyrää, eikä välttämättä löydetä rasitusten ääriarvoja, ellei tarkasteltava piste ole valittu sopivasti. Influenssikuormatarkastelu on kuitenkin kohtuullisen hyvin suuntaa antava ja sen avulla voidaan vertailla eri ajoneuvoyhdistelmiä.

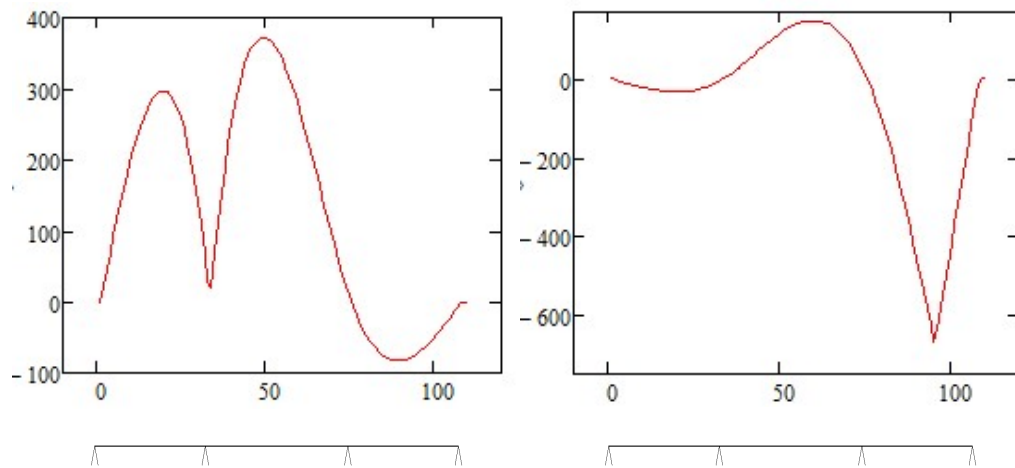
Influenssikuorman avulla voidaan tehdä influenssikuvaaaja, jonka avulla tarkastellaan kuorman aiheuttamia rasituksia tietyssä pisteessä. Jotta tarkasteltava piste osataan valita, ajetaan sillan yli myös AA13/76 kuormakaavio. Valitaan tarkastelupisteiksi sellaisia kohtia sillasta, joihin AA13/76 kuormakaavio aiheuttaa rasitusten ääriarvoja. Valituille pisteille laaditaan influenssikuvaaajat, jossa vaaka-akselilla on sillan pituus ja pystyakselilla esimerkiksi taivutusmomentin tai leikkausvoiman arvo. Kuvaaaja kuvaa tiettyyn pisteeseen kohdistuvaa rasituksen suuruutta, jonka influenssikuorma aiheuttaa kuorman ollessa eri kohdissa siltaa.

Tässä työssä käytetään influenssikuormana 100 kN suuruista akselia, jonka rengasväli on 1,8 m. Vaikutusviiva on laadittu siirtämällä 100 kN akseli sillan rakennemallin yli käyttämällä 1 m jakoväliä. Tämän jälkeen on voitu poimia haluttuun pisteeseen kuormista muodostuvat rasitukset vaikutusviivan laatimiseksi. Tarkasteltavat sillat ja niiden rakennemallit on esitelty luvussa 4.2.3.

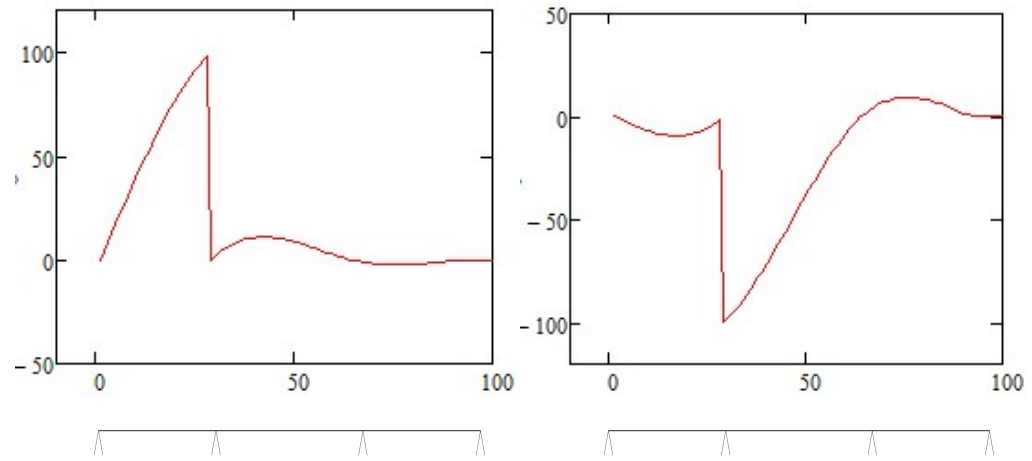
Kuormakaavio AA13/76 aiheuttaa taivutusmomentin ääriarvot välituille sekä kenttään, joten tarkasteltaviksi pisteiksi valitaan sillan pituussuunnassa piste keskeltä toista kenttää ja piste toiselta välituelta. Leikkausvoiman ääriarvot kuormakaaviolla AA13/76 tulevat välituelle, joten tarkastellaan pistettä välituelta. Taivutusmomentin influenssiviivat lyhyemmälle sillalle on esitetty kuvassa 36 ja pidemmälle sillalle kuvassa 37. Leikkausvoiman influenssiviivat lyhyemmälle sillalle on esitetty kuvassa 38 ja pidemmälle sillalle kuvassa 39. Väännön influenssiviivat lyhyemmälle sillalle on esitetty kuvassa 40 ja pidemmälle sillalle kuvassa 41. Kuvaaajien alapuolella on siltaa esittävä kuva, jossa näkyy tukien sijainnit, helpottamassa kuvaajan lukemista.



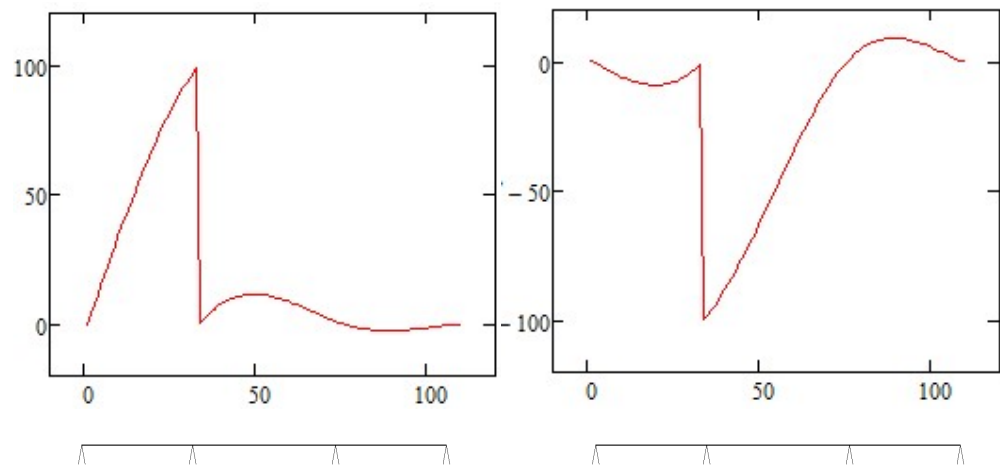
Kuva 36. Taivutusmomentin vaikutusviivat 100 kN akselikuormalla lyhyemmällä sillalla. Vasemmanpuoleinen kuva taivutusmomenttia välituella ja oikeanpuoleinen taivutusmomenttia keskellä kenttää.



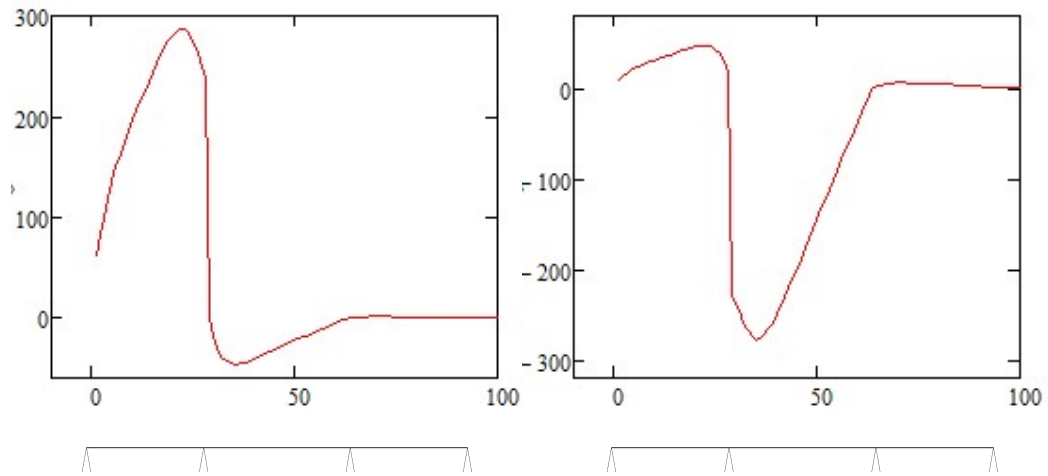
Kuva 37. Taivutusmomentin vaikutusviivat 100 kN akselikuormalla pidemmällä sillalla. Vasemmanpuoleinen kuva taivutusmomenttia välituella ja oikeanpuoleinen taivutusmomenttia keskellä kenttää.



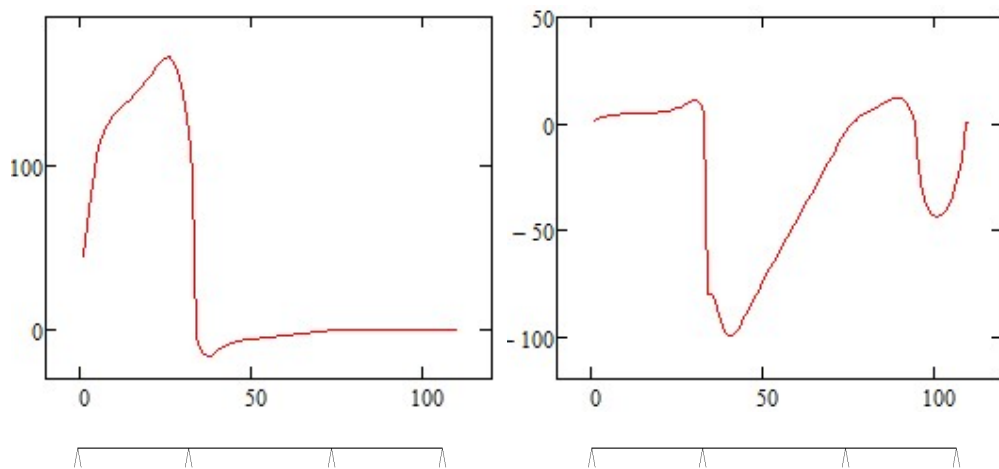
Kuva 38. Leikkausvoiman vaikutusviivat 100 kN akselikuormalla lyhyemmällä sillalla välituella.



Kuva 39. Leikkausvoiman vaikutusviivat 100 kN akselikuormalla pidemmällä sillalla välituella.



Kuva 40. Väännön vaikutusviivat 100 kN akselikuormalla koko poikkileikkaukselle lyhyemmällä sillalla välituella.



Kuva 41. Väännön vaikutusviivat 100 kN akselikuormalla koko poikkileikkaukselle pidemmällä sillalla välituella.

Taivutusmomentin influenssiivoista havaitaan, että taivutusmomentit ovat jonkin verran suurempia pidemmällä sillalla, sillä taivutusmomentin suuruuteen vaikuttaa esimerkiksi jännemitta. Suurimmat taivutusmomentin arvot molemmille silloille välituella aiheutuvat akselin ollessa tarkasteltavan välituen viereisessä kentässä. Kentässä ääriarvo syntyy, kun kuorma on tarkasteltavan kentän kohdalla maatuen ja välituen välissä. Leikkausvoiman ääriarvot ovat lähes samansuuruiset molemmille silloille, ja molemmissa silloissa ääriarvot aiheutuvat akselin ollessa tuen välittömässä läheisyydessä tai kohdalla. Väännön suuruuteen vaikuttaa poikkileikkaus. Lyhyemmälle sillalle syntyy suuremmat vääntömomentin arvot, koska lyhyemmällä sillalla poikkileikkaus on leveämpi ja poikkileikkauksessa on pidempi uloke, jolla kuorma sijaitsee.

5.3 HCT-yhdistelmien aiheuttamat kuormitukset

HCT-yhdistelmät ovat kaikki pidempiä ja painavampia kuin ajoneuvoasetuksen mukainen AA13/76 kuormakaavion mukainen ajoneuvo. Lisäksi myös akseli- ja telikuormat sekä akselien ja telien väliset etäisyydet poikkeavat ajoneuvoasetuksen mukaisesta ajoneuvosta. Verrataan influenssikuorman avulla erilaisten HCT-yhdistelmien aiheuttamia rasituksia AA13/76 kaavion aiheuttamiin rasituksiin.

Tässä vaiheessa työtä influenssikuorman avulla arvioitiin taulukon 6 mukaisia HCT-yhdistelmiä. Kokonaismassaltaan samanlaisten yhdistelmien akselimassat ja akselivälit eroavat, kuten myös yhdistelmän etummaisen ja takimmaisen akselin välinen etäisyys. Tutkimuksessa on käytetty yhdistelmien tyypillisiä akselimassoja. Osassa yhdistelmissä tyypilliset akselimassat aiheuttavat suuremman massan kuin yhdistelmän nimen mukainen massa. Vertailun vuoksi taulukossa on myös AA13/76 mukainen ajoneuvo.

Taulukko 6. *Influenssiviivojen avulla tarkasteltavat HCT-yhdistelmät*

Ajoneuvoyhdistelmä	Kokonaismassa [t]	Akselien lkm.	Äärimmäisten akselien väli [m]
AA13/76	76	9	19,3
Terminaaliyhdistelmä 100	100	12	29,265
Hakeyhdistelmä 100	100	12	29,88
Terminaaliyhdistelmä 92	92,2	12	28,7
Hakeyhdistelmä 91 H	91	11	25,3
Terminaaliyhdistelmä 90 A	90	11	23,8
Hakeyhdistelmä 90	90	11	24,72
Metsäauto 85 M	88,5	10	25
Metsäauto 84 C	85	10	22
Metsäauto 84 D	84	10	21,9
Hakeyhdistelmä 84 t	84	10	23,3
Terminaaliauto 84 B	84	10	23,065

Tarkastelussa olevat 100 tonnin terminaali- ja hakeyhdistelmä eivät juurikaan eroa toisistaan, sillä molemmissa on 12 akselia, eikä pituudessakaan ole yhdistelmien välillä eroa kuin 0,615 m. Akseliväleissä ja -painoissa on jonkin verran eroja, mutta erot ovat melko pieniä. Myös 92 tonnin terminaaliyhdistelmä on lähes 30 m pitkä ja akseleita on 12, jolloin suurin ero on kokonaismassassa. 91 t hakeyhdistelmässä merkittävä ero syntyy akselien määrästä ja kokonaispituudesta. Yhdistelmässä on vain 11 akselia ja kokonaispituus on noin 5 m lyhyempi kuin 100 t ja 92 t yhdistelmissä. Näin ollen yksittäisille akseleille tulee suurempia massoja etenkin verrattuna 92 t yhdistelmään.

Tarkastelluissa yhdistelmissä, jotka painavat 84-85 t, on enemmän vaihtelua. Tästä syystä myös yhdistelmien aiheuttamissa rasituksissa on myöskin enemmän eroja. Ääriakselien välit vaihtelevat välillä 19,3 – 25 m. Akseleita on kaikissa kuitenkin sama kymmenen kappaletta. Pääosin painojakauma on sellainen, että ajoneuvon kaksi ensimmäistä ja viimeinen akseli ovat kevyempiä ja välissä on kaksi selvästi painavampaa akselia. Suuremmissa osassa perävaunuista kaksi etummaista akselia ovat hieman painavampia kuin kolme viimeistä.

Influenssikuorman avulla arvioitiin taulukon 6 ajoneuvojen aiheuttamia rasituksia kahdelle eri pituiselle sillalle. Molemmat sillat ovat kolmiaukkoisia. Taulukossa 7 on esitetty HCT-yhdistelmien aiheuttamat arvioidut taivutusmomentit. Tarkastelupisteet on valittu edellisen luvun perusteella, joten taivutusmomentin maksimiarvo on välituelta ja minimiarvo kentästä. Taulukoista on harmaalla korostettu rasitusten suurimpia arvoja.

Taulukko 7. *HCT-yhdistelmien aiheuttamat arvioidut taivutusmomentit kahdelle tarkasteltaville silloille, kuorma kaistalla yksi*

Ajoneuvoyhdistelmä	Kokonaismassa [t]	Taivutusmomentti MAX [kNm]		Taivutusmomentti MIN [kNm]	
		Pitkä silta	Lyhyt silta	Pitkä silta	Lyhyt silta
AA13/76	76	2506	1950	-3263	-2420
Terminaaliyhdistelmä 100	100	2750	2232	-3254	-2215
Hakeyhdistelmä 100	100	2712	2149	-3151	-2250
Terminaaliyhdistelmä 92	92,2	2220	2039	-3103	-2243
Hakeyhdistelmä 91 H	91	2475	2175	-3265	-2330
Terminaaliyhdistelmä 90 A	90	2205	2049	-3289	-2369
Hakeyhdistelmä 90	90	2311	2021	-3274	-2323
Metsäauto 85 M	88,5	2187	1939	-3085	-2251
Metsäauto 84 C	85	2610	1781	-3263	-2368
Metsäauto 84 D	84	2646	1807	-3327	-2412
Hakeyhdistelmä 84 t	84	2522	1843	-3133	-2167
Terminaaliauto 84 B	84	2595	1980	-3308	-2310

Taulukosta 7 huomataan sama kuin edellisen luvun influenssikuvaajista, eli taivutusmomentin maksimit ovat suurempia pidemmällä sillalla. Taivutusmomentin arvot vaihtelevat jonkin verran ajoneuvoyhdistelmästä riippuen. Arvot eivät ole suoraan yhdistelmän massasta riippuvia. Pidemmällä sillalla 84 t metsäauto aiheuttaa lähes 10 % suuremman taivutusmomentin kuin AA-kaavio. Molemmilla silloilla taivutusmomentin suurimman arvon aiheuttaa 100 t painoinen terminaaliyhdistelmä. Taivutusmomentin minimi arvo pienemmällä sillalla aiheutuu AA13/76 mukaisesta ajoneuvosta. Pidemmällä sillalla taivutusmomentin minimin ääriarvon aiheuttavat terminaaliauto 84 B, mikä aiheuttaa myös lyhyemmälle sillalle lähes saman minimiarvon kuin AA13/76.

Leikkausvoiman maksimi ja minimiarvot eri ajoneuvoyhdistelmille on esitetty taulukossa 8. Tarkastelupisteeksi on valittu edellisen luvun perusteella välituki.

