

Juha Teräväinen

Vanhan sillan reunaulokkeella sijaitsevan kevyen liikenteen väylän kantavuus

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Rakennustekniikka

Insinöörityö

26.9.2016

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Juha Teräväinen Vanhan sillan reunaulokkeella sijaitsevan kevyen liikenteen väylän kantavuus 52 sivua + 3 liitettä 26.9.2016
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Rakennustekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Rakennetekniikka
Ohjaajat	Projektipäällikkö Ilkka Redman Lehtori Jouni Kalliomäki
<p>Tässä opinnäytetyössä tarkasteltiin 29 teräsbetonisillan reunaulokkeella olevan kevyen liikenteen väylän kantavuutta. Reunauloke on poikkisuunnassa tarkasteltuna sillan pääkannattajan ulkopuolella oleva ulokelaatta. Tarkastelun kohteena olivat sellaiset ajoneuvo-liikenteen sillat, joissa reunaulokkeella oleva kevyen liikenteen väylä on erotettu ajoradasta korokkeella. Sillat ovat valmistuneet vuosina 1957–1975. Opinnäytetyö tehtiin WSP Finlandin toimeksiannosta. Työn tilaajana oli Helsingin kaupungin rakennusvirasto.</p> <p>Kantavuuksia tarkasteltiin ensinnäkin vertaamalla suunnittelun aikaisten kuormitusnormien mukaisia kuormia, eli oletettuja suunnittelukuormia nykykaluston aiheuttamiin kuormiin. Toiseksi tarkistettiin reunaulokkeiden todellinen kantavuus käyttämällä piirustusten mukaisia mittoja sekä materiaali- ja raudoitetietoja. Kantavuus tarkistettiin myös suunnittelu-kuormille, jolloin saatiin tietää, ovatko aineiston reunaulokkeet alun perin suunniteltu silloisten kuormitusmääräysten mukaisesti.</p> <p>Kantavuuslaskenta tehtiin murtorajatilassa taivutusmomentille, leikkaukselle ja lävistykselle. Käyttörajatilassa tarkistettiin betonin ja terästen jännitykset sekä halkeamaleveys. Kaikki tarkastelut tehtiin sillan poikkisuunnassa. Lopputuloksena laadittiin siltakohtainen lista kantavuuksista huoltokalustoon kuuluville ajoneuvoille.</p> <p>Sallittu halkeamaleveys ylittyi kahden sillan kohdalla, kun tarkasteltiin 12 tonnin huoltoajoneuvon aiheuttamaa halkeamaleveyttä. Reunaulokkeiden leikkaus- ja lävistyskestävyys oli riittävä kaikissa 29 kohteessa. Reunaulokkeiden taivutusmomenttikestävyys 12 tonnin huoltoajoneuvolle ylittyi seitsemässä kohteessa ja 16 tonnin huoltoajoneuvolle kymmenessä kohteessa. Lisäksi nykyiseen huoltokalustoon kuuluu tätä painavampia ajoneuvoja, joiden käytölle tultaneen kyseisissä kestävyydeltään riittämättömissä kohteissa asettamaan rajoitus.</p> <p>Kohteet oli suunniteltu kolmen eri suunnittelunormin mukaan. Työn tuloksena havaittiin, että suunnittelunormista ei voida päätellä, mille kuormille kyseisen aikakauden siltojen kevyen liikenteen väylät on suunniteltu, sillä hajonta käyttöasteessa normin mukaisille kuormille oli huomattavaa.</p>	
Avainsanat	Reunauloke, teräsbetonisilta, kantavuus

Author Title Number of Pages Date	Juha Teräväinen Load-carrying capacity of pedestrian walkways located on a cantilever slab of an old bridge 52 pages + 3 appendices 26 September 2016
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Civil engineering
Specialisation option	Structural engineering
Instructors	Ilkka Redman, Project Manager Jouni Kalliomäki, Lecturer
<p>The aim of this thesis was to examine load-carrying capacity of pedestrian walkways that are located on a bridge deck, on the side of a driveway. The focus was on sidewalks that are situated on a cantilever slab. Cantilever slab is the part of a bridge deck that is outside the beam that carries the main loads of a bridge. The thesis was made for WSP Finland and was ordered by Public Works Department, City of Helsinki.</p> <p>The material of this study consisted of 29 bridges that are built between years 1957-1975 and are located in Helsinki. The first aim of the thesis was to find out for which load cases the pedestrian walkways were originally designed for. This task was carried out by studying the old load regulations. The original design loads were then compared with the loads that the maintenance equipment used a present causes on the sidewalks.</p> <p>Secondly the actual capacity of the slabs was examined by using the measures and amount of reinforcement steel in the structure according to the original drawings. The load-carrying capacity was checked for the current maintenance equipment and vehicle load patterns that are defined in present regulations.</p> <p>The carrying capacities in ultimate limit state were checked for bending moment, shear force and punching. In service limit state the crack width and stresses of concrete and steel were checked. The capacity of cantilever slabs was examined in cross direction only.</p> <p>The results showed that in seven cases the carrying strength of a slab was not adequate for a maintenance vehicle weighing 12 tons. Strength against a 16 ton maintenance vehicle was exceeded in ten cases. The current maintenance equipment includes also vehicles heavier than 16 tons. Use of the vehicles that surpass the carrying capacity should presumably be limited.</p> <p>The bridges included in study material had been designed using three different standards. It was found out that reliable conclusions of the actual load carrying capacity of a sidewalk cannot be drawn based solely on the standard used in the design of a bridge. The actual carrying capacity of sidewalks on bridges this age has to be examined using the actual features of the structure instead.</p>	
Keywords	Carrying capacity, bridge, pedestrian walkway

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
1.1	Tausta	1
1.2	Tavoitteet	1
2	Ajoneuvoliikenteen siltojen reunaulokkeet	3
2.1	Esimerkkejä reunaulokkeista	3
2.2	Kevyen liikenteen väylän suunnittelukuormat eri aikoina	4
2.2.1	RKM 1955	5
2.2.2	RKN 1969	7
2.2.3	PKM 71	9
2.2.4	MAA 75	10
2.2.5	RIL 144–1982/1983/1990	10
2.2.6	RIL 144–1997/2002	11
2.2.7	Eurokoodi	12
2.3	Yhteenveto kevyen liikenteen väylän mitoituskormista	13
3	Kantavuuden määrittämisessä käytetyt kuormat	14
3.1	Huoltoajoneuvot 12 tn ja 16 tn	14
3.2	Ajoneuvoasetuksen 2013 mukaiset kuormakaaviot (AA 13)	14
3.3	Huoltokalusto	16
3.4	Päälystystöissä käytettävä kalusto	17
3.5	Lujuudet, osavarmuusluvut, yhdistelykertoimet ja sysäyskertoimet	17
3.5.1	Materiaalien lujuudet ja osavarmuusluvut	17
3.5.2	Kuormien osavarmuusluvut, yhdistelykertoimet ja sysäyskerroin	20
4	Reunaulokkeiden vauriomekanismit ja korjaamistoimenpiteet	23
5	Tarkasteltavat kohteet	25
5.1	Helsingin sillasto	25
5.2	Tutkimusaineisto	25
6	Kantavuuksien tarkastelu	29
6.1	Rakenteiden omapainot	29
6.2	Kuormakaavioiden sijoittaminen reunaulokkeelle	29

6.3	Voimasuureiden määrittäminen	30
6.3.1	Taivutusmomentti	30
6.3.2	Leikkaus	31
6.3.3	Lävistys	37
6.3.4	FEM-mallin yksinkertaistukset	37
6.4	Suunnittelukuormien ja nykyisten kuormien vertailu	38
6.5	Mitoitus murtorajatilassa	38
6.5.1	Taivutusmomentti	38
6.5.2	Leikkauskestävyys	39
6.5.3	Lävistys	39
6.6	Mitoitus käyttörajatilassa	39
6.6.1	Halkeamaleveyden laskenta	40
7	Tulokset	40
7.1	Murtorajatila	40
7.1.1	Taivutusmomentti	41
7.1.2	Leikkaus	44
7.1.3	Lävistys	44
7.2	Käyttörajatila	45
8	Johtopäätökset	47
8.1	Reunaulokkeille asetettavat painorajoitukset	47
8.2	Momenttikestävyys suunnittelukuormien suhteen	48
8.3	Jatkotutkimuksen tarve	49
8.4	Mahdolliset korjaustoimenpiteet	50
	Lähteet	51

Liitteet

Liite 1. Huolto- ja päällystyskaluston mitat ja massat

Liite 2. Kohteiden mitat, materiaalitiedot ja teräsmäärät

Liite 3. Kantavuuslaskennan tulokset, MRT

Käsitteet ja lyhenteet

FEM	Finite element method. Elementtimenetelmä. Käytetään rakenteiden voimasuureiden laskemiseen.
Kestävyys	Rakenteen tai rakenneosan suurin mahdollinen rasitus, jolla sallitut rajatilan arvot saavutetaan.
Klk	Kevyen liikenteen sillan kuorma.
Käyttöaste	Rakenteen tai rakenneosan käyttö- tai murtorajatilan rasituksen suhde kyseisen rakenteen tai rakenneosan kestävyYTEEN.
Käyttörajatila (KRT)	Rajatila, jossa rakenne lakkaa täyttämästä sen käyttökelpoisuuden ehdoksi asetettuja vaatimuksia, esimerkiksi sallittu taipuma tai halkeamaleveys ylittyy.
Mitoitusarvo	Ominaisarvo, joka on kerrottu (kuormat) tai jaettu (materiaalien kestävydet) osavarmuusluvulla.
Murtorajatila (MRT)	Rajatila, jossa rakenteen katsotaan osittain tai kokonaan menettävän kantokykynsä.
Ominaisarvo	Perusarvo, jota ei ole kerrottu (kuormat) tai jaettu (materiaali) osavarmuusluvulla.
PKM 71	Pohjoismaiset tiesiltojen kuormamääräykset. Esiteltiin vuonna 1971, otettiin virallisesti käyttöön Suomessa vuonna 1974.

Rajatila Tila, jossa rakenne lakkaa täyttämästä sille asetetut vaatimukset.

Reunauloke Poikkisuunnassa tarkasteltuna sillan pääkannattajan ulkopuolella oleva ulokelaatta.

Reunaulokkeen pituus l

Ulokkeen pituudella l tarkoitetaan tässä työssä sillan poikkisuunnassa tarkasteltua ulokkeen pituutta.

Rajatilamenettely

Rajatilatarkasteluissa käytetään kuormien ja materiaalien mitoitusarvoja. Murto- ja käyttörajatilatarkasteluissa käytetään kyseessä olevaa rajatilaa vastaavia osavarmuuskertoimia.

RIL Suomen Rakennusinsinöörien liitto.

RKM 55 Rakenteiden kuormitusmääräykset vuodelta 1955. Rakennusinsinööriyhdistyksen julkaisu A 26.

RKN 69 Vuoden 1969 Rakenteiden kuormitusnormit. Esiteltiin julkaisussa RIL 59.

Sallittujen jännitysten menettely

Rakenteisiin syntyvät jännitykset määritetään käyttäen kuormien ominaisarvoja. Rakenteet mitoitetaan siten, etteivät materiaalien sallitut jännitykset ja muodonmuutokset ylity.

Sysäyskerroin

Sysäyskerroimella huomioidaan sysäyksestä aiheutuva dynaaminen suurenusvaikutus. Vanhoissa kuormitusmääräyksissä sysäyskerroimesta käytetään nimitystä sysäyslisä.

1 Johdanto

1.1 Tausta

Opinnäytetyö tehdään WSP Finlandin toimeksiannosta. Työn tilaajana on Helsingin kaupungin rakennusvirasto (HKR).

Työssä tarkastellaan sellaisia HKR:n hallinnoimia 1950–1970 -luvuilla valmistuneita ajoneuvoliikenteen siltoja, joiden reunaulokkeiden kantavuus on oletettu heikoksi. Tarkastelun kohteena ovat sellaiset ajoneuvoliikenteen sillat, joissa reunaulokkeella oleva kevyen liikenteen väylä on erotettu ajoradasta korokkeella. Kevyen liikenteen väyliä ei ole tarkasteltavissa silloissa erotettu ajoradasta kaiteella tai muulla vastaavalla rakenteella.

Kevyen liikenteen väylillä liikennöivien huoltoajoneuvojen kuormat ovat kasvaneet verrattuna siltojen suunnitteluajankautiin kuormituksiin. Tämä aiheuttaa tarpeen kantavuuden tarkistamiselle. Lisäksi Liikenneviraston kantavuuslaskentaohjeen mukaan ajoneuvoasetuskaavio täytyy kantavuuslaskennassa ottaa huomioon myös kevyen liikenteen väylällä, mikäli sille pääsyä ei ole estetty esimerkiksi kaiteella.

1.2 Tavoitteet

Pääasiallinen tavoite on selvittää 29 sillan reunaulokkeella olevan kevyen liikenteen väylän kantavuus. Opinnäytetyössä ei tarkastella muiden rakenneosien, kuten esimerkiksi päärakenteiden, kestävyksiä. Lopputuloksena laaditaan siltakohtainen lista kantavuuksista huoltokalustoon eri kuormakaavioille.

Toisena tavoitteena on selvittää, millaisia kuormakaavioita eri aikakausien kuormitusmääräyksissä on käytetty kevyen liikenteen väylän kantavuuden tarkistamiseen.

Siltojen kantavuuslaskentaohjeessa [16, s.10] kantavuuslaskennan laajuus jaetaan kahteen tarkastelutasoon:

- 1) Jos rakenteen oma paino ei ole merkittävästi muuttunut, vertaillaan kantavuuslaskennassa suunnittelun aikaisten ja kantavuuden määrittämisessä käytettävien liikennekuormien päävoimasuureita keskenään. Vertailussa otetaan huomioon osavarmuusluvut ja kuorman sysäyskerroin.
- 2) Voimasuureet lasketaan mahdollisimman tarkalla rakennemallilla (FEM tai vastaava) huomioiden rakenteiden todelliset mitat ja kuormat.

Tässä työssä selvitetään aluksi eri aikakausien kuormitusnormien sisältö, jotta saadaan tietää, mille kuormille ja millaisia kertoimia käyttäen kohteet on suunniteltu. Tämä on edellytyksenä, jotta voidaan tehdä tarkastelutason 1 mukainen vertailu.

Tason 2 mukaiset kantavuustarkastelut tehdään ajoneuvoasetuksen mukaisille kuormakaavioille, eurokoodin mukaiselle 16 tonnin huoltoajoneuvolle, RIL-144 kuormitusohjeiden mukaiselle 12 tonnin huoltoajoneuvolle, Helsingin kaupungin rakentamispalvelu Staran käyttämälle huoltokalustolle sekä päällystystöissä käytettävälle kalustolle. Lisäksi kantavuus tarkistetaan suunnittelunormin mukaiselle kuormalle, jotta saadaan tietää, onko kevyen liikenteen väylä alun perin suunniteltu normin mukaisille kuormitustapauksille.

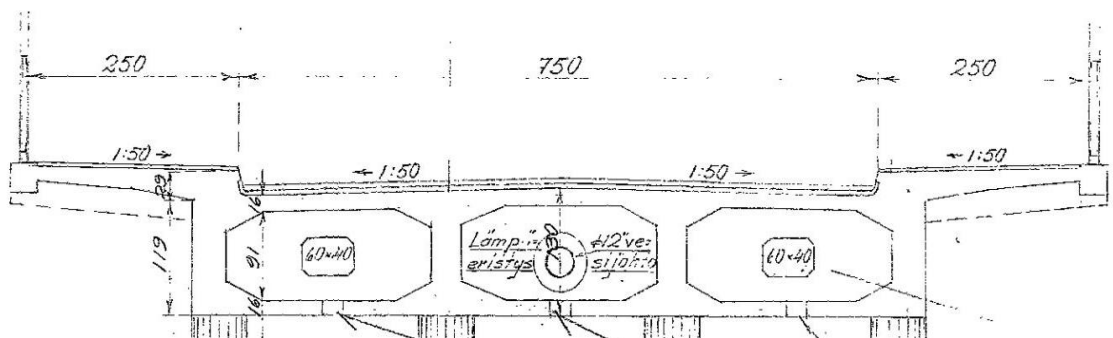
Työssä käytetään Liikenneviraston siltojen kantavuuslaskentaohjeen mukaista murtorajatilän mitoituskaavaa ja varmuuskertoimia. Murtorajatilassa tarkistetaan reunaulokkeiden taivutusmomentti-, leikkaus- ja lävistyskestävyys kaikille kuormakaavioille tai määräville kuormitustapauksille. Käyttörajatilassa tarkistetaan ulokelaatan yläpinnan halkeamaleveys sekä betonin ja teräksen jännitys, kun kuormituksena on 12 tonnin huoltoajoneuvo.

2 Ajoneuvoliikenteen siltojen reunaulokkeet

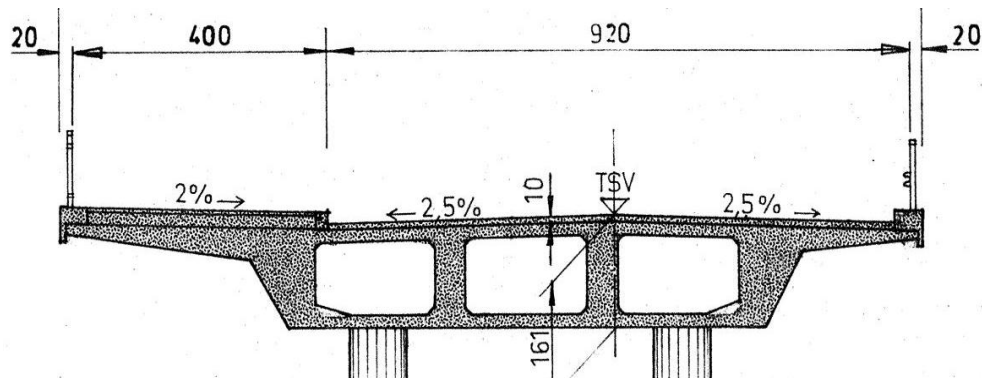
Reunauloke on poikkisuunnassa tarkasteltuna sillan pääkannattajan ulkopuolella oleva ulokelaatta. Ulokkeella voi olla ajorata ja samassa tasossa ajoradan kanssa oleva piennar tai ajoradasta esimerkiksi korokkeella erotettu kevyen liikenteen väylä. Tässä työssä rajoitutaan tarkastelemaan sellaisia reunaulokkeita, joilla on kevyen liikenteen väylä. Ulokkeen pituudella l tarkoitetaan tässä työssä sillan poikkisuunnassa tarkasteltua pituutta.

2.1 Esimerkkejä reunaulokkeista

Kuvissa 1 ja 2 esitetään esimerkki kahden sillan poikkileikkauksista. Katajaharjuntien sillassa on kevyen liikenteen väylä ajoradan molemmilla puolilla ja Hopeasalmentien sillassa toisella reunalla.



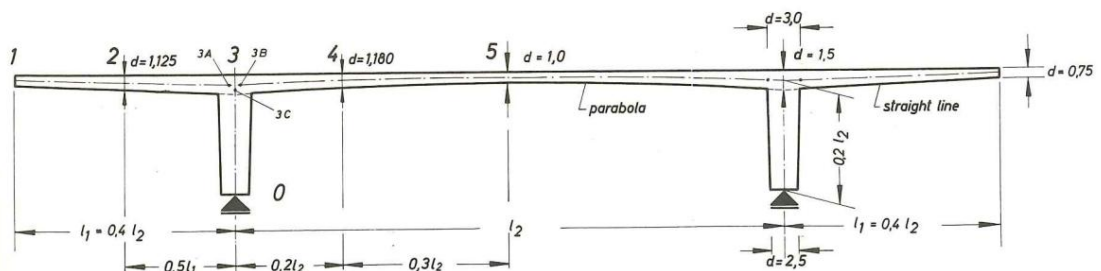
Kuva 1. Katajaharjuntien sillan (U-6054) poikkileikkaus. Silta on valmistunut v. 1963 ja se on piirustusten mukaan suunniteltu RKM 1955 -rakennusmääräysten mukaisille kuormille. Molemmilla reunoilla on kevyen liikenteen väylät, jotka on erotettu ajoradasta korokkeella.



Kuva 2. Hopeasalmentien (U-6127) sillan poikkileikkaus. Silta on valmistunut v. 1973 ja se on suunniteltu RKN 1969 -normin mukaisille kuormille. Vasemmalla reunalla on korkeella ajoradasta erotettu kevyen liikenteen väylä ja oikealla reunalla samalla tasolla ajoradan kanssa oleva piennar. Tässä työssä rajoitutaan tarkastelemaan vasemman puoleisen reunaulokkeen tyyppisiä tapauksia, joissa reunaulokkeella on kevyen liikenteen väylä.

2.2 Kevyen liikenteen väylän suunnittelukuormat eri aikoina

Siltojen kansilaatat olivat 1900-luvun alkuun saakka puuta ja ne mitoitettiin joko kokemusperäisesti tai vapaasti pituuskannattimiin tuettuina poikkisuuntaisina palkkeina. 1900-luvun alussa teräsbetoniset kansilaatat mitoitettiin vapaasti tuettuina, jatkuvina palkkeina ottaen jatkuvuuden vaikutus likimääräisesti huomioon. Kansilaattojen laskenta kehittyi asteittain, kunnes apuvälineiksi saatiin 1950-luvulta alkaen kansilaattojen taulukkikirjoja, joita laativat muun muassa itävaltalainen Adolf Pucher ja saksalainen Hellmut Homberg. Tietokonelaskentaa on käytetty laattasiltojen laskemiseen 1960-luvun lopulta alkaen. Laskentaohjelmat perustuivat aluksi differenssimenetelmään ja 1980-luvulta alkaen elementtimenetelmään (FEM). [1, s. 406.]



Kuva 3. Palkkisillan poikkileikkaus. Kuvaan on merkitty mallin mittasuhteet ja pisteet, joiden suhteen laatan voimasuureet on voitu ennen FEM-laskentaohjelmia laskea taulukkikirjan avulla. Reunauloke on pisteiden 1 ja 3 välissä oleva alue. [13].

Jalkakäytävät ja käyntisillat mitoitettiin 1930-luvulta alkaen viranomaisen harkinnan mukaan tasaiselle kuormalle 250–400 kg/m². Vuoden 1955 kuormitusmääräyksissä määriteltiin jalankulkukuorma rakenteille, jotka olivat tarkoitettuja yksinomaan jalankulkijoille tai polkupyöräliikenteelle, suuruudeltaan 400 kg/m². [1, s. 417.]

