

ANTTI ARTUKKA

## Betonisten rautatiesiltojen jäljellä olevan käyttöiän arvioiminen







Antti Artukka

# Betonisten rautatiesiltojen jäljellä olevan käyttöiän arvioiminen

Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 28/2014

Liikennevirasto

Helsinki 2014

*Kannen kuva: Antti Artukka*

Verkojulkaisu pdf ([www.liikennevirasto.fi](http://www.liikennevirasto.fi))

ISSN-L 1798-6656

ISSN 1798-6664

ISBN 978-952-255-471-0

Liikennevirasto

PL 33

00521 HELSINKI

Puhelin 029 534 3000

**Antti Artukka, Betonisten rautatiesiltojen jäljellä olevan käyttöiän arvioiminen.** Liikennevirasto, infra- ja ympäristöosasto. Helsinki 2014. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 28/2014. 152 sivua ja 13 liitettä. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-255-471-0.

**Avainsanat:** Väsyminen, rautatiesillat, kantavuustarkastelu, silta, betonirakenteet, käyttöikä, S-N-käyrä, eurokoodi,  $\lambda$ -kerroin (ekvivalentti vauriokerroin), Suomen rautatieliikennemäärä

## Tiivistelmä

Tämän työn aiheena on betonisten rautatiesiltojen jäljellä olevan käyttöiän arvioiminen. Työssä käyttöikää arvioidaan väsymisrajan kannalta, ja muut rajatilat jätetään vähemmälle huomiolle. Rakenteen väsymiskertymän kehittyminen ei riipu ajasta vaan kuormituskertojen määrästä ja intensiteetistä. Tämän vuoksi työn alussa käsitellään Suomen rautatieliikennettä aikaväliltä 1900–2012. Liikennemäärää selvitetään rataosittain ja suomalaisen rautatiekaluston kehitystä tutkitaan väsymiskertymän laskemiseen tarvittavien tietojen laajuudessa. Lisäksi työssä on pitänyt kiinnittää huomiota kaluston nopeuteen ja radan kuntoon dynaamisten vaikutusten arvioinnin ja huomioimisen vuoksi.

Työn tarkoituksena on luoda mitoitusmalli betonisen rautatiesillan väsymiskertymän laskemiseksi ja jäljellä olevan käyttöiän arvioimiseksi. Väsymiskertymää on ennustettava, jotta voidaan arvioida tulevaisuuteen sijoittuvaa käyttöiän päättymishetkeä. Tämän vuoksi työssä on arvioitu karkeat liikennemääräennusteet vuoteen 2050 asti. Lisäksi kaluston kehittymisestä aiheutuvaa väsymiskertymän kasvua on arvioitu.

Mitoitusmallin luomiseksi suoritetaan väsymiskertymälaskelmia eri aikajaksojen kalustolle ja erilaisille siltarakenteille. Laskelmiin on valittu sekä 1-aukkoisia että jatkuvia siltarakenteita. Laskelmien avulla tuotetaan ekvivalentteja vauriokerroimia, vaikutusviivan kriittisen pituuden funktiona, eri aikajaksoille ja ominaismatkustaja- ja ominaistavarajunakohtaisesti. Siltakohtaisessa mitoituksessa näitä yhdistelemällä ja skaalaamalla saadaan siltakohtainen ekvivalentti vauriokerroin. Tämä kuvaa väsymiskertymän määrää, jonka avulla voidaan arvioida sillan jäljellä olevaa käyttöikää. Lopuksi luotua mitoitusmallia verrataan nykyisin käytössä oleviin mitoitusmalleihin.

Mitoitusmallissa huomioidaan Suomessa ratifioidun standardin SFS-EN 15528+A1 aiheuttama, radan kantavuuteen perustuvaa, luokitustarvetta Suomen rataverkolle. Tämän mukaan pääradat ovat luokiteltava vuoteen 2016 ja muut radat vuoteen 2018 mennessä.



**Antti Artukka: Bedömning av den återstående livslängden hos järnvägsbroar av betong.** Trafikverket, infra och miljöavdelningen. Helsingfors 2014. Trafikverkets undersökningar och utredningar 28/2014. 152 sidor och 13 bilagor. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-255-471-0.

## Sammandrag

Denna studie handlar om bedömning av den återstående livslängden hos järnvägsbroar av betong. I studien bedöms livslängden utifrån utmattningsgränstillståndet, och andra gränstillstånd ägnas mindre uppmärksamhet. Utvecklingen av den ackumulerade utmattningen i en konstruktion beror inte på tiden utan på lastcyklernas antal och intensitet. Därför behandlas järnvägstrafiken i Finland under perioden 1900–2012 i studiens början. Trafikmängderna utreds per banavsnitt, och den finländska järnvägsmaterielens utveckling behandlas i den omfattning som är nödvändig med hänsyn till de uppgifter som behövs för att beräkna den ackumulerade utmattningen. Dessutom studeras även materielens hastighet och banans skick i syfte att bedöma och beakta de dynamiska effekterna.