Taulukko 8. *HCT-yhdistelmien aiheuttamat arvioidut leikkausvoimat tarkasteltaville silloille, kuorma kaisalla 1*

Ajoneuvoyhdistelmä	Kokonais- massa [t]	Leikkausvoima MAX [kN]		Leikkausvoima MIN [kN]	
		Pitkä silta	Lyhyt silta	Pitkä silta	Lyhyt silta
AA13/76	76	564	532	-604	-573
Terminaaliyhdistelmä 100	100	601	524	-644	-572
Hakeyhdistelmä 100	100	585	543	-641	-577
Terminaaliyhdistelmä 92	92,2	586	523	-593	-562
Hakeyhdistelmä 91 H	91	618	534	-671	-616
Terminaaliyhdistelmä 90 A	90	601	531	-652	-604
Hakeyhdistelmä 90	90	602	523	-652	-601
Metsäauto 85 M	88,5	591	539	-622	-574
Metsäauto 84 C	85	586	522	-625	-584
Metsäauto 84 D	84	560	532	-632	-591
Hakeyhdistelmä 84 t	84	566	500	-602	-558
Terminaaliauto 84 B	84	572	482	-622	-583

Taulukon 8 arvot ovat melko yhteneväisiä edellisen luvun influenssikäyrän kanssa. Pidemmälle sillalle aiheutuu suuremmat leikkausvoimat ajoneuvoyhdistelmistä kuin lyhyemmälle sillalle. Leikkausvoimien vaihtelut ovat melko maltillisia eri painoisten ajoneuvoyhdistelmien välillä. Suurimman rasituksen ja AA-kaavion rasituksen arvojen välillä on eroa lähes 10 %. Kasvu voi olla merkittävän suuri, mikäli sillan kapasiteetti on jo kokonaisuudessaan käytössä ajoneuvoasetukselle. Pääosin leikkausvoiman ääriarvot aiheutuvat 90–100 tonnin HCT-yhdistelmistä. Koska suurin leikkausvoima ei aiheudu ainoastaan painavimmista yhdistelmistä, voidaan todeta, että myös yhdistelmän pituus vaikuttaa leikkausvoiman suuruuteen. Tarkastellut 100 tonnin yhdistelmät ovat pituudeltaan noin 5 m pidempiä kuin tarkastellut 90 tonnin yhdistelmät. Tällöin yhdistelmän massa jakautuu pidemmälle matkalle ja osa kuormasta jakautuu enemmän tarkasteltavaa tukea edeltävälle tai seuraavalle tuelle.

Taulukko 9. HCT-yhdistelmien aiheuttamat arvioidut vääntömomentit tarkasteltaville silloille. kuorma kaistalla 1

Ajoneuvoyhdistelmä	Kokonais- massa [t]	Vääntö MAX [kN]		Vääntö MIN [kN]	
		Pitkä silta	Lyhyt silta	Pitkä silta	Lyhyt silta
AA13/76	76	1136	1876	-637	-1775
Terminaaliyhdistelmä 100	100	1330	1921	-695	-1587
Hakeyhdistelmä 100	100	1277	1794	-648	-1826
Terminaaliyhdistelmä 92	92,2	1260	1849	-639	-1671
Hakeyhdistelmä 91 H	91	1345	2044	-711	-1919
Terminaaliyhdistelmä 90 A	90	1287	1894	-694	-1892
Hakeyhdistelmä 90	90	1297	1874	-694	-1882
Metsäauto 85 M	88,5	1240	1826	-664	-1801
Metsäauto 84 C	85	1216	1946	-662	-1820
Metsäauto 84 D	84	1232	1976	-671	-1844
Hakeyhdistelmä 84 t	84	1188	1874	-637	-1741
Terminaaliauto 84 B	84	1182	1765	-661	-1819

Taulukon 9 arvot ovat myös yhteneväisiä verrattuna edellisen luvun influenssikäyriin ja lyhyemmälle sillalle aiheutuu yhdistelmistä suurempia vääntömomenteja. Molemmille silloille vääntömomentin molemmat ääriarvot aiheutuvat 91 tonnin painoisesta hakeyhdistelmästä. Väännön osalta erot ovat jopa 18 %, mikä on jo suurehko vaihtelu väli rasi-
tukselle.

Taulukoiden 7-9 arvot eivät ole välttämättä tarkat ääriarvot vaan ne on arvioitu influenssikuorman avulla, eli lukuarvoja ei pidä tarkastella liian tarkasti. Niistä voidaan kuitenkin nähdä rasi-
tuksille suuruusluokkaa ja arvioida eri ajoneuvoyhdistelmien välisiä eroja jonkin verran. Erot eri ajoneuvoyhdistelmien välillä ovat melko maltillisia, jolloin ajoneuvoyhdistelmän akselipainoilla ja akseliväleillä ei sillan rasi-
tusten kannalta vaikuttaisi olevan kovinkaan suurta merkitystä. Kun tarkastellaan taulukoita ja arvioidaan eri rasi-
tuksien suuruuksia eri yhdistelmillä, voidaan valita mielenkiintoisimmiksi ajoneuvoiksi valita ajoneuvoyhdistelmiä, jotka aiheuttavat suurimpia rasi-
tuksia kaikissa kolmessa taulukossa. Mielenkiintoisimmaksi yhdistelmäksi valitaan hakeyhdistelmä 91 H.

Samana painoisten yhdistelmien välillä rasi-
tusten arvojen väliset erot ovat melko pieniä. Näin ollen voidaan päätellä, että akselien väliset paino- ja akselivälierot eivät vaikuta niin paljoa kuin yhdistelmän kokonaismassa. Yksittäiset akselit eivät juuri vaikuta rasi-
tuksiin, sillä kaikki akselit ovat kuitenkin sallitun akselimassan rajoissa. Myös akselien lukumäärä

ja yhdistelmän kokonaispituus vaikuttavat rasituksiin. Painavimmat ajoneuvoyhdistelmät ovat selvästi pidempiä kuin lyhyemmät ja taulukossa 10 on esitetty karkeat arviot yhdistelmien kuorman intensiteetistä. Taulukossa on jokaiselle tarkastellulle yhdistelmälle massan suhde pituuteen, eli kuinka paljon yhdistelmä painaa metriä kohden. Luvussa ei huomioida akseleiden sijaintia eikä akselimassoja. Luku on kuitenkin suuntaa antava ja selittää osaltaan sitä, miksi erot rasituksissa eivät ole kovin suuria merkittävistä massaeroista huolimatta.

Taulukko 10. *Ajoneuvojen kuorman intensiteetti, eli kokonaismassa jaettuna yhdistelmän äärimmäisten akselien välisellä pituudella*

Ajoneuvo	Kuorman intensiteetti (t/m)
AA13/76	3,94
Terminaaliyhdistelmä 100	3,42
Hakeyhdistelmä 100	3,35
Terminaaliyhdistelmä 92	3,21
Hakeyhdistelmä 91 H	3,60
Terminaaliyhdistelmä 90 A	3,78
Hakeyhdistelmä 90	3,64
Metsäauto 85 M	3,54
Metsäauto 84 C	3,86
Metsäauto 84 D	3,84
Hakeyhdistelmä 84 t	3,61
Terminaaliauto 84 B	3,64

Kuten taulukosta 10 huomataan AA13/76 kuorman intensiteetti on korkeimmasta päästä, vaikka se on massaltaan pienin. Pääosin painavimmat yhdistelmät ovat myös huomattavasti pidempiä, jolloin kuorman intensiteetti on matalampi. Metsäautojen 84 C ja D kuormaintensiteetit ovat selvästi suurempia muilla 84 tonnin yhdistelmillä. Lähes kaikissa rasituksissa metsäauto D kuitenkin saa suuremmat arvot, joten kuormaintensiteetti ei kerro suoraan yhdistelmän huonoudesta tai hyvydestä sillan kannalta. Myös massaltaan lähellä 90 tonnia olevat yhdistelmät ovat lyhyempiä, jolloin niiden kuorman intensiteetti on selvästi suurempi verrattuna 100 tonnin yhdistelmiin.

Ehdotetut HCT käytävät on karkeasti jaettu kolmeen ryhmään yhdistelmän painon mukaan. Reitit on esitetty luvussa 3.3. Sinisillä reiteillä yhdistelmän maksimipainoksi on esitetty 88 t. Alle 88 tonnin yhdistelmistä mielenkiintoisin yllä olevien rasiustaulukoiden perusteella on Metsäauto 84D, joka aiheuttaa lähes kaikissa suurimmat rasitukset. Vihreillä reiteillä HCT-yhdistelmän paino on ajateltu välille 89 – 94 t ja punaisilla reiteillä yli 100 t. Vihreän reitin kiinnostavin yhdistelmä on sama hakeyhdistelmä 91 H. Punaisten reittien

kannalta tarkasteltavat 100 tonnin yhdistelmät eivät juurikaan eroa toisistaan. Voi olla tarpeellista tehdä jonkin verran lisätarkastelua sen selvittämiseksi, onko reittien kannalta mielenkiintoisempi yhdistelmä jompikumpi 100 t yhdistelmästä vai 91 tonnin hakeyhdistelmä.

6. RAKENNEANALYYSIN TULOKSET

Poikkileikkauksen toimintaa pyritään selvittämään laskentamallin avulla. Aikaisemmin esiteltyjä siltamalleja kuormitetaan ja malliin syötetään erilaisia poikkileikkauksarvoja. Seuraavissa alaluvuissa tutkitaan ensin hieman laajemmin poikkileikkauksen toimintaa ja pyritään löytämään ne tekijät, jotka vaikuttavat eniten kotelopoikkileikkaukseen. Poikkileikkausta tarkastellaan sen mukaan, kuinka se jakaa eri tilanteissa rasituksia koko kotelopoikkileikkauksen kesken.

Aluksi tarkastellaan halkeilemattomien ja halkeilleiden poikkileikkauksen poikkileikkauksarvojen vaikutuksia taivutusmomenttiin, leikkausvoimaan ja vääntöön, sekä rasitusten jakautumiseen poikkileikkauksessa arinamallin palkkien välillä. Kun löydetään eniten vaikuttavat tekijät yksinkertaisella kuormituksella, tarkennetaan analyysien sisältöä ja lopuksi tarkastellaan vielä ajoneuvojen vaikutuksia.

6.1 Täysin halkeilemattomat ja halkeilleet poikkileikkauksarvot

Kotelopoikkileikkauksen toimintaa tutkittiin arinamallin avulla. Tutkittiin, kuinka poikkileikkauks jakaa kuormituksen aiheuttamia rasituksia täysin halkeilemattomana, täysin halkeileena sekä erilaisin variaatioin. Tarkastelua varten oletettiin poikkileikkauksen vääntö- ja taivutusjäykkyys joko täysin halkeilleen tai täysin halkeilemattoman poikkileikkauksen jäykkyydeksi, ja arvot annettiin koko sillan mitalle samanlaisina. Arinamallissa on erikseen annettu poikkileikkauksarvoja kotelopalkeille sekä arinasauvoille. Siltoja kuormitettiin yhdellä 100 kN suuruisella akselilla, ja kuorma ajettiin kokonaan molempien siltojen yli. Tarkastellut tapaukset on koottu taulukkoon 11.

Taulukko 11. *Tarkasteltavat tapaukset. Taulukossa I tarkoittaa täysin halkeilemattomaa arvoa kyseiselle ominaisuudelle ja II täysin halkeillutta.*

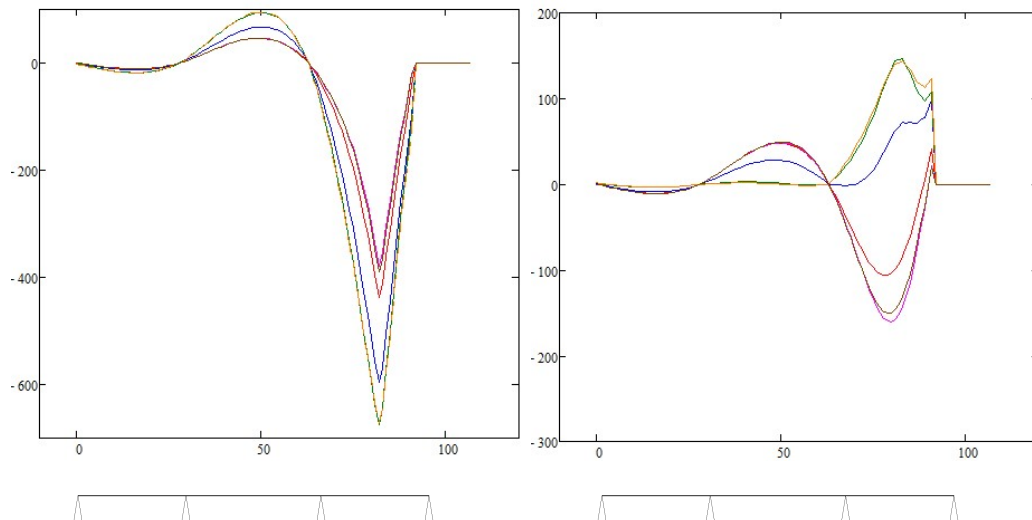
	Ely kotelo	Glv kotelo	Ely laatta	Käyrän väri kuvaajassa
Analyysi 1	I	I	I	Red
Analyysi 2	II	II	II	Blue
Analyysi 3	I	II	I	Green
Analyysi 4	II	I	I	Pink
Analyysi 5	I	II	II	Orange
Analyysi 6	II	I	II	Brown

Taulukossa kotelolla tarkoitetaan arinamallin palkkeja ja laatalle tarkoitetaan palkkeja yhdistäviä arinasauvoja. Halkeilleen ja halkeilemattoman poikkileikkauksen poikkileikkauksarvot ovat arvioita ja ne on laskettu luvussa 4 esitettyjen kaavojen ja periaatteiden mukaan. Taulukon 11 mukaisesti Analyysissä 1 on täysin halkeilemattoman poikkileikkauksen

ja analyysissä 2 täysin halkeillut poikkileikkaus. Analyyseissä 3 ja 4 laatan, eli arinasauvan, taivutusjäykkyys on täysin halkeilemattoman poikkileikkauksen taivutusjäykkyys ja analyyseissä 5 ja 6 se on asetettu täysin halkeilleen poikkileikkauksen taivutusjäykkyydeksi. Analyyseissä 3 ja 5 kotelon, eli mallin palkkien, taivutusjäykkyydet ovat täysin halkeilemattoman poikkileikkauksen ja vääntöjäykkyydet ovat täysin halkeilleen poikkileikkauksen. Analyyseissä 4 ja 6 kotelon vääntöjäykkyydet ovat täysin halkeilemattoman poikkileikkauksen ja taivutusjäykkyydet ovat täysin halkeilleen poikkileikkauksen.

Yllä tehdyt oletukset ovat todella karkeita ja niiden on tarkoitus paljastaa rakenteen toimintaa. Todellisuudessa rakenteet harvemmin ovat täysin halkeilemattomia tai täysin halkeilleita. Tästä johtuen saadut tulokset näyttävät melko suuriakin eroja eri analyysien väleille, mutta niiden avulla voidaan nähdä, kuinka rakenne pystyy laskennallisesti välittämään kuormia poikkileikkauksessa.

Tarkasteluun valittiin kentästä arvo, jossa taivutusmomentti saa ääriarvonsa. Tässä pisteessä tarkasteltiin, kuinka taivutusmomentti, leikkausvoima ja vääntö jakautuvat eri analyyseissa. Kuvassa 42 on esitetty taivutusmomentin arvot, kuvassa 43 leikkausvoiman arvot sekä kuvassa 44 väännön arvot lyhyemmälle sillalle eri analyysille. Vasemmanpuoleinen kuvaaja kuvaa palkkia lähempään kuormitusta ja oikeanpuoleinen kuvaaja kuvaa toista palkkia.

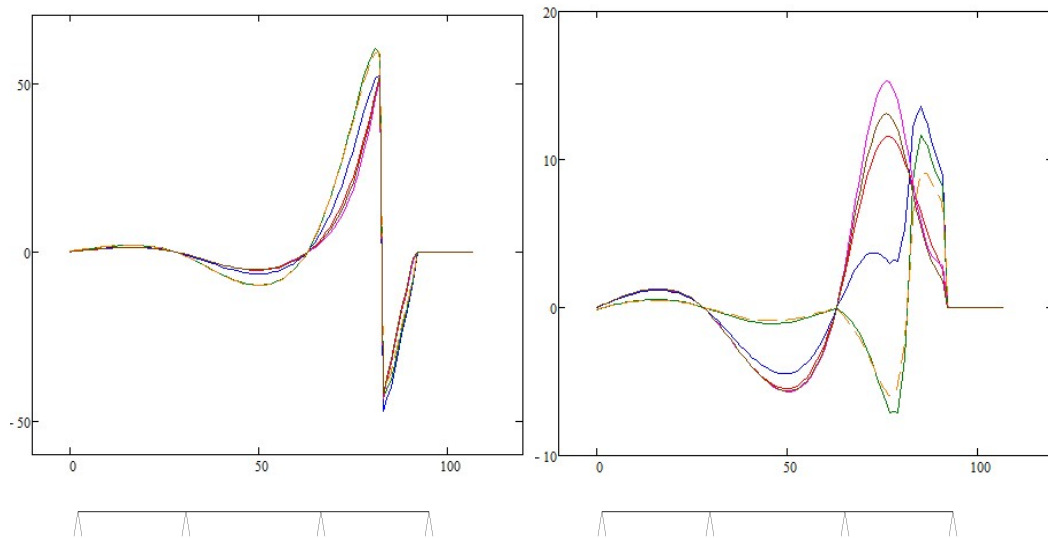


Kuva 42. Taivutusmomentin arvot kentässä lyhyemmälle sillalle eri analyysille. Vasemmanpuoleinen kuvaaja on kuorman puoleiselle palkille ja oikeanpuoleinen toiselle palkille.

Kuten kuvan 42 kuvaajista huomataan, taivutusmomenttien arvoja kuvaavat käyrät ovat jonkin verran ryhmittyneet. Molemmille palkeille analyysijä 3 ja 5 kuvaavat käyrät ovat lähes päällekkäin sekä analyysijä 4 ja 6 kuvaavat käyrät ovat lähes päällekkäin. Lisäksi

analyysiä 1, eli täysin halkeilematonta poikkileikkausta kuvaava käyrä on lähellä analyysijä 4 ja 6 sekä analyysia 2, eli täysin halkeillutta poikkileikkausta kuvaava käyrä on lähellä analyysijä 3 ja 5. Koska analyysien 2 ja 5 aiheuttamat taivutusmomentit eroavat huomattavasti analyysien 4 ja 6 aiheuttamista taivutusmomenteista, voidaan todeta, että kotelon taivutusjäykkyyden ja vääntöjäykkyyden välisellä suhteella on vaikutusta taivutusmomentin suuruuteen ja sen jakautumiseen kotelopoikkileikkauksessa. Sen sijaan laatan, eli arinasauvan, taivutusjäykkyydellä ei juurikaan ole vaikutusta taivutusmomentin suuruuteen. Tämä huomataan siitä, että analyysit 1, 4 ja 6, joissa laatalta on halkeilemattoman poikkileikkauksen taivutusjäykkyys, aiheuttavat melko samansuuruiset taivutusmomentit, ja analyysit 2,3 ja 5, joissa laatalta on halkeilleen poikkileikkauksen taivutusjäykkyys, aiheuttavat melko samansuuruiset taivutusmomentit palkkiin.