Vuoden 1955 kuormitusmääräyksistä alkaen ohjeistettiin lisäksi sijoittamaan yksittäinen pyöräkuorma mihin tahansa ajotielle tai sen ulkopuolelle, mihin ajoneuvo voi joutua. Pyöräkuorman suuruus vaihteli kuormitusluokan mukaan. Eri kuormitusmääräyksissä ja -normeissa esiintyvät kevyen liikenteen väylälle sijoitettavat kuormakaaviot esitellään luvuissa 2.2.1–2.2.7.

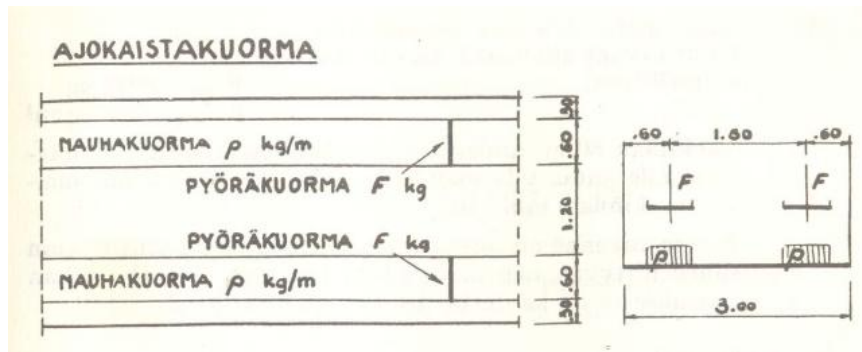
Vuonna 1976 Tie- ja vesirakennushallitus määritteli kevyen liikenteen sillan mitoituskorkeuden, jossa otettiin huomioon 12 tonnin painoisen kunnossapitoajoneuvojen käyttömahdollisuus [1, s. 417]. Kyseisen 12 tonnin huoltoajoneuvon kuormakaavio löytyy rakenteiden kuormitusohjeesta RIL 144–1982 ja esitellään tämän opinnäytetyön luvussa 2.2.5.

Ensimmäinen kirjallisuudessa esiintyvä ohjeistus, jonka mukaan ajoneuvoliikenteen kuormittamalla sillalla välittömästi ajorataan liittyvä jalkakäytävä tai pyörätie suunnitellaan pääsääntöisesti samoilla kuormilla kuin ajorata, on Rakennusinsinööriliiton julkaisemassa rakenteiden kuormitusohjeissa RIL 144–1997. Tällöin ohjeen mukaan varaudutaan siihen, että jalkakäytävä otetaan myöhemmin ajoneuvoliikenteen käyttöön. [12, s. 94.]

2.2.1 RKM 1955

Rakennusinsinööriyhdistyksen julkaisussa Rakenteiden kuormitusmääräykset vuodelta 1955 (RKM 55) annettiin määräykset, joita oli käytettävä suunniteltaessa rakennuksia, siltoja ja muita rakenteita. [2, s. 11.]

Ajoneuvokuormia käsitellään kuormitusmääräyksissä omassa luvussaan. Ajoneuvo kuorma muodostetaan yhdestä tai useammasta ajokaistakuormasta tai erillisestä pyöräkuormasta siten, että aiheutuu suurin vaikutus. Ajokaistakuorma muodostuu nauha kuormasta p ja pyöräkuormasta F , kuva 4.



Kuva 4. RKM 55:n mukaiset ajoneuvokuormat [2, s. 27.] Pyöräkuorman F (25–70 kN) joutumista jalkakäytävälle tuli käsitellä poikkeuksellisenä ylikuormana.

Kuormitusmääräysten mukaan ajotielle sijoitetaan leveyssuunnassa yksi tai useampia ajokaistakuormia. Kantavuuden tarkistamisesta erilliselle pyöräkuormalle todetaan:

”Erillinen pyöräkuorma voidaan sijoittaa mihin hyvänsä ajotielle tai sen ulkopuolellekin sellaiseen kohtaan, johon auto voi joutua”. [2, s. 27.]

Auton pyöräkuorman joutumista sillan ajoradasta erilliselle jalkakäytävälle käsitellään poikkeuksellisenä ylikuormana. Lisäksi todetaan, että

” - poikkeuksellisen ylikuorman vaikutusta arvostellessaan suunnittelija ei ole sidottu normaalimääräysten sallittuihin jännityksiin ja varmuuslukuihin, vaan hänen on arvioitava, minkälaiset ylikuormat ovat mahdollisia ja miten niiden vaikutus voidaan rajoittaa, ettei koko rakenne sorru eikä ihmishengelle tai rakenteen lähellä ja alla olevalle vieraalle omaisuudelle aiheudu välitöntä vaaraa.” [2, s. 13.]

Jalankulkijakuorman suuruus on 400 kg/m^2 , johon sisältyy sysäyksistä ja tärinästä aiheutuvat lisävoimat. Muun liikennekuorman kanssa esiintyessään jalankulkijakuormasta saa vähentää 100 kg/m^2 . Pyöräkuormille jännevälistä riippumatta sekä nauhakuormille alle 80 m jännevälistä rakenteissa annetaan taulukon 1 mukaiset arvot.

Taulukko 1. Pyöräkuormille F ja nauhakuormille p eri luokissa annettavat arvot, RKM 55.

Luokka	Kuvaus	
I	Rakenteet, joilla raskaimmat ajoneuvot voivat liikkua: kaupunkien ja liikennekeskusten sekä näiden lähiympäristöjen sillat.	$F = 7000 \text{ kg}$ $p = 1200 \text{ kg/m}$
II	Rakenteet, joilla kaikki autot ja tiekoneet voivat liikkua: maantiesillat yleensä.	$F = 6000 \text{ kg}$ $p = 900 \text{ kg/m}$
III	Rakenteet, joilla raskaimmat ajoneuvot eivät yleensä liiku: hyvin vähäliikenteisten maanteiden sillat	$F = 4000 \text{ kg}$ $p = 900 \text{ kg/m}$
IV	Rakenteet, joilla vain henkilöautot ja muut kevyet ajoneuvot saavat liikkua säännöllisesti.	$F = 2500 \text{ kg}$ $p = 400 \text{ kg/m}$

Luokkaan I (kuorman tunnus AI) kuuluvat rakenteet on mitoitettu käyttäen pyöräkuormaa, jonka suuruus on $7000 \text{ kg} = 70 \text{ kN}$. Tällöin voidaan olettaa, että myös kevyen liikenteen väylä on mitoitettu 70 kN suuruiselle erilliselle pyöräkuormalle. Pyöräkuorman joutumista kevyen liikenteen väylälle on kuitenkin edellä olevan lainauksen mukaisesti käsitelty poikkeuksellisenä ylikuormana, jolloin ei suunnittelussa ole ollut pakko käyttää normaalimääräysten mukaisia jännityksiä ja varmuuslukuja. Toinen mahdollinen tulkinta rakennusmääräyksistä on, että kevyen liikenteen väylä on voitu käsitellä luokkaan II – IV kuuluvana rakenteena, jolloin kevyen liikenteen väylälle sijoitettava pyöräkuorma on välillä $25 \text{ kN} - 60 \text{ kN}$.

Pystysuorista lisävoimista todetaan, että ajokaistakuormaan kuuluvien pyöräkuormien sysäyksistä ja tärinästä johtuva lisävoima eli sysäyslisä on ajotietä kantavissa rakenteissa 40% . Erilliseen pyöräkuormaan, joka koskettaa sillan kaidetta, ei tule sysäyslisää. [2, s. 28.]

Ajokaistakuormiin saa tehdä vähennyksiä, kun rakennetta kuormittaa useampi kuin kaksi ajokaistaa. Nauhakuormiin saa tehdä vähennyksiä, jotka riippuvat nauhakuorman suuruudesta ja kuormituspituudesta. Näitä vähennyksiä ei tässä käsitellä, koska ajokaistakuormia ei määrätä sijoitettavaksi kevyen liikenteen väylälle ja vähennykset liittyvät sillan pituussuunnan mitoittamisessa tehtävin tarkasteluihin.

2.2.2 RKN 1969

Vuoden 1969 Rakenteiden kuormitusnormit (RKN 69) esitettiin julkaisussa RIL 59 [3]. Ajoneuvoliikenteen kuormat päivittyivät siten, että kuormaluokassa 1 (Ak1) tavallisen ajoneuvokuorman akselikuorman suuruus oli sama kuin RKM 1955:ssä eli 140 kN , mutta erillisen pyöräkuorman suuruudeksi määrättiin 100 kN . [3, s. 30–32.]

Erillisen pyöräkuorman sijoittamisesta todetaan:

”Pyöräkuorma, suuruudeltaan $10 \text{ Mp} (=100 \text{ kN})$, voi sijaita missä tahansa ajoradalla tai sen ulkopuolella, mihin ajoneuvo voi joutua. Ajoradan ja siihen samassa tasossa liittyvien muiden kaistojen ja pientareiden tai suojakaiteen ulkopuolelle joutunut pyöräkuorma muodostaa yhdessä pysyvien kuormien kanssa poikkeuksellisen kuormituksen.” [3, s. 32.]

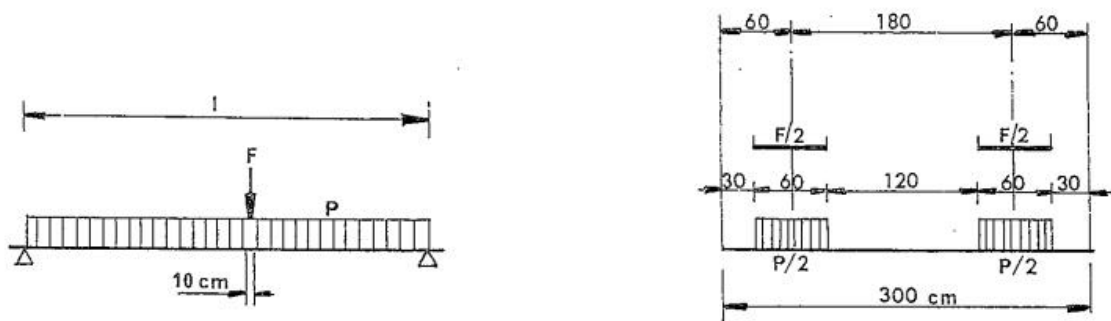
Poikkeuksellisen kuorman määritelmässä todetaan:

"Poikkeuksellinen kuormitus ("katastrofikuorma") on onnettomuuden, odottamattomien luonnonilmiöiden tms. aiheuttama tilanne, jossa rakenne joutuu sellaisen rasituksen alaiseksi, jota siinä normaalioloissa ei esiinny. Poikkeuksellisen kuormituksen vaikutuksen alainen rakenne mitoitetaan eri rakennusaineita koskevien normien mukaan. Suunnittelijan on lisäksi kiinnitettävä huomiota siihen, että mahdollinen vaurio jää rakenteessa paikalliseksi." [5, s. 11.]

Taulukko 2. Pyöräkuormille $F/2$ ja nauhakuormille $p/2$ eri luokissa annettavat arvot, RKN 69.

Kuormaluokka	Ak1	Ak2	Ak3	
Pyöräkuorma $F/2$	70	60	40	kN
Nauhakuorma $p/2$	12	9	4,5	kN/m

Liikennekuormat ovat samat kaikissa vuosina 1969–1974 ilmestyneissä RIL 59 painoksissa 59 – 59 d [3; 4; 5; 6]. RKN 69 -normista käytetään joissakin piirustuksissa nimitystä RKN 71, jonka tulkitaan tässä työssä viittaavan vuonna 1971 julkaistuun RIL 59 c -painokseen, jossa kuormitusmääräykset ovat samat kuin RKN 69:ssä.



Kuva 5. RKN 69 -normin mukainen tavallinen ajoneuvokuorma.

Sysäyslisä 40 % (kun täyterros 0,5 m tai alle) on otettava huomioon paitsi akseli-kuorman ja erikoiskuorman, myös erillisen pyöräkuorman lisänä, paitsi silloin kun pyörä koskettaa sillan tms. kaidetta [3, s. 34].

Jalkakäytävän kuorma on RKN 69:ssä nimeltään tungoskuorma, suuruudeltaan 4 kN/m^2 . Tungoskuormaan ei lisätä sysäyskerrointa. Jalkakäytävän tungoskuormaa saa vähentää jännemitan ylittäessä 15 m. Tehtävän vähennyksen suuruus kasvaa aina 75 m jänneväliin saakka. Vähennyskerroimen arvo vaihtelee jännemitan mukaan välillä 0,5–1. [3, s. 25, s. 31.]

2.2.3 PKM 71

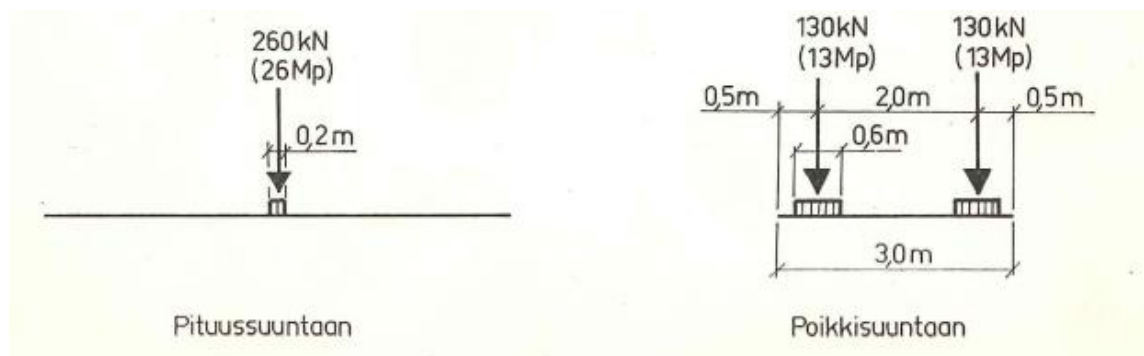
Pohjoismaisen tieteknillisen liiton työryhmä teki 9.12.1971 ehdotuksen [20] väliaikaisiksi pohjoismaisiksi tiesiltojen kuormamääräyksiksi (PKM 71). Tie- ja vesirakennushallitus päätti 14.2.1974 ottaa kyseiset kuormamääräykset käyttöön Suomessa [7, alkusana].

Vuonna 1975 julkaistuun rakenteiden kuormitusnormien painokseen RIL 59 e [7] on koottu PKM 71:n mukaiset kuormamääräykset. Liikennekuormat ovat samat myös RIL 59 -normin viimeisessä painoksessa 59 f [8] vuodelta 1978. RIL:n julkaisuissa oleva sisältö on liikennekuormien osalta sama kuin edellä mainitussa vuoden 1971 ehdotuksessa kuormamääräyksiksi.

PKM 71:ssä todetaan jalkakäytävän ja pyörätien mitoittamisesta seuraavaa:

”Jalkakäytävä ja pyörätie, jotka ovat erotetut ajoradasta (korokkeella tai kaiteella), kuormitetaan $p = 4 \text{ kN/m}^2$ suuruisella pinta-alkuormalla. Lisäksi kyseiset alueet on kuormitettava kuormakaavio 2:lla tai kuormakaavio 3:lla ja tarkistettava, ettei murtoa synny. Tämän tarkistuksen voi jättää suorittamatta, jos jalkakäytävä tai pyörätie on erotettu ajoradasta siten, että ajoneuvot eivät pääse ajamaan niille. [7, s. 28.]

Lainauksen perusteella korokkeella tai kaiteella erotetun kevyen liikenteen väylä tulee tarkistaa kuormakaavio 2, joka on esitetty kuvassa 6.



Kuva 6. PKM 71 mukainen kuormakaavio 2, jolla tarkastetaan kevyen liikenteen väylän kantavuus.

Kuormakaavio 2 käsittää yhden 260 kN:n suuruisen akselikuorman, kuormakaavio 3 puolestaan yhden pyöräkuorman, jonka suuruus ja kosketuspinta ovat samat kuin kuormakaaviossa 2. Pyöräkuorma sijoitetaan mielivaltaisesti sillan poikkisuunnassa,

pienin kosketuspinnan keskiöetäisyys kaiteeseen tai muuhun esteeseen on 0,5 m. Kuormissa on sysäyksistä aiheutuva lisäys mukaan luettuna. [7, s. 26–28.]

Jalkakäytävän pinta-alakuorma 4 kN/m^2 pienennetään puoleen, kun kuormakaavio kuormittaa ajorataa samanaikaisesti [7, s. 28].

2.2.4 MAA 75

Suomessa on 111 siltaa, jotka on suunniteltu vuoden 1975 moottoriajoneuvoasetuksen (MAA 75) mukaan [1, s. 415]. Tarkkaan ottaen MAA 75 on vuonna 1975 annettu asetus moottoriajoneuvoasetuksen muuttamisesta (142/1975). Sillä on tehty muutoksia ja lisäyksiä alun perin vuodelta 1957 olevaan moottoriajoneuvoasetukseen (330/1957).

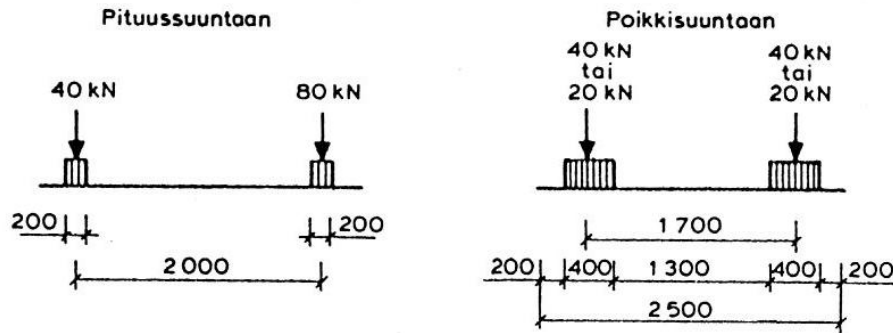
MAA 75:ssä määrätään auton suurimmaksi sallituksi akselipainoksi 10,0 tonnia ja telipainoksi 16,0 tonnia. Ajoneuvoyhdistelmän suurin sallittu kokonaispaino on 42 tonnia ja pituus 22 metriä. Lisäksi auton suurimmaksi korkeudeksi määrätään 4,0 metriä ja leveydeksi 2,50 metriä. Vuoden 1957 ajoneuvoasetuksen mukaiset suurimmat sallitut painot ovat: akselipaino 6,4 tonnia ja telipaino 10 tonnia, ajoneuvoyhdistelmän suurin paino noin 30 tonnia (lasketaan pituuden mukaan), pituus 14,0 metriä sekä auton suurin korkeus 3,80 metriä ja leveys 2,40 metriä. [26, 27.]

Vuoden 1957 asetuksessa tai vuoden 1975 muutosasetuksessa ei ole mainintaa kevyen liikenteen väylään sovellettavista kuormakaavioista. MAA 75:n mukaan suunniteltuja siltoja ei tarkasteltavassa aineistossa ole.

2.2.5 RIL 144–1982/1983/1990

Rakenteiden kuormitusohjeen RIL 144–1982 (ja uusintapainosten RIL 144–1983/1990) mukaan jalkakäytävä ja pyörätie, jotka on erotettu ajoradasta (korokkeella tai kaiteella), kuormitetaan $q = 4 \text{ kN/m}^2$ suuruisella pintakuormalla. Lisäksi kyseiset alueet kuormitetaan vaihtoehtoisesti kuormakaavio 2:lla tai 3:lla (samat PKM 71:n mukaiset kuormakaaviot kuin kuvassa 6). Lisäyksenä PKM 71 -normiin nähden kyseiset kuormakaaviot oletetaan onnettomuuskuormiksi ja akselikuorma F vaihtelee kuormaluokan (Lk1–Lk3) mukaan välillä 160–260 kN. [9, s. 82–84.]

RIL 144–1982:ssä esitellään Tie- ja vesirakennushallituksen vuonna 1976 määrittämä kevyen liikenteen sillan mitoituksessa käytettävä 12 tonnin huoltoajoneuvon kuormakaavio. Ohjeessa todetaan, että mikäli jalkakäytävä tai pyörätie on erotettu ajoradasta siten, etteivät ajoneuvot ajoradalta voi joutua niille, tarkistetaan ne kevyen liikenteen kuormakaavioille 1 (4 kN/m^2) tai kevyen liikenteen kuormakaavioille 2 (kuva 7).



Kuva 7. Tie- ja vesirakennushallituksen vuonna 1976 määrittämä kevyen liikenteen väylän kuormakaavio 2 (12 tonnin huoltoajoneuvo) [9, s.89].

RIL 144–1982 mukaiset osavarmuuskertoimet ovat onnettomuuskuormalle 1,0 ja pysyisuuralle liikennekuormalle 1,8 [9, s. 124–126]. Kuormakaaviot sisältävät sysäyslisän.

2.2.6 RIL 144–1997/2002

RIL 144–1997 ja RIL 144–2002:n mukaan ajoneuvoliikenteen kuormittamalla sillalla välittömästi ajorataan liittyvä jalkakäytävä tai pyörätie suunnitellaan yleensä samoilla kuormilla kuin ajorata, jolloin varaudutaan siihen, että jalkakäytävä otetaan myöhemmin ajoneuvoliikenteen käyttöön. Jos jalkakäytävän tai pyörätien ottaminen ajoneuvoliikenteen käyttöön on epätodennäköistä tai mahdotonta esimerkiksi sillan rakenteesta johtuen, mitoitetaan ne kevyen liikenteen kuormille ja tarkistetaan mitoitus myös kuormakaavioille 2 ja 3, samoin kuin RIL 144–1982:n mukaan. [12, s. 94.]

Kevyen liikenteen siltojen kuormalle (Klk) suunnitellun sillan todetaan kantavan taulukon 3 mukaiset ajoneuvot.

Taulukko 3. Kevyen liikenteen siltojen kuormalle (Klk) suunnitellun sillan kantamat ajoneuvot [12, s. 89].

Ajoneuvo	Etuakseli [t]	Akseliväli [m]	Taka-akseli (tai teli) [t]
Tiehöylä	6	5	6+6
Aura-auto	7	4	7
Traktori	6	2,5	6

2.2.7 Eurokoodi

Eurokoodit ovat korvanneet aiemmat siltojen kantavien rakenteiden suunnittelussa käytetyt ohjeet 1.6.2010 lähtien [17].