Syftet med studien är att skapa en dimensioneringsmodell för beräkning av den ackumulerade utmattningen av en järnvägsbro av betong och bedöma brons återstående livslängd. Ackumuleringen av utmattningen måste prognostiseras för att göra det möjligt att bedöma den tidpunkt i framtiden när bron når slutet av sin livslängd. Därför presenteras översiktliga trafikmängdsprognoser fram till 2050. Vidare bedöms den ökning av den ackumulerade utmattningen som orsakas av att materielens utvecklas.

För att utarbeta en dimensioneringsmodell beräknas den ackumulerade utmattningen för materiel från olika tidsperioder och för olika brokonstruktioner. Till kalkylerna har valts både broar med en öppning och kontinuerliga brokonstruktioner. Med hjälp av beräkningarna utarbetas skadeekvivalentfaktorer, som en funktion av influenslinjens kritiska längd, för olika tidsperioder och för olika specifika passagerar- och godståg. Vid den brospecifika dimensioneringen beräknas en brospecifik skadeekvivalentfaktor genom att kombinera och skala dessa värden. Faktorn beskriver den ackumulerade utmattningens mängd, som kan användas för att bedöma brons återstående livslängd. Avslutningsvis jämförs dimensioneringsmodellen med de dimensioneringsmodeller som används i dag.

I dimensioneringsmodellen beaktas det klassificeringsbehov av bannätet i Finland som bygger på banans bärförmåga som föranleds av standarden SFS-EN 15528+A1, som ratificerats i Finland. Enligt standarden ska huvudbanor klassificeras senast 2016 och övriga banor senast 2018.

**Antti Artukka: Estimating the remaining service life of concrete railway bridge.** Finnish Transport Agency, Infrastructure and Environment Department. Helsinki 2014. Research reports of the Finnish Transport Agency 28/2014. 152 pages and 13 appendices. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-255-471-0.

## Summary

The subject of this master's thesis is estimating the remaining service life of concrete railway bridges. The main focus in this master's thesis was estimating the service life of railway bridges with fatigue limit state and other limit states were left with less attention. The development of fatigue accumulation of the structure does not depend on time, but the amount of stress cycles and the cycle's intensity. As part of the work, a thorough traffic inventory was done on the Finnish rail network between the years 1900–2012, which consisted of the volume of the railway traffic on each track line and the Finnish railway rolling stock development. This was needed for the fatigue accumulation calculation. In addition, work was needed to pay attention to the speed of the rolling stock and railway track condition for dynamic impact assessment and consideration.

The aim of this study is to create a calculation model of concrete railway bridges to calculate fatigue accumulation and make assessments of remaining service life of bridges. A future service life due to fatigue accumulation has to be predicted. As a result, the work has drawn up rough railway traffic volume forecasts up to 2050. In addition, the development of the railway rolling stock caused by the accumulated fatigue growth is estimated.

The calculation model for creating and performing the fatigue accumulation calculations is based on the railway rolling stock at different time periods and a variety of bridge structures. The calculations are selected for both single span and multi-span bridge structures. The calculations used to produce equivalent damage factors as a function of a critical length of influence line. These factors are produced in different time periods and own factors for specific passenger trains and own factors for specific freight trains. Combining and scaling these a particular bridge design can be used to calculate the bridge specific equivalent damage factor. This describes the amount of accumulated fatigue, which can be used to evaluate the bridge remaining service life. Finally, the calculation model created here is compared with the models currently used in the calculation.

## Esipuhe

Tämä työ koostuu tutkimuksesta, jonka on tehnyt Antti Artukka diplomityönä Tampereen teknillisen yliopiston (TTY) Rakennustekniikan laitoksella, Rakennetekniikan yksikössä.

Diplomityön ohjausryhmään ovat kuuluneet professori Ralf Lindberg ja tohtori Anssi Laaksonen Tampereen teknillisestä yliopistosta, Ilkka Sinisalo, Janne Wuorenjuuri ja Risto Parkkila VR Track Oy:stä, Heikki Lilja ja Sami Noponen Liikennevirastosta. Lisäksi työssä ovat ohjanneet tai avustaneet Vilho Roos, Mikael Anttonen VR Track Oy:stä ja Jani Meriläinen Liikennevirastosta.