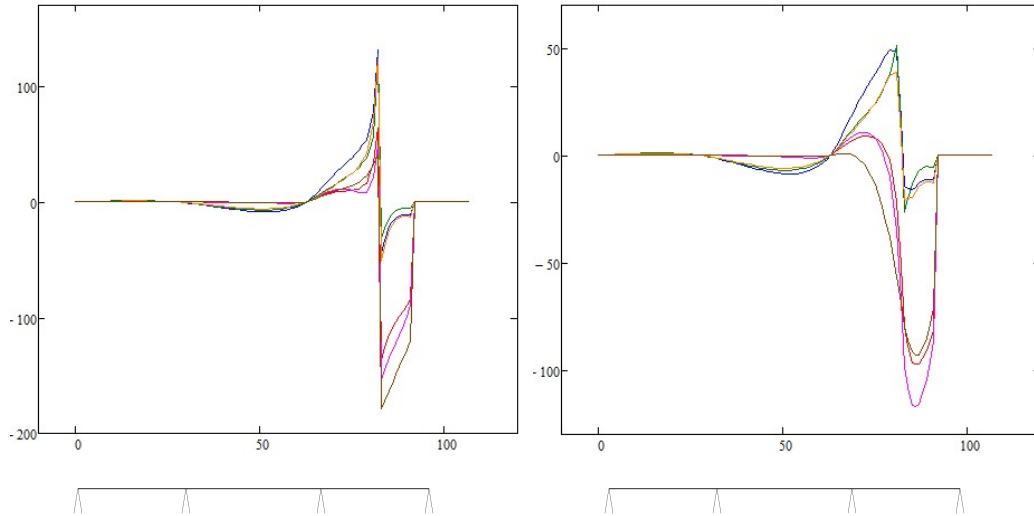
Palkkien välillä suurin ero on, että toiselle palkille analyysit 2,3 ja 5 aiheuttavat eri suuntaista taivutusmomenttia kuin analyysit 1,4 ja 6. Samat analyysit 2,3 ja 5 aiheuttavat arvoltaan huomattavasti suuremmat taivutusmomentit kuorman puoleiselle palkille. Tästä voidaan päätellä, että analyyseissä 2,3 ja 5 poikkileikkaus ei kykene siirtämään rasitusta koko poikkileikkaukselle yhtä tehokkaasti kuin analyyseissä 1,4 ja 6.



Kuva 43. Leikkausvoiman arvot kentässä lyhyemmälle sillalle eri analyysille. Vasemmanpuoleinen kuvaaja on kuorman puoleiselle palkille ja oikeanpuoleinen toiselle palkille.

Leikkausvoimalle voidaan tehdä samankaltaiset havainnot eri analyyseistä kuin taivutusmomentille, eli analyysit ryhmittyvät kuvaajissa samalla tavalla. Kuvasta 43 havaitaan, että analyyseissä 1, 4 ja 6 leikkausvoima saa lähes samansuuruisia arvoja ja analyyseillä 2,3 ja 5 vastaavasti leikkausvoima saa myös lähes samansuuruisia arvoja. Leikkausvoiman kohdalla kuorman puoleiselle palkille saadut leikkausvoiman arvot eivät eroa yhtä voimakkaasti toisistaan, kuin toiselle palkille tulevat leikkausvoimien arvot. Kuorman

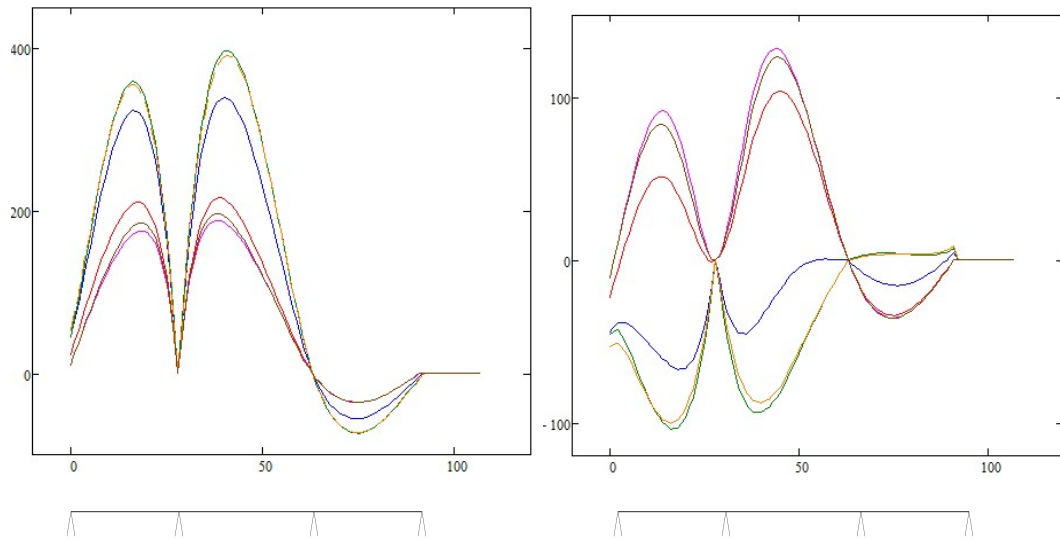
puoleiselle palkille erot ovat myös maltillisempia kuin taivutusmomenttien väliset erot. Leikkausvoimat oikeanpuoleisessa kuvassa ovat samoilla yhdistelmillä eri suuntaiset kuin taivutusmomentillekin. Analyysit 2,3 ja 5 aiheuttavat kuorman puoleiselle palkille suuremmat leikkausvoiman ääriarvot ja toiselle palkille päinvastaisen suuntaiset.



Kuva 44. Väännön arvot kentässä lyhyemmälle sillalle eri analyyseille. Vasemmanpuoleinen kuvaaja on kuorman puoleiselle palkille ja oikeanpuoleinen toiselle palkille.

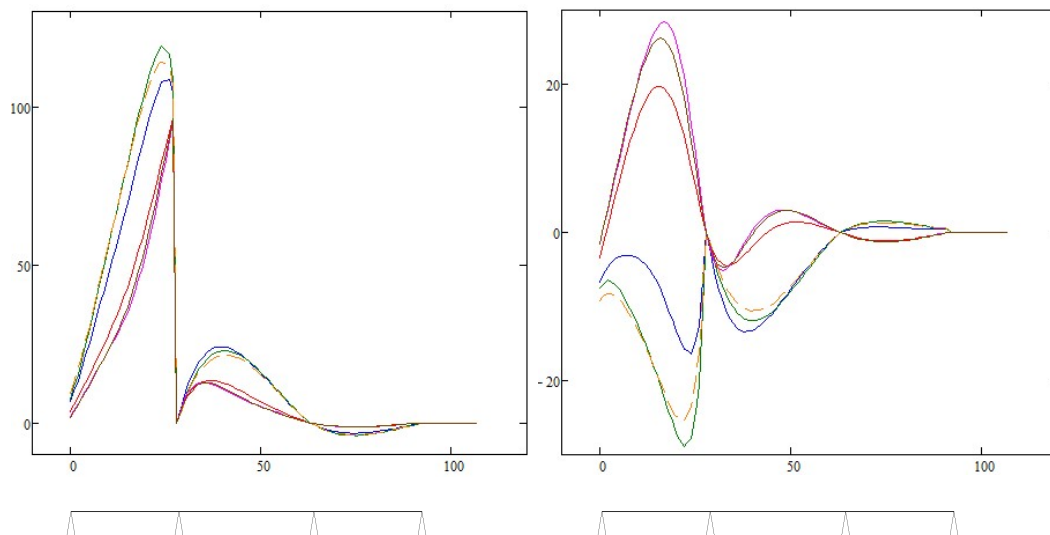
Väännön osalta huomataan edelleen samankaltaista käytöstä analyyseiden välillä. Kuvan 44 vasemmanpuoleisessa kuvaajassa positiivisella puolella oleva vääntömomentti on epäselvemmin jakautunut analyyseiden välillä, mutta silti on havaittavissa, että analyysit 1,4 ja 6 ovat lähempänä toisiaan ja analyysit 2,3 ja 5 ovat lähempänä keskenään. Oikeanpuoleisessa kuvaajassa erot ovat hyvin selkeät kahden eri analyysiryhmän välillä. Suuremman positiivisen väännön aiheuttavat siis analyysit, joissa poikkileikkaus on täysin vääntöhalkeillut. Negatiivisen ääriarvon väännölle aiheuttavat analyysit, joissa poikkileikkaus on asetettu väännön osalta täysin halkeilemattomaksi. Negatiivinen vääntömomentti on itseisarvoltaan suurempi kuin positiivinen vääntömomentti.

Tarkastelu tehtiin myös välituella, jossa leikkausvoima saa suurimman arvonsa. Lyhyemmälle sillalle välituen taivutusmomentin vaihtelu analyyseiden välillä on esitetty kuvassa 45, leikkausvoimalle kuvassa 46 ja väännölle kuvassa 47.



Kuva 45. Taivutusmomentin arvot välituella lyhyemmälle sillalle eri analyyseille. Vasemmanpuoleinen kuvaaja on kuorman puoleiselle palkille ja oikeanpuoleinen toiselle palkille.

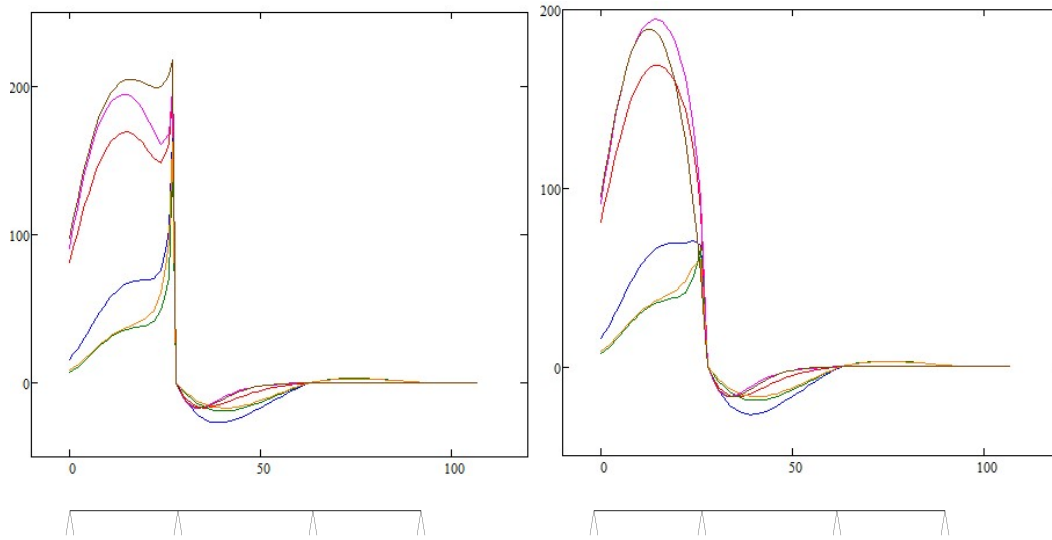
Kuvasta 45 havaitaan, että välituella taivutusmomentille arvot analyysien välillä ryhmittyvät samalla tavalla kuin kentässä. Kuorman puoleisella palkilla kaikki analyysit aiheuttavat samansuuntaista taivutusmomenttia. Kuvan 45 oikeanpuoleisesta kuvaajasta huomataan, että analyysit, joissa poikkileikkaus on asetettu vääntöjäykkyydeltä halkeilleeksi, aiheuttavat toiselle palkille eri suuntaista taivutusmomenttia.



Kuva 46. Leikkausvoiman arvot välituella lyhyemmälle sillalle eri analyyseille. Vasemmanpuoleinen kuvaaja on kuorman puoleiselle palkille ja oikeanpuoleinen toiselle palkille.

Leikkausvoimalle voidaan tehdä välituella samanlaiset havainnot kuin kentässäkin. Suurin piirtein samansuuruiset leikkausvoiman arvot aiheutuvat analyyseistä 1,4 ja 6 sekä

analyyseistä 2, 3 ja 5. Leikkausvoimalle erot ovat huomattavasti pienempiä analyysien välillä kuin taivutusmomentilla.



Kuva 47. Väännön arvot välituella lyhyemmälle sillalle eri analyyseille. Vasemmanpuoleinen kuvaaja on kuorman puoleiselle palkille ja oikeanpuoleinen toiselle palkille.

Välituella väännön arvot vaihtelevat enemmän kuin kentässä. Suurimmat arvot syntyvät analyyseillä 1,4 ja 6. Molemmille palkille suurimmat taivutusmomentit aiheutuvat analyyseistä, joissa vääntöjäykkyys on asetettu täysin halkeilemattomaksi.

Samantyyppiset tulokset saatiin myös pidemmälle sillalle. Arvojen suuruudet olivat erilaisia, johtuen siltojen erilaisesta poikkileikkauksesta ja mitoista. Kuorman puoleinen palkki käyttäytyi hyvin samalla tavalla kuin lyhyemmälläkin sillalla. Keskimmäinen palkki ja toinen reunapalkki käyttäytyivät samalla tavalla kuin lyhyemmän sillan toinen reunapalkki. Sekä kaksi- että kolmikoteloiset poikkileikkaukset jakavat rasituksia samankaltaisesti.

6.2 Taivutus- ja vääntöjäykkyyksien välisen suhteen vaikutus

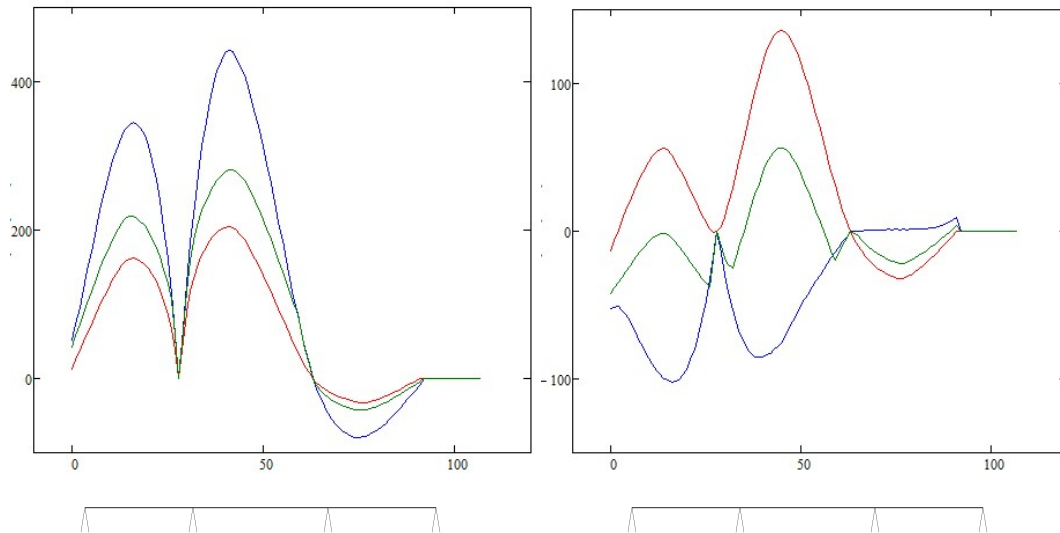
Edellisen luvun perusteella tutkitaan tarkemmin taivutus- ja vääntöjäykkyyksien suhdetta. Tutkitaan vielä kolmea erilaista analyysiä, joissa annetut jäykkyyden arvot ovat edelleen joko täysin halkeilleen tai halkeilemattoman poikkileikkauksen, mutta asetetaan sillan pituussuunnassa osa halkeilleeksi ja osa halkeilemattomaksi poikkileikkaukseksi. Laattapoikkileikkaus asetetaan kuitenkin kaikissa täysin halkeilleeksi koko sillan matkalta, koska sillä ei ollut suurta merkitystä rasitusten jakautumiseen poikkileikkauksessa.

Asetetaan myöskin taivutusjäykkyys kaikkiin analyyseihin samanlaiseksi, mutta asetetaan se vastaamaan mahdollisesti todellista tilannetta. Taivutuksesta johtuvaa halkeilua

voidaan ajatella esiintyvän kohdissa, joissa taivutusmomentti saa ääriarvonsa. Näin ollen taivutushalkeilua todennäköisimmin esiintyy tuilla ja kentässä. Asetetaan kotelopoikkileikkaus taivutusjäykkyyden osalta halkeilleeksi kentän keskeltä molempiin suuntiin sekä tuilta molempiin suuntiin tietyn matkan verran. Kentässä tuo pituus on noin 15 % jänne-
mitasta ja tuilla noin 10 % jännemitasta.

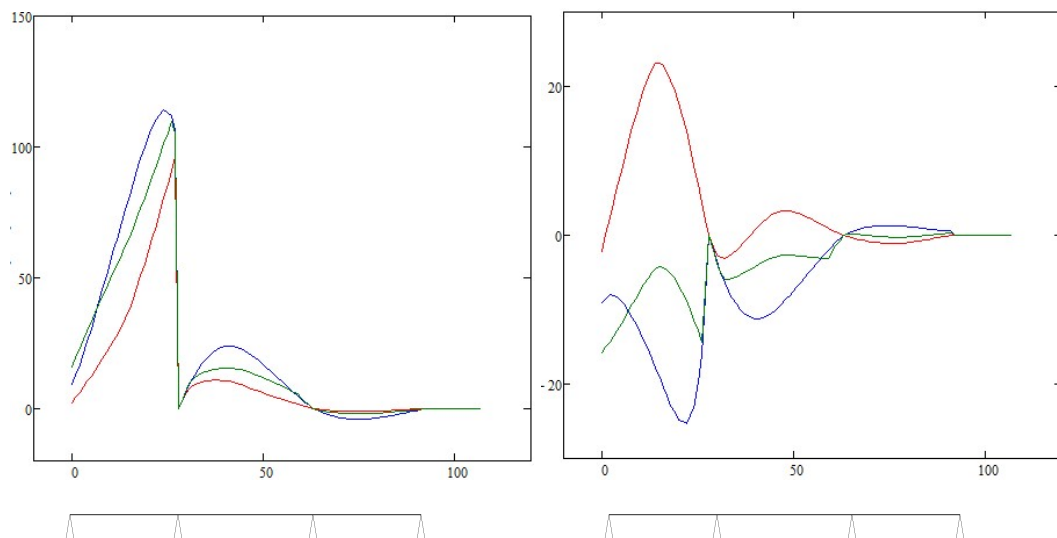
Vääntöjäykkyyden osalta kotelopoikkileikkaus asetetaan eri analyyseihin erilaiseksi. Analyysiin 7 poikkileikkaus asetetaan vääntöjäykkyyden osalta koko sillan matkalta täysin halkeilemattomaksi ja analyysissä 8 täysin halkeilleeksi. Näin saadaan vaihteluväli, jolla poikkileikkaus mahdollisesti toimii. Todennäköisesti oikea tilanne on jossain täysin halkeilleiden ja täysin halkeilemattomien poikkileikkauksen välissä. Analyysissä 9 pyritään osumaan tuohon väliin mahdollisimman todenmukaisella tilanteella ja asetetaan poikkileikkaus vääntöjäykkyyden osalta halkeilleeksi sillan pituussuunnassa sieltä, missä todellista vääntöhalkeilua mahdollisesti tapahtuu. Vääntörasitus on halkeilemattomalla poikkileikkauksella suurin tuilla, joten asetetaan poikkileikkaus vääntöjäykkyyden osalta halkeilleeksi tukien kohdalta samalta matkalta kuin taivutusjäykkyyden osalta on asetettu.

Analyysien eri rasituksista ja rasitusten jakautumisesta tehtiin samanlaiset kuvaajat kuin edeltävässäkkin luvussa tarkastelun helpottamiseksi. Kuvaajissa analyysi 6 näkyy punaisella, analyysi 7 sinisellä ja analyysi 9 vihreällä. Lyhyemmälle sillalle analyysien 7,8 ja 9 taivutusmomentin arvot on esitetty kuvassa 48, leikkausvoiman arvot kuvassa 49 ja väännön arvot kuvassa 50. Kuvaajista on nähtävissä erityisesti vääntöjäykkyyden vaikutusrasituksiin, sillä se on ainoa muuttuva asia analyysien välillä.



Kuva 48. Taivutusmomentin arvot välituella lyhyemmälle sillalle. Vasemmanpuoleinen kuvaaja on kuorman puoleiselle palkille ja oikeanpuoleinen toiselle palkille.