Eurokoodin kansallisen liitteen [19] mukaan välittömästi ajorataan liittyvä jalkakäytävä tai pyörätie suunnitellaan liikennekuormille, eli varaudutaan siihen, että ne otetaan myöhemmin ajoneuvoliikenteen käyttöön.

Tiesiltojen ja rautatiesiltojen yhteydessä kevyen liikenteen väylien kuormituksena käytetään tasaisesti jakautunutta kuormaa $q_{fk} = 5 \text{ kN/m}^2$ ja pistekuormaa $Q_{fwk} = 20 \text{ kN}$. [18, 19.]

Sillalla kulkevien ajoneuvojen suistumisesta johtuvat kuormat tarkistetaan seuraavasti: yksi suistunut akselikuorma, jonka suuruus on $\alpha_{Q2}Q_{2k}$ eli $1,5 \times 200 \text{ kN} = 300 \text{ kN}$, sijoitetaan ja suunnataan kannen suojaamattomalle osalle siten, että saadaan aikaan epäedullisin vaikutus kaiteen vieressä. Jos asennetaan kevyen liikenteen väylää riittävästi suojaava kaide, ei kevyen liikenteen väylää tarvitse kuormittaa pyörä- tai ajoneuvo-kuormalla. [18.]

2.3 Yhteenveto kevyen liikenteen väylän mitoituskuormista

Tämän työn aineistoon kuuluvat sillat on suunniteltu normien RKM 55, RKN 69 tai PKM 71 mukaan. Kyseisten normien mitoituskuormat on koottu taulukkoon 4. Kevyen liikenteen väylälle sijoitettavien kuormakaavioiden mitat ja pyöräkuorman kosketuspinta-ala ja etäisyys kaiteeseen kunkin normin osalta on esitelty luvussa 2.2.

Taulukko 4. Yhteenveto kevyen liikenteen väylän mitoituskuormista.

Normi ja kuorma-luokan tunnus	Pinta-alakuorma [kN/m ²]	Erillinen Pyöräkuorma ⁽¹⁾ [kN]	Pyöräkuorman sysäyslisä	Kuormakerroin (MRT-vertailussa)
RKM 55, AI	3–4 ⁽⁶⁾	70	1,4 ⁽²⁾	1,5 ⁽³⁾
RKN 69, Ak1	2–4 ⁽⁷⁾	100	1,4 ⁽²⁾	1,5 ⁽³⁾
PKM 71, Lk1	2–4 ⁽⁶⁾	130 ⁽⁴⁾	Sisältyy	1,6 ⁽⁵⁾

⁽¹⁾ Sijoitetaan sillan poikkisuunnassa, mihin tahansa auto voi joutua.

⁽²⁾ Erillisen pyöräkuorman sysäyslisä, ei käytetä kun kuorma koskettaa sillan kaidetta.

⁽³⁾ Liikenneviraston kantavuuslaskentaohjeen 36/2015 mukaan. RKM 55 ja RKN 69 ovat sallittujen jännitysten mukaisia mitoitusmenetelmiä, jolloin murtorajatilan vertailussa käytetään kuorman kertoimena arvoa 1,5.

⁽⁴⁾ PKM 71 -normin mukaan suunniteltaessa tarkistetaan kevyen liikenteen väylä pyöräkuorman lisäksi myös 260 kN suuruiselle akselikuormalle.

⁽⁵⁾ Liikenneviraston kantavuuslaskentaohjeen 36/2015 mukaan.

⁽⁶⁾ Pinta-alakuormaan 4 kN/m² voidaan tehdä vähennys, kun pinta-alakuorma esiintyy muun liikennekuorman kanssa samanaikaisesti.

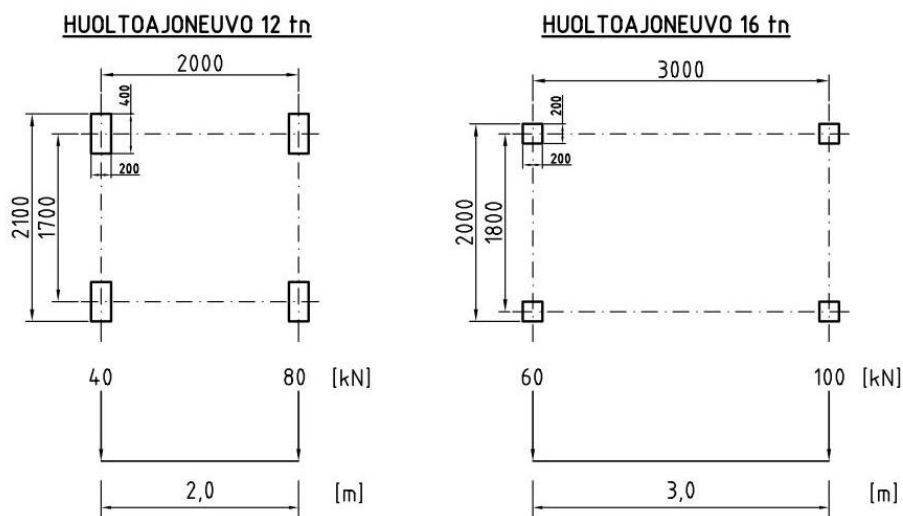
⁽⁷⁾ Pinta-alakuormaan 4 kN/m² voidaan tehdä vähennys, kun jännemitta ylittää 15 m, vähennyksen suuruus kasvaa aina 75 m jännemittaan asti.

Kevyen liikenteen väylälle sijoitettavan pyöräkuorman suuruus on eniten tulkinvarainen RKM 55 -normissa (ks. luku 2.2.1). Sen sijaan RKN 69 kuormaluokka 1:n (Ak1) mukaan suunniteltaessa suuruudeltaan 100 kN suuruinen pyöräkuorma voi sijaita missä tahansa ajoradalla tai sen ulkopuolella, mihin ajoneuvo voi joutua. PKM 71 -normissa määrätään yksiselitteisesti sijoittamaan taulukon 4 mukainen erillinen pyöräkuorma (ja mikäli mahtuu, 260 kN suuruinen akselikuorma) ajoradan lisäksi myös jalakäytävälle ja pyörätielle.

3 Kantavuuden määrittämisessä käytetyt kuormat

3.1 Huoltoajoneuvot 12 tn ja 16 tn

Kaikkien kohteiden kantavuudet tarkistettiin RIL-144 kuormitusohjeiden mukaiselle 12 tonnin huoltoajoneuvolle sekä eurokoodin SFS-EN 1991-2 [18] ja kansallisen liitteen (NA) [19] kohdissa 5.3.2.3 ja 5.6.3 määritellylle 16 tonnin huoltoajoneuvolle, kuva 8.

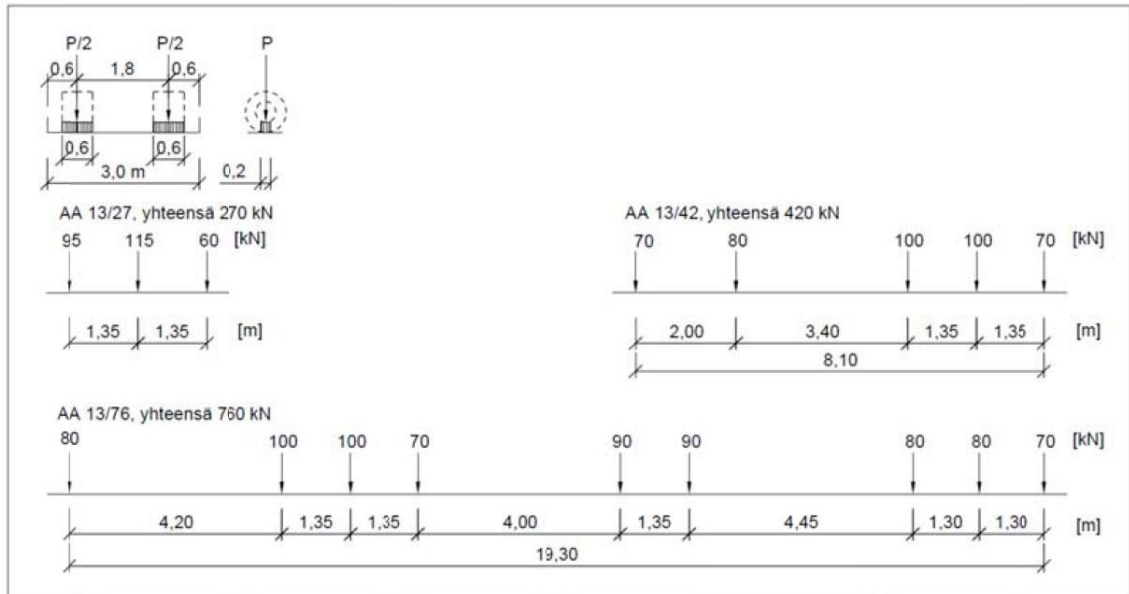


Kuva 8. Huoltoajoneuvot 12 tn ja 16 tn.

3.2 Ajoneuvoasetuksen 2013 mukaiset kuormakaaviot (AA 13)

Liikenneviraston kantavuuslaskentaohjeen (36/2015) mukaan ajoneuvoasetuskaavio ja pintakuorma täytyy ottaa huomioon myös kevyen liikenteen väylällä, mikäli sille pääsyä ei ole estetty esimerkiksi kaiteella. Pintakuorman p suuruus on $4,5 \text{ kN/m}^2$. Pintakuormaa ei kerrota sysäyslisällä. [16, s. 26.]

Pintakuorma on kantavuuslaskentaohjeen mukaan päällekkäinen kuormakaavion kanssa pääkannattajien tai kansilaatan pääsuunnan voimasuureita laskettaessa. Tässä työssä tehdyissä tarkasteluissa kevyen liikenteen väylällä pintakuormaa ja kuormakaaviota ei huomioitu samaan aikaan. Kantavuuslaskentaohjeen mukaan pintakuorman päällekkäinen vaikutus voidaan jättää huomiotta myös pääsuunnassa, mikäli sillan hyödyllinen leveys on alle 5,5 m. [16, s. 26.]

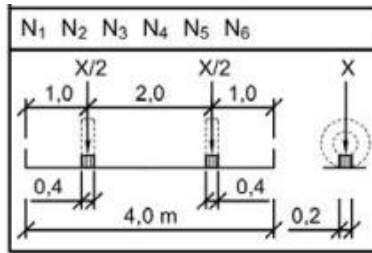


Kuva 9. Ajoneuvoasetuksen 2013 mukaiset kuormakaaviot AA 13/27, AA13/42 sekä AA13/76.

Erikoiskuljetuskaavioita (EK) ei sijoiteta kevyen liikenteen väylälle, jos kuljetusten mitat tai mahdolliset käännökset eivät sitä edellytä. Tässä työssä kuitenkin kantavuus erikoiskuljetuksille tarkistetaan kaikkien siltojen osalta (ajoneuvonostureita kuvaaville) EK-kuormakaavioille N_1 – N_6 .

	KAAVIO PITUUSSUUNNASSA	KAAVION PITUUS [m]
N_1		3,5
N_2		6,1
N_3		8,7
N_4		7,9
N_5		9,6
N_6		12,2

Kuva 10. Erikoiskuljetuskaaviot N_1 – N_6 pituussuunnassa.



Kuva 11. Pyörien kosketuspinnat pituus- ja poikkisuunnassa, erikoiskuljetuskaaviot N_1 – N_6 .

Erikoiskuljetuskaavioille haetaan suurin sallittu akselipaino, jonka silta kestää. Sillan kantavuutta todelliselle kuljetukselle arvioidaan laskettujen erikoiskuljetuskaavioiden avulla. Siltojen kantavuuksia voidaan laskea myös erikseen todelliselle kuljetukselle, kun kuljetusta ei voida luotettavasti verrata mihinkään vakiokaavioon. [16, s. 27]

3.3 Huoltokalusto

Katujen hoidossa käytettävää kalustoa selvitettiin tiedustelemalla Helsingin kaupungin rakentamispalvelu Staralta, millaista kalustoa kevyen liikenteen väylillä käytetään. Star on urakoitsija, joka vastaa katujen hoidosta joillain alueilla Helsingissä. Staran keskuksen varikolla olevan kaluston suurimmat sallitut akselipainot tarkistettiin ajoneuvojen dokumenteista. Kuormakaavioiden muodostamiseen käytettiin suurimpia sallittuja majoja. Akselivälit, kokonais- ja raideleveydet sekä renkaiden leveydet mitattiin rullamitalilla. Niiltä osin kuin kalustosta oli saatavilla tekniset tiedot valmistajien verkkosivuilta, käytettiin kuormakaavioiden muodostamiseen teknisten tietojen mukaisia mittoja.

Lain mukaan kevyen liikenteen väylillä ei saa liikkua moottoriajoneuvolla, ellei sitä ole erikseen sallittu. Poikkeuksena tähän ovat tienpitoajoneuvot. Staran edustajilta saadun tiedon mukaan ajoneuvoliikenteen silloilla oleville kevyen liikenteen väylille ei ole asetettu painorajoituksia. Heidän mukaansa keskusta-alueella olevilla silloilla, joissa on riittävän leveät kevyen liikenteen väylät, voi talvella lunta poistettaessa olla tilanne, jossa peräkkäin ovat katuhoylä (20 tonnia), traktori (16 tn) ja perässä useampi kuorma-auto (18–26 tn), joihin lumi lastataan ja jotka hiekoittavat auratun väylän. Kantavuuslaskennassa rajoituttiin tarkastelemaan yksittäisten ajoneuvojen aiheuttamia kuormituksia. LUSAS-ohjelmalla mallinnettiin kuitenkin esimerkinomaisesti tilanne, jossa 16 tonnin kuorma-auto ja 16 tonnin huoltoajoneuvo ovat ulokkeella siten, että painavimmat akselilinjat ovat kolmen metrin päässä toisistaan. Tällöin taivutusmomentti oli noin 10 % suurempi, kuin yksittäisen 16 tonnin ajoneuvon aiheuttama taivutusmomentti.

Tyypillisiä pienten siltojen ja kapeiden väylien huoltoajoneuvoja ovat Wille-traktorit, joiden suurin sallittu kokonaismassa on mallista riippuen 6–14 tn ja leveys vaihtelee välillä 1,4–2,2 m. Näitä monitoimikoneita käytetään väylien pesemiseen, hiekoitukseen ja auraamiseen. Pienimpien kuorma-autojen suurin sallittu kokonaismassa on 6,5–7,5 tn ja leveydeltään 2 m.

Staran kalustoon kuuluvien 12 tonnin ja 16 tonnin painoisten traktorien mitat poikkeavat niin vähän luvussa 3.1 mainittuja normien mukaisia huoltoajoneuvojen mitoista, että normin mukaisten ajoneuvokaavioiden katsotaan edustavan kyseisten Staran kalustoon kuuluvien traktorien kuormakaavioita. Taulukko kaluston mitoista ja akselipainoista esitetään liitteessä 1.

3.4 Päälylystystöissä käytettävä kalusto

Päälylystystöissä käytettävän kaluston tekniset tiedot selvitettiin valmistajien verkkosivuilta löytyvistä esitteistä. Lista siltojen kevyen liikenteen väylien kunnostustöissä käytettävistä tyypillisistä koneista saatiin NCC:n työpäälliköltä.

Kantavuus tarkistetaan Wirtgenin päältä ajettavalle jyräjälle, jonka suurin massa on 17 tonnia ja leveys 2,1 m. Vögelen levittäjän suurin massa puolestaan on 21,2 tonnia ja leveys muunneltavissa välillä 3,4–4,2 m.

Tyypilliset kevyen liikenteen väylällä käytettävät jyrät ovat NCC:n työpäällikön mukaan massaltaan 3–8,6 tonnia ja leveydeltään 1,2–1,7 m.

3.5 Lujuudet, osavarmuusluvut, yhdistelykertoimet ja sysäyskertoimet

3.5.1 Materiaalien lujuudet ja osavarmuusluvut

Betonisiltojen lujuusluokat määritettiin alkuperäisessä suunnitelmassa esitettyjen materiaalien perusteella. Suunnitelmissa olevan betonin lujuuden otaksuttiin vastaavan eurokoodien mukaista kuutiolujuusluokkaa $f_{ck,cube}$ (150 mm kuutiolla määrätty ominaislujuus) taulukon 5 mukaisesti [16, s. 13]. Taulukossa esitetään vain aineistoon kuuluvien siltojen kansirakenteiden lujuusluokat.

Taulukko 5. Betonin lujuusluokitusta vastaavia 28 vrk ikäisiä lujuuksia eri koekappaleilla sekä Suomessa eri aikaan käytössä olevien normien betonien lujuusluokat [16, s. 13].

Vanhat normit [kp/cm ²]	Suomen RakMk B4 [N/mm ²]	Nykyinen lujuusluokka CEN (EN) [N/mm ²]	150x300 mm lieriöllä määrätty ominaislujuus f_{ck} [N/mm ²]	150 mm kuutiolla määrätty ominaislujuus [N/mm ²]	100 mm kuutiolla määrätty ominaislujuus [N/mm ²]
K300	K30	C25/30	25	30	20,5
K350	K35	C28/35	28	35	36,0
K400	K40	C32/40	32	40	41,0
K450	K45	C35/45	35	45	46,5

Betonin iän myötä tapahtuva lujittuminen huomioitiin kantavuuslaskentaohjeen mukaisesti [16, s 14] siten, että ennen vuotta 1985 rakennettujen siltojen kuutiopuristuslujuutta $f_{ck,cube}$ korotettiin 5 MPa. Tällöin esimerkiksi piirustusten mukaan K300 -lujuusluokkaa olevan betonin lujuusluokka korotettiin vastaamaan eurokoodin lujuusluokkaa C28/35. Korotus tehtiin kaikkiin kohteisiin, jolloin oletettiin, että rakenne on todettu vauriottomaksi.

Betonirakenteen leikkauksessa käytettävä betonin vetolujuus $f_{ctk,0,05}$ määritettiin kantavuuslaskentaohjeen [16, s. 50] mukaisesti:

$$f_{ctk,0,05} = f_{ctk} = f_{ck,cube}^{(2/3)} \quad (1)$$

Betonin puristuslujuuden mitoitusarvo f_{cd} määritettiin Liikenneviraston eurokoodin soveltamisohjeen NCCI 2 [17, s. 17] mukaan:

$$f_{cd} = 0,85 \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad (2)$$

Betonin vetolujuuden mitoitusarvo f_{ctd} määritettiin ohjeen NCCI 2 [17, s. 18] mukaan:

$$f_{ctd} = \frac{f_{ctk,0,05}}{\gamma_c} \quad (3)$$

Betonin osavarmuuslukuna γ_C käytettiin arvoa 1,35. Hyväkuntoiseksi todetun loppuun käytettävän sillan betonin osavarmuuslukua voidaan pienentää arvoon 1,25 [16, s 14]. Muut tapaukset, joissa osavarmuuslukua voidaan pienentää, esitetään taulukossa 6.

Taulukko 6. Betonin osavarmuusluvut [16, s 14].

Betonin osavarmuusluku γ_C	Rakenteen mitat perustuvat vain suunnitelmiin	Rakenteen mitat on mitattu kantavuuden kannalta kriittisissä kohdissa
Betonin lujuus perustuu suunnitelmissa esitettyihin arvoihin. Vauriokartoitusta ei ole tehty.	1,35	1,30
Betonin lujuus on selvitetty kattavasti koekappalein. Erikoistarkastuksessa ei ole havaittu rakenteellisia vaurioita	1,30	1,25

Teräsbetonirakenteissa on jännittämättöminä betoniterästankoina käytetty yleensä kuumavalssattua harjaterästankoa tai sileää pyöröterästankoa. Betoniterästankojen lujuuden, sitkeyden, hitsattavuuden ja tartunnan ominaisuudet ovat vaihdelleet ajan kuluessa. Ennen 1980-lukua Suomessa yleisesti käytössä olleen harjateräksen lujuusluokka vastaa myötölujuudeltaan 400 MPa terästä. [16, s. 14–15.]

Pyörö- ja harjaterästangot on vanhoissa piirustuksissa merkitty kuvan 12 mukaisin symbolein.

\emptyset = sileän teräksen merkintä piirustuksissa, teräksen laatu on mainittava; pyöreäreikäisen seulan tunnus silmänsuuruuden merkinnän yhteydessä
 \emptyset = harjatangon merkintä piirustuksissa

Kuva 12. Pyörö- ja harjaterästankojen merkinnät vanhoissa piirustuksissa [25, s. 15].

Betoniteräksen osavarmuuslukuna γ_s käytettiin arvoa 1,15. Hyväkuntoiseksi todetun loppuun käytettävän sillan betonin osavarmuuslukua voidaan pienentää arvoon 1,05 [16, s 15]. Muut tapaukset, joissa betoniteräksen osavarmuuslukua voidaan pienentää, esitetään taulukossa 7.

Taulukko 7. Betoniteräksen osavarmuusluvut [16, s 15].

Betoniteräksen osavarmuusluku γ_s	Rakenteen mitat perustuvat vain suunnitelmiin	Rakenteen mitat on mitattu kantavuuden kannalta kriittisissä kohdissa
Betonin lujuus perustuu suunnitelmissa esitettyihin arvoihin. Vauriokartoitusta ei ole tehty.	1,15	1,10
Betonin lujuus on selvitetty kattavasti koekappalein. Erikoistarkastuksessa ei ole havaittu rakenteellisia vaurioita	1,10	1,05

3.5.2 Kuormien osavarmuusluvut, yhdistelykertoimet ja sysäyskerroin

Siltojen kantavuuslaskennassa käytetyt kuormien yhdistelykaavat, yhdistelykertoimet ja osavarmuusluvut poikkeavat monessa tapauksessa uusille silloille tarkoitetuista arvoista [16, s. 35].

Kantavuuslaskennassa käytettiin Liikenneviraston siltojen kantavuuslaskentaohjeen [16] mukaista murtorajatilan mitoituskaavaa ja varmuuskertoimia. Käyttörajatilassa ei käytetä varmuuskertoimia. Siltojen kantavuuslaskennan murtorajatilan mitoituskaava on:

$$E_d = E_{d,G} + E_{d,Lk} \quad , \quad (4)$$

missä

$$E_{d,G} = \gamma_G * \Psi_{0,ULS,G} * G$$

$$E_{d,Lk} = \gamma_{Q_{k,i}} * \Psi_{0,ULS,Q_{k,i}} * Q_{k,i}$$

Rakenteen omaa painoa ($E_{d,G}$) laskettaessa huomioitiin kantavan rakenteen suunnitelmapiirustuksiin perustuvat mitat sekä pintarakenteiden todelliset paksuudet. Omaan painoon kuuluvat sillan kaikki kaiteet ja varusteet. Omapainon osavarmuusluku on:

$$\gamma_G = 1,15$$

Kantavuuslaskennassa ei huomioitu pysyviin kuormiin lukeutuvia betonin virumaa tai kutistumaa eikä laatan pintalämpötilaeroista aiheutuvia kuormia.