Helsingissä kesäkuussa 2014

Liikennevirasto  
Infra- ja ympäristöosasto



# Sisällysluettelo

TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT .....	10
1 JOHDANTO.....	13
1.1 Työn lähtökohdat .....	13
1.2 Työn rajaukset ja tavoite.....	14
1.3 Rautatiesillat ja niiden kantavuuden laskenta.....	14
1.3.1 Rautatiesillat.....	14
1.3.2 Rautatiesiltojen kantavuuden laskenta.....	19
2 RAUTATEIDEN KUORMAT .....	23
2.1 Suomen rataverkko .....	23
2.1.1 Useampiraiteiset rataosuudet .....	25
2.2 Kuormitushistoria rataosuksittain.....	26
2.2.1 Bruttotonniin tarkastelussa käytetyt rataosuudet .....	28
2.2.2 Vuodet 2000–2012.....	29
2.2.3 Vuodet 1975–1999 .....	31
2.2.4 Vuodet 1950–1974 .....	31
2.2.5 Vuodet 1900–1949.....	31
2.2.6 Useampiraiteiset rataosuudet .....	33
2.3 Rautatiekalusto .....	37
2.3.1 Suurimpien akselipainojen kehitys.....	39
2.3.2 Rautatiekaluston akselipainot ja mitat .....	41
2.3.3 Ominaisjunien nopeus ja ratojen kunnossapitotaso .....	63
2.3.4 Matkustaja- ja tavarajunien suhteellinen osuus bruttotonneista kunakin aikakautena.....	65
2.4 Kuormien kehittymisen ennustaminen rataosittain .....	66
2.4.1 Vanhan ohjeen bruttotonniennustusten tarkastelu .....	66
2.4.2 Julkaistut liikennemääräennusteet.....	67
2.4.3 Bruttotonniennustukset vuosille 2013–2050 .....	70
2.5 Dynaamiset vaikutukset.....	72
2.5.1 Dynaaminen suurennuskerroin: Uusien rautatiesiltojen eurokoodin mukainen mitoitus .....	73
2.5.2 Dynaaminen suurennuskerroin: SFS-EN 1991-2 liite C .....	74
2.5.3 Dynaaminen suurennuskerroin: SFS-EN 1991-2 liite D .....	76
2.5.4 Dynaaminen suurennuskerroin: Roosin tutkimus.....	78
2.6 Ratojen luokitus ja sn liittymisen kantavuuden laskentaan .....	79
2.6.1 Ratojen luokitteluun liittyvä tutkimus Suomen rataverkolle .....	80
2.6.2 Vanhojen rautatiesiltojen kuormakaavioiden vertaaminen standardiin EN 15528+A1.....	81
2.6.3 Standardin EN 15528+A1 vaatimukset ja suositukset .....	85
2.6.4 Väsymislaskennan liittymisen ratojen luokitteluun .....	86
3 VÄSYMINEN .....	88
3.1 Wöhler- eli S-N-käyrä .....	91
3.1.1 S – N-käyrät eurokoodin mukaan sekä betoniteräkselle että betonille	93
3.2 Rainflow-analyysi.....	95
3.3 Palmgren–Minerin kumulatiivinen vauriosääntö .....	99
3.4 Väsymismitoitus olemassa olevilla silloilla RSO:n mukaan .....	102
3.4.1 Malli 1 .....	102