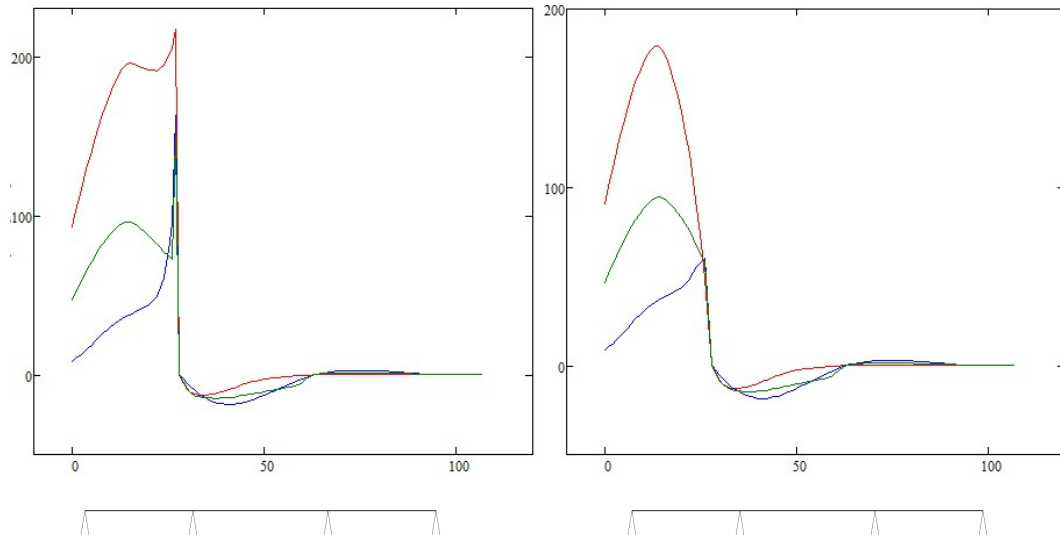
Kuvasta 48 havaitaan, että taivutusmomenttiin vääntöjäykkyys vaikuttaa selkeästi, sillä analyysien 7 ja 8 arvot eroavat suuresti toisistaan. Suurimmat taivutusmomentin arvot kuorman puoleiselle muodostuvat analyysistä 8, jossa poikkileikkaus on koko sillan matkalta vääntöhalkeillut. Tällöin poikkileikkaus ei jaa tasaisesti taivutusmomenttia molemmille palkille, vaan toiselle palkille syntyy eri suuntaista taivutusmomenttia. Analyysissä 7, missä poikkileikkaus on täysin vääntöhalkeilemätön, taivutusmomentti jakautuu tasaisesti palkkien välillä. Analyysin 9 arvot ovat selvästi lähempänä analyysiä 7.



Kuva 49. Leikkausvoiman arvot välituella lyhyemmälle sillalle. Vasemmanpuoleinen kuvaaja on kuorman puoleiselle palkille ja oikeanpuoleinen toiselle palkille.

Kuvan 49 perusteella voidaan todeta, että kuorman puoleisella palkilla vääntöjäykkyydellä ei ole suurta merkitystä, sillä analyysien arvot ovat melko lähellä toisiaan. Toisen

palkin osalta erot ovat myöskin melko pieniä, kun huomaa, että arvot vaihtelevat noin 25 kN ja -25 kN välillä. Kuvaaja on toiselle palkille skaalattu lähemmäksi, kuin kuorman puoleisella palkilla, sillä ääriarvot ovat huomattavasti pienempiä. Huomionarvoista on se, että analyysi, jossa vääntöjäykkyys on täysin halkeilematon aiheuttaa molemmille palkille samansuuntaisen leikkausvoiman ja toiset analyysit aiheuttavat erisuuntaisen leikkausvoiman toiselle palkille.



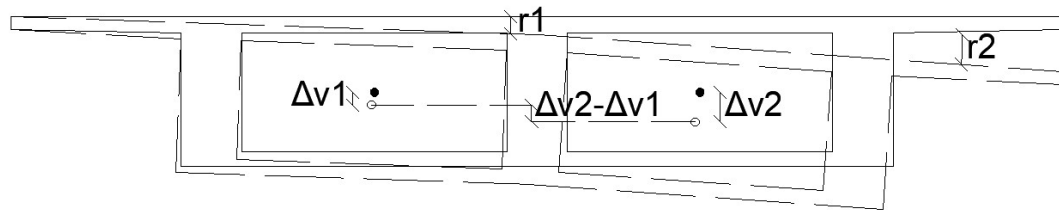
Kuva 50. Vääntöarvot välituella lyhyemmälle sillalle. Vasemmanpuoleinen kuvaaja on kuorman puoleiselle palkille ja oikeanpuoleinen toiselle palkille.

Kuvasta 50 huomataan, että vääntöjäykkyydellä on suuri vaikutus vääntörasituksen suuruuteen ja jakautumiseen poikkileikkauksessa palkkien välillä. Suurimmat vääntörasitukset kummallekin palkille aiheutuu analyysistä, jossa vääntöjäykkyys on täysin halkeilematon. Vääntöjäykkyyden ollessa halkeilematon, rakenne pystyy siirtämään rasituksia poikkileikkauksen sisällä palkilta toiselle.

Kuten kuvista 48, 49 ja 50 huomataan analyysiä 9 esittävä vihreä käyrä on kaikissa pääosin analyysijä 7 ja 8 kuvaavien punaisen ja sinisen käyrän välissä. Taivutusmomentille ja vääntölle analyysien 7 ja 8 väliset erot arvoissa ovat aika suuria. Leikkausvoimassa analyysit antavat kuorman puoleiselle palkille melko samansuuruiset arvot.

Saadut kuvaajat olivat pidemmälle ja lyhyemmälle sillalle hyvin samankaltaiset. Arvojen suuruudet vaihtelivat siltojen välillä, mutta kuvaajien muodot sekä analyysien väliset erot olivat saman suuntaisia. Pidemmälle sillalle välituen kuvaajat on esitetty liitteessä 2. Myöskin kentässä arvot olivat linjassa kuvaajien muotojen kannalta edellisen luvun kentässä saatujen kuvaajien kanssa. Analyysien väliset erot olivat linjassa tuella saatujen tulosten kanssa.

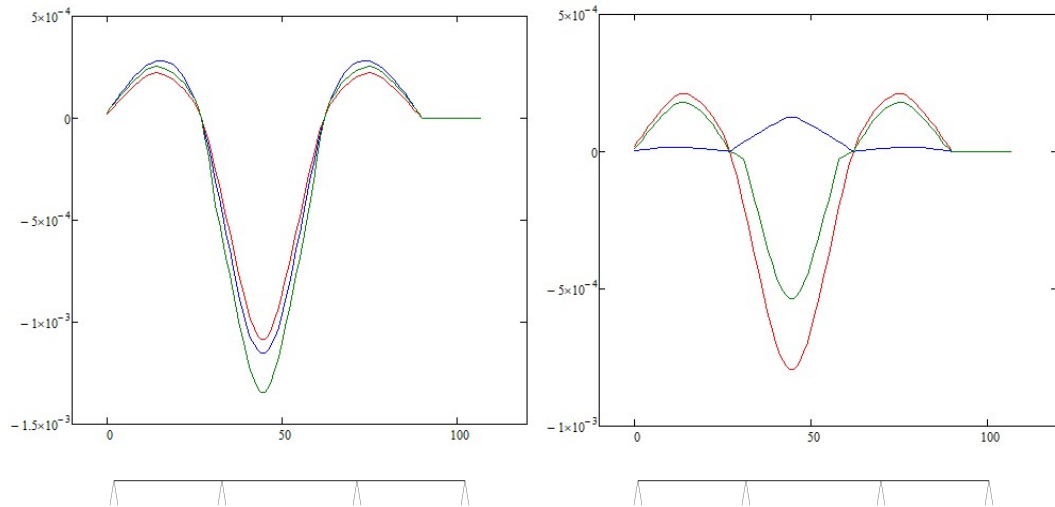
Analyyssien 7-9 aiheuttamia siirtymiä arvioitiin ja vertailtiin myös. Sisäisiä rasituksia on mahdoton nähdä koekuormitustilanteessa, mutta siirtymiä on mahdollista mitata. Tämän takia pyritään löytämään yhteys rakenteen toiminnan ja siirtymien välillä. Laskennalliset siirtymät harvemmin vastaavat rakenteiden todellisia siirtymiä, mutta jokin yhteys tai suhde on mahdollista löytää. Influenssikuorman aiheuttamia taipumia ja kiertymiä tarkasteltiin kentässä. Lisäksi tarkasteltiin palkin kiertymän ja taipuman suhdetta sekä eri palkkien taipumien suhdetta. Kuvassa 51 on havainnollistettu palkkien taipumat ja kiertymät.



Kuva 51. Palkkien taipumat ja kiertymät

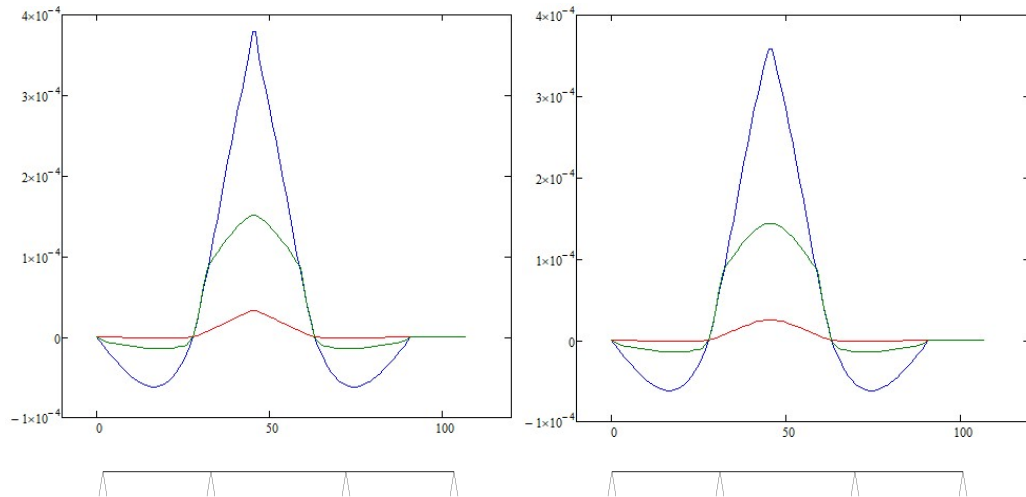
Kuvassa 51 r_1 kuvaa toisen palkin kiertymää ja r_2 kuorman puoleisen palkin kiertymää. Kuvassa on esitetty, että kuorman puoleinen palkki taipuisi selkeästi enemmän kuin toinen palkki, mutta tarkastellussa tilanteessa palkit taipuivat lähes yhtä paljon. Kuvaan on merkitty palkkien taipumat Δv_1 ja Δv_2 sekä palkkien taipumaero $\Delta v_2 - \Delta v_1$.

Kaikissa kiertymää ja taipumaa kuvaavissa kuvissa, eli kuvissa 52-55, kuorman ollessa minkä tahansa tuen kohdalla, kuvaajat saavat arvon nolla, sillä tuella ei pääse tapahtumaan taipumaa eikä kiertymää. Koska tarkasteltava kuorma on pistekuorma, se ei aiheuta tuenkohdalla ollessaan taipumaa myöskään kentässä. Kuvassa 52 on 100 kN painoisen akselin aiheuttama taipuma keskellä lyhyemmän sillan keskimmäistä jännettä ja kuvassa 53 kiertymä. Liitteessä 2 on esitetty pidemmän sillan taipumien kuvaajat.



Kuva 52. Lyhyemmän sillan taipumat keskellä keskimmäistä kenttää 100 kN painoisesta akselista. Vasemmanpuoleinen kuvaaja on kuorman puoleiselle palkille ja oikeanpuoleinen kuvaaja toiselle palkille.

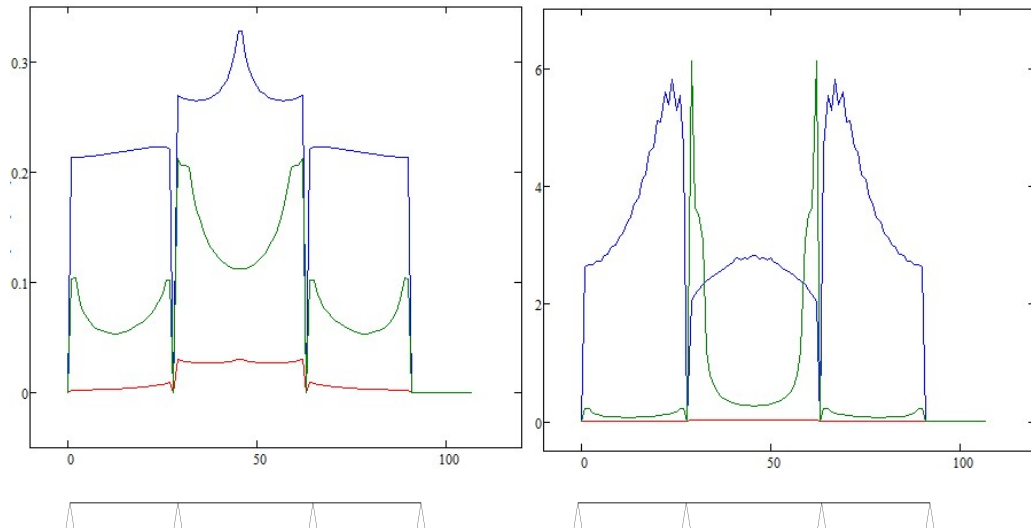
Kuvassa 52 pystyakselilla taipuman yksikkönä on metri ja arvot ovat suuruusluokkaa 10^{-3} m eli taipumat ovat millimetrin luokkaa. Taipumalle vääntöjäykkyyden muutoksella ei ole kuorman puoleiselle palkille kovin suurta merkitystä, jolle suurimman taipuman aiheuttaa analyysi, jossa vääntöjäykkyys on tukialueilta asetettu halkeilleeksi ja kentissä halkeilemattomaksi. Suurin taipuma keskellä keskimmäistä kenttää aiheutuu kuorman ollessa myös keskimmäisen kentän jännemitan puolivälissä. Kun kuorma on jommassa kummassa reunakentässä, keskikenttä taipuu hieman ylöspäin. Kuorman ollessa tuella, keskikentässä ei ole taipumaa. Kun kuvaaja verrataan keskenään, huomataan analyysien välillä eroa rasiusten siirtokyvissä, sillä täysin vääntöhalkeillut analyysi aiheuttaa toisen suuntaista taipumaa, kuin kaksi muuta analyysia. Eli periaatteessa täysin vääntöhalkeilleessa rakenteessa toinen palkki voi taipua ylöspäin, kun kuorman puoleinen palkki taipuu alaspäin. Taipuma ylöspäin on kuitenkin todella pieni, noin 0,2 mm.



Kuva 53. Lyhyemmän sillan kiertymät keskellä keskimmäistä kenttää 100 kN painoisesta akselistä. Vasemmanpuoleinen kuvaaja on kuorman puoleiselle palkille ja oikeanpuoleinen kuvaaja toiselle palkille.

Kiertymät ovat kuvaajissa esitetty radiaaneina. Vääntöjäykkyydellä on suuri merkitys kiertymän kannalta, kuten kuvasta 53 huomataan. Kun vääntöjäykkyys on täysin halkeilematon koko sillan mitalta, kiertymät ovat todella pieniä verrattuna tilanteeseen, jossa vääntöjäykkyys on täysin halkeillut koko sillan mitalta. Kiertymät ovat kummallekin palkille lähes samansuuruiset, mikä kertoo siitä, että vaikka palkkien vääntöjäykkyydet ovat heikot, ne toimivat kuitenkin yhtenä poikkileikkauksena eivätkä kahtena täysin erillisenä palkkina.

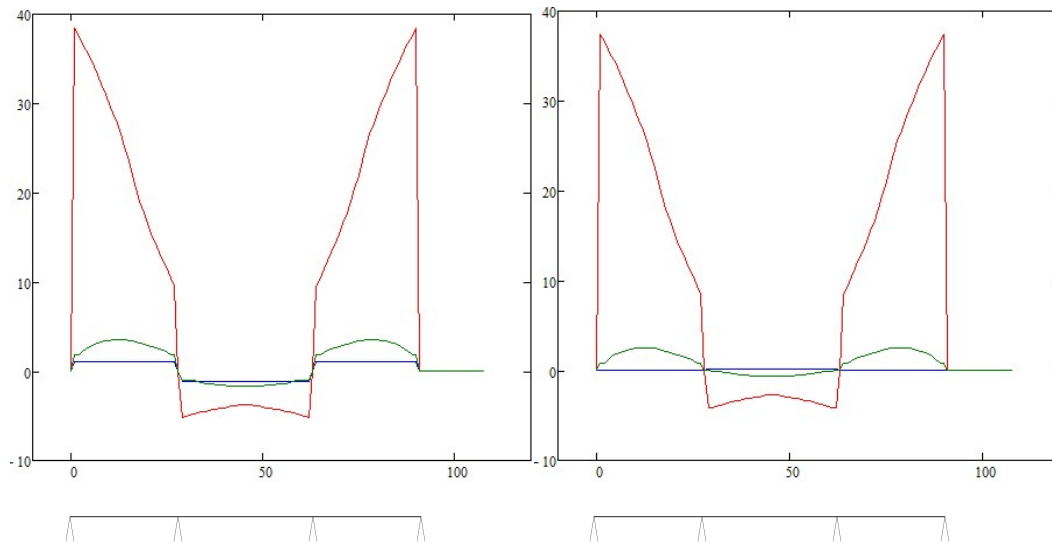
Kiertymän ja taipuman suhteen avulla voidaan pohtia rakenteen toimintaa. Kuvassa 54 on esitetty kiertymän suhde taipumaan lyhyemmän sillan keskikentän keskellä. Yksikkönä suhteella on 1/m ja se on kuvaajissa pystyakselilla. Vaaka-akselilla sillan pituus-suunnassa kohta metreinä, jossa 100 kN akseli on. Kuvassa 55 on esitetty palkin taipuman suhdetta palkkien taipumaeroon.



Kuva 54. Lyhyemmän sillan kiertymän suhde taipumaan keskellä keskimmäistä kenttää 100 kN painoisesta akselista. Vasemmanpuoleinen kuvaaja on kuorman puoleiselle palkille ja oikeanpuoleinen kuvaaja toiselle palkille.

Kuvasta 54 huomataan, että kiertymän ja taipuman suhteet ovat eri suuruisia eri analyyseille. Kiertymän ja taipuman suhde muuttuu eri tavalla eri analyyseissä kuorman liikkuessa sillan pituussuunnasta, kuten kuvaajien erilaisista muodoista huomataan. Kaikki kuvaajat käyvät nollassa, kuorman ollessa tuen kohdalla, sillä kiertymää tai taipumaa ei tuella ole. Pienet kiertymäerot palkkien välillä voivat johtua esimerkiksi arinamallin käyttäytymisestä ja mallinnuksen tarkkuudesta.

Analyysi 7 aiheuttaa kaikista pienimmän suhteen kiertymälle ja taipumalle. Suhde on hyvin lähellä nollassa, eli kiertymää tapahtuu melko vähän suhteessa taipumaan. Suurin kiertymän suhde taipumaan syntyy analyyseissä 8. Kuorman puoleiselle palkille kiertymän suhde taipumaan on suurimmillaan, kun kuorma on keskimmäisessä kentässä ja suhteen arvoksi tulee noin 0,33. Toisella palkilla arvot ovat huomattavasti suurempia, sillä kiertymä on molemmille palkeille lähes samansuuruinen, mutta taipuma on huomattavasti pienempi varsinkin analyyseissä 8.