Kutistumasta ja lämpötilaerosta aiheutuvia kuormia murtorajatilassa sekä kutistumasta aiheutuvia kuormia käyttörajatilassa ei huomioida, koska niiden yhdistelykerroin on 0.

Pintalämpötilaerokuorman yhdistelykerroin käyttörajatilassa on 0,25 [16, s. 39–40]. LUSAS:illa mallinnettu 10 asteen pintalämpötilaero ulokelaatassa aiheutti taivutusmomentin, joka oli suuruudeltaan 0,1 % 12 tonnin huoltoajoneuvon aiheuttamasta momentista, joten voimasuureen pienuuden vuoksi se jätettiin huomiotta.

Käyttörajatilassa laskettiin halkeamaleveys lyhytaikaisella kuormitusyhdistelmällä, jolloin viruman vaikutusta ei huomioida.

Kahdessa aineistoon kuuluvassa rautatien ylittävässä sillassa on kosketussuojalipat, joille laskelmissa huomioitiin lumikuorma. Kantavuuslaskentaohjeessa [16] ei ole esitetty lumi- tai jääkuorman varmuuslukua tai yhdistelykerrointa. Sen sijaan Liikenneviraston eurokoodin soveltamisohjeessa NCCI 1 [24] liikennekuorman kanssa samanaikaisen muun muuttuvan kuorman kertoimeksi annetaan $1,50 \cdot \Psi_{0,i}$. Esimerkiksi jääkuorman yhdistelyarvo Ψ_0 on 0,7, joten jääkuorman ollessa muuna muuttuvana kuormana (liikennekuorman ollessa määräävä muuttuva kuorma), kerroin on $1,50 \cdot 0,7 = 1,05$. [24, s. 54–55.] Kosketussuojalipparakenteelle ja lumikuormalle käytetään laskelmissa tästä poiketen yhteistä omapainon osavarmuuslukua 1,15, joka on varmalla puolella esimerkiksi jääkuormalle käytettävään kertoimeen verrattuna.

Tässä työssä käytettiin alennettuja liikennekuorman osavarmuuslukuja. Perusteluna on, että siltojen kantavuuslaskentaohjeen mukaan sekundäärirakenteissa (kuten reu-naulokkeet), joissa vaurioituminen on paikallista ja se ei johda päärakenteen vaurioitumiseen tai liikenneturvallisuuden vaarantumiseen, voidaan rakenteen kestävyyttä arvioidaessa käyttää alennettuja kuormien osavarmuuslukuja. [16, s. 35.] Liikenteen kuormien ($E_{d,Lk}$) osavarmuusluvut kaikille siltatyypeille ovat seuraavat (suluissa sekundäärirakenteille tarkoitetut alennetut osavarmuuslukujen arvot):

$$\gamma_{Q_{k,AA}} = 1,45 \text{ (1,25)} \quad (\text{AA-kuormakaavio})$$

$$\gamma_{Q_{k,p}} = 1,60 \text{ (1,35)} \quad (\text{Pintakuorma})$$

$$\gamma_{Q_{k,EK,k}} = 1,30 \text{ (1,15)} \quad (\text{Kertakuljetus})$$

$$\gamma_{Q_{k,EK,R}} = 1,40 \text{ (1,25)} \quad (\text{Reitistökuljetus})$$

Pysyvien kuormien / oman painon yhdistelykerroin murtorajatilassa on:

$$\Psi_{0,ULS,G} = 1,0$$

Tie- ja katusiltojen liikennekuormien yhdistelykerroin murtorajatilassa on:

$$\Psi_{0,ULS,Q_{k,i}} = 1,0$$

Yhteenvedona voidaan todeta, että tässä työssä kaikkien liikennekuormien osavarmuuslukuina käytettiin arvoa $\gamma_{Qk} = 1,25$, paitsi pintakuorman osavarmuuslukuina $\gamma_{Qk,p} = 1,35$. Kuten edellä todettiin, pintakuorman ja ajoneuvokuorman ei katsota vaikuttavan yhtä aikaa poikkisuuntaisia tarkasteluja tehtäessä, eikä muutoinkaan kantavuuslaskennassa tarkastella sellaisia kuormitustapauksia, joissa reunaulokkeella on useampi ajoneuvo yhtä aikaa.

Ajoneuvoasetuksen mukaisen kuormakaavion sysäyksen vaikutus otettiin huomioon kertomalla kunkin akselin paino sysäyskerroimella [16, s. 26], joka on:

$$\Phi = 1,40 - 0,006 \cdot L \geq 1,10, \quad (5)$$

missä L on tarkasteltavan rakenneosan mitta tai ulokkeen pituus.

Aineistossa olevien ulokkeiden pituus L on 1,0 m – 2,8 m, joten sysäyskerroimen arvo vaihtelee kaavan (5) mukaan laskettuna välillä 1,383 – 1,394.

Kantavuustarkasteluissa käytettiin kaavasta (5) poiketen liikennekuormille alennettua sysäyskerroimen arvoa $\Phi = 1,25$. Perusteluna on, että sysäys ei vaikuta poikkisuuntaista tarkastelua tehtäessä samalla intensiteetillä kuin sillan pääsuuntaisessa tarkastelussa, jossa dynaaminen vaikutus syntyy ajoneuvojen ajaessa sillalle. Reunaulokkeessa tämä vaikutus sillan päässä tulee huomioiduksi kannen päädyissä olevilla vahvistuspalkeilla tai lisäraudoitteilla, joka kaikissa kohteissa oletettiin olevan.

Taulukko 8. Yhteenvedo kuormien osavarmuusluvuista ja sysäyskerroimista.

Mitoituskuormakaavio	Pinta-alakuorma [kN/m ²]	Osavarmuus- luku	Sysäyskerroin
Pinta-alakuorma	4,5	1,35	-
Ajoneuvokuormakaaviot	-	1,25	1,25

4 Reunaulokkeiden vauriomekanismit ja korjaamistoimenpiteet

Betonikansissa tapahtuu muodonmuutoksia betonin kuivumiskutistuman, liikenteen kuormituksen ja lämpötilan vaihteluiden takia. Tällöin kansilaatan betoniin voi syntyä halkeamia. Halkeamariski on erityisen suuri pinnoilla, joilla betonin yläpinnan teräkset ovat vetorasituksen alaisena, kuten reunaulokelaatoissa. Halkeamaherkissä kohteissa tulee korjauksen yhteydessä kiinnittää huomiota vedeneristyksen halkeamankestävyyteen. Ohjeen NCCI 1 mukaan halkeamaherkillä silloilla harkitaan joko nestemäisenä levitettävän eristyksen valitsemista, paineentasausrakenteen käyttöä tai eristyksen suojaamista suojabetonilla. [24, s. 87.]

Vedeneristyksen ehjänä säilyminen on tärkeää sillan kannen yläpinnan betonin ja raudituksen säilyvyyden kannalta, sillä vaurioituneen eristyksen alle päässyt vesi voi muun muassa aiheuttaa pakkasrapautumaa ja talvisuolauksen myötä veteen liuennut suola voi kiihdyttää betonin rapautumista ja terästen korroosiota. Vedeneristyksen halkeamattomuuden edellytyksenä on, että rakenteen sallittuja halkeamaleveyksiä ei ylitetä. Liikennevirasto asettaa siltojen vedeneristyksen halkeamankestävyydelle seuraavanlaisia vaatimuksia [29]: Kermieristysrakenteen ja nestemäisenä levitettävän vedeneristyksen tulee säilyä vaurioitumattomana -20 °C lämpötilassa. Kumibitumimastiksieristyksen tulee säilyä vaurioitumattomana -10 °C lämpötilassa ja läpimeneviä halkeamia ei saa syntyä -20 °C lämpötilassa.

Liikenneviraston ylläpitämässä siltojen korjausohjeissa (SILKO) ei käsitellä erikseen reunaulokkeiden korjausta tai vahventamista. Suurista valukorjauksista yleensä on oma ohjeensa, samoin vahventamisesta. Halkeamien korjaamista käsittelevässä ohjeessa todetaan, että päällysrakenteissa halkeamia esiintyy usein hoikissa reunaulokkeissa. Halkeamia rakenteissa yleensä aiheuttavat suunnitteluvirheet, kuten liian pitkät liikuntasaumavälit tai riittämätön rauditus, betonin väärä koostumus ja betonointivirheet, väärin asennettu rauditus, puutteellinen jälkihoito ja suojaus, rakenteiden ylikuormitus, liikkuminen ja värinä. Halkeamia voidaan korjata injektoimalla tai imeyttämällä. [22, s. 6.]

Helsingin kaupungin silloissa reunaulokkeisiin kohdistuneet korjaustoimenpiteet ovat yleensä liittyneet koko kannen yläpinnan käsittäneisiin korjauksiin, mihin kuuluu tyypillisesti kannen yläpinnan betonin vesipiikkaus, muotoiluvalu, vedeneristyksen ja päälly-

teen uusiminen. Lisäksi tyypillisiä korjaustoimenpiteitä ovat laatan alapinnan pinnoitus, halkeamien injektointi, reunapalkkien uusiminen ja joskus koko ulokkeen uusiminen.

Reunaulokkeita voidaan tarvittaessa vahvistaa hiilikuidulla [23], lisäämällä raudoitusta laatan yläpintaan tai lisäämällä tukipalkkeja ulokelaatan alapuolelle. Hiilikuituvahvenus tapahtuu liimaamalla hiilikuitunauhat laatan yläpintaan. Vetoteräksiä voidaan lisätä piikkaamalla riittävän syvät urat laatan yläpintaan ja valamalla teräkset uriin. Ongelmana jälkikäteen tehtävässä vahventamisessa saattaa olla esimerkiksi lisäterästen puutteellinen tartunta vanhaan rakenteeseen.

Mikäli reunauloke todetaan kantavuudeltaan riittämättömäksi, voidaan uloke kokonaan uusida kestävyydeltään riittävänä. Edellytyksenä on, että pääkannattajien varaan on mahdollista rakentaa uusi reunauloke. Mahdollista on myös kaventaa reunauloketta, jolloin tukilinjaan kohdistuva momentti pienenee, tai poistaa reunauloke ja ohjata kevyt liikenne omalle sillalle.

5 Tarkasteltavat kohteet

5.1 Helsingin sillasto

Helsingin kaupungilla on siltarekisterin mukaan 653 siltaa. Siltojen yhteenlaskettu pinta-ala on noin 325 000 m². Lukumäärä vastaa noin 3,5 % siltarekisteriin merkityistä valtion ja kuntien tiesilloista. Helsingin silloista yli puolet ja siltojen pinta-alasta viidesosa on kevyen liikenteen väylillä. [21.]

Siltojen yleisin rakennusmateriaali on teräsbetoni, ajoneuvoliikenteen silloista 90 % on teräsbetonisia.

1960-luvun lopulta 70-luvun puoliväliin rakennettiin kolmasosa Helsingin silloista. Helsingin silloista 50 % on rakennettu ennen vuotta 1975. Helsingissä on huomattava määrä huonokuntoisia ja erittäin huonokuntoisia 60- ja 70-luvuilla valmistuneita ajoneuvoliikenteen siltoja. Yli puolet näistä sijaitsee vilkkaasti liikennöidyillä kaduilla. Erittäin huonokuntoisia ajoneuvoliikenteen siltoja on vuoden 2012 tietojen mukaan ollut 22 kpl. [21.]

5.2 Tutkimusaineisto

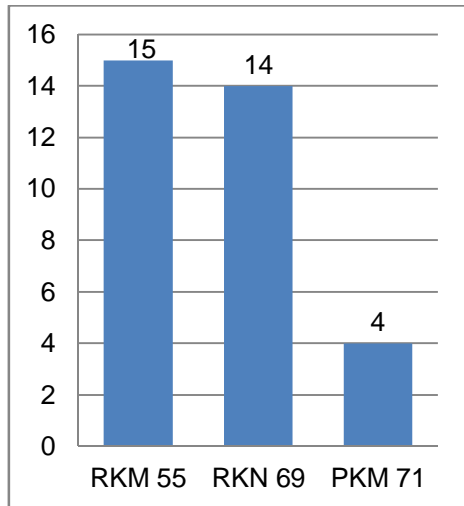
Tarkastelun kohteena tässä työssä olivat sellaiset ajoneuvoliikenteen sillat, joissa reunaulokkeella on ajorataan nähden korotettu kevyen liikenteen väylä. Kevyen liikenteen väyliä ei ole tarkasteltavissa silloissa erotettu ajoradasta kaiteella tai muulla vastaavalla suojarakenteella.

Työssä tarkasteltiin 33 sillan reunaulokkeiden kantavuutta. Kohteissa oli neljä siltaparia, joten tarkasteltavana on 29 erilaista kohdetta. Tilaajalta saatiin projektin alussa kaksi listaa mahdollisista tarkasteluun mukaan tulevista silloista. Toisessa listassa oli 367 siltaa, joista suurin osa oli kevyen liikenteen siltoja ja toisessa listassa 93 siltaa, jotka oli suunniteltu ennen vuotta 1977.

Tarkastelun ulkopuolelle rajattiin kevyen liikenteen sillat sekä sellaiset ajoneuvoliikenteen sillat, joissa kevyen liikenteen väylä ei sijaitse reunaulokkeella. Tarkasteluun ei otettu myöskään sellaisia siltoja, joissa kevyen liikenteen levennys on tehty tai uusittu

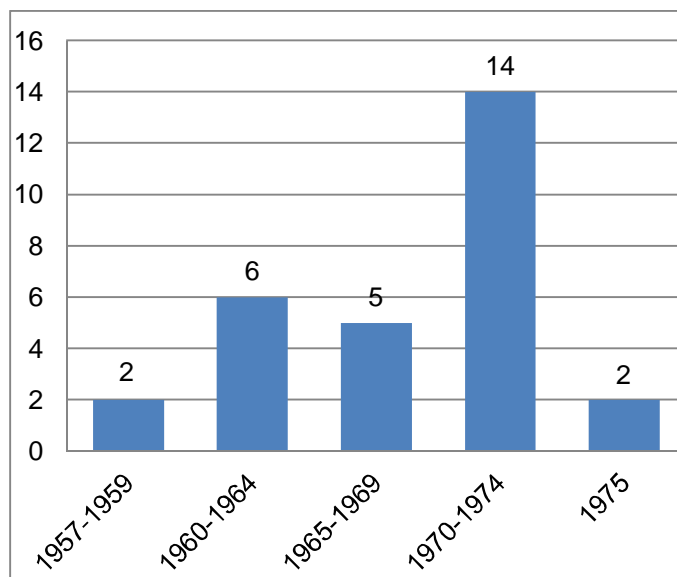
2000-luvun aikana eikä siltoja, joiden reuna-alkueille kantavuustarkastelu on tehty jo aiemmin.

Kuviossa 1 esitetään aineistoon kuuluvat sillat suunnittelunormin mukaan.

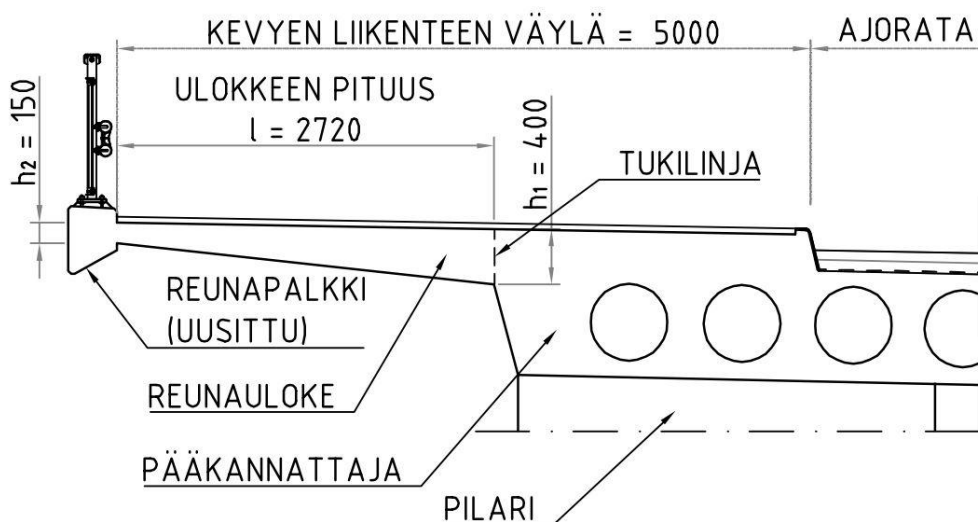


Kuvio 1. Aineistoon kuuluvat sillat (kpl) suunnittelunormien mukaan.

Kuviossa 2 esitetään aineistoon kuuluvat sillat valmistumisvuosittain.



Kuvio 2. Aineistoon kuuluvat sillat valmistumisvuosittain.



Kuva 13. Reunaulokkeen poikkileikkaus. Latokartanontien silta kehä I:n yli, U-6097. Ulokkeen pituus l on määritetty tukilinjasta reunapalkin sisäpintaan. Useimmissa kohteissa on matala reunapalkki, eli reunapalkin yläpinta on samassa tasossa päällysteen kanssa, jolloin ulokkeen pituus määritetään tukilinjasta kaiteeseen.

Kuvassa 13 esitetään rakenneosien nimet sekä reunaulokkeen pituuden määrittely. Kohteiden reunaulokkeiden mitat esitetään taulukossa 9. Ulokkeen pituus l vaihtelee välillä 1,0–2,8 m. Ulokkeen juuren korkeus h_1 vaihtelee välillä 180–500 mm. Joidenkin ulokkeiden juuressa on kolmion muotoinen vahvikeviiste. Viisteen paksuus laskettiin mukaan juuren vahvuuteen. Pääteräksiä ovat tukilinjalla olevat ulokkeen yläpinnan teräkset (kuva 24, s. 38). Tehollinen korkeus d on pääterästen painopisteen etäisyys ulokkeen alapinnasta.

Mitat ja materiaaliominaisuudet perustuvat alkuperäisissä piirustuksissa oleviin merkintöihin. Piirustuksiin merkitty kansirakenteiden betonin lujuusluokka vaihteli välillä K300–K400. Betoniteräs oli kaikissa kohteissa myötölujuudeltaan 400 MPa vastaavaa harjaterästä. Betonipeite vaihteli välillä 25–30 mm, lukuun ottamatta yhtä siltaa, jossa betonipeite oli 35 mm. Mikäli piirustuksista ei löytynyt materiaalitietoja tai betonipeitteen paksuutta, käytettiin oletusarvoina betonille lujuusluokkaa K300, teräkselle myötölujuutta 400 MPa ja betonipeitteelle paksuutta 30 mm.

Taulukko 9. Aineistoon kuuluvien reunaulukkeiden mitat (mm).

Kohde nro	Ulokkeen pituus l	Ulokkeen juuren korkeus h_1	Ulko- reunan korkeus h_2	Kevyen liikenteen väylän leveys	Suunnittelu- normi	Pääteras- määrä A_s (mm ²)	Tehollinen korkeus d
1	1550	200	150	5150	RKM 55	754	164
2	1800	300	150	4400	RKM 55	904	264
3	1900	300	150	5000	PKM 71	2115	270
4	1000	300	150	4250	RKM 55	754	264
5	2260	260	120	4500	RKM 55	1105	222,5
6	2000	380	190	5500	RKN 69	1178	342,5
7	1900	300	150	4200	RKM 55	565	269
8	1000	180	150	4000	RKM 55	785	155
9	1200	270	140	4500	PKM 71	1606	232,5
10	1900	300	150	2450	RKM 55	565	269
11	1900	250	100	2900	RKM 55	966	213,0
12	1200	300	200	3150	RKM 55	754	264
13	1700	300	150	3000	RKM 55	1159	262,5
14	2165	300	150	2500	RKM 55	1178	262,5
15	2720	400	150	5000	RKM 55	1307	357
16	1000	200	130	4500	RKM 55	706	172,5
17	2050	500	310	2800	RKM 55	942	469
18	1350	280	160	5000	RKN 69	883	247,5
19	2800	400	150	4000	RKN 69	966	362,5
20	1650	250	150	2050	RKN 69	1028	224
21	2250	270	150	3450	RKN 69	1767	232,5
22	2050	300	150	3150	RKN 69	981	272,5
23	2100	300	150	3000	RKN 69	1178	272,5
24	2400	300	150	8000	PKM 71	999	267,5
25	2000	350	200	3950	RKN 69	1078	316,0
26	1100	260	150	5000	RKN 69	1178	227,5
27	2350	240	120	5500	RKN 69	1325	202,5
28	1500	320	250	3500	RKN 69	1039	282,5
29	1500	320	250	2500	RKN 69	1178	282,5

6 Kantavuuksien tarkastelu

6.1 Rakenteiden omapainot

Teräsbetonin, suojabetonin, tasoitteen, murskeen ja päällysteen tilavuuspainona käytettiin arvoa 25 kN/m^3 . Kevytsorabetonin tilavuuspainona käytettiin arvoa 15 kN/m^3 , lukuun ottamatta yhtä siltaa (U-6221), jonka piirustuksissa kevytsorabetonin tilavuuspainoksi oli merkitty 7 kN/m^3 . Kohteen laskenta tehtiin molemmilla kevytsorabetonin tilavuuspainoilla. Kaiteiden paino laskelmissa määritettiin Liikenneviraston H2-tyyppiin piirustusten perusteella. Kaikissa kohteissa kaiteen painona käytettiin vähintään $0,7 \text{ kN/m}$, paitsi rautatien kohdalla olevien korotettujen kaiteiden painona $1,0 \text{ kN/m}$.

Portaalit ja valaisinpylväät huomioitiin pistekuormana ulokelaatan ulkoreunalla, mikäli piirustusten mukaan niiden kohdalla ei ollut vahvistuspalkkia tai lisäteräksiä. Valaisinpylvään aiheuttama pistekuorma oli laskelmissa $2,5 \text{ kN}$ ja portaalien noin $2,8 \text{ kN}$.