Kuva 55. Lyhyemmän sillan palkin taipuman suhde palkkien taipumaeroon keskellä keskimmäistä kenttää 100 kN painoisesta akselista. Vasemmanpuoleinen kuvaaja on kuorman puoleiselle palkille ja oikeapuoleinen kuvaaja toiselle palkille.

Kuvasta 55 havaitaan, että molemmille palkeille palkin taipuman ja palkkien taipumaeron kuvaajat ovat hyvin samanlaiset ja suhteet lähes samansuuruisia. Kuorman ollessa reuna-akselissa, kuvaajien arvot ovat suuremmat kuin kuorman ollessa keskimmaisessä kentässä. Suuremmat arvot taipuman ja taipumaeron suhteelle johtuvat siitä, että taipumaero palkkien välillä on todella pieni. Suurimmat suhdeluvut näkyvät punaisella käyrällä, joka kuvaa analyysiä, jossa palkkien vääntöjäykkyys on asetettu täysin halkeilemattomaksi. Punaisesta käyrästä havaitaan myös, että mitä lähempänä kuorma on maatukia, sitä suuremman arvon tarkasteltava suhde saa eli sitä pienempi palkkien välinen taipumaero on.

Sinisellä käyrällä kuvatussa analyysissä, jossa palkkien vääntöjäykkyys on täysin halkeillut, taipuman ja taipumaeron suhde on hyvin lähellä nollaa molemmille palkeille. Tämä johtuu siitä, että taipumaero palkkien välillä on suuri, mikä havaitaan myös pelkkiä taipumia kuvaavista kuvaajista kuvasta 52.

Kuvaajien mukaiset taipumien ja kiertymien erot aiheutuvat pelkästään jäykkyysien muutoksista, sillä kuorma on kaikissa täysin sama. Analyysit käyttäytyvät samalla tavalla rasituksissa ja siirtymissä, eli täysin halkeillut vääntöjäykkyys ja täysin halkeilematon vääntöjäykkyys aiheuttavat ääriarvot. Useissa kuvaajissa ero analyysien 7 ja 8 välillä on suuri, kuten esimerkiksi kiertymässä, ja joissakin ero on pieni, kuten esimerkiksi taipumassa.

Palkkien välinen ero arvoissa eri analyyseillä kertoo rakenteen toiminnasta ja rasiusten siirtokyvystä. Usein halkeilemattomalla vääntöjäykkyydellä palkkien arvot ovat lähempänä toisiaan, eli rakenne jakaa kuormia ja rasituksia tasaisemmin rakenteen sisällä. Vääntöjäykkyyden ollessa halkeillut, palkeille voi aiheuta eri suuntaisia rasituksia, ja erot palkkien välillä ovat suurempia.

Kaikista yllä esitetyistä taipumaan ja siirtymään liittyvistä kuvista on havaittavissa samoja asioita. Kotelopoikkileikkaus toimii yhtenäisenä kappaleena, ja suurimmat taipumat ja kiertymät aiheutuvat keskikentässä silloin kun kuorma on keskikentässä. Taipumaa tapahtuu enemmän kuorman puoleisella kotelolla, mutta koko poikkileikkaus kiertyy lähes saman verran. Mikäli todellisella sillalla mittauksia tehdessä huomattaisiin kiertymän olevan merkittävästi erisuuruinen eri kotelolla, se kertoisi, että kotelopoikkileikkaus ei toimi enää yhtenä palkkina, vaan jokainen kotelo toimisi omanaan.

6.3 Valituilla yhdistelmällä kuormittaminen

Sillat kuormitetaan lopuksi 91 tonnin hakeyhdistelmällä, AA13/76 ajoneuvolla sekä 4,5 kN/m² suuruisella pintakuormalla. Tarkastellaan vertailun vuoksi myös metsäauto 84 D aiheuttamia rasituksia tarkemmin. Hakeyhdistelmän akselijaot ja -painot on esitetty tarkemmin liitteessä A. HCT-yhdistelmät sijoitetaan kaistalle yksi ja pintakuorma sekä AA13/76 kaistalle kaksi, kuten aikaisemmin luvussa 4.4.2 kerrotaan. Siltojen poikkileikkausarvot ovat analyysin 9 mukaiset, eli palkkien taivutusjäykkyys on asetettu halkeilleeksi kentistä ja tukialueilta, ja vääntöjäykkyys on asetettu halkeilleeksi välituiltä. Taulukossa 12 on esitetty molemmille tarkastelluille silloille taivutusmomentti ja leikkausvoiman ja vääntömomentin suurimmat arvot välituella. Rasitukset on eritelty ensin kuorman mukaan ja lopuksi esitetty myös kokonaisrasitus. Rasitukset ovat koko sillalle välituen kohdalta. Taulukkoon 13 on koottu kuormitusten aiheuttamat taipumat keskikentässä siltojen eri palkeille.

Taulukko 12. Rasiukset silloille 91 tai 84 tonnin HCT-yhdistelmästä, AA13/76 kuormakaaviosta ja 4,5 kN/m² suuruisesta pintakuormasta. Taivutus- ja vääntömomentit yksikössä kNm ja leikkausvoimat yksikössä kN.

Välituella	Lyhyempi, kaksikoteloinen silta			Pidempi, kolmikoteloinen silta		
	Taivutusmomentti	Leikkausvoima	Vääntömomentti	Taivutusmomentti	Leikkausvoima	Vääntömomentti
HCT-yhdistelmä 91 t	2226	564	1084	3626	736	514
HCT-yhdistelmä 84 t	2172	538	1051	3444	706	483
4,5 kN / m ² pintakuorma	1340	269	400	2515	360	161
A13/76	2111	563	1184	3369	744	449
Yhteensä (91t)	5677	1396	2668	9510	1840	989
Yhteensä (84t)	5623	1370	2635	9328	1810	1093

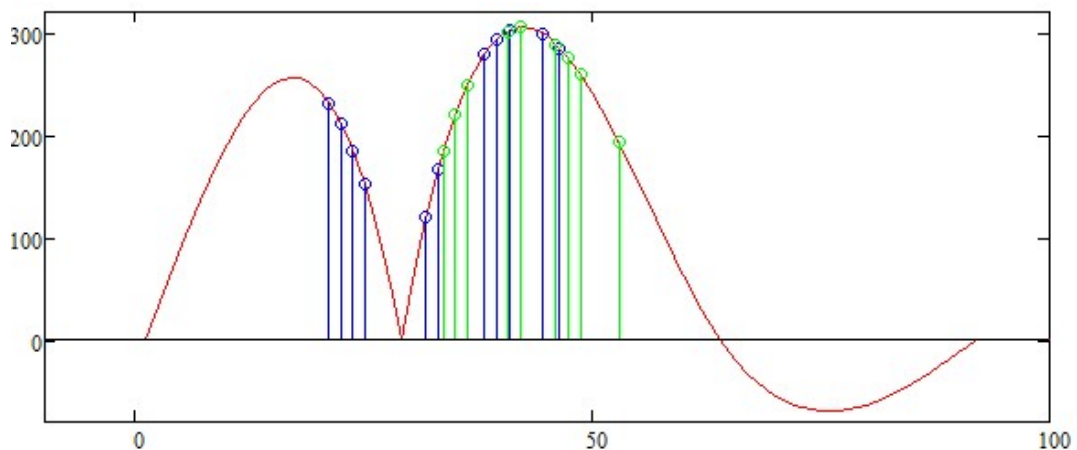
Kuten taulukon 12 arvoista havaitaan, suurimmat rasiukset aiheutuvat ajoneuvoyhdistelmistä. Yhdistettynä rasiukset kasvavat melko suuriksi. Tarkastellussa tilanteessa sillan kuormitukset aiheutuvat siis kaistalla 1 ajavasta 91 tonnin painoisesta HCT-yhdistelmästä ja kaistalla 2 ajavasta 76 tonnin yhdistelmästä sekä muuta liikennettä kuvaavasta pintakuormasta, joka on samalla kaistalla 76 tonnin ajoneuvon kanssa. Kantavuustarkasteluja tehdessä on tarkasteltava useampi tilanne, sillä vaikka silta kestäisi yksittäisenä HCT-yhdistelmän painon, se ei välttämättä kestä HCT-yhdistelmää muun liikenteen kanssa samaan aikaan.

Taulukko 13. Taipumat siltojen palkeille 91 tai 84 tonnin HCT-yhdistelmästä, AA13/76 kuormakaaviosta ja 4,5 kN/m² suuruisesta pintakuormasta. Taipuman yksikkönä on metri.

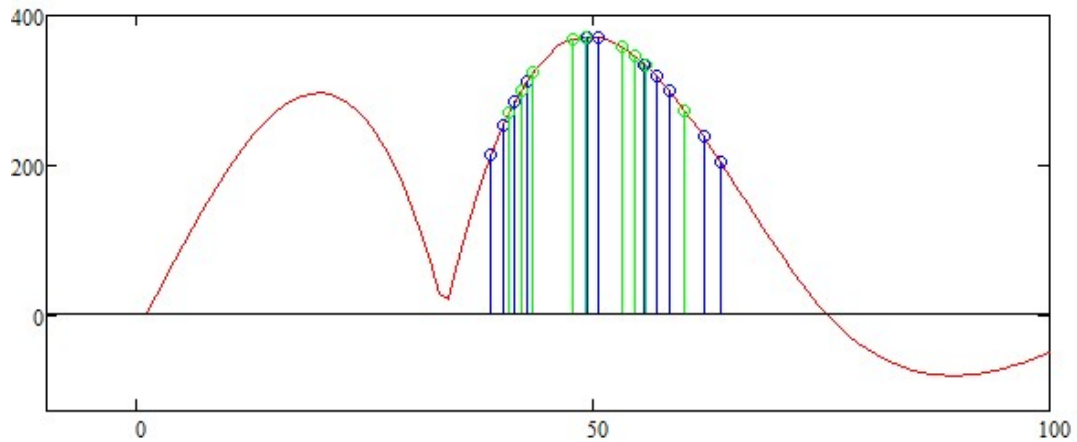
Kentässä	Lyhyempi, kaksikoteloinen silta		Pidempi, kolmikoteloinen silta		
	Kaistan 1 puoleinen palkki	Kaistan 2 puoleinen palkki	Kaistan 1 puoleinen palkki	Keskimmäinen palkki	Kaistan 2 puoleinen palkki
HCT-yhdistelmä 91 t	0,0085	0,0028	0,0086	0,0080	0,0075
HCT-yhdistelmä 84 t	0,0084	0,0029	0,0083	0,0078	0,0073
4,5 kN / m ² pintakuorma	0,0003	0,0026	0,0006	0,00087	0,0011
A13/76	0,0028	0,0083	0,0069	0,0075	0,0080
Yhteensä (91t)	0,0116	0,0137	0,0161	0,0164	0,0166
Yhteensä (84t)	0,0115	0,0138	0,0158	0,0162	0,0164

Taulukon 13 taipumat ovat siltojen keskikentän keskellä olevan pisteen taipumat kuormista. Taipumien arvot eivät yksittäisinä arvoina tarkasteltuna eroa toisistaan kovin paljoa, mutta eroja voi olla esimerkiksi siinä, kuinka pitkältä matkalta palkit ovat taipuneet ja kuinka paljon. Tarkasteltavan kuormituksen osalta taipumaa tapahtuu luonnollisesti enemmän palkilla, jonka päällä kuorma sijaitsee. Palkkien kokonaistaipumaista huomataan, että pidempi kolmikoteloinen silta ei juuri kierry keskikentästä kyseisillä kuormituksilla, kuormitusten ollessa sillan kannella siten, että ne aiheuttavat suurimmat taipumat.

Erot painavamman HCT-yhdistelmän ja AA13/76 ajoneuvon aiheuttamissa rasituksissa ovat aika pieniä. Myös kahden eri HCT-yhdistelmien väliset erot ovat pieniä. Yksi syy tähän on se, että HCT-yhdistelmät ovat usein huomattavasti pidempiä, jolloin kuorma jakaantuu pidemmälle matkalle. Pidemmässä ajoneuvoyhdistelmässä on myös enemmän akseleita, jolloin akselimassat voivat olla alhaisempia. Jos yhdistelmä ei esimerkiksi mahdu kokonaan kenttään, osa yhdistelmän akseleista voi aiheuttaa jo helpottavan suuntaista rasitusta. Pidemmällä yhdistelmällä etu- ja takapäin akselit voivat olla niin kaukana toisistaan, että akselien kuormitukset jakautuvat tasaisemmin kahdelle eri tuelle. Lyhyemmällä yhdistelmällä kuorma saattaa kohdistua suuremmilta osin yhdelle tuelle. Taivutusmomentin osalta kuvassa 56 havainnollistetaan syytä tarkemmin vaikutusviivan avulla ja kuvassa 57 pidemmälle sillalle. Kuvassa 58 on leikkausvoiman vaikutusviiva lyhyemmälle sillalle ja kuvassa 59 pidemmälle sillalle. Väännön vaikutusviiva lyhyemmälle sillalle on kuvassa 60 ja pidemmälle sillalle kuvassa 61. Kuvissa on esitetty vaikutusviiva punaisella ja lisäksi AA13/76 ajoneuvon akselit vihreällä ja hakeyhdistelmän 91 H akselit sinisellä.

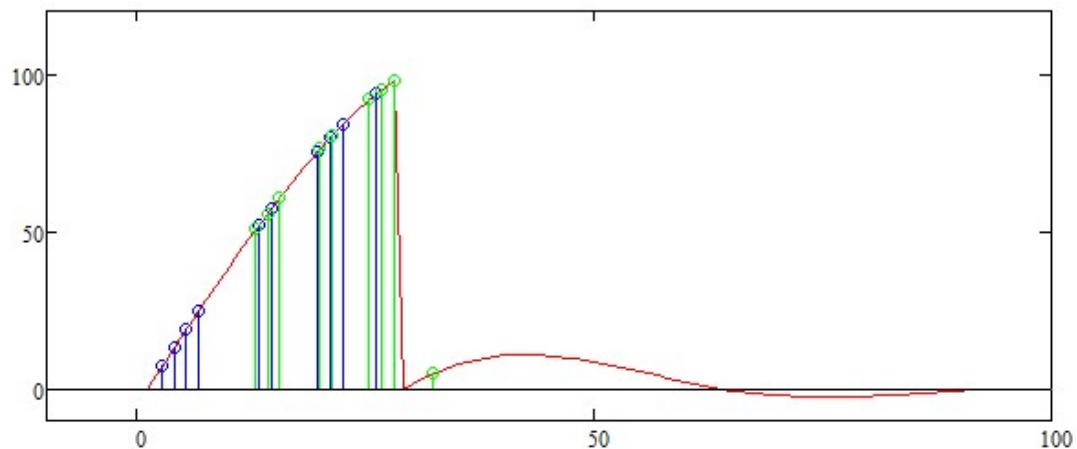


Kuva 56. Taivutusmomentin vaikutusviiva lyhyemmälle sillalle. Kuvassa vihreällä AA13/76 akselit ja sinisellä HCT-yhdistelmän 91 H akselit.

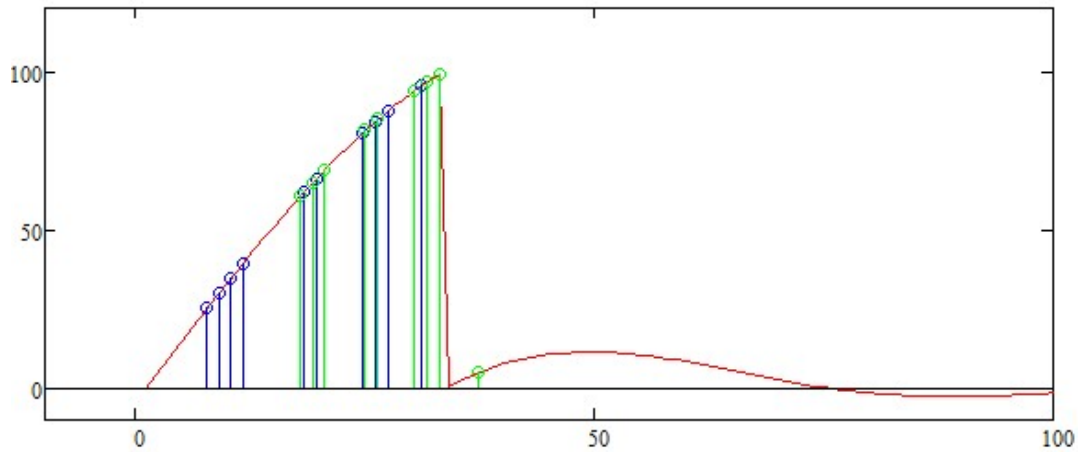


Kuva 57. Taivutusmomentin vaikutusviiva pidemmälle sillalle. Kuvassa vihreällä AA13/76 akselit ja sinisellä HCT-yhdistelmän 91 H akselit.

Kuvista 56 ja 57 havaitaan, että HCT-yhdistelmä on huomattavasti pidempi kuin AA13/76 ajoneuvo. Pidempi yhdistelmä jakautuu pidemmälle matkalle. Kuvaajissa ei näy akselien eri painoista aiheutuvia eroja, sillä vaikutusviiva on tehty 100 kN akselilla. Tarkasteltavalla HCT-yhdistelmällä painavammat akselit sijoittuvat silloilla paremmin sellaisiin kohtiin, että ne aiheuttavat vaikutusviivan mukaan pienempää taivutusmomenttia, kun 76 t yhdistelmällä ne sijoittuvat vaikutusviivan huippujen läheisyyteen.