Kahdessa kohteessa oli ulokelaattaan ripustettu kaukolämpöputki, joiden ulkohalkaisijaan perustuva suurin mahdollinen massa metriä kohden tarkistettiin Uponorin esitteestä. Kaukolämpöputket huomioitiin pistekuormina piirustusten mukaisin kannakevälein.

Kahdessa junanradan ylittävässä kohteessa oli kosketussuojalipat, joille huomioitiin lumikuorma 2 kN/m^2 sekä rakenteen oma paino $0,1 \text{ kN/m}^2$. Kosketussuojalippa lumikuormineen huomioitiin laskelmissa kannakevälein esiintyvänä pistekuormana. Perustelut lumikuorman huomioimiselle omapainona on esitetty luvussa 3.5.2.

6.2 Kuormakaavioiden sijoittaminen reunaulokkeelle

Suunnittelunormien ja ajoneuvoasetuksen mukaiset kuormakaaviot sijoitettiin ohjeiden mukaisen etäisyyden päähän (ks. kuormakaaviot luvuissa 2 ja 3.2) kaiteen tai korkean reunapalkin sisäreunasta. Kaiteen tai reunapalkin sisäreunalla tarkoitetaan kantavuustarkasteluissa samaa kuin ulokkeen ulkoreunalla.

Huoltokalusto sijoitettiin suurimman mahdollisen taivutusmomentin saamiseksi mahdollisimman lähelle ulkoreunaa siten, että pyöräkuorman ulkoreuna on 200 mm päässä ulokkeen reunasta. Tämä etäisyys on RIL-144 mukaisen 12 tonnin huoltoajoneuvon

kuormakaavion mukainen, lisäksi työn yhteydessä haastateltu Staran työnjohtaja arvioi huoltokaluston liikenneivän lähimmillään noin 200 mm päässä kaiteesta.

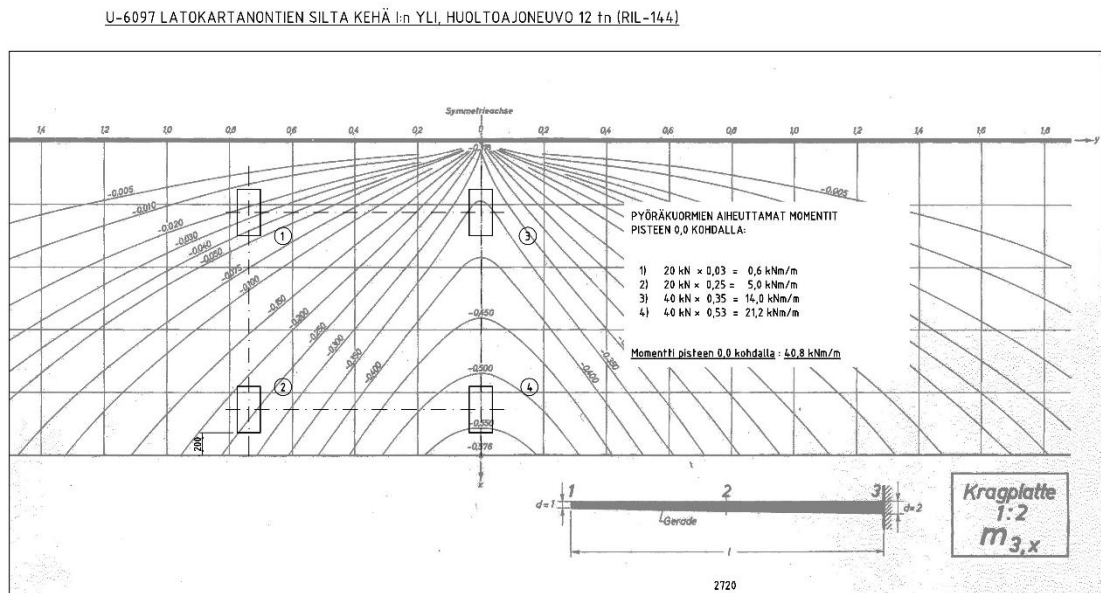
Poikkeuksena ovat päällystyskalustoon kuuluvat valssiyrä, jyrä ja levittäjä, jotka kantavuustarkastelussa sijoitettiin kiinni ulkoreunaan. Levittäjän renkaat ovat tällöin koneen mitoista johtuen noin 700 mm etäisyydellä kaiteesta.

6.3 Voimasuureiden määrittäminen

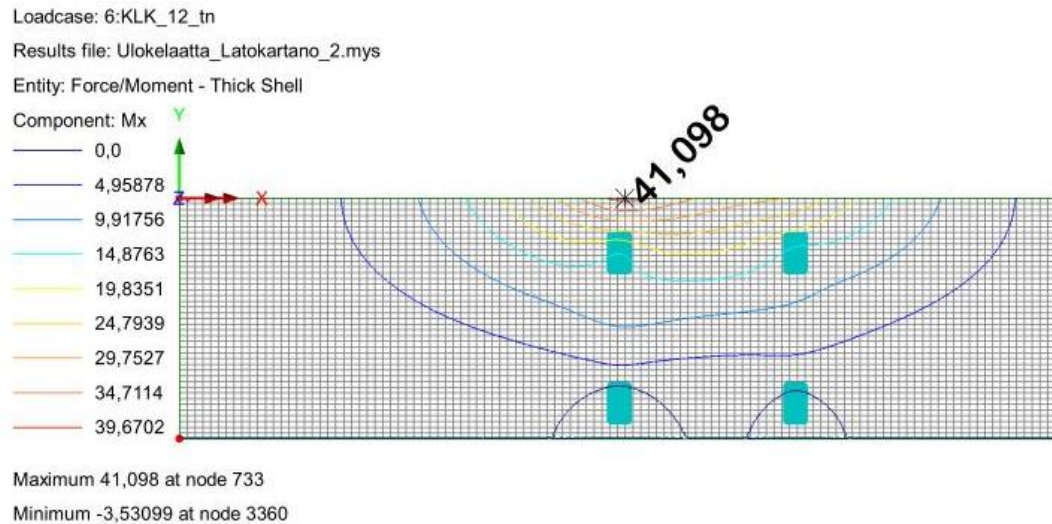
6.3.1 Taivutusmomentti

Taivutusmomenttia tarkasteltiin sillan poikkisuunnassa. Sillan pituussuuntaisen momentin oletettiin siirtyvän sillan pääkannattajille.

Kuormakaavioiden aiheuttama momentti ulokkeen juuressa määritettiin LUSAS Modeler 14.7. FEM-ohjelmalla. Tulosten tarkistamiseksi joidenkin kohteiden osalta momentti laskettiin lisäksi ulokelaatan momentin määrittämiseen tarkoitetun kaavion [15] avulla. Kuvissa 14 ja 15 esitetään esimerkki reunaulokkeelle sijoitetun 12 tonnin huoltoajoneuvon aiheuttaman poikkisuuntaisen taivutusmomentin määrittämisestä kaavion avulla ja LUSAS-ohjelmalla.



Kuva 14. Taivutusmomentti ulokelaatan juuressa kaavion avulla laskettuna on 40,8 kNm/m. Huoltokalusto on sijoitettu ulokkeelle siten, että renkaan ulkoreunan etäisyys ulokkeen reunasta on 200 mm ja y-akselin 0-kohta painavamman eli 80 kN akselin kohdalla. Huoltoajoneuvo 12 tn, silta U-6097.



Kuva 15. LUSAS-mallin mukainen maksimimometti on 41,1 kNm/m. 12 tonnin huoltoajoneuvo, silta U-6097.

6.3.2 Leikkaus

Leikkausvoiman ääriarvo määritettiin Liikenneviraston eurokoodin soveltamisohjeen NCCI 2 [17, s.50] avulla. Leikkausvoiman ääriarvo v_{max} mitoituskohdassa, etäisyydellä $d/2$ tukilinjalta, arvioitiin kaavasta:

$$v_{max} = \frac{\sum F_1}{l + 3d} + \sum_0^i \frac{F_i}{l + 3d + x} \quad (6)$$

missä

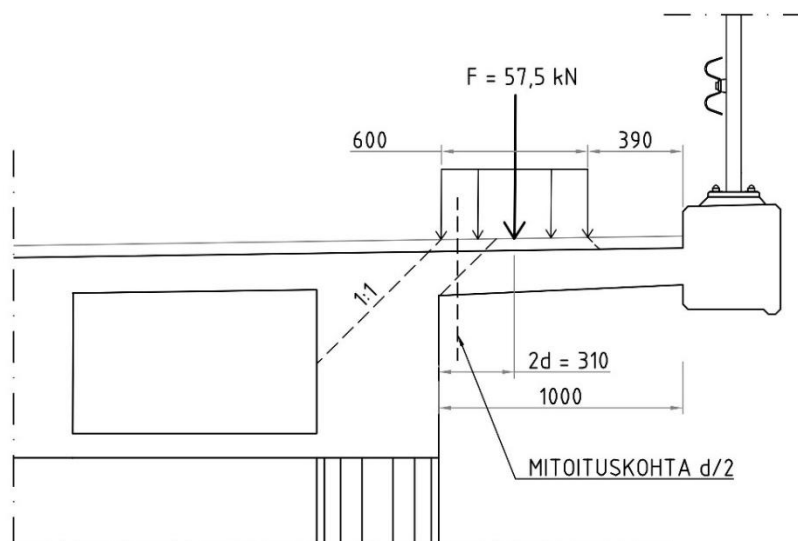
F_1	lähimpänä tukilinjaa sijaitsevat pyöräkuorma(t)
F_i	seuraavat ulokkeella sijaitsevat pyöräkuormat
l	renkaan kosketuspinnan/kuormakaavion pituus
d	laatan tehollinen korkeus pääkannattimen reunalla
x	toisen pyöräkuorman etäisyys ensimmäisestä

Mikäli pyöräkuorman resultantti on lähempänä kuin $2d$ etäisyydellä tukilinjasta, tulee pyöräkuorman intensiteettiä redusoida (eli pienentää pyöräkuormaa) kertoimella $a/2d$, missä a on pyöräkuorman resultantin etäisyys tukilinjasta [17, s. 51].

Kaava (6) on tarkoitettu eurokoodin kuormakaavioiden LM1 ja LM2 tarkistamiseen. LM1 on telikuorma, jonka akseliväli on 1,2 m, raideleveys 2,0 m ja pyöräkuorman kosketuspinta $0,4 \times 0,4$ m. LM2 on yksittäinen akselikuormakaavio, jonka raideleveys on 2,0 m ja pyöräkuorman pinta-ala $0,35 \times 0,6$ m. [18, s. 32–34.] Kantavuuksien tarkistamista ei tässä työssä tehdä kuormakaavioille LM1 ja LM2.

Leikkausvoiman ääriarvo saatiin suurimmassa osassa kohteita sijoittamalla suurin pyöräkuorma, eli kaavion AA 13/27 keskimmäisen akselin yksittäisen pyöräkuorman 57,5 kN suuruisen resultantti etäisyydelle $2d$ tukilinjasta. Leikkausvoima tarkistettiin myös 16 tonnin huoltoajoneuvolle, kun ulokkeen pituus oli vähintään (tai lähes) $0,3 \text{ m} + 1,8 \text{ m} + 2d$. Tällöin 16 tonnin huoltoajoneuvo mahtuu kokonaan ulokkeelle siten, että tukilinjaa lähempänä olevaa pyöräkuormaa ei redusoida (tai redusoidaan vain vähän). Leveimpien ulokkeiden osalta leikkausvoima tarkistettiin myös sijoittamalla AA 13/27 akselikuorma ulokkeelle 300 mm etäisyydelle ulkoreunasta.

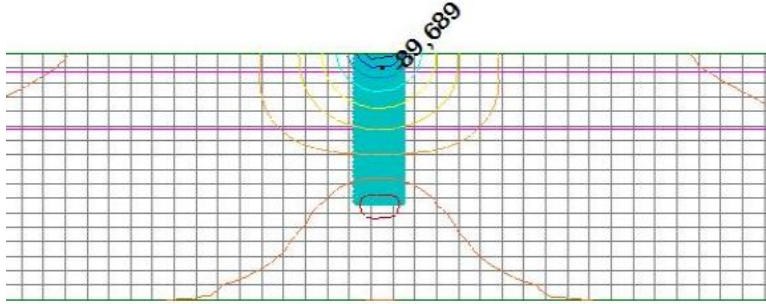
Seuraavassa esitetään esimerkkejä leikkausvoiman määrittämisestä kaavan (6) avulla, verrataan tuloksia LUSAS-mallin mukaisiin leikkausvoimiin ja perustellaan, miksi leikkauskestävyyden tarkistamiseen käytetään kaavan (6) mukaisia leikkausvoimia.



Kuva 16. Poikkileikkaus reunaulokkeesta, jolle on sijoitettu AA 13/27 -kuormakaavion mukainen pyöräkuorma, resultantti $2d$ etäisyydellä tukilinjasta. Silta U-6044.

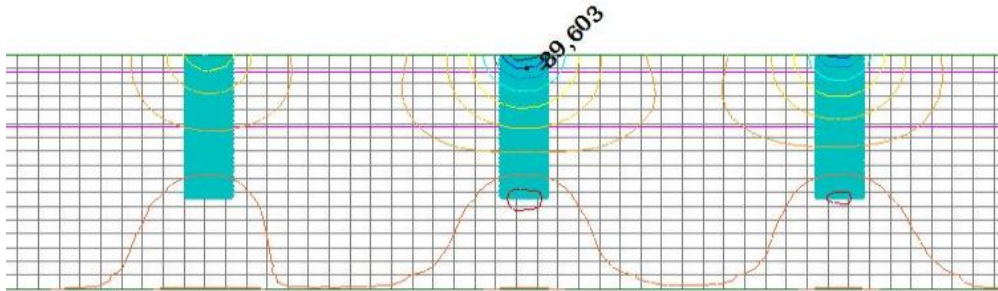
Kuvassa 16 esitetään tilanne, jossa sillan U-6044 reunaulokkeelle on sijoitettu AA13/27 mukainen pyöräkuorma. Leikkausvoima saadaan kaavan (6) mukaan jakamalla pyöräkuorman resultantti 57,5 kN kuorman jakautumispituudella $l + 3d$ eli $57,5 \text{ kN} / (0,2 \text{ m} + 3 \cdot 0,155 \text{ m}) = 86,47 \text{ kN/m}$.

LUSAS-mallista saadaan samalla kuormalla leikkausvoimaksi 89,7 kN/m (kuva 17).



Kuva 17. Leikkausvoima AA 13/27 -kuormakaavion keskimmäisen akselin pyöräkuormalla, silta U-6044.

LUSAS-mallin mukainen leikkausvoima koko AA 13/27 -telille on 89,6 kN/m (kuva 18).

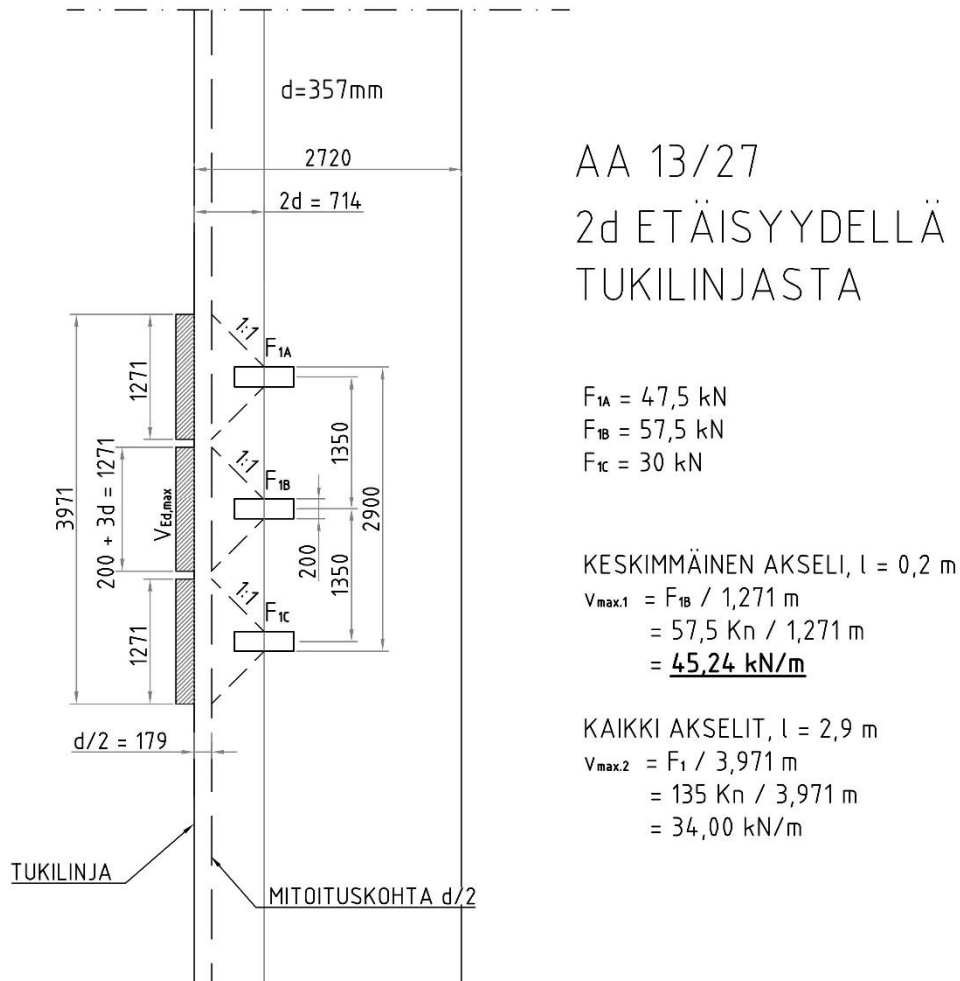


Kuva 18. Leikkausvoima, kun koko AA 13/27 -kuormakaavio on sijoitettuna ulokkeelle, silta U-6044.

Kuten edellä esitetty siltaa U-6044 koskevaa esimerkki osoittaa, LUSAS-mallista saadaan joissakin tapauksissa suurempia leikkausvoiman ääriarvoja kuin NCCI 2 -ohjeen kaavasta. Tämän oletetaan johtuvan siitä, että LUSAS-mallissa ei tule huomioiduksi lähellä tukilinjaa olevien pystysuuntaisten voimien holvaantumisen pääkannattimelle. Tämä puolestaan johtuu siitä, että LUSAS:illa on mallinnettu ulokelaatta, jonka yksi sivu on tuettu jäykällä tuella. Oletettua todellisessa rakenteessa tapahtuvaa holvautumista on havainnollistettu kuvan 16 katkoviivalla.

Edellä esitetyn perusteella tässä työssä käytettiin leikkausvoiman ääriarvona NCCI 2 -ohjeen mukaan kaavalla (6) laskettua leikkausvoiman ääriarvoa.

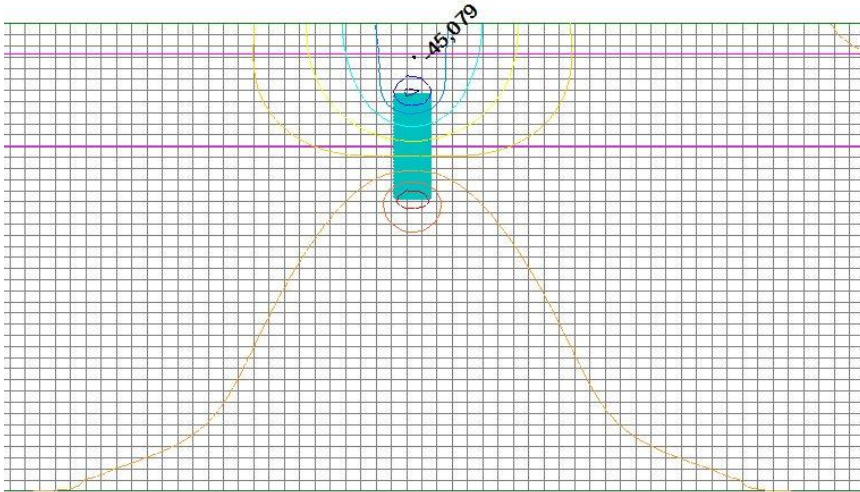
Seuraavaksi esimerkkien avulla perustellaan, miksi kaavan (6) avulla saadaan leikkausvoiman ääriarvo yksittäisen akselin mukaan laskettuna, eli kuormakaavion AA 13/27 tapauksessa keskimmäisen akselin (115 kN) ja 16 tonnin huoltoajoneuvon tapauksessa painavamman akselin (100 kN) mukaan, sen sijaan että leikkausvoiman ääriarvo määräytyisi koko kuormakaavion (telin tai ajoneuvon) mukaan.



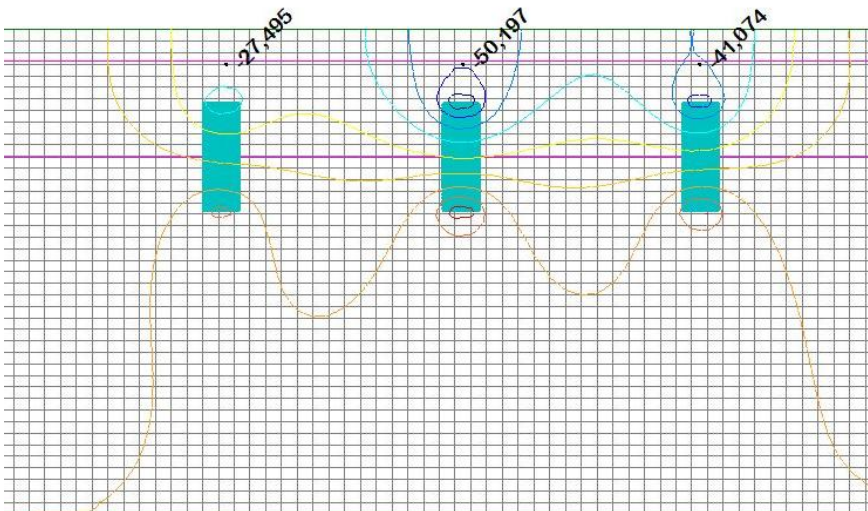
Kuva 19. Leikkausvoiman ääriarvo mitoituskohdassa $d/2$ kuormakaaviolle AA 13/27 on NCCI 2 kaavan mukaan määritettynä 45,2 kN/m. Silta U-6097.