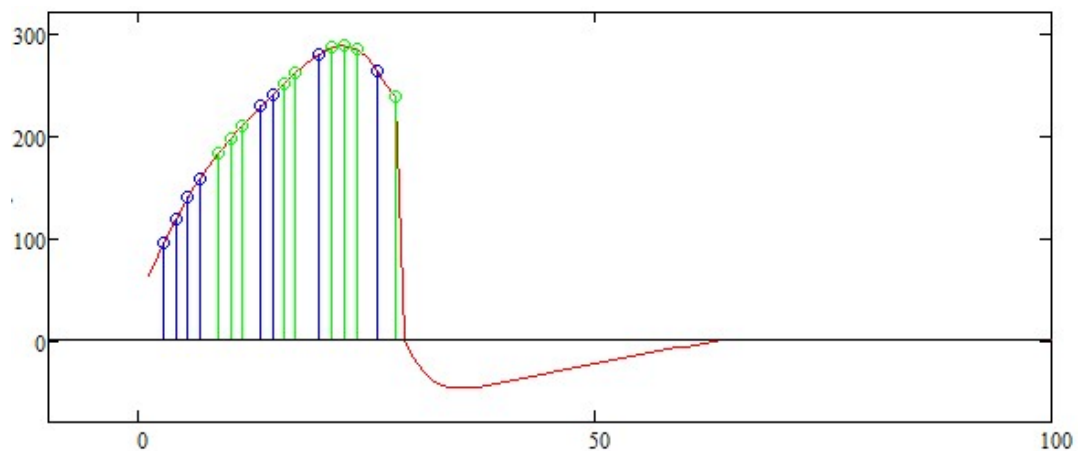


Kuva 58. Leikkausvoiman vaikutusviiva lyhyemmälle sillalle. Kuvassa vihreällä AA13/76 akselit ja sinisellä HCT-yhdistelmän 91 H akselit

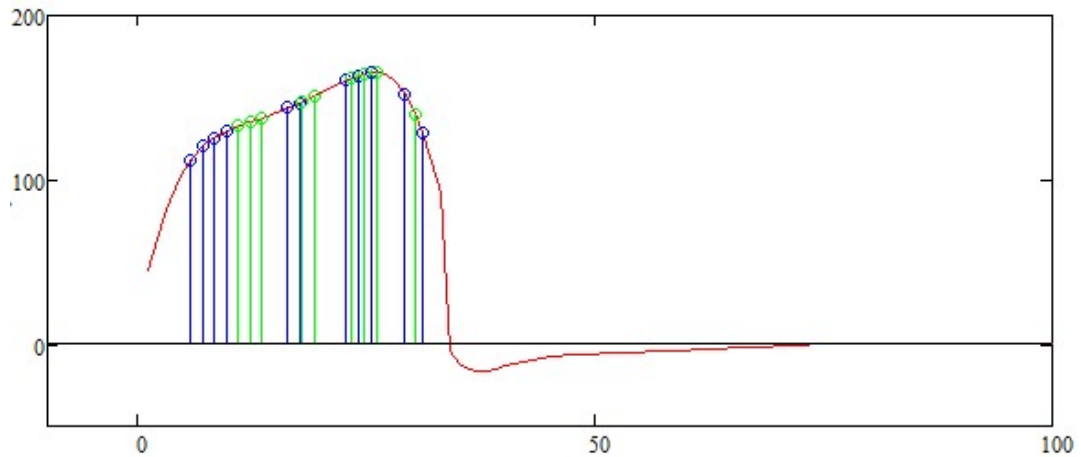


Kuva 59. Leikkausvoiman vaikutusviiva pidemmälle sillalle. Kuvassa vihreällä AA13/76 akselit ja sinisellä HCT-yhdistelmän 91 H akselit

Leikkausvoiman osalta yhdistelmän pituudella on paljon vaikutusta. Kuten kuvista 58 ja 59 huomataan HCT-yhdistelmän takimmaisista akselista, että ne aiheuttavat vain vähän leikkausvoimaa välituelle. Akselit ovat lähempänä maatuokea, jolloin osa kuormista kohdistuu maatuille. Hakeyhdistelmällä 91 H kaksi painavinta akselia osuvat välituen leikkausvoiman vaikutusviivan matalampaan osioon. Tämän takia leikkausvoimat eivät ole merkittävästi suuremmat kuin 76 t yhdistelmällä.



Kuva 60. Väännön vaikutusviiva lyhyemmälle sillalle. Kuvassa vihreällä AA13/76 akselit ja sinisellä HCT-yhdistelmän 91 H akselit



Kuva 61. Väännön vaikutusviiva pidemmälle sillalle. Kuvassa vihreällä AA13/76 akselit ja sinisellä HCT-yhdistelmän 91 H akselit

Kuvasta 60 huomataan, että AA13/76 akselit osuvat vaikutusviivan korkeimpaan kohtaan. Kolmesta vaikutusviivan akselista kaksi on yhdistelmän painavimmat akselit. Pidemmän sillan osalta vaikutusviiva on tasaisempi ja molempien yhdistelmien akseleita on vaikutusviivan korkeimmalla kohdalla. Pidemmän sillan osalta enemmän vaikuttaakin akselien painot, sillä AA13/76 painavimmat akselit ovat vaikutusviivan korkeimmalla kohdalla, kun taas hakeyhdistelmällä painavimmat akselit ovat vaikutusviivan matalammalla osuudella.

7. YHTEENVETO

Työssä tutkittiin teräsbetonisten kotelopalkkisiltojen rakenteellista toimintaa sekä HCT-yhdistelmien aiheuttamia rasituksia silloille. Työssä tarkasteltiin metsäsektorin HCT yhdistelmiä ja reittejä. Rajaus kohdistui erityisesti puutavaran ja hakkeen kuljettamiseen. Työssä ei tehty kantavuustarkasteluja yksittäisille silloille.

7.1 Yleistä

Suomessa on useita, kymmeniä vuosia vanhoja siltoja, jotka on suunniteltu nykyistä pienemmälle liikennekuormalle. Haasteita aiheuttaa yleisesti kasvaneet liikennekuormat, mutta myös yksittäiset suuremmat ajoneuvoyhdistelmät. Tällä hetkellä laki sallii 76 t suuruisen ajoneuvoyhdistelmän liikenteessä. Erikoiskuljetukset ja työssä tarkastellut poikkeusluvalla liikennöivät HCT-yhdistelmät ovat massaltaan tätä suurempia.

Suomessa on kokeiluvilla ajettu HCT-yhdistelmillä vuodesta 2013 lähtien. Yhdistelmien käytön hyötyjä ja haittoja on tutkittu viime vuosina paljon teiden kannalta, mutta siltojen kannalta tutkimusta ei vielä ole tehty. Siltojen kannalta suuremman kokonaisuuden lisäksi merkittäviä ominaisuuksia HCT-yhdistelmissä ovat yhdistelmän kokonaispituus sekä akselipainot- ja välit. Akselipainot eivät suurimmassa osassa yhdistelmistä ylitä lain sallimia akselipainoja. Myös yhdistelmien pituudet ovat pääosin uuden tieliikennelain myötä sallittuja, sillä ajoneuvoyhdistelmän suurinta sallittua pituutta nostettiin. Nykyään ajoneuvoyhdistelmän suurin sallittu pituus on 34,5 m.

Työssä keskityttiin jatkuviin teräsbetonisiin kotelopalkkisiltoihin. Niiden toiminnasta on Suomessa tehty jonkin verran tutkimusta, ja niitä on melko paljon Suomen tieverkolla. Teräsbetonisia kotelopalkkisiltoja alettiin kehittämään ja rakentamaan 1950-luvulla, kun tarvittiin pidemmän jännemitan siltoja ja liikennekuormat kasvoivat. Kotelopoikkileikkaus mahdollistaa pienemmät materiaalmäärät kuin esimerkiksi laattapalkkisilta. Yksi teräsbetonisten kotelopalkkisiltojen haaste on, että niiden rakentaminen on työlästä koteloa jäykistävien poikkiseinien takia. Pitkäjänteisille teräsbetonisille silloille haasteita aiheuttavat myös pitkäaikaismuodonmuutoksista, kuten kutistumisesta ja virumisesta, aiheutuvat halkeamat ja taipumat.

7.2 Tulokset

Työssä tutkittiin kahta asiaa tarkemmin. Ensin keskityttiin HCT-yhdistelmiin ja niiden aiheuttamiin rasituksiin. Sen jälkeen tarkasteltiin teräsbetonisen kotelopalkkisillan rakenteellista toimintaa. Molempien tarkastelussa hyödynnettiin olemassa olevaa kirjallista tietoa, sekä numeerista laskentaa rakennemallien avulla.

Rakennemallit tehtiin kahdesta erilaisesta teräsbetonisesta kotelopalkkisillasta. Toinen oli lyhyempi ja kaksikoteloinen, ja toinen oli pidempi ja kolmikoteloinen. Siltoja tarkasteltiin palkkimaisen arinamallin avulla.

7.2.1 HCT-yhdistelmien muodostamat rasitukset

HCT-yhdistelmien aiheuttamia rasituksia tutkittiin vaikutusviivojen avulla. Vaikutusviivat tehtiin kahdelle eri pituiselle kotelopalkkisillalle välituelta sekä kentästä. Työssä tarkasteltiin vaikutusviivojen avulla useampaa eri painoista ja pituista HCT-yhdistelmää, joita metsäteollisuudella on ollut käytössä. Rasituksista tarkasteltiin taivutusmomenttia, leikkausvoimaa sekä vääntöä. Lisäksi tarkempaan tarkasteluun otettiin hakeyhdistelmä 91 ja metsäauto 84 D, jotka mallinnettiin ja kuljetettiin 1 m jakovälillä siltojen rakennemallien yli. Näiden kahden ajoneuvoyhdistelmän osalta tarkasteltiin taivutusmomentin, leikkausvoiman ja väännön lisäksi myös palkkien taipumia ja kiertymiä.

Vaikutusviivojen avulla tehtyjen tarkastelujen perusteella huomattiin, etteivät rasitukset nousseet samassa suhteessa massan kasvun kanssa. Pääosin painavammat yhdistelmät aiheuttivat suurempia rasituksia kuin pienempi massaiset, mutta erot olivat joissakin tilanteissa hyvin pieniä. Tämä selittyy osin sillä, että painavammissa yhdistelmissä on useampia akseleita, eikä akselimassat kasva juurikaan eri yhdistelmien välillä. Painavammat yhdistelmät ovat myös selvästi pidempiä. Pidemmissä ja painavammissa yhdistelmissä paino jakautuu pidemmälle matkalle, jolloin rasitukset eivät kohdistu niin voimakkaasti yhteen pisteeseen. Yhdistelmän pituus voi olla suurempi kuin sillan jänneväli, jolloin koko yhdistelmä ei mahdu kokonaan sillan kenttään.

Toinen selittävä tekijä on painavien akselien sijainti yhdistelmässä. Kun verrattiin 91 tonnin hakeyhdistelmän ja AA13/76 kuormakaavion akselien sijaintia vaikutusviivojen avulla, huomattiin akselien erilainen jakautuminen vaikutusviivoilla. Pitkällä yhdistelmällä akselit jakautuivat tasaisemmin myös vaikutusviivan alhaisempiin kohtiin. Molemmilla akselit osuvat myös vaikutusviivojen huippuja. Tarkastellulla hakeyhdistelmällä painavimmat akselit osuvat vaikutusviivojen alempiin kohtiin, kun AA13/76 kuormakaavion painavimmat akselit osuvat vaikutusviivojen huippuihin. Sillan rasitusten kannalta on parempi, kun painavimmat akselit ovat perävaunun takaosassa.

Erot tarkasteltujen yhdistelmien ja AA13/76 kuormakaavion aiheuttamien rasitusten välillä olivat merkittäviä. Useissa tilanteissa rasitukset ovat 10 % suuremmat kuin AA13/76 kaavion aiheuttamat rasitukset. Tämä on ongelma, mikäli sillan kantavuudesta on lähes kaikki käytössä jo ajoneuvoasetuksen mukaiselle kuormakaavioille.

7.2.2 Rakenteellinen toiminta

Rakenteen toimintaa tarkasteltiin muuttamalla taivutus- ja vääntölujuuksia rakennemallin eri osille. Näin tarkasteltiin, kuinka rasitukset jakautuvat palkkien välillä eri tilanteissa. Aluksi tarkasteltiin kuutta eri analyysia, joissa eri taivutus- ja vääntölujuuden arvot annettiin samanlaisina koko sillan pituudelle. Tarkasteluissa oletettiin poikkileikkaus taivutus- ja vääntölujuuksien osalta joko täysin halkeilemattomaksi tai täysin halkeilleeksi.

Tarkasteluissa huomattiin, että arinasauvojen lujuusominaisuuksilla ei ollut suurta merkitystä rasitusten jakautumisen. Pääpalkkien taivutus- ja vääntölujuuksilla oli suuri merkitys, jonka takia niille tehtiin tarkemmat tarkastelut. Tehtiin kolme tarkastelua, joissa kaikissa poikkitaissauvojen lujuusominaisuudet asetettiin täysin halkeilleet, pääpalkkien taivutuslujuus asetettiin kenttien keskialueelta sekä tukialueelta halkeilleeksi ja muuten halkeilemattomaksi ja vääntölujuutta muutettiin. Yhdessä analyysissä pääpalkkien vääntölujuus asetettiin koko sillan matkalta halkeilemattomaksi, toisessa täysin halkeilleeksi ja kolmannessa analyysissä vääntölujuus asetettiin halkeilleeksi tukialueilta ja muuten halkeilemattomaksi.

Analyysien välillä oli melko suuriakin eroja rasituksissa. Joissakin tapauksissa toiselle palkille tuleva rasitus oli eri merkkistä eri rasitusten välillä. Kaikissa tapauksissa rasituksia syntyy kaikille palkeille, eli kotelopoikkileikkaus toimii yhtenäisenä rakenteena, vaikka lujuusominaisuudet olisivatkin heikentyneet. Pääosin rasitusten ääriarvot syntyivät analyysistä, joissa lujuudet olivat, joko täysin halkeilemattomia tai täysin halkeilleita. Erot analyysien välillä ovat suurimpia taivutusmomentissa, missä ero oli suurimmillaan lähes 50 %. Leikkausvoiman ja väännön osalta erot olivat suurimmillaan noin 20 % luokkaa. Analyysi, jossa poikkileikkaus on asetettu taivutuslujuuden osalta halkeilleeksi tukialueilta ja keskikentästä ja vääntölujuuden osalta halkeilleeksi tukialueilta, osuu pääosin kahden muun analyysin väliin. Tämä lujuustilanne vastaa todennäköisesti parhaiten siltojen todellista tilannetta. Silloissa taipumahalkeilua tapahtuu usein tuilla sekä kenttien keskellä.

Lyhyemmän ja pidemmän sillan välillä erot olivat arvojen suuruuksissa. Kuvaajat olivat pääosin samanmuotoisia eli rakenteellinen toiminta on silloilla samanlaista. Kolmikote-loisessa sillassa kuormat välittyivät kaikille palkeille. Molemmissa silloissa kuorman puo-

leiselle palkille syntyvät rasitukset olivat keskenään samankaltaiset, mutta erilaiset verrattuna muihin saman sillan palkkeihin. Kaksikoteloisen toiselle reunapalkille ja kolmikoteloisen keskimmaiselle ja toiselle reunapalkille syntyi keskenään samankaltaisia rasituksia.

7.3 Jatkotoimenpiteet

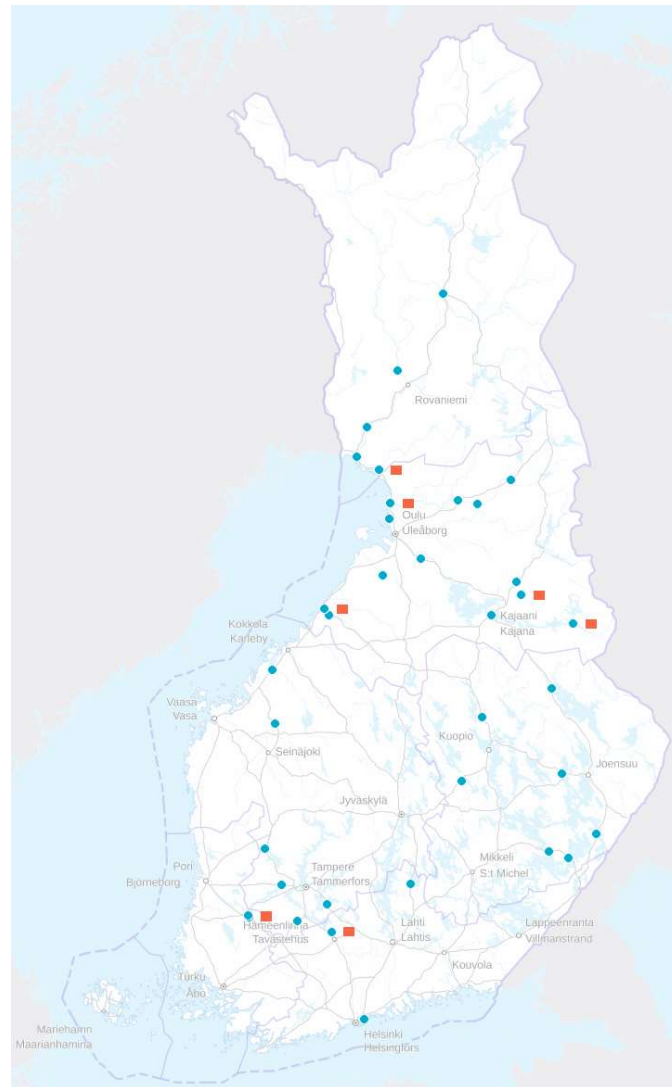
Työssä tarkastellaan metsäteollisuuden HCT-reiteillä olevia teräsbetonisia kotelopalkkisilloja. Osa näistä silloista on jo vahvennettu jälkijännittämällä. Työssä tarkasteltiin eri HCT-yhdistelmien rasituksia vaikutusviivojen avulla. Näin vertailtiin eri yhdistelmiä siltojen kannalta ja pyritti löytämään mielenkiintoisimmat ajoneuvoyhdistelmät koekuormituksia ajatellen.

Jatkotoimenpiteenä ehdotetaan koekuormituksia, joiden avulla saadaan paremmin tietoa siltojen kantavuudesta. Koekuormitusten suunnittelu ja toteutus ei kuulu diplomityöhön. Koekuormitusten avulla saadaan tarkempaa tietoa siltojen todellisesta kantavuudesta, jolloin on parempi arvioida siltojen kestävyyttä HCT-yhdistelmien kannalta.

7.3.1 HCT-reiteillä olevat sillat, joista valitaan koekuormitettavat

Tarkasteltavilla reiteillä on erilaisia teräsbetonisia koteloalkkisilloja. Kaikki 37 siltaa on kerätty taulukkoon 14 ja niiden sijainnit Suomessa on esitetty kuvassa 62. Mahdollisesti tuleviin koekuormituksiin valitaan sillat tästä joukosta. Tarkkaa lukumäärää koekuormituksille ei ole vielä asetettu, joten tarkkoja ehdotuksia koekuormitukseen valittavista silloista ei työssä tehdä, mutta erilaisia kriteereitä koekuormitettavalle sillalle voidaan antaa. Koekuormituksilla olisi hyvä saada mahdollisimman paljon sellaista tietoa, jota voidaan hyödyntää useammalle sillalle ilman, että jokaista siltaa koekuormitetaan erikseen.



Työssä reiteillä olevat sillat ovat Taitorakennerekisteristä poimittuja. Joukossa on siltoja, jotka ovat väyläviraston omistuksessa sekä siltoja, jotka ovat kaupungin omistuksessa. Kaikkia kaupunkien omistuksessa olevia siltoja ei välttämättä ole tuotu Taitorakennerekisteriin, joten reiteillä saattaa olla muitakin teräsbetonisia kotelopalkkisilloja. Näitä ei kuitenkaan huomioida.





Kuva 62. Tarkasteltavilla reiteillä olevat 1950–1980 valmistuneet teräsbetoniset kotelopalkkisillat, joiden jännemitta on suurempi tai yhtä suuri kuin 20 m. Punainen neliö sinisen pallon vieressä tarkoittaa, että silta on vahvennettu jälkijännittämällä. [4]

Kuten kuvasta 62 havaitaan sillat sijoittuvat ympäri Suomea eikä useampaa siltaa ole lähekkäin. Kuvaan on myös erikseen punaisella merkitty sillat, jotka on jo vahvennettu jälkijännittämällä. Koekuormitusten kannalta olisi helpointa valita mahdollisimman lähellä toisiaan olevia siltoja, jotta koekuormitukset olisivat ajallisesti ja kalustollisesti helpompi suorittaa. Valittavien siltojen sijainti voi jäädä kuitenkin toissijaiseksi kriteeriksi kuormitettavaa siltaa valittaessa, sillä sillat ovat hajautetusti ympäri Suomea. Tärkeämmiksi kriteereiksi nousee todennäköisesti taulukkoon 14 kerätyt siltojen ominaisuudet.