Kuvasta 19 nähdään, että sillan U-6097 ulokkeen leikkausvoiman ääriarvo mitoituskohdassa $d/2$ on 45,2 kN/m, kun huomioidaan AA 13/27 -kaavion keskimmäisen akselin pyöräkuorma. Koko kuormakaavion perusteella laskettu leikkausvoima on 34,0 kN/m, eli kaavan (6) mukaan määritetty leikkausvoima on suurempi, kun huomioidaan vain AA 13/27 -kuormakaavion keskimmäinen akseli.

Vertailuna kuvassa 19 esitettyihin leikkausvoiman ääriarvoihin LUSAS-mallin mukainen määräävä leikkausvoima, kun kuormituksena on keskimmäisen akselin pyöräkuorma, on 45,1 kN/m (kuva 20). Kun LUSAS-malliin otetaan koko AA 13/27 -kuormakaavio, leikkausvoima on suurempi, eli 50,2 kN/m (kuva 21).

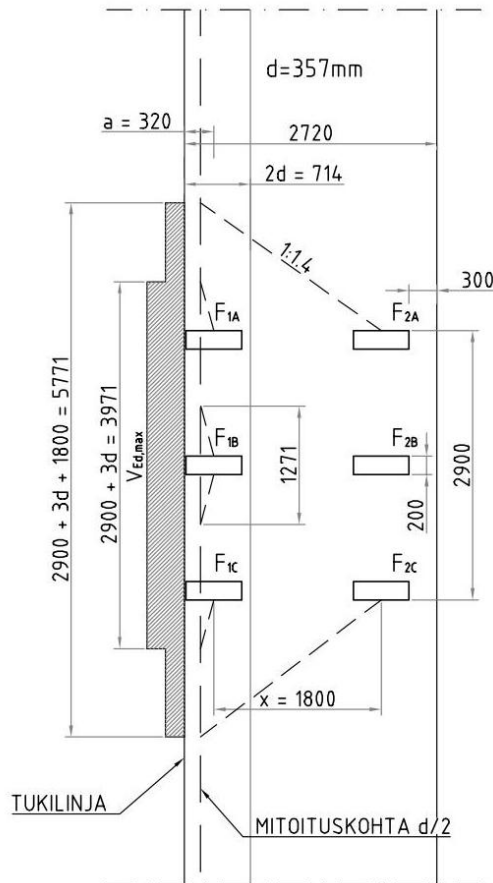


Kuva 20. Leikkausvoiman ääriarvo kuormakaavion AA 13/27 keskimmäiselle akselille on LUSAS-mallin mukaan etäisyydellä $d/2$ tukilinjasta 45,1 kN/m. Silta U-6097.



Kuva 21. Leikkausvoiman ääriarvo koko kuormakaavioille AA 13/27 LUSAS-mallin mukaan etäisyydellä $d/2$ tukilinjasta 50,2 kN/m. Silta U-6097.

Kun sama kuormakaavio sijoitetaan 300 mm päähän ulokkeen ulkoreunasta (kuva 22), molemmat pyörät mahtuvat ulokkeelle. Tällöin kuitenkin lähempänä tukilinjaa olevaa pyöräkuormaa tulee NCCI 2 -ohjeen mukaan redusoida kertoimella $a/2d$. Tällöin saadaan kuvan 22 mukaiset tulokset, eli keskimäinen akseli huomioiden leikkausvoima on 39,0 kN/m ja koko kuormakaavion mukaan laskettuna 38,6 kN/m.



AA 13/27 300mm KAITEESTA

Redusointikerroin
 $a / 2d = 0,448$

$$F_1 = 47,5 + 57,5 + 30 = 135 \text{ kN}$$

$$F_{1,\text{red}} = 135 \text{ kN} \times 0,448 = 60,48 \text{ kN}$$

$$F_2 = F_1 = 135 \text{ kN}$$

KAIKKI AKSELIT, $l = 2,9 \text{ m}$

$$V_{\text{max}} = F_{1,\text{red}} / 3,971 \text{ m} + F_2 / 5,771 \text{ m}$$

$$= (15,237 + 23,39) \text{ kN/m}$$

$$= 38,63 \text{ kN/m}$$

KESKIMMÄINEN AKSELI, $l = 0,2 \text{ m}$

$$V_{\text{max},1} = F_{B,\text{red}} / 1,271 \text{ m} + F_{2B} / 3,071 \text{ m}$$

$$= 25,77 \text{ kN} / 1,271 \text{ m} +$$

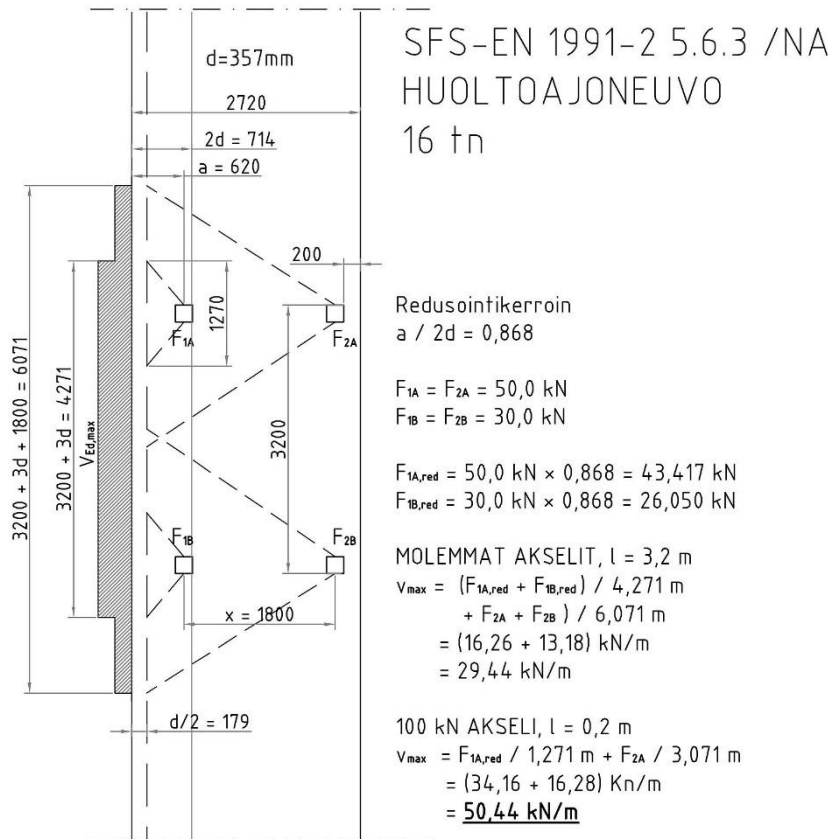
$$57,5 \text{ kN} / 3,071 \text{ m}$$

$$= \underline{38,99 \text{ kN/m}}$$

Kuva 22. Leikkausvoima kuormakaaviolle AA 13/27 NCCI 2 kaavan mukaan, kun kuormakaavio sijoitetaan 300 mm päähän ulkoreunasta. Silta U-6097.

Kuvan 22 mukaista tilannetta ei laskettu LUSAS-mallilla siitä edellä esitetystä syystä johtuen, että LUSAS-malli ei ota huomioon tukilinjan lähellä olevan pystykuorman jakautumista pääkannattajalle. Toisin sanoen käytetyllä FEM-mallilla ei pystytä määrittämään todenmukaista leikkausvoiman ääriarvoa kuormalle, joka sijaitsee lähempänä kuin $2d$ tukilinjasta.

Lopuksi esitetään vielä kuormitustapaus (kuva 23), joka muodostuu sillan U-6097 kohdalla määrääväksi leikkausvoiman suhteen: ulokkeelle mahtuu 16 tonnin huoltoajoneuvo, joka aiheuttaa leikkausvoiman ääriarvon $50,44 \text{ kN/m}$, kun huomioidaan vain painavampi akseli. Tätä leikkausvoimaa käytettiin kyseisen kohteen leikkauskestävyyden tarkistamiseen.



Kuva 23. Leikkausvoima 16 tonnin huoltoajoneuvolle. Silta U-6097.

6.3.3 Lävistys

Lävistys tarkistettiin 16 tonnin huoltoajoneuvon 50 kN suuruiselle rengaskuormalle, joka aiheuttaa suurimman kuorman pinta-alaa kohti. Laatan paksuus määritettiin 300 mm ulokkeen ulkoreunasta, joka on ulokelaatan ohuin kohta, johon mainitun rengaskuorman resultantti voidaan sijoittaa. Lävistyskestävyys tarkistettiin kohteille, joiden laatta oli ohuin määrityskohdasta.

6.3.4 FEM-mallin yksinkertaistukset

Kantavuuslaskentaohjeen [16, s.43] mukaan ajoneuvokuormien jakaantuminen pintarakenteissa otetaan mallintamisessa huomioon siten, että esimerkiksi asfalttibetonissa ja betonissa kuorma jakaantuu kosketuspinta-alaa suuremmalle alueelle suhteessa 1:1. Laattarakenteita tarkasteltaessa kuorman oletetaan jakaantuvan laattarakenteen puoleen väliin.

Tässä työssä käytetyissä rakennemalleissa ei huomioitu pintakuorman jakautumista. Toinen mallista pois jätetty, todellisissa rakenteissa esiintyvä ominaisuus on reunapalkin momenttia tasaavaa vaikutus. Perusteluna ratkaisuille on ensinnäkin tarkasteltavan aineiston laajuus, jonka vuoksi tehtiin yksinkertaistuksia, sekä toiseksi se, että tehdyt yksinkertaistukset antavat määräävien voimasuureiden suhteen varmallalla puolella olevia tuloksia. Lisäksi voidaan todeta, että koska reunaulokkeella päällystekerros on ohut (tyypillisesti noin 30–50 mm) ja ulokelaatta on ohut suhteessa kansilaattaan, jäävät pintakuorman jakautumisesta aiheutuvat vaikutukset mallista saataviin voimasuureisiin pieniksi.

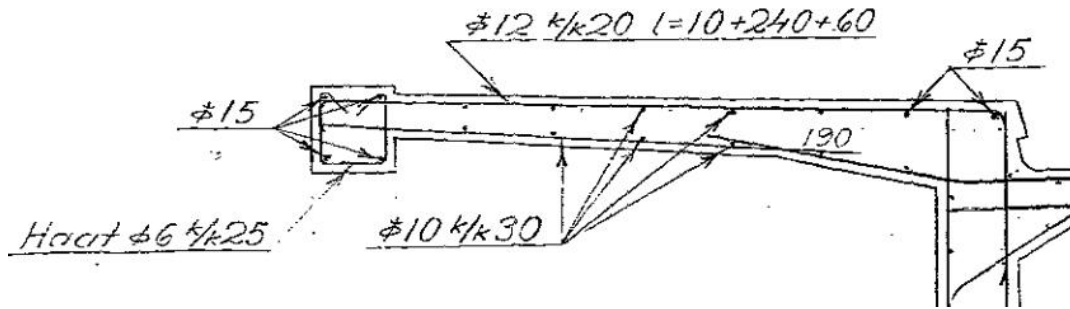
6.4 Suunnittelukuormien ja nykyisten kuormien vertailu

Kantavuustarkastelussa verrattiin RIL-144 kuormitusohjeiden mukaisen 12 tonnin huoltoajoneuvon aiheuttamaa taivutusmomenttia kunkin sillan suunnittelunormin mukaisen suunnittelukuorman eli erillisen pyöräkuorman aiheuttamaan taivutusmomenttiin. Vertailu tehtiin sekä ominaiskuormilla että mitoituskuormilla.

6.5 Mitoitus murtorajatilassa

6.5.1 Taivutusmomentti

Mitoitus taivutusmomentille tehtiin eurokoodin SFS-EN 1992-1-1 [28] mukaisesti olettaen betonin jännitys jakauma suorakaiteen muotoiseksi. Laskelmissa käytettävä tehollinen korkeus d määritettiin vähentämällä ulokkeen juuren korkeudesta h_1 suunnitelmien mukainen betonipeite c sekä puolet pääraudoituksen halkaisijasta.



Kuva 24. Ulokkeen raudituspiirustus. Taivutusmomentin laskennassa käytettävän pääraudoituksen muodostavat ulokkeen yläpinnassa 200 mm jaolla olevat halkaisijaltaan 12 mm harjateräset. U-6042 Käskynhaltijantien silta.

6.5.2 Leikkauskestävyys

Leikkauskestävyys tarkistettiin Liikenneviraston NCCI 2 -ohjeen mukaan [17, s. 54] käyttäen leikkausraudoittamattoman rakenteen leikkauskestävyyden kaavaa.

6.5.3 Lävistys

Leikkausraudoittamattoman laatan lävistyskestävyys tarkistettiin Liikenneviraston NCCI 2 -ohjeen [17, s. 60–61] mukaan, huomioiden kantavuuslaskentaohjeessa [16, s. 50–51] annetut poikkeamat.

6.6 Mitoitus käyttörajatilassa

Käyttörajatilatarkasteluissa betonisiltojen rasituksia tulee rajoittaa, jotta voidaan välttää haitallisen halkeilun ja palautumattomien muodonmuutoksien syntyminen [16, s.55]. Reunaulokelaatan yläpinnan halkeilu saattaa aiheuttaa vedeneristyksen halkeilua. Vedeneristyksen ehjänä pysyminen on sillan kannen yläpinnan betonin ja terästen säilyvyyden kannalta tärkeää.

Betoniraudituksen jännitykset tulee rajoittaa kimmorajaan f_{yk} , mutta enintään arvoon 400 MPa. Betonin puristusjännitykset tulee rajoittaa arvoon $0,6f_{ck}$. [16, s. 55.]

6.6.1 Halkeamaleveyden laskenta

Käyttörajalilassa tarkistettiin betoniraidoituksen vetojännitys, betonin puristusjännitys sekä halkeamaleveys. Halkeilu tarkistettiin ulokkeen juuressa tapahtuvan yläpinnan halkeilun suhteen käyttäen Liikenneviraston NCCI 2 -ohjeen halkeamaleveyden laskentakaavaa [17, s.68]. Laskennallinen halkeamaleveysraja eli suurin sallittu halkeamaleveys w_{max} oli kaikille kohteille 0,35 mm [16, s.56].

Kantavuuslaskentaohjeen [16] mukaan sallittua halkeamaleveyttä voidaan korottaa kertoimella $c/c_{min,dur}$. Ympäristöolosuhteiden ja käyttöiän vaatima betonipeitteen vähimmäisarvo $c_{min,dur}$ oli kaikille kohteille 40 mm – 5 mm = 35 mm. Betonipeite c oli kaikissa kohteissa korkeintaan 35 mm. Tästä johtuen kaikille kohteille päti $c/c_{min,dur} \leq 1$, eikä sallittua halkeamaleveyttä korotettu.

Halkeamaleveyden laskennassa kuormina olivat rakenteen omat painot ja liikennekuormana 12 tonnin kevyen liikenteen huoltoajoneuvo.

7 Tulokset

7.1 Murtorajatila

Tarkastelussa oli mukana 29 erilaista siltaa. Reunaulokkeita tarkasteltiin murtorajatilassa taivutusmomentin, leikkauksen ja lävistyksen suhteen. Käytetyt osavarmuuskerroimet ja sysäyskerroimet on esitetty luvuissa 2.3 ja 3.5.

Taivutusmomentti- ja leikkaustarkasteluiden tulokset esitetään tiivistettynä taulukossa 11. Taulukossa esitetään siltakohtaiset käyttöasteet eri kuormille. Kun käyttöaste on yli 1,00, kyseisen kuorman aiheuttama rasitus on suurempi kuin rakenteen kestävyys. Tulostaulukko kokonaisuudessaan esitetään liitteessä 3.

Taulukko 10. Tulostaulukon värien selitykset.

Väri	Käyttöaste
0,50	$\leq 0,85$
0,90	$0,86 \leq 1,00$
1,10	$1,01 \leq 1,15$
1,50	$1,16 \leq$

Taulukko 11. Kantavuuslaskennan tuloksia. Leikkaus ja taivutusmomentti, MRT. Tulokset kokonaisuudessaan liitteessä 3.

Silta nro	1	2		3		4		
	Leikkaus	$M_{Kl12}/M_{suunn,Epk}$		Momentti, $A_{s,vaad}/A_s$		Momentti, $A_{s,vaad}/A_s$		
	Q_d/V_{c0} AA 13/27	M _k	M _d	Huoltoajoneuvo	Huoltoajoneuvo	Suunnittelunormi		
27 tn	16 tn			12 tn	RKM 55	RKN 69	PKM 71	
U-1354	1,03	0,59	0,62	1,25	1,06	1,57		
U-1356	0,56	0,60	0,63	0,87	0,74	1,01		
U-1365	0,42	0,36	0,42	0,40	0,36			0,73
U-1382	0,75	0,52	0,55	0,98	0,84	0,91		
U-1386	0,69	0,82	0,85	1,20	1,04	1,11		
U-6003	0,40	0,45	0,47	0,57	0,52		0,85	
U-6042	0,68	0,61	0,64	1,58	1,42	1,73		
U-6044	1,11	0,54	0,56	1,08	0,87	1,39		
U-6047	0,60	0,34	0,33	0,54	0,46			0,93
U-6054	0,58	0,61	0,64	1,32	1,17	1,59		
U-6059	0,74	0,61	0,64	1,01	0,90	1,22		
U-6078	0,56	0,55	0,57	0,73	0,61	0,92		
U-6085	0,53	0,59	0,62	0,67	0,59	0,79		
U-6095	0,57	0,75	0,78	0,92	0,83	0,96		
U-6097	0,37	1,02	1,07	0,76	0,68	0,65		0,94
U-6098	0,84	0,53	0,55	1,21	0,96	1,56		
U-6104	0,30	0,68	0,71	0,48	0,45	0,55		
U-6117	0,59	0,39	0,41	0,85	0,73	1,05	1,38	
U-6127	0,42	0,73	0,76	1,18	1,07		1,25	
U-6132	0,64	0,41	0,43	0,83	0,72		1,36	
U-6140	0,58	0,57	0,59	0,75	0,65		0,92	
U-6141	0,48	0,47	0,49	0,90	0,84		1,33	
U-6142	0,48	0,49	0,51	0,78	0,72		1,11	
U-6144	0,49	0,48	0,47	1,18	1,04			1,68
U-6159	0,49	0,45	0,47	0,86	0,80		1,20	1,42
U-6166	0,59	0,37	0,39	0,58	0,47		1,10	1,17
U-6221	0,67	0,63	0,66	1,22	1,07	1,11	1,43	
U-6244	0,50	0,41	0,43	0,53	0,46		0,87	
U-6245	0,48	0,41	0,43	0,47	0,40		0,76	

7.1.1 Taivutusmomentti

Sarakkeessa 2 ($M_{Kl12}/M_{suunn,Epk}$) esitetään kantavuuslaskentaohjeen tarkastelutason 1 mukainen vertailu: 12 tonnin huoltoajoneuvon aiheuttaman momentin suhde suunnittelunormin mukaisen erillisen pyöräkuorman aiheuttamaan momenttiin. Suhde on esitetty

taulukossa sekä ominaiskuormilla (M_k) että mitoituskuormilla (M_d) laskettuna. Sarakkeesta 2 nähdään, että mikäli kantavuuslaskenta olisi tehty vain tarkastelutasolla 1, kantavuus 12 tonnin huoltoajoneuvolle olisi varsin hyvä yhtä kohdetta (U-6097) lukuun ottamatta. Tarkasteltaessa sillan U-6097 alkuperäisiä laskelmia kävi ilmi, että reunauloke oli suunniteltu suuremmalle momentille, kuin mitoitukseen käytetty normi RKM 55 olisi edellyttänyt.

Reunaulokkeen todellinen taivutusmomenttikestävyys käy ilmi sarakkeesta 3, jossa esitetään kantavuuslaskentaohjeen tarkastelutason 2 mukaiset, todellisilla mitoilla ja kuormilla tehtyjen kantavuuslaskentojen tulokset. Taivutusmomenttikestävyys 12 tonnin huoltoajoneuvolle ylittyi seitsemässä kohteessa. 16 tonnin huoltoajoneuvolle momenttikestävyys ylittyi kymmenessä kohteessa.

Sarakkeessa 4 on esitetty kunkin kohteen momenttikestävyys suunnittelunormin mukaisen erillisen pyöräkuorman suhteen. Vain 12 sillan kestävyys oli riittävä. Tästä voidaan päätellä, että 17 kohteen reunaulokkeella sijaitsevaa kevyen liikenteen väylää ei ole suunniteltu normien mukaisia erillisiä pyöräkuormia käyttäen. Niissä silloissa, joissa on varsinaisen käyttöasteen lisäksi merkitty toisen normin kohdalle valkoisella taustalla oleva harmaa luku, oli kyseisen kohteen yleispiirustuksessa mainittu kuormituksen perustuvan useampaan suunnittelunormiin. Tästä syystä käyttöaste on näissä kohteissa esitetty myös vaihtoehtoisen suunnittelunormin pyöräkuormalle.

Kohteessa U-6097 harmaalla merkitty käyttöaste laskettiin alkuperäisistä laskelmista ilmenevien suunnittelukuormien, eli 100 kN erillisen pyöräkuorman ja 4 kN/m² jalankulkijakuorman mukaan. Muista kohteista ei alkuperäisiä laskelmia ollut käytössä tätä työtä tehtäessä.

Pintakuorman aiheuttamaa taivutusmomenttia ei ole sisällytetty tulostaulukkoon. Pintakuorman aiheuttaman momentin vertailu suhteessa 12 tonnin ja 16 tonnin huoltoajoneuvojen aiheuttamaan momenttiin eri ulokkeen pituuksilla esitetään taulukossa 12.

Taulukko 12. Pintakuorman p aiheuttama momentti verrattuna huoltoajoneuvojen aiheuttamiin momenttiin, ominaiskuormilla.

Ulokkeen pituus <i>l</i> [m]	M_k [kNm/m]		
	p (4,5 kN/m ²)	Huoltoajoneuvo 12 tn	Huoltoajoneuvo 16 tn
1,0	2,3	17,5	23,7
1,5	5,1	19,1	23,6
2,0	9,0	24,8	28,9
2,4	13,0	36,8	44,6
2,8	17,6	42,1	50,1

Taulukosta 12 nähdään, että poikkisuuntaista taivutusmomenttia tarkastellessa pinta-kuorman aiheuttama momentti suhteessa 12 tonnin huoltoajoneuvon aiheuttamaan momenttiin on ulokkeen pituudesta riippuen välillä 13 – 42 % ominaiskuormilla laskettuna. Pintakuorman osavarmuusluku on 1,35, kun ajoneuvokuorman osavarmuusluku ja sysäyskerroin muodostavat kokonaiskerroimen $1,25 * 1,25 = 1,56$. Näin ollen pinta-kuorma ei muodostu missään kohteessa määrääväksi liikennekuormaksi ominais- eikä mitoituskuormilla laskettuna suhteessa 12 tonnin huoltoajoneuvoon.

Käyttöasteet päällystyskaluston suhteen esitetään liitteessä 3. Staran huoltokalustosta poiketen jyräjän aiheuttama taivutusmomentti laskettiin sijoittamalla jyrä kiinni ulokkeen ulkoreunaan ja levittäjä sijoitettiin laitteen ulkomittojen perusteella siten, että rengaskuorman ulkoreuna on 700 mm etäisyydellä ulokkeen reunasta. Käyttöasteita 3,4 ja 8,6 tonnin valssijyrille ei esitetä erikseen. Kaikki ulokkeet kestävät kevyemmän jyrän ja painavamman 8,6 tonnin jyrän aiheuttama taivutusmomentti on kaikilla ulokkeen pituuksilla pienempi kuin 12 tonnin huoltoajoneuvon aiheuttama taivutusmomentti. Jyrän ja huoltoajoneuvon aiheuttaman momentin suhde esitetään taulukossa 13. Jyrä on sijoitettu kiinni ulokkeen ulkoreunaan.

Taulukko 13. 8,6 tonnin valssijyrän ja 12 tonnin huoltoajoneuvon aiheuttamat taivutusmomentit (kNm/m) ulokkeen pituuden mukaan.

	Ulokkeen pituus <i>l</i> [m]						
	1,0	1,35	1,55	1,9	2,2	2,4	2,7
Jyrä, Bomag 8,6 tn	11,9	15,7	19,8	21,0	22,2	23,4	25,4
Huoltoajoneuvo 12 tn	17,5	20,3	21,2	23,3	30,6	36,8	40,6
$M_{Bomag}/M_{Kik,12tn}$	68 %	77 %	94 %	90 %	73 %	64 %	63 %

7.1.2 Leikkaus

Leikkauskestävyys oli hyvällä tasolla kaikissa kohteissa kahta siltaa lukuun ottamatta. Näissäkin leikkauskestävyys on riittävä 16 tonnin huoltoajoneuville ja kaikille Staran huoltokalustoon kuuluville ajoneuvoille.

Pintakuorman aiheuttama suurin mahdollinen leikkausvoima metriä kohden oli $4,5 \text{ kN/m}^2 * 2,8 \text{ m} = 12,6 \text{ kN/m}$. Kuormakaavion AA 13/26 aiheuttama leikkausvoima vaihteli kohteesta riippuen välillä 35,8 – 86,5 kN/m. Tämän vuoksi leikkauskestävyyttä pintakuorman suhteen ei esitetä siltakohtaisesti. Liikenneviraston kantavuuslaskentaohjeen [16, s. 26] mukaisesti poikittaissuuntaisissa tarkasteluissa ajoneuvokuorman ja pintakuorman ei ole oleteta vaikuttavan samanaikaisesti.

7.1.3 Lävistys

Lävistyskestävyys tarkistettiin viidelle sillalle, joissa on ohuimmat ulokelaatat. Lävistyskestävyys tarkistettiin 16 tonnin huoltoajoneuvon rengaskuormalle, joka aiheuttaa suurimman kuorman pinta-alaa kohti, tulokset taulukossa 14.

Taulukko 14. Lävistyskestävyydet, MRT.

Tunnus	Sillan nimi	Paksuus ulokkeen päässä (mm)	Tehollinen korkeus d Lävistyskohdassa (mm)	Suhteellinen teräsala ρ (%)	f_{ctd}	Käyttöaste Q_d/V_c
U-1386	Kulosaaren silta	120	96	0,273	1,585	0,51
U-6042	Käskynhaltijantien silta	150	132	0,198	1,585	0,35
U-6059	Mustikkamaan silta	100	90	0,187	1,585	0,57
U-6098	Lauttasaaren silta	130	123	0,514	1,874	0,28
U-6221	Kulosaaren puistotien silta	120	110	0,228	1,874	0,37

7.2 Käyttörajatila

Käyttörajatilassa tarkistettiin halkeamaleveys sekä betoniraudoituksen vetojännitys ja betonin puristusjännitys, kun kuormituksena oli rakenteen oma paino ja 12 tonnin huoltoajoneuvo. Ajoneuvokuorman kertoimena oli sysäyskerroin 1,25. Taulukossa 15 esitetään käyttörajatilatarkastelun tulokset.

Betoniraudoituksen vetojännitys $\sigma_{s,t}$ pysyi yhtä kohdetta lukuun ottamatta sallituissa rajoissa eli alitti teräksen myötölujuuden f_{yk} , (joka on kaikissa kohteissa 400 MPa). Betonin puristusjännitys σ_c oli kaikissa kohteissa selvästi sallitussa rajoissa eli alle $0,6f_{ck}$.

Suurin sallittu halkeamaleveys w_{max} oli kaikille kohteille 0,35 mm. Halkeamaleveys ylitti sallitun kahdessa kohteessa. Luvussa 6.6 on esitelty vedeneristeille asetettavat halkeamankestävyysvaatimukset, joiden mukaan kaikkien vedeneristysrakenteiden tulee säilyä läpihalkeilemattomana -20 °C lämpötilaan saakka. Oletuksena on, että muodonmuutoskykynsä säilyttäneet vedeneristeet säilyvät halkeilemattomana, mikäli halkeamaleveys pysyy sallituissa rajoissa eli halkeamaleveys ei ylitä 0,35 mm.

Taulukko 15. Teräksen vetojännityksen suhde myötölujuuteen ($\sigma_{s,t}/f_{yk}$), betonin puristusjännityksen suhde sallittuun jännitykseen ($\sigma_{c,max}/0,6f_{ck}$), ulokelaatan yläpinnan halkeamaleveys (w_k) sekä halkeamaleveyden suhde sallittuun halkeamaleveyteen (w_k/w_{max}). Kuormituksena 12 tonnin huoltoajoneuvo, KRT.

		$\sigma_{s,t}/f_{yk}$	$\sigma_{c,max}/0,6f_{ck}$	w_k (mm)	w_k/w_{max}
U-1354	Kuusisaarentien silta	0,78	0,80	0,23	0,67
U-1356	Hämeentien silta Vallilassa	0,55	0,48	0,19	0,55
U-1365	Vihdintien ylikulkusilta	0,28	0,32	0,06	0,18
U-1382	Naurissalmen silta	0,63	0,50	0,25	0,71
U-1386	Kulosaaren silta	0,73	0,79	0,24	0,67
U-6003	Herttoniemensalmen eteläinen silta	0,40	0,31	0,15	0,42
U-6042	Käskynhaltijantien silta	1,05	0,71	0,46	1,32
U-6044	Professorintien risteyssilta	0,64	0,70	0,13	0,38
U-6047	Veturitien silta radan yli	0,35	0,41	0,09	0,26
U-6054	Katajajarjuntien silta	0,86	0,58	0,38	1,08
U-6059	Mustikkamaan silta	0,67	0,68	0,21	0,61
U-6078	Vuosaaren silta	0,45	0,36	0,18	0,52
U-6085	Marjaniemen liittymäsilta	0,45	0,40	0,14	0,41
U-6095	Konalantien itäinen silta Kehä I:n yli	0,63	0,57	0,21	0,60
U-6097	Latokartanontien silta Kehä I:n yli	0,51	0,41	0,21	0,59
U-6098	Lauttasaaren silta	0,71	0,56	0,23	0,65
U-6104	Wallininkadun silta Helsinginkadun yli	0,34	0,22	0,11	0,31
U-6117	Haaga - Metsälä -silta nro 1	0,54	0,43	0,20	0,58
U-6127	Hopeasalmentien silta	0,80	0,54	0,31	0,90
U-6132	Kylänevantien silta	0,54	0,50	0,13	0,37
U-6140	Reposalmentien risteyssilta	0,49	0,60	0,12	0,34
U-6141	Haagan risteyssilta s4 Nurmijärventien yli	0,63	0,47	0,19	0,53
U-6142	Haagan risteyssilta s5 Nuijamiestentien yli	0,55	0,45	0,14	0,41
U-6144	Pelimannintien silta Martinlaakson radan yli	0,78	0,59	0,26	0,73
U-6159	Veturitien silta pohjoisen huolto radan yli	0,61	0,47	0,22	0,64
U-6166	Malminkartanontien ylikulkusilta	0,36	0,35	0,10	0,29
U-6221	Kulosaaren puistotien silta	0,79	0,82	0,24	0,68
U-6244	Salpausseläntien alikäytävä 3	0,35	0,32	0,13	0,38
U-6245	Tiirismaantien alikäytävä 4	0,31	0,30	0,11	0,31

8 Johtopäätökset

8.1 Reunaulokkeille asetettavat painorajoitukset

Tehtyjen tarkastelujen valossa joidenkin siltojen kevyen liikenteen väylille tulee asettaa kalustorajoituksia. Kantavuudet kohteittain eri liikennekuormille käyvät ilmi liitteestä 3. Yhteenvedona voidaan todeta, että 29 tarkastellusta sillasta kymmenen kohteen kestävyys riitti kaikille tarkasteluissa mukana olleille kuormakaavioille. Murtorajatilan taivutusmomenttikestävyys 12 tonnin huoltoajoneuvolle ylittyi seitsemässä kohteessa. Momenttikestävyys 16 tonnin huoltoajoneuvon suhteen ylittyi kymmenessä kohteessa.

Huonoin kantavuus oli Käskynhaltijantien (U-6042) sillan reunaulokkeella, jonka taivutusmomenttikestävyys ei ollut riittävä kevyimmälle Staran kalustoon kuuluvalla ajoneuvolle, eli kuuden tonnin traktorille. Käskynhaltijantien sillan reunaulokkeeseen on jälkikäteen ripustettu kaukolämpöputki, lisätty tasoitekerros sekä uusittu reunapalkki alkuperäistä suurempana. Lisäksi raudoituspiirustusten mukaan reunaulokkeen teräsmäärä on alun perin ollut oleellisesti pienempi, kuin mitä silloisten kuormitusmääräysten mukaiselle kuormalle suunnittelu olisi edellyttänyt.

Toiseksi huonoin kantavuus oli Katajaharjuntien sillan reunaulokkeella. Kyseisestä kohteesta ei ollut saatavilla raudoituspiirustusta, mutta koska silloissa on suunnitelmapiirustuksien perusteella sama suunnittelija, siltojen suunnitteluajankohdat ovat lähellä toisiaan (vuodet 1959 ja 1962), sillat ovat samaa siltatyyppiä ja Katajaharjuntien sillan mitat ovat samat kuin Käskynhaltijantien sillassa, oletettiin myös raudoitus tiedot Käskynhaltijantien siltaa vastaaviksi. Koska Katajaharjuntien sillan reunaulokkeille ei jälkikäteen ole lisätty pysyviä kuormia, oli kantavuus liikennekuormille jonkin verran parempi kuin Käskynhaltijantien sillan reunaulokkeella.

Muiden siltojen osalta kantavuus 12 tonnin huoltoajoneuvolle ylittyi tehtyjen tarkasteluiden mukaan enintään 7 % ja kantavuus 16 tonnin huoltoajoneuvolle ylittyi suurimmillaan 25 %.

Kantavuuslaskennassa rajoituttiin tarkastelemaan yksittäisten ajoneuvojen aiheuttamia kuormituksia. LUSAS-ohjelmalla mallinnettiin esimerkinomaisesti tilanne, jossa 2,7 m leveällä ulokkeella 16 tonnin kuorma-auto ja 16 tonnin huoltoajoneuvo ovat ulokkeella

siten, että painavimmat akselilinjat ovat kolmen metrin päässä toisistaan. Tällöin taivutusmomentti oli noin 10 % suurempi, kuin yksittäisen 16 tonnin ajoneuvon aiheuttama taivutusmomentti. Peräkkäisten ajoneuvojen aiheuttaman momentin suuruus riippuu siitä, miten lähellä ajoneuvot ovat toisiaan. Tätä yhteisvaikutusta ei systemaattisesti tämän työn puitteissa tutkittu.

8.2 Momenttikestävyys suunnittelukuormien suhteen

Vaihtelu murtorajatilán momenttikestävydessä suunnittelukuorman suhteen oli suurta kaikkien kolmen normin mukaan suunnitelluissa kohteissa. 17 kohteen momenttikestävyys suunnittelunormin mukaiselle erilliselle pyöräkuormalle ei ollut riittävä. Tästä voi päätellä, että kaikkien kohteiden reunaulokkeella sijaitsevaa kevyen liikenteen väylää ei ole suunniteltu normien mukaisia erillisiä pyöräkuormia käyttäen.

Reunaulokkeiden puutteellinen momenttikestävyys suunnittelukuormien suhteen saattaa osittain selittyä käytetyillä varmuuskertoimilla. Tarkastelussa käytettiin Liikenneviraston kantavuuslaskentaohjeen mukaisia kertoimia, eli sallittujen jännitysten menetelmällä (normit RKM 55 ja RKN 69) suunniteltujen siltojen kuorman kertoimena käytettiin murtorajatilavertailussa arvoa 1,5. Kuitenkin RKM 55:n mukaan erillisen pyöräkuorman joutumista sillan ajoradasta erilliselle jalkakäytävälle on tullut käsitellä poikkeuksellisenä ylikuormana, ja tällöin suunnittelija ei ole ollut sidottu silloisten määräysten mukaisiin sallittuihin jännityksiin ja varmuuslukuihin. Samoin RKN 69:n mukaan erillinen pyöräkuorma kevyen liikenteen väylällä on luokituksestaan poikkeuksellinen kuormitustilanne eli "katastrofikuorma".

PKM 71 -määräysten mukaan suunniteltujen siltojen kuormakertoimena murtorajatilán vertailuissa käytettiin Liikenneviraston ohjeen mukaista arvoa 1,6. Pyöräkuorman (tai akselikuorman, mikäli uloke on riittävän leveä) joutumista kevyen liikenteen kaistalle ei ole kyseisessä normissa määritelty onnettomuus- tai katastrofikuormaksi, joten kertoimen tulisi olla sellaisenaan sovellettavissa myös kevyen liikenteen väylän kuormiin. Kuitenkin aineistossa olleissa PKM 71:n mukaan suunniteltujen kohteiden (kolme kappaletta) kestävyyksissä on vaihtelua: reunaulokkeen momenttikestävyys osoittautui yhdessä kohteessa olevan vain 55 % suunnittelunormin mukaisen kuorman aiheuttamasta rasituksesta.

Latokartanontien sillasta Kehä I:n yli (U-6097) oli käytössä alkuperäiset laskelmat. Niistä kävi ilmi, että reunauloke on mitoitettu suuremmille kuormille kuin suunnitteluun käytetty kuormitusmääräys RKM 55 olisi edellyttänyt, nimittäin 100 kN suuruiselle erilliselle pyöräkuormalle ja 4 kN/m^2 suuruiselle jalankulkijakuormalle. Kuitenkin sillan yleispiirustukseen on suunnittelukuormaksi merkitty RKM I/1955, eli kuormitusmääräysten RKM 55 mukainen kuormitusluokka 1, jossa erillisen pyöräkuorman suuruus on 70 kN. Tämä osaltaan vahvistaa sitä johtopäätöstä, että kyseisen aikakauden siltojen piirustuksista ei luotettavasti voi päätellä, mille kuormille reunaulokkeella olevat kevyen liikenteen väylät on suunniteltu.

Johtopäätöksenä on, että kantavuuslaskentaohjeen tarkastelutaso 1, eli suunnittelu-kuorman vertaaminen kantavuuden määrittämisessä käytettäviin kuormiin, ei vaikuta tämän aikakauden kohteissa olevan riittävä, jotta voitaisiin tehdä luotettavia päätelmiä reunaulokkeen todellisesta kantavuudesta. Sen sijaan kantavuuslaskenta tulee suorittaa tarkastelutason 2 mukaisesti, eli voimasuureet tarkalla rakennemallilla laskien ja rakenteiden todelliset mitat ja kuormat huomioiden.

8.3 Jatkotutkimuksen tarve

Tässä selvityksessä olivat mukana vain siltojen reunaulokkeella sijaitsevat kevyen liikenteen väylät. Tarkastelua tulisi mahdollisesti laajentaa myös sellaisiin saman aikakauden siltoihin, joissa kevyen liikenteen väylä sijaitsee ajoradan vieressä, esimerkiksi ajorataa heikomman kotelorakenteen päällä. Samoin tulisi mahdollisesti tarkistaa saman aikakauden kevyen liikenteen siltojen kantavuudet nykyisin käytössä olevalle huoltokalustolle.

Kantavuustarkasteluissa käytettiin suunnitelmapiirustusten mukaisia rakenteiden mittoja ja raudoitustietoja. Kantavuuslaskennan tulokset voivat reunaulokkeiden osalta muuttua, mikäli todelliset mitat tai raudoitusmäärät poikkeavat piirustuksissa esitetyistä. Betonin todellinen lujuus selvittämällä ja kantavuuden kannalta kriittiset mitat tarkistamalla voidaan myös alentaa käytettyjä materiaalien osavarmuuslukuja, eli materiaalien lujuuksia ei tällöin laskennassa alenneta yhtä paljon.

8.4 Mahdolliset korjaustoimenpiteet

Helsingin kaupungin silloissa ei tiettävästi ole tehty reunaulokkeiden vahvistamistoimenpiteitä. Reunaulokkeita on sen sijaan rakennettu uudestaan. Mahdollisia vahvistamiskeinoja ovat muun muassa hiilikuituvahventaminen, lisäraudoituksen lisääminen ulokelaatan yläpintaan tai palkkien lisääminen laatan alapuolelle. Reunaulokkeen juureen kohdistuvaa poikittaista momenttirasitusta on mahdollista pienentää uloketta kaventamalla.

Mikäli reunauloke todetaan kantavuudeltaan riittämättömäksi, voidaan uloke kokonaan uusiksi kestävyydeltään riittävänä. Edellytyksenä on, että pääkannattajien varaan on mahdollista rakentaa uusi reunauloke. Joissain tapauksissa vaihtoehtona voi olla poistaa heikko reunauloke ja ohjata kevyt liikenne omalle sillalleen.

Lähteet

- 1 Siltojemme historia. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL. 525 s. Otavan Kirjapaino Oy. Keuruu 2004.
- 2 Rakenteiden kuormitusmääräykset (RKM 1955). Rakennusinsinööriyhdistyksen julkaisuja A 26. Rakennusinsinöörien yhdistys ry. Helsinki. 1955.
- 3 RIL 59. Rakenteiden kuormitusnormit. Suomen rakennusinsinöörien liitto. Helsinki 1969.
- 4 RIL 59 b. Rakenteiden kuormitusnormit (1969) 1970. Suomen rakennusinsinöörien liitto. Helsinki 1970.
- 5 RIL 59 c. Rakenteiden kuormitusnormit (1969, 1970) 1971. Suomen rakennusinsinöörien liitto. Helsinki 1971.
- 6 RIL 59 d. Rakenteiden kuormitusnormit (1969, 1970,1971) 1974. Suomen rakennusinsinöörien liitto. Helsinki 1974.
- 7 RIL 59 e. Rakenteiden kuormitusnormit (1969, 1970,1971, 1974) 1975. Suomen rakennusinsinöörien liitto. Helsinki 1975.
- 8 RIL 59 f. Rakenteiden kuormitusnormit (1969, 1970,1971, 1974) 1978. Suomen rakennusinsinöörien liitto. Helsinki 1978.
- 9 RIL 144–1982 Rakenteiden kuormitusohjeet. Suomen rakennusinsinöörien liitto. Helsinki 1982.
- 10 RIL 144–1983 Rakenteiden kuormitusohjeet. Suomen rakennusinsinöörien liitto. Helsinki 1983.
- 11 RIL 144–1990 Rakenteiden kuormitusohjeet. Suomen rakennusinsinöörien liitto. Helsinki 1990.
- 12 RIL 144–1997 Rakenteiden kuormitusohjeet. Suomen rakennusinsinöörien liitto. Helsinki 1997.
- 13 RIL 144–2002 Rakenteiden kuormitusohjeet. Suomen rakennusinsinöörien liitto. Helsinki 1992.
- 14 Homberg, Hellmut. Double Webbed Slabs (Platten mit Zwei Stegen). Springer-Verlag. Berlin-Heidelberg-New York. 1973.

- 15 Homberg, Hellmut, Ropers, Walter. Fahrbahnplatten mit veränderlicher Dicke. Erster Band. Springer-Verlag. Berlin-Heidelberg-New York. 1965.
- 16 Siltojen kantavuuslaskentaohje. Liikenneviraston ohjeita 36/2015. Liikennevirasto. Helsinki 2015. Verkkojulkaisu pdf (www.liikennevirasto.fi)
- 17 Eurokoodin soveltamisohje. Betonirakenteiden suunnittelu – NCCI 2 (16.9.2014). Liikenneviraston ohjeita 25/2014. Liikennevirasto. Helsinki 2014.
- 18 SFS-EN 1991-2 + AC. Eurokoodi 1. Rakenteiden kuormat. Osa 2: Siltojen liikennekuormat. Suomen standardisoimisliitto SFS. 2. painos.
- 19 SFS-EN 1991-2. Kansallinen liite. Liikenne- ja viestintäministeriö. 9.1.2015.
- 20 Väliaikaiset pohjoismaiset tiesiltojen kuormamääräykset (PKM 71). Ehdotus. Pohjoismainen tieteknillinen liitto. 9.12.1971. Pdf-tiedosto.
- 21 Siltojen ylläpito, toimintalinjat. Helsingin kaupungin rakennusviraston julkaisuja 2012:9.
- 22 SILKO 1.233 Betonirakenteet. Halkeamien korjaaminen. Yleiset laatuvaatimukset. Liikennevirasto. 05/2003.
- 23 Tirkkonen, Timo. Betonisiltojen vahventaminen hiilikuidulla. Tielaitoksen selvityksiä 33/1999. Helsinki 1999.
- 24 Eurokoodin soveltamisohje. Siltojen kuormat ja suunnitteluperusteet – NCCI 1 (5.9.2014). Liikenneviraston ohjeita 24/2014. Liikennevirasto. Helsinki 2014.
- 25 Betoninormit 1965. Rakennusinsinööriyhdistyksen julkaisuja A 46. Suomen Betoniyhdistys ry ja Rakennusinsinööriyhdistys ry. Vammala 1965.
- 26 Moottoriajoneuvoasetus (330/1957). Suomen asetuskokoelma. Annettu Helsingissä 4.10.1957. Pdf-tiedosto, Eduskunnan kirjasto.
- 27 Asetus moottoriajoneuvoasetuksen muuttamisesta (142/1975). Annettu Helsingissä 28.2.1975. Pdf-tiedosto, Eduskunnan kirjasto.
- 28 SFS-EN 1992-1-1 + A1 + AC. Eurokoodi 2. Betonirakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Suomen standardisoimisliitto SFS. 2. painos.
- 29 Siltojen vedeneristysten SILKO-tuotevaatimukset. Liikenneviraston ohjeita 9/2015. Liikennevirasto. Helsinki 2015.