Taulukko 14. Ehdotetuilla HCT-reiteillä olevat teräsbetoniset kotelopalkkisillat. [4]

Sillan nimi	Jännemitat [m] (Jännemittojen suhde)	Koteloiden määrä	Kotelot yhdessä erikseen		Vahven- nettu jännittä- mällä	Suun- nittelukuorma
						
Hautaan silta	20 (1)	2	x		EI	Al+teli
Kostianvirran silta	22,5+33,77+22,5 (0,67+1+0,67)	2		x	EI	Akl, Ek1
Murhasaaren silta	26+52+26 (0,5+1+0,5)	2		x	KYLLÄ	AI
Mansoniemen silta	24+30+22,2 (0,8+1+0,74)	2		x	EI	AI
Simonjoensilta	32,6+44+32,6 (0,74+1+0,74)	3	x		KYLLÄ	Lkl, Ek1
Sinettihojen silta	23 (1)	2	x		EI	Al+teli
Kitisen silta	18,5+23+23+23+18,5 (0,8+1+1+1+0,8)	2		x	EI	Al+Klk
Lampelan silta	25 (1)	3	x		EI	Al+teli
Vähähaaran silta	28+35+28 (0,8+1+0,8)	2	x		EI	Akl, Ek1
Siikajoen silta	20,5+27+20,5 (0,76+1+0,76)	2		x	EI	AII
Iijoen silta II	22,4+28+22,4 (0,8+1+0,8)	4	x		EI	AI
Haukiputaan silta	41+52+41 (0,79+1+0,79)	3	x		EI	Klk
Puodinkosken silta	41+52+41 (0,79+1+0,79)	3	x		KYLLÄ	Lkl, Ek1
Helsinginkosken silta	41+52+41 (0,79+1+0,79)	3	x		KYLLÄ	Lkl, Ek1
Eskon silta	26,5+33+26,5 (0,8+1+0,8)	2		x	EI	Al+teli
Syväyksen silta	25 (1)	2	x		EI	Al+teli
Iijoen silta	20,33+30,5+30,5+20,33 (0,67+1+1+0,67)	2		x	EI	Akl, Ek1
Koivukosken silta	24+30+24 (0,8+1+0,8)	4	x		KYLLÄ	AI
Revonkannsalmen silta	27 (1)	3	x		KYLLÄ	Lkl, Ek1
Tönölänsalmen silta	25+50+25 (0,5+1+0,5)	2	x		KYLLÄ	Lkl, Ek1
Kirrukosken silta	18+27+18 (0,67+1+0,67)	2	x		EI	Al+teli
Kalajoen isosilta	20+25+25+25+25+20 (0,8+1+1+1+1+0,8)	4	x		KYLLÄ	Lkl, Ek1

Sillan nimi	Jännemitat [m] (Jännemittojen suhde)	Kotelojen määrä	yh- dessä 	erikseen 	Vahven- nettu jännittä- mällä	Suun- nittelu- kuorma
Tavastin silta	20 (1)	3	x		EI	Al+teli
Alapitkänjoen silta	21 (1)	3	x		EI	Al
Sikosalmen silta	22 (1)	2	x		EI	Al+teli
Syrjäsalmen silta	32,6+44+32,6 (0,74+1+0,74)	3	x		EI	Al
Taipaleenjoen silta II	25 (1)	3	x		EI	Al
Aronsalmen silta	26+40+26 (0,65+1+0,65)	2	x		EI	Al+teli
Pitkäsilta	16,7+22+16,7 (0,76+1+0,76)	-	-		EI	Akl, Ek1
Tuunaansalmen silta	15+21+15 (0,71+1+0,71)	1			EI	PKM71, Ek1
Lukkarin silta	24+30+24 (0,8+1+0,8)	3	x		KYLLÄ	Lkl, Ek1
Loimijoen silta	24+30+24 (0,8+1+0,8)	2		x	KYLLÄ	Al, Lkl, Ek1
Mierolansalmen silta	18,6+33,5+18,6 (0,56+1+0,56)	2	x		KYLLÄ	Al+teli
Tainionvirran silta	21 (1)	3	x		EI	Al
Vuosaaren silta	32,35+39+39+39+39+39+39+39+39+32,5 (0,83+1+1+1+1+1+1+1+1+1+0,83)	4	x		EI	Al
Joksholman silta	20 (1)	3	x		EI	Al+teli
Hemminginkosken silta	21 (1)	2	x		EI	Al+teli

Taulukossa 13 on kaikenlaiset reiteillä olevat teräsbetoniset kotelopalkkisillat, eivätkä kaikki ole koekuormitusten kannalta kiinnostavia. Tarkastelussa on ollut tarkemmin jatkuvat sillat, eli yksiaukkoisia siltoja, joita listassa on jonkin verran, ei kannata valita koekuormitukseen. Työssä on myös tarkasteltu kaksi- ja kolmikoteloisia siltoja, joten valinta kannattaa ainakin alustavasti tehdä tällaisten siltojen väliltä. Myös nelikoteloisia siltoja on useampi, joten ne ovat mielenkiintoisia myös, mutta yksikoteloisia on reiteillä van yksi.

Yksikoteloisen palkin kuormittamisesta ei todennäköisesti saada hyödyllistä tietoa muiden siltojen kannalta.

Teräsbetonisen kotelopoikkileikkauksen tutkimisen kannalta jälkijännittämällä vahvennettu silta ei ole järkevä valinta koekuormitukseen, sillä jännitetty poikkileikkaus toimii hieman eri tavalla kuin jännittämätön poikkileikkaus. Reiteillä on 11 jälkijännitettyä siltaa.

Kotelot voivat poikkileikkauksessa olla yhdessä tai erikseen. Erikseen olevat kotelot ovat kiinnitetty toisiinsa koteloiden yläreunasta laatalle. Suurimmassa osassa erillään olevista kotelosta poikkileikkaus on tukien kohdalta tavallaan yhdessä, sillä poikkileikkaus on yhdellä leveällä tuella eikä molemmat kotelot omilla tuillaan. Siltoja, jotka ovat jatkuvia ja joissa on enemmän kuin yksikotelo on lähes yhtä paljon siten että kotelot ovat yhdessä tai erikseen. Työssä on tarkasteltu vain yhdessä olevia kotelaita, mutta koekuormitukseen voisi olla hyvä valita molempia tyyppisiä mahdollisuuksien mukaan.

7.3.2 Koekuormitukseen valittavat HCT-yhdistelmät

Koekuormitukseen valittavat yhdistelmät riippuvat monesta tekijästä. Yksi iso otettava huomioon asia on se, onko yhdistelmällä voimassa oleva kokeilulupa, silloin kun koekuormituksia halutaan suorittaa. Koekuormitukset on tehtävä saatavilla olevalla kalustolla, eikä kaikilla nyt liikenteessä olevilla tai työssä tarkastelussa olevilla yhdistelmillä ole välttämättä enää koekuormitushetkellä voimassa olevaa kokeilulupaa tai yhdistelmä ei muuten ole saatavilla.

Koekuormitukseen valittavan yhdistelmä valinta voi riippua tarkasteluun valittavista silloista. Täytyy pohtia, halutaanko kaikkia siltoja kuormittaa sillan sijainnista riippumatta samalla HCT-yhdistelmällä, vai halutaanko siltaa kuormittaa reitin mukaisesti, jolla silta sijaitsee. Silta reitit on alustavasti jaettu yhdistelmien painon mukaan kolmeen eri ryhmään. Onko tarvetta kuormittaa suurimmalla mahdollisella yhdistelmällä siltaa, jos alustavasti sen yli ei tarvitse kulkea kuin 88 tonnin suuruinen ajoneuvoyhdistelmä vai onko todennäköistä, että kuorma myös tällä reitillä kasvaa?

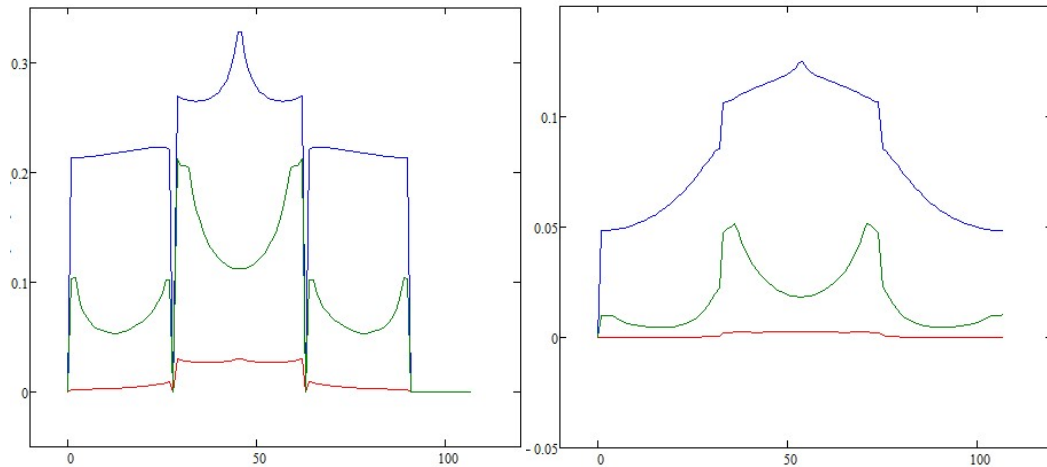
Erot samanpainoisten yhdistelmien välillä eivät olleet suuria, joten koekuormituksiin kannattaa valita yhdistelmät, jotka aiheuttavat suurimmat rasitukset. Yhdistelmien eroja tarkasteltiin jo aikaisemmin luvussa 4.3 ja siellä esitettiin koekuormitusten kannalta mielenkiintoisimmiksi yhdistelmiksi metsäauto 84 D ja hakeyhdistelmä 91 H. Yhdistelmät, jotka painoivat 100 tonnia, eivät eronneet juurikaan toisistaan, joten niiden välillä valintaan vaikuttaa ennemminkin yhdistelmän saatavuus.

7.3.3 Koekuormituksessa mitattavat asiat

Siltojen koekuormituksissa on mahdollista mitata kuormituksen aiheuttamia taipumia ja kiertymiä. Nämä eivät itsessään kerro rakenteesta oikeastaan mitään, sillä laskennallisesti saadut siirtymät eroavat yleensä koekuormituksessa mitatuista siirtymistä paljon. Tämän takia työssä on pyritty löytämään tapa, jolla voidaan selvittää rakenteen toimintaa ja kuntoa siirtymien erilaisten suhteiden avulla.

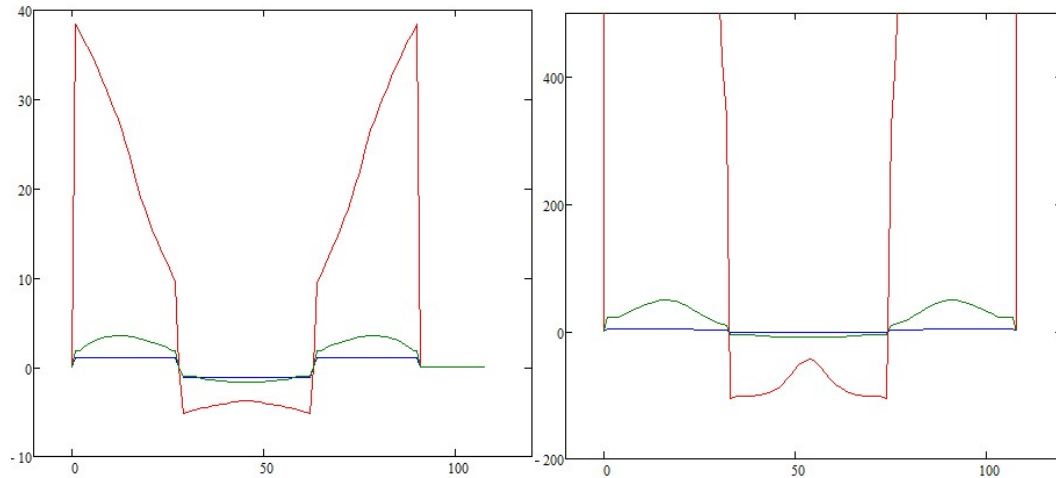
Laskentamalli tehtiin kahdelle erilaiselle sillalle ja molemmille tarkasteltiin keskikentässä kiertymän suhdetta taipumaan sekä eri yhden palkin taipuman suhdetta sillan reunapalkkien taipumaeroon. Samalla kuormituksella arvot siltojen välillä erosivat paljon, eikä suhteiden arvojen perusteella suoraan voida päätellä rakenteesta juuri mitään. Koekuormituksissa sillat ovat jännemitoiltaan ja poikkileikkauksiltaan erilaisia, mutta myöskin kuorman suuruus on eri kuin työssä tehdyssä yksinkertaisessa tarkastelussa. Näin ollen koekuormituksissa saatavat lukuarvot kiertymän ja taipuman suhteelle tai taipuman ja taipumaeron suhteelle voivat vaihdella huomattavasti.

Suhteita kuvaavat kuvaajat kuitenkin olivat molemmilla silloilla saman mallisia. Kiertymän suhde taipumaan keskellä keskimmäistä kenttää aiheutti täysin halkeilemattoman poikkileikkauksen vääntöjäykkyydellä ja täysin halkeilleen poikkileikkauksen vääntöjäykkyydellä lähes saman muotoiset kuvaajat, kuten kuvasta 63 havaitaan. Kuvassa 63 on esitetty lyhyemmälle ja pidemmälle sillalle kuorman puoleisen palkin kiertymän suhde taipumaan. Molemmissa kuorman ollessa reunakentässä, kuvaaja on melko tasainen ja välitukia kohti nouseva kaari. Kuorman ollessa keskikentässä kuvaajaan syntyy terävä huippu keskelle kuvaajaa. Analyysissä, jossa vääntöjäykkyys on täysin vääntöhalkeilemattoman poikkileikkauksen, kuvaaja kulkee kuitenkin koko ajan hyvin lähellä nollaa. Analyysi, jossa poikkileikkauksen vääntöjäykkyys on halkeilleen poikkileikkauksen vain tuilta, aiheuttaa selvästi erilaisen kuvaajan. Kuorman ollessa missä tahansa kentässä, kuvaaja laskee melko tasaisella kaarella kohti kentän keskustaa ja nousee tuille.



Kuva 63. Kiertymän suhde taipumaan kuvaajat kuorman puoleisille palkeille. Vasemmanpuoleinen kaksikoteloiselle lyhyemmälle sillalle ja oikeanpuoleinen kolmikoteloiselle pidemmälle sillalle.

Palkin taipuman suhde palkkien taipumaeroon aiheuttaa kaikissa kolmessa tilanteessa täysin erilaisen kuvaajan. Kuvassa 64 on esitetty lyhyemmälle ja pidemmälle sillalle kuorman puoleisen palkin taipuman suhde reunimmaisten palkkien taipumaeroon. Täysin halkeilleella vääntöjäykkyydellä kuvaaja on lähellä nollaa pysyvä lähes vaakasuora viiva. Täysin halkeilemattomalla vääntöjäykkyydellä, kuorman ollessa maatuen välittömässä läheisyydessä, kuvaaja nousee lähes pystysuorasti selvästi korkeammalle kuin muut ja laskee lähes vakiolla kulmakertoimella kuorman lähestyessä välitukea. Kuorman ollessa keskimmaisessä kentässä, kuvaaja on pyöreä. Se on korkeimmillaan, kun kuorma on lähellä välitukia ja saavuttaa huippunsa, kun kuorma on keskellä kenttää. Analyysi, jossa halkeillut vääntöjäykkyys on vain tukialueilla, kuvaaja on jokaisessa kentässä loivan kupuran paraabelin muotoinen.



Kuva 64. Palkin taipuman suhde palkkien taipumaeroon kuvaajat kuorman puoleisille palkeille. Vasemmanpuoleinen kaksikoteloiselle lyhyemmälle sillalle ja oikeanpuoleinen kolmikoteloiselle pidemmälle sillalle.

Koekuormituksessa voitaisiin seurata esimerkiksi kolmiaukkoisen sillan keskimmäisen kentän taipumaa ja kiertymää kuorman ajaessa sillan yli. Siirtymät tulisi mitata kotelopal- kin jokaisen kotelon kohdalta, jotta saataisiin palkkien väliset taipuma- ja kiertymäerot. Saaduista arvoista tehdään kuvaaja, jonka muotoa tarkastelemalla voidaan päätellä rakenteen tilasta.

Todennäköisesti sillat eivät ole täysin halkeilemattomia, sillä sillat ovat olleet rasitettuina useita vuosikymmeniä. Todennäköisesti sillat eivät myöskään ole täysin halkeilleita, sillä ne ovat kuitenkin jatkuvassa käytössä ja silloille tehdään tasaisin väliajoin kuntotarkastuksia.

7.3.4 Koekuormituksissa huomioitavia muita asioita

Itse sillan, kuorman ja mitattavan suureen lisäksi koekuormitusta suunniteltaessa on otettava huomioon monia muitakin asioita. Tutkimustuloksiin vaikuttaa esimerkiksi muu liikenne. Joudutaanko silta sulkemaan koekuormituksen ajaksi, jotta saadaan vain tarkasteltavan kuormituksen aiheuttamat mittaustulokset, vai onko mahdollista suorittaa koekuormitus osittain suljetulla sillalla tai muun liikenteen joukossa?

Laskennallisesti tarkasteltaessa tietyn pisteen rasituksia tarkastellaan, kun kuorma on paikoillaan tietyssä pisteessä. Todellisessa tilanteessa ja koekuormituksissa kuorma ajetaan sillan yli, jolloin tarkasteltavaan pisteeseen aiheutuu erilaisia rasituksia koko kuormituksen ajan. Tällöin tarkasteltavaan pisteeseen vaikuttaa tarkasteltavan kuorman sijainnin lisäksi myös edellisen ja seuraavan kuorman sijainnin aiheuttamat rasitukset. Laskennassa rasitukseen vaikuttaa vain kuorman tietty sijainti, eikä kuorma liiku sillalla.

HCT-tutkimuksen kannalta voi olla kannattavaa koekuormittaa myös muun tyyppisiä siltoja. Tällöin ei voida suoraan hyödyntää tämän työn kotelopoikkileikkaukseen liittyviä osuuksia, mutta HCT-yhdistelmien aiheuttamat rasituksen ovat hyödynnettävissä jatkuvien siltojen kannalta. Voidaan joutua tekemään jonkin verran tutkimusta siitä, että millaisiin muihin siltoihin HCT-yhdistelmillä on vaikutusta. Siltatyypit, joiden kantavuuden kannalta eniten merkitystä on yksittäisillä akselimassoilla, eivät ole kiinnostavia HCT-yhdistelmien kannalta, sillä HCT-yhdistelmien akselimassat eivät ylitä lain sallimia rajoja. Tällaisia siltoja ovat esimerkiksi putkisillat.

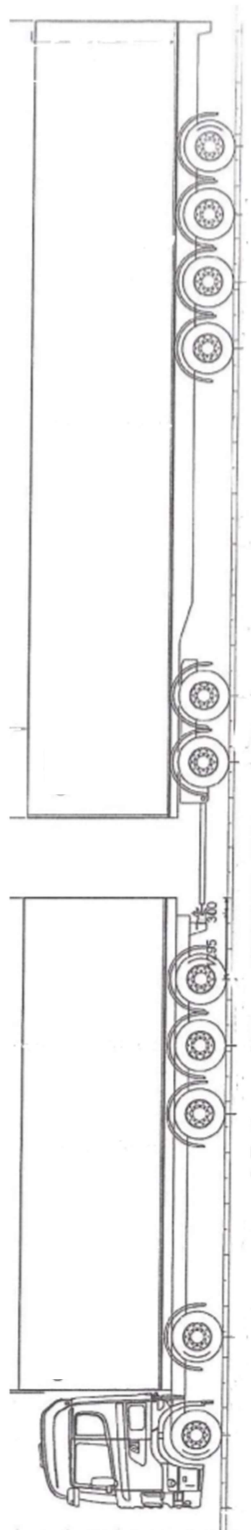
LÄHTEET

- [1] Otto Lahti, Uusi tieliikennelaki ja rekkojen käyttösäännöt, Traficomin julkaisu 10/2021, 35 s. Saatavissa: <https://www.traficom.fi/sites/default/files/media/publication/Uusi%20tieliikennelaki%20ja%20rekkojen%20k%C3%A4ytt%C3%B6s%C3%A4%C3%A4nn%C3%B6t.pdf>
- [2] RIL 179-2018 Sillat -suunnittelu, toteutus ja ylläpito, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, Helsinki. 2018, 509 s.
- [3] Siltojemme historia, Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL ry, Helsinki, 2004 525 s.
- [4] Taitorakennerekisteri
- [5] Väyläviraston sillat 1.1.2020, Väyläviraston julkaisu 46/2020, Väylävirasto, Helsinki, 2020, 77 s. Saatavissa: <https://www.doria.fi/handle/10024/177943>
- [6] Elinkeinoelämän kuljetukset tieverkolla- volyymi- ja arvoanalyysi, WSP Finland Oy, 2017, 147 s. Saatavissa: https://www.rakennusteollisuus.fi/globalassets/liikenne-ja-infra/elinkeinoelaman-kuljetukset-tieverkolla_volyymi-ja-arvoanalyysi_wsp-finland.pdf
- [7] Liikenneviraston sillat 1.1.2015, Liikenneviraston tilastoja 10/2015, Liikennevirasto, Helsinki, 2015, 164 s. Saatavissa: http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisu/pdf8/lvi_2015-10_liikenneviraston_sillat_web.pdf
- [8] Siltojen kantavuuslaskentaohje, Liikenneviraston ohjeita 36/2015, Liikennevirasto, Helsinki, 2015, 61 s. Saatavissa: http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisu/pdf8/lo_2015-36_siltojen_kantavuuslaskentaohje_web.pdf
- [9] RIL 179 Sillat, Suomen Rakennusinsinöörien liitto RIL ry, Helsinki, 1989 390 s.
- [10] Pidemmät ja raskaammat HCT-rekat, Traficom, päivitetty 13.2.2020 (Viitattu 13.9.2021) Saatavissa: <https://www.traficom.fi/fi/liikenne/tieliikenne/pidemmat-ja-raskaammat-hct-rekat?toggle=Julkaisu%20ja%20tutkimustuloksia>
- [11] Uusi tieliikennelaki voimaan 1.6.2020, Valtioneuvosto, Liikenne- ja viestintäministeriö, Päivitetty 27.5.2020 (Viitattu 29.11.2021) Saatavissa: <https://valtioneuvosto.fi/-/uusi-tieliikennelaki-voimaan-1-6-2020>
- [12] Tieliikennelaki 10.8.2018/729, Finlex, Päivitetty 9.4.2021 (Viitattu 12.1.2021) Saatavissa: https://finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2018/20180729#a8.5.2020-36_0
- [13] Tieliikennelaki 729/2018, alkuperäinen, Finlex, Naantali, 10.18.2018 (Viitattu 14.9.2021), Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2018/20180729>
- [14] Kokonaismassat- ja mitat, Vetoautojen ja yhdistelmien suurimmat massat ja mitat Suomessa 21.1.2019 alkaen, Volvotrucks Saatavissa: https://www.volvotrucks.fi/content/dam/volvo-trucks/markets/finland/trucks/VETOAUTO_juuliste_2019.pdf

- [15] Määräys ajoneuvoyhdistelmien teknisistä vaatimuksista, Traficom, Otto Lahti, 2019, 33 s. Saatavissa: <https://www.traficom.fi/sites/default/files/media/file/HCTF%20Otto.pdf>
- [16] Uusilla mitoilla pidempiä yhdistelmiä, Jussi Mikkola, Päivitetty 12.02.2019 (Viitattu 29.11.2021) Saatavissa: <https://koneporssi.com/kuljetuskalusto/uusilla-mitoilla-pidempia-yhdistelmia/>
- [17] Traficom määräys: Ajoneuvoyhdistelmien tekniset vaatimukset, Päivitetty 31.3.2021 (Viitattu 13.09.2021), Saatavilla: https://www.traficom.fi/sites/default/files/media/regulation/FI_Final_HCT-m%C3%A4%C3%A4r%C3%A4ys_korjaukset.pdf
- [18] Hallituksen esitys HE 17/2020 vp, Päivitetty 03.11.2021 (Viitattu 15.11.2021) https://www.eduskunta.fi/FI/vaski/HallituksenEsitys/Sivut/HE_17+2020.aspx
- [19] Tierakenteen rasittuminen yli 76 tonnin HCT-yhdistelmien koekuormituksissa vuosina 2015-2017, Liikennevirasto, Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 63/2018, Saatavilla: https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf8/lts_2018-63_tierakenteen_rasittuminen_web.pdf
- [20] Pitkät rekat yleistyvät liikenteessä, Traficom, julkaistu 15.01.2019, (Viitattu 13.10.2021) <https://www.traficom.fi/fi/ajankohtaista/pitkat-rekat-yleistyvat-liikenteessa>
- [21] Metsätehon raportti 258: Puutavara- ja hakeajoneuvojen massojen noston vaikutukset, Pirjo Venäläinen ja Asko Poikela, 2020, 78 s. Saatavissa: <https://metsateho.fi/wp-content/uploads/Raportti-258-Puutavara-ja-hakeajoneuvojen-massojen.pdf>
- [22] Metsätehon raportti 246: Puutavara- ja hakeajoneuvojen pidentämisen vaikutukset, Täydennetty versio, Metsäteho Oy, Pirjo Venäläinen, 2019, 42 s. Saatavissa: https://metsateho.fi/wp-content/uploads/Metsatehon_raportti_246_Puutavara_ja_hakeajoneuvojen_pidentamisen_vaikutukset.pdf
- [23] HCT-yhdistelmien mittapiirustukset + massatiedot, Metsäteho Oy, Pirjo Venäläinen, Luottamuksellinen
- [24] Metsäteho, HCT, Pirjo Venäläinen, Viitattu 12.11.2021, Saatavissa: <https://www.metsateho.fi/hct/>
- [25] Bridge deck analysis, second edition, Eugene J.Obrien, Damien L. Keogh, Alan J. O'Connor, Barry M. Lehane, CRS Press, Taylor and Francis Group, 2015, 331 s.
- [26] Rakenteiden lujuusopin perusteita, Jukka Aalto, Päivitetty 23.10.2020 (Viitattu 27.1.2022) 47 s.Saatavissa: <http://rmseura.tkk.fi/opetusmonisteita/index.html>
- [27] Vorlesungen uber Massivbau, Fritz Leonhardt, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York ,1979, 396 s.
- [28] 2. mekaniikka OAMK, mekaniikan peruskaavoja, ABB:n TTT-käsikirja 2000-07
- [29] Lujuusoppi, Tapio Salmi ja Sami Pajunen, 2010 (painettu 2018), 462 s.

- [30] Capacity Assessment of Concrete Box-Girder Bridge Webs Against the Combined Action of In-plane Shear and Transverse Bending, Demis Karagiannis, Walter Kaufmann, Kirjasta High Tech Concrete: Where Technology and engineering Meet, s.693-700 ResearchGate, Päivitetty tammikuu 2018 (Luettu 3.6.2022)
- [31] Palkkisiltojen kantavuuslaskenta, Tielaitoksen selvityksiä 40/1997, Tielaitos, Helsinki, 1997, 90 s.

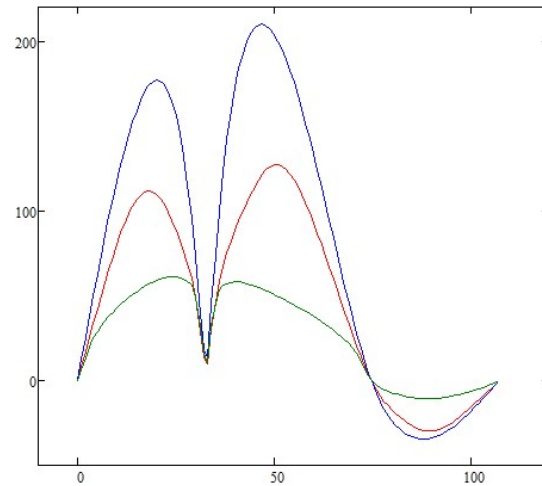
LIITE A: HAKEYHDISTELMÄ 91 T = 91H



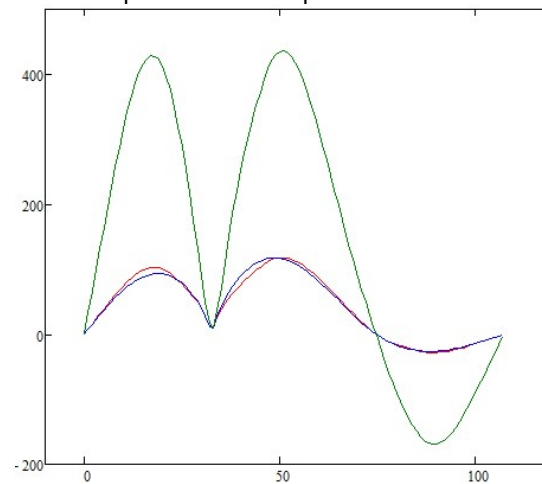
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Akselivälit (m)	1,9	4,4	1,4	1,3	4,3	1,3	6,8	1,3	1,3	1,3	
Tyypillinen akselimassa (t)	8,5	8,5	9	9	7	9	9	9	9	6,5	6,5

LIITE B: PIDEMMÄN SILLAN RASITUSTEN KUVAAJAT ANALYYSILLE 7-9

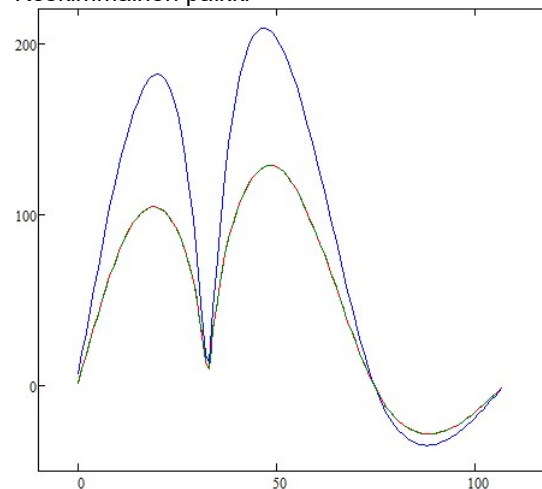
Kuvaajat taivutusmomentille välituella



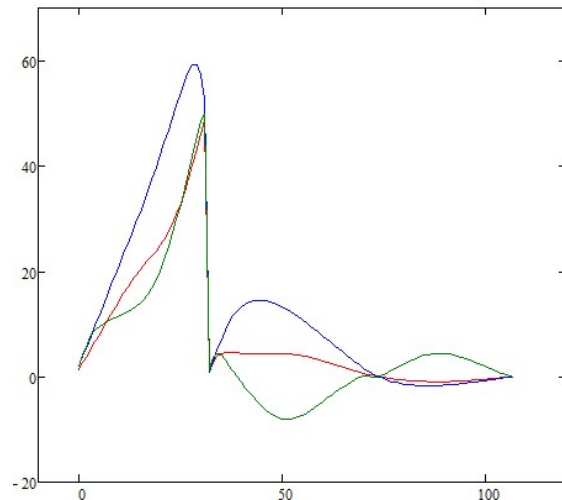
Kuorman puoleinen reunapalkki



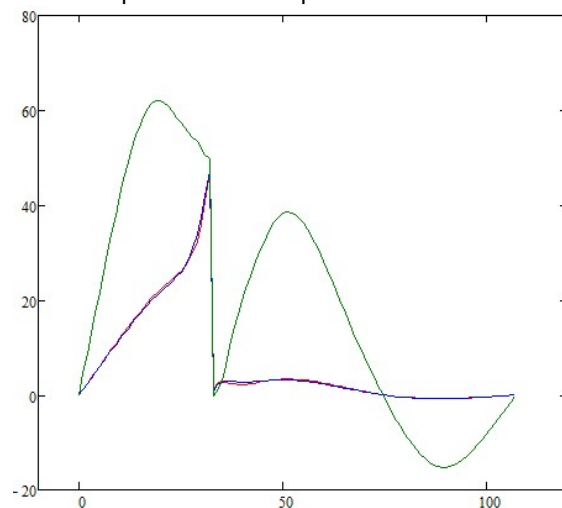
Keskimmäinen palkki



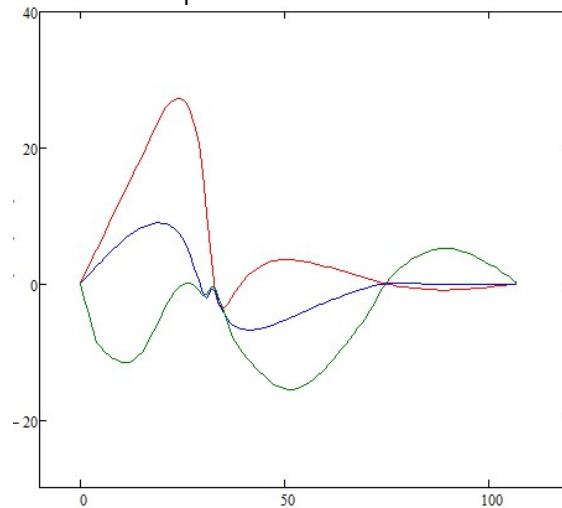
Toinen reunapalkki

Kuvaajat leikkausvoimalle välituella

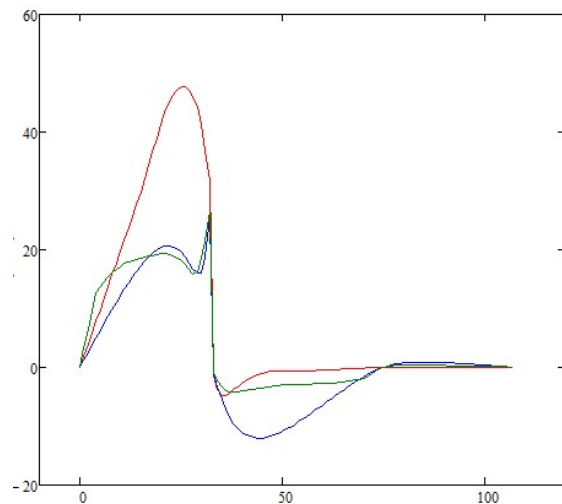
Kuorman puoleinen reunapalkki



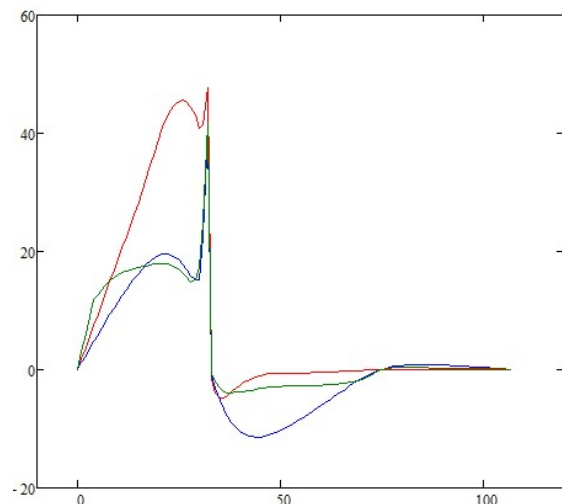
Keskimmäinen palkki



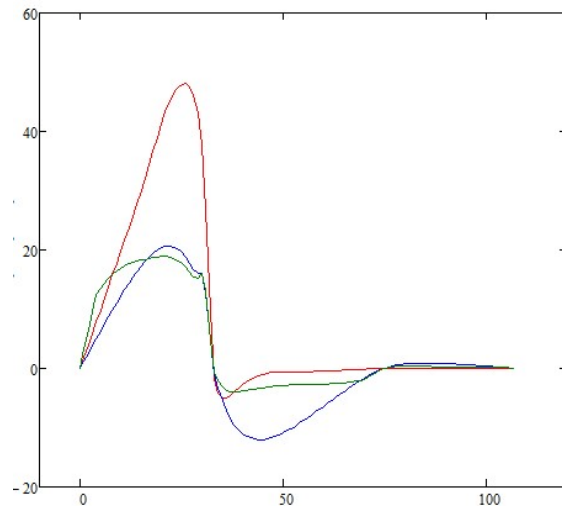
Toinen reunapalkki

Kuvaajat vääntömomentille välituella

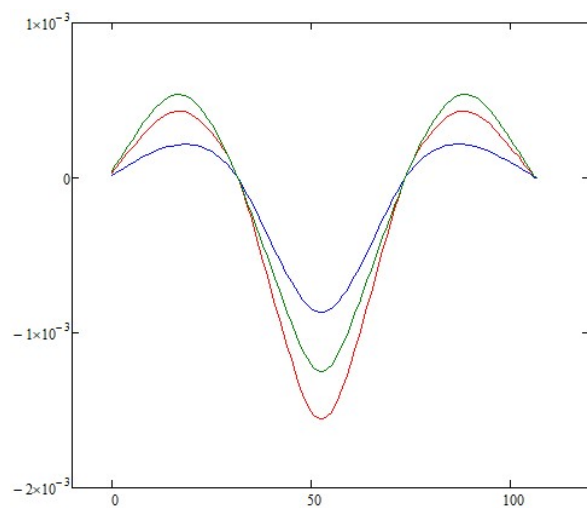
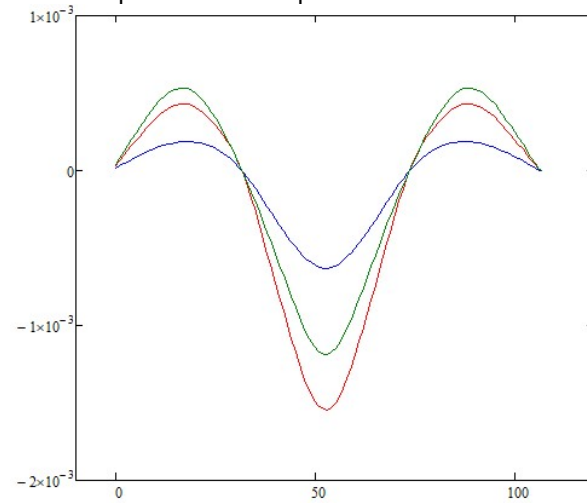
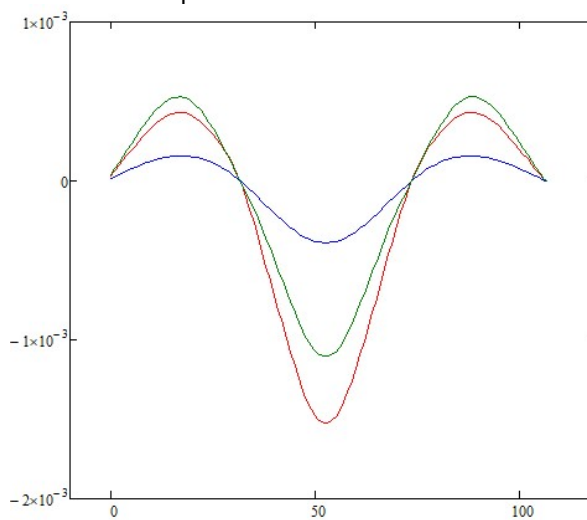
Kuorman puoleinen reunapalkki



Keskimmäinen palkki



Toinen reunapalkki

Kuvaajat taipumalle kentässä**Kuorman puoleinen reunapalkki****Keskimmäinen palkki****Toinen reunapalkki**