Huolto- ja päällystyskaluston mitat ja massat

	Suurin sallittu massa [tn]	Akseliväli [m]	Raideleveys [m]	Leveys [m]	Etuakseli [tn]	Taka-akseli (tai teli) [tn]
<u>Traktorit</u>						
Wille 355	6	1,7	1,2	1,4	2	4
Wille 655	12	2,3	1,6	1,9	4	8
Wille 855	14	2,6	1,8	2,2	5	9
Volvo 50	10	2,7	1,7	2,2	3	7
Liebherr 514	10,5	2,8	1,9	2,3	3,5	7
CAT 924 (G)	12	2,8	1,9	2,3	4	8
Volvo 60	16	3	1,9	2,4	6	10

Kuorma-autot

IVECO 65C18-P	6,5	3,5	1,7	2	1,5	5
Fuso Canter 7C15	7,5	2,8	1,7	2	1,5	6
Volvo FL 10	12	3,2	1,8	2,1	4	8
Volvo FL 10	16	3,2	1,8	2,1	6	10
Scania P280	18	3,8	1,9	2,5	7	11
Scania P340	26	3,8+1,35	2,2	2,5	5	10,5+10,5

Höylät

Veekmas RG 281	20	5+1,35	2,2	2,55	6	7+7
----------------	----	--------	-----	------	---	-----

Jyrsijä

Wirtgen W 100i	17	2,7	1,0 / 1,9	2,1	5,9	11,1
----------------	----	-----	-----------	-----	-----	------

Levittäjä

Vögele 1303-3i	21,2	1,5	1,5	3,4-4,2	5,3+5,3	10,6
----------------	------	-----	-----	---------	---------	------

Jyrät

Hamm HD 12	3,4	1,7	1,2	1,3	1,7	1,7
Bomag BW 154 AP-41	8,6	2,9	1,5	1,7	4,3	4,3

Normien mukaiset huoltoajoneuvot

Huoltoajon. 12 tn RIL-144	12	2	1,7	2,1	4	8
Huoltoajon. 16 tn SFS-EN 1991-2/NA	16	3	1,8	2	6	10

	Ulokkeen pituus l	Paksuus ulokkeen juuressa h1	Paksuus ulokkeen ulko-reunassa h2	Kev. liik. väylän leveys	Raudoitus-piirustus	Valm. vuosi	Suunnittelu-normi	Ylä-pinnan teräsket	A s	Betonipeite c (Oletus 30 mm)	Tehollinen korkeus d	Suhteellinen teräsala p	Betonin lujuus	Teräksen lujuus	Huomioitavaa		
																(Ol. K300)	(Ol. 40)
1	U-1354	Kuusisaarentien silta	1550	200	150	5150	X	1961	RKM 55	12 k150	754	Ol.	164	0,460 %	K300	Ol.	Valaisinylväiden kohdalla vahvistuspalkit
2	U-1356	Hämeentien silta Vallilassa	1800	300	150	4400	X	1964	RKM 55	12 k125	904	30	264	0,342 %	K300	V40	Valaisinylväiden kohdalla vahvistuspalkit
3	U-1365 W	Vihdintien ylikulkusilta	1900	300	150	5000	X	1975	PKM 72	22 k300 + 18 k300	2115	20	270	0,783 %	K400	A40H	Sama raudoitus kevyen liikenteen väylän ja ajoradan puoleisella ulokkeella, kaiteet uusittu, kosketussuojalipat poistettu
4	U-1382	Naurissalmen silta	1000	300	150	4250	X	1957	ei merk. (RKM 55)	12 k150	754		264	0,286 %	K300	V40j	Ulokkeen juuressa vahvike hxb 100x300, 2xkl-putki ripustus
5	U-1386	Kulosaaren silta	2260 / 1710	260/180	120	4500	*)	1957	ei merk. (RKM 55)	15 k160 *)	1105	Ol.	222,5 / 142,5		Ol.	Ol.	*) Ei raudoituspöirustusta, terästen määrä korjauspöirustuksesta KAO_23660_2
6	U-3365 E	Vihdintien ylikulkusilta		Sama kuin U-1365			X						Sama kuin U-1365				
7	U-6003	Herttoniemensalmen eteläinen silta	2000	380	190	5500	X	1971	RKN 69	15 k150	1178	30	342,5	0,344 %	K350	A40H	Sama raudoitus kevyen liikenteen väylän ja ajoradan puoleisella ulokkeella, kevytsorabetoni K75, valaisinylväitä ei huomioitu
8	U-6025	Konalantien läntinen silta Kehä I:n yli		Sama kuin U-6095			X						Sama kuin U-6095				
9	U-6042	Käskynhaltijantien silta	1900	300	150	4200	X	1960	RKM 55	12 k200	565	25	269	0,210 %	BK300	Ol.	Ulokkeen juuressa vahvike hxb 100x600, PUTKI d900mm ripustus, valaistuspylvään kohdalla vahvike
10	U-6044	Professorintien risteysilta	1000	180	150	4000	X	1960	RKM 55	10 k100	785	20	155	0,506 %	BK300	Ol.	Valaisinylväiden kohdalla vahvistuspalkit
11	U-6047	Veturintien silta radan yli	1200	270	140	4500	X	1974	PKM 71	15 k220 + 15 k220	1606	Ol.	232,5	0,691 %	K350	A 40 H	Sama raudoitus kevyen liikenteen väylän ja ajoradan puoleisella ulokkeella: Kevytsorabetoni 7kN/m3, (K40), Kosketussuojalippa, valaisinylv. kohdalla ei vahvikkeita
12	U-6054	Katajaharjuntien silta	1900	300	150	2450	*)	1963	RKM 55	*)	*)	25	269	0,210 %	BK300	Ol.	*) Raudoitustiedot Käskynhaltijantien mukaan, jossa sama suunnittelija, samat mitat ja sama siltatyyppi
13	U-6059	Mustikkamaan silta	1900	250	100	2900	X	1963	RKM 55	15 k300+ 12 k300	966	Ol.	213,0	0,454 %	K300	V40j	Valaisinylväiden kohdalla ei vahvikkeita
14	U-6078	Vuosaaren silta	1200	300	200	3150	X	1969	RKM 55	12 k150	754	Ol.	264	0,286 %	K300	Ol.	Valaisinylväiden kohdalla vahvikkeet
15	U-6085	Marjaniemen liittymäsilta	1700	300	150	3000	X	1968	RKM 55	15 k250 + 12 k250	1159	Ol.	262,5	0,442 %	K350	A 40 H	Ajoradan puoleisella ulokkeella enemmän terästä, Portaali huomioitu
16	U-6095	Konalantien itäinen silta Kehä I:n yli	2165	300	150	2500	X	1969	RKM 55	15 k150	1178	30	262,5	0,449 %	K350	A 40 H	Sama raudoitus kevyen liikenteen väylän ja ajoradan puoleisella ulokkeella, keskimmäisen val.pylvään kohdalla ei lisäteräksiä/vahviketta
17	U-6097	Latokartanontien silta Kehä I:n yli	2720	400	150	5000	X	1969	RKM 55	15 300 + 15 k600 +	1307	35	357	0,366 %	K350	A 40 H	Valaisinylväiden ja portaalin kohdalla lisäteräsket
18	U-6098	Lautasaaren silta	1000	200	130	4500	X	1969	ei merk. (RKM 55)	15 k250	706	20	172,5	0,409 %	K400	A 40 H	Valaisinylväiden kohdalla ei lisäteräksiä
19	U-6104	Wallininkadun silta Helsinginkadun yli	2050	500	310	2800	X	1969	RKM 55	12 k120	942	Ol.	469	0,201 %	Ol.	Ol.	Ulokkeen alapinta kaareva, Valaisin huomioitu
20	U-6113	Herttoniemensalmen pohjoinen silta	2000	Sama kuin U-6003		4250	X						Sama kuin U-6003				
21	U-6117	Haaga - Metsälä -silta nro 1	1350	280	160	5000	X	1972	RKM/RKN	15 k 200	883	25	247,5	0,357 %	K 350	A 40 H	Ajoradan puoleisella ulokkeella 15 k 150, Valaisinylväiden kohdalla ei vahvikkeita
22	U-6118	Haaga - Metsälä -silta nro 2	1350	Sama kuin U-6117		5000	X						Sama kuin U-6117				"
23	U-6127	Hopeasalmentien silta	2800	400	150	4000	X	1973	RKN 69	15 k300+ 12 k300	966	30	362,5	0,266 %	K350	A 40 H	Ajoradan puoleisella ulokkeella 15 k 150 + 12 k 60, ulokkeen h1 300mm, Valaisinylväs huomioitu; Kevytsorabetoni
24	U-6132	Kylänevantien silta	1650	250	150	2050	X	1973	RKN 69	12 k220 + 12 k220	1028	20	224	0,459 %	K350	A 40 H	Valaisin huomioitu; Kevytsorabetoni K100
25	U-6140	Reposalmentien risteysilta	2250	270	150	3450	X	1973	RKN 69	3x15k300	1767	Ol.	232,5	0,760 %	K350	A 40 H	Sama raudoitus kevyen liikenteen väylän ja ajoradan puoleisella ulokkeella, valaisinylväät välituiden kohdalla, jossa lisäraudoitukset; kevytsorabetoni
26	U-6141	Haagan risteysilta s4 Nurmijärventien yli	2050	300	150	3150	X	1974	Epk 100 kN / RKN tai PKM	15 k360 + 15 k360	981	20	272,5	0,360 %	K400	A 40 H	Ajoradan puoleisella ulokkeella enemmän terästä, Portaali
27	U-6142	Haagan risteysilta s5 Nuijamiestentien yli	2100	300	150	3000	X	1974	Epk 100 kN / RKN tai PKM	15 k 150	1178	20	272,5	0,432 %	K400	A 40 H	Ajoradan puoleisella ulokkeella T18k150, valaisimien kohdalla lisäteräsket; kevytsorabetoni
28	U-6144	Pelimannintien silta Martinlaakson radan yli	2400	300	150	8000	X	1974	PKM 71	12 k290 + 15 k290	999	25	267,5	0,373 %	K400	A 40 H	Samanlaiset kevyen liikenteen ulokkeet molemmilla puolilla, valaisin huomioitu, kosketussuojalippojen kohdalla lisäteräsket
29	U-6159	Veturintien silta pohjoisen huoltoradan yli	2000	350	200	3950	X	1974	PKM71 / RKN71	18 k400 + 15 k400	1078	25	316,0	0,341 %	K350	A 40 H	Ajoradan puoleisella ulokkeella lisäksi 22 k400, ripustettu kosketussuojalippa, valaisinylväs
30	U-6166	Malminkartanontien ylikulkusilta	1100	260	150	5000	X	1975	PKM72 / RKN71	15 k150	1178	25	227,5	0,518 %	K350	A 40 H	Valaisinylväs
31	U-6221	Kulosaaren puistotien silta	2350	240	120	5500	X	1973	RKN 69	3x15k400	1325	Ol.	202,5	0,654 %	K400	A 40 H	Toisella puolella korotettu lyhyempi uloke, ei käytössä, 15k400+18k400, Valaisin huomioitu
32	U-6244	Salpausseläntien alikäytävä 3	1500	320	250	3500	X	1972	RKN 69	15 k170	1039	Ol.	282,5	0,368 %	K300	A 40 H	
33	U-6245	Tiirismaantien alikäytävä 4	1500	320	250	2500	X	1972	RKN 69	15 k 150	1178	Ol.	282,5	0,417 %	BK300	A 40 H	

			Leikkaus, Qd/Vco				Momentti, As,vaad/As												X, momentin suhteen						M _{k12} /M _{sunn} (Epk)		Momentti, As,vaad/As					
			AA 13/27 27 tn	N1 *)	Kik SFS-EN/NA 16 tn	Kik (RIL144) 12 tn	Ajoneuvoasetus		Huoltoajoneuvot		STARAN KALUSTO **)		FUSO	Scan P340	Scan P280	Volvo FL	Volvo FL	Veekmas	PÄÄLLYSTYSKALUSTO		Suurin sallittu akselipaino (kN)						M _k	M _d	Suunnittelunormi			
							AA 13 27 tn	AA 13 42/76	SFS-EN/NA 16 tn	RIL-144 12 tn	Wille 855c 14 tn	VolvoL50 10 tn	Wille 355b 6 tn	7,5 tn	26 tn	18 tn	16 tn	12 tn	20 tn	Wirtgen 17 tn	Vögele 21 tn	N1	N2	N3	N4	N5	N6			RKM55	RKN69	PKM71
1	U-1354	Kuusisaarentien silta	1,03	0,93	0,91	0,75	1,65	1,56	1,25	1,06	1,13	0,93	0,79	0,83	1,76	1,24	1,17	0,98	1,23	1,44	1,17	103	88	78	88	87	85	0,59	0,62	1,57		
2	U-1356	Hämeentien silta Vallilassa	0,56	0,81			1,11	1,06	0,87	0,74					1,16	0,83	0,81	0,70	0,85	0,95	0,84	176	137	118	138	137	132	0,60	0,63	1,01		
3	U-1365	Vihdintien ylikulkusilta	0,42	1,34			0,53	0,51	0,40	0,36					0,54	0,40	0,40	0,35	0,41	0,48	0,41	452	343	293	341	339	325	0,36	0,42			0,73
4	U-1382	Naurissalmen silta	0,75				0,93	0,87	0,98	0,84					1,05	0,94	0,89	0,79	0,83	1,14	0,61	600	600	600	600	600	600	0,52	0,55	0,91		
5	U-1386	Kulosaaren silta	0,69	0,62			1,64	1,56	1,20	1,04	1,09	0,92	0,88	0,83	1,73	1,19	1,14	0,97	1,01	1,41	1,19	104	84	72	83	82	79	0,82	0,85	1,11		
6	U-3365	Vihdintien ylikulkusilta	Ks U-1365																			Ks U-1365										
7	U-6003	Herttoniemensalmen eteläinen silta	0,40	0,86			0,77	0,75	0,57	0,52					0,78	0,57	0,59	0,52	0,60	0,73	0,60	304	214	181	213	211	201	0,45	0,47		0,85	
8	U-6025	Konalantien läntinen silta Kehä I:n yli	Ks U-6095																			Ks U-6095										
9	U-6042	Käskynhaltijantien silta	0,68	0,40			2,07	2,00	1,58	1,42	1,47	1,30	1,28	1,21	2,13	1,57	1,58	1,40	1,62	1,88	1,62	47	35	30	35	35	33	0,61	0,64	1,73		
10	U-6044	Professorintien risteysilta	1,11		0,97	0,80	1,07	0,98	1,08	0,87	0,94	0,74			1,23	1,04	0,96	0,81	0,87	1,30	0,56	442	432	432	442	432	432	0,54	0,56	1,39		
11	U-6047	Veturitien silta radan yli	0,60				0,56	0,53	0,54	0,46					0,61	0,52	0,50	0,44	0,47	0,61	0,42	526	508	496	517	517	513	0,34	0,33			0,93
12	U-6054	Katajajaruntien silta	0,58	0,46			1,81	1,74	1,32	1,17	1,22	1,05	1,03	0,98	1,87	1,32	1,33	1,15	1,37	1,63	1,37	85	63	54	63	63	60	0,61	0,64	1,59		
13	U-6059	Mustikkamaan silta	0,74	0,83			1,39	1,34	1,01	0,90	0,93	0,81	0,78	0,75	1,43	1,01	1,02	0,88	1,05	1,25	1,05	131	98	84	98	97	93	0,61	0,64	1,22		
14	U-6078	Vuosaaren silta	0,56				0,80	0,74	0,73	0,61					0,88	0,71	0,67	0,57	0,64	0,86	0,55	312	298	288	304	301	298	0,55	0,57	0,92		
15	U-6085	Marjaniemen liittymäsilta	0,53	1,00			0,86	0,82	0,67	0,59					0,90	0,67	0,64	0,56	0,67	0,76	0,65	245	199	173	201	200	194	0,59	0,62	0,79		
16	U-6095	Konalantien itäinen silta Kehä I:n yli	0,57	0,72			1,15	1,11	0,92	0,83					1,14	0,84	0,94	0,82	0,88	1,13	0,91	175	117	99	115	114	108	0,75	0,78	0,96		
17	U-6097	Latokartanontien silta Kehä I:n yli	0,37	0,74	0,42		1,00	0,98	0,76	0,68					0,88	0,72	0,74	0,64	0,66	0,85	0,82	279	170	137	151	146	138	1,02	1,07	0,65		0,94 ***)
18	U-6098	Lauttasaaren silta	0,84				1,13	1,02	1,21	0,96	1,04	0,80			1,30	1,14	1,05	0,89	0,93	1,47	0,58	424	424	424	424	424	424	0,53	0,55	1,56		
19	U-6104	Wallinkadun silta Helsinginkadun yli	0,30	0,76			0,66	0,65	0,48	0,45					0,67	0,48	0,51	0,44	0,50	0,64	0,52	377	253	212	246	242	230	0,68	0,71	0,55		
20	U-6113	Herttoniemensalmen pohjoinen silta	Ks U-6003																			Ks U-6003										
21	U-6117	Haaga - Metsälä -silta nro 1	0,59	0,98			0,96	0,90	0,85	0,73					1,03	0,84	0,79	0,69	0,77	0,97	0,71	210	196	185	199	198	196	0,39	0,41	1,05	1,38	
22	U-6118	Haaga - Metsälä -silta nro 2	Ks U-6117																			Ks U-6117										
23	U-6127	Hopeasalmentien silta	0,42	0,48	0,49		1,54	1,51	1,18	1,07	1,10	0,97	0,84	0,89	1,38	1,13	1,16	1,02	1,07	1,30	1,29	138	84	67	73	71	67	0,73	0,76		1,25	
24	U-6132	Kylänevantien silta	0,64	0,94			1,06	1,01	0,83	0,72					1,13	0,83	0,78	0,68	0,82	0,95	0,79	181	152	134	154	154	149	0,41	0,43		1,36	
25	U-6140	Reposalmentien risteysilta	0,58	1,12			0,90	0,87	0,75	0,65					0,87	0,65	0,74	0,64	0,66	0,89	0,71	256	168	141	163	160	152	0,57	0,59		0,92	
26	U-6141	Haagan risteysilta s4 Nurmijärventien yli	0,48	0,62			1,21	1,18	0,90	0,84					1,23	0,89	0,96	0,84	0,93	1,21	0,96	158	110	93	110	108	103	0,47	0,49		1,33	
27	U-6142	Haagan risteysilta s5 Nujjamiestentien yli	0,48	0,76			1,03	1,00	0,78	0,72					1,04	0,75	0,82	0,72	0,79	1,03	0,82	204	140	119	139	137	130	0,49	0,51		1,11	
28	U-6144	Pelimannintien silta Martinlaakson radan yli	0,49	0,57			1,43	1,40	1,18	1,04	1,05	0,92	0,80	0,86	1,32	1,02	1,16	1,00	1,00	1,36	1,13	139	89	73	84	82	78	0,48	0,47			1,80
29	U-6159	Veturitien silta pohjoisen huoltoradan yli	0,49	0,67			1,09	1,07	0,86	0,80					1,11	0,85	0,89	0,80	0,88	1,06	0,90	181	128	108	127	126	120	0,45	0,47		1,20	1,42
30	U-6166	Malminkartanontien ylikulkusilta	0,59				0,58	0,53	0,58	0,47					0,65	0,56	0,52	0,45	0,47	0,69	0,37	615	600	593	608	608	608	0,37	0,39		1,10	1,17
31a	U-6221	Kulosaaren puistotien silta	0,67	0,75			1,46	1,42	1,22	1,07	1,06	0,93	0,82	0,88	1,36	1,04	1,20	1,03	1,03	1,42	1,14	132	85	71	81	80	75	0,63	0,66	1,11	1,43	
31b	****)						1,38	1,35	1,15	1,01	1,00	0,88	0,78	0,84	1,29	0,98	1,13	0,97	0,97	1,34	1,08									1,06	1,37	
32	U-6244	Salpausseläntien alikäytävä 3	0,50	1,26			0,67	0,64	0,53	0,46					0,72	0,52	0,50	0,43	0,52	0,60	0,49	330	282	250	282	281	272	0,41	0,43		0,87	
33	U-6245	Tiirismaantien alikäytävä 4	0,48	1,40			0,59	0,56	0,47	0,40					0,63	0,46	0,44	0,38	0,46	0,53	0,43	377	323	286	323	321	311	0,41	0,43		0,76	

*) Leikkauskestävyyttä N1 kuormakaaviole ei ole laskettu, mikäli N1-kaavio ei mahdu ulokkeelle siten, että pyöräkuorman resultantti on mitoittavassa kohdassa (2d etäisyydellä tukilinjasta) eli jos $l < 1,0 m + 2d$

**) Kestävyyttä ei ole tarkistettu 16 ja 12 tonnin huoltoajoneuvoa kevyemmälle kalustolle, mikäli uloke kestää em. kuormakaaviot.

***) Silta U-6097 on alkuperäisten laskelmien perusteella suunniteltu kuormalle Epk 100 kN (keskioetäisyys 0,5 m kaiteesta) + jalankulkijakuorma 4 kN/m². Käyttöaste (MRT) tälle kuormitukselle on 0,94.

****) 31a on laskettu käyttäen kevytsorabetonin tiheydenä 15 kN/m³, 31b on laskettu käyttäen kevytsorabetonille kyseisen kohteen piirustusten mukaista kuivatilavuuspainoa 7 kN/m³.