3.4.2	Malli 2 .....	104
3.4.3	Malli 3 .....	105
4	EHDOTUS KÄYTETTÄVÄKSI VÄSYMISMITOITUSMENETELMÄKSI KANTAVUUSLASKENTAAN .....	107
4.1	Käytettävä kuormakaavio .....	107
4.2	Tutkittavat siltajänteet .....	108
4.2.1	1-aukkoiset siltajänteet .....	108
4.2.2	Useampiaukkoiset jatkuvat siltajänteet .....	109
4.2.3	Käytetyt tunnuksat laskentapisteistä .....	111
4.3	Laskennan kulku .....	112
4.4	Ominaisjunien akselipainojen korotus dynaamisella suurennuskertoimella ...	115
4.5	Ominaisjunan ylityksestä aiheutuva momenttihistoria .....	117
4.5.1	1-aukkoiset sillat .....	118
4.5.2	3-aukkoiset sillat .....	119
4.5.3	Ominaisjunien vaunujärjestyksen vaikutus momenttihistoriaan .....	122
4.6	Rainflow-analyysi momenttihistorialle .....	122
4.7	Yhtä yliajoo vastaavan momenttivaihteluvälin laskeminen .....	123
4.8	Vertailukuormakaavioiden, LM71 ja SW/O, aiheuttaman momenttivaihteluvälin määrittäminen .....	124
4.9	$\lambda$ -kertoimien muodostaminen .....	126
4.9.1	Yhden yliajokerran $\lambda$ -kertoimen muodostaminen .....	126
4.9.2	$\lambda$ -kertoimen skaalaaminen .....	126
4.10	$\lambda$ -kertoimet .....	128
4.10.1	1-aukkoiset sillat .....	128
4.10.2	3-aukkoiset sillat .....	134
4.11	Tulosten käyttö olemassa olevien siltojen väsymisvaurion ja jäljellä olevan käyttöään laskennassa .....	136
4.11.1	Mitoituksessa käytettävien $\lambda$ -taulukoiden laadinta .....	136
4.11.2	Siltakohtaisen $\lambda$ -kertoimen laskemisen kulku .....	137
4.11.3	Tulosten vertailu nykyään käytössä olevaan menetelmään .....	140
4.11.4	Siltojen luokittelu .....	144
4.11.5	Jäljellä olevan käyttöään laskenta .....	145
5	JOHTOPÄÄTÖKSET .....	146
5.1	Yhteenveto ja päätelmät .....	146
5.2	Jatkotutkimustarpeet .....	148
	LÄHTEET .....	149
	LIITTEET	
Liite 1	Kartta Suomen rataverkosta	
Liite 2	Liikennemäärä Suomen rataverkolla 1900–2012 bruttotonnein esitettyinä	
Liite 3	Eri veturimallien käyttövuodet	
Liite 4	Roosin tutkimuksen mukaiset ominaisjunat 1900–1999	
Liite 5	Tämän tutkimuksen mukaiset ominaisjunat 1900–2024	
Liite 6	Matkustaja- ja tavarajunien keskinäinen suhde bruttotonnein esitettyinä, kunakin aikajaksona	
Liite 7	Liikennemääräennusteet bruttotonnein esitettyinä	
Liite 8	Standardin SFS-EN 15528+A1 mukaiset kuormakaaviot	
Liite 9	Vanhat, siltojen mitoituksessa käytetyt kuormakaaviot	

- Liite 10 Tämän tutkimuksen mukaiset  $\lambda$ -kerroin tulokset ja vertailuarvot eurokoodista ja Rynäsen tutkimuksesta.
- Liite 11 Jatkuvien rakenteiden  $\lambda$ -kerroin tulokset esitettynä viiva kaavioiden avulla.
- Liite 12 Ehdotusmitoitusmenetelmän  $\lambda$ -kerrointaulukot.
- Liite 13 Eurokoodin  $\lambda$ -arvojen laskennassa käytetyt mitoitussijat



## Termit ja niiden määritelmät

1J-35M1975	Laskentapisteen tunnus. Ks. kappale 4.2.3.
AK	Alikäytävä, kevyen liikenteen väylän ylittävä rautatiesilta. Rautatieasema-alueella tästä sillasta käytetään myös nimitystä, asematunneli.
AKS	Alikulkusilta, tien ylittävä rautatiesilta.
Alikulkusilta	Ks. AKS.
Alikäytävä	Ks. AK.
Alusrakenne (rata)	Radan rakenneosa, johon koostuu välikerroksesta, eristyskerroksesta sekä mahdollisesta suodatinkerroksesta ja routalevyistä.
Alusrakenne (silta)	Sillan alusrakenteet välittävät sillan päällysrakenteelta tulevat kuormat maaperälle. Alusrakenteisiin kuuluu mm. paalut, maatuet ja välituet.
CEN	Eurooppalaisen stantarsointikomitea <i>European Committee for Standardization</i> (CEN). Yksityinen voittoa tavoittelematon järjestö, jonka päätehtävänä on edistää eurooppalaista standardisointia.
Ekvivalentti vauriokerroin	Kerroin, kuvaa todellisen liikenteen aiheuttaman väsymisvaurion suhdetta valitun vertailukuormakaavion (tai -kaavioiden) avulla laskettuun rasitusvaihteluväliin.
ICS-vaunu	IC2-junan kaksikerroksinen vaunusarja. Sisältää sarjattunnukset Ed, Edb, Edfs, Edo ja Eds.
Lambda-kerroin	Ks. Ekvivalentti vauriokerroin
Liikennepaikka	ks. rautatieliikennepaikka.
Liikenteen koostumus	Eurokoodin $\lambda$ -kertoimet ovat laskettu tietyllä liikenteen koostumukselle. Liikenteen koostumus sisältää junatyypit ja niiden suhteelliset osuudet kokonaisliikennemäärästä.
LM71	Euroopassa vuonna 1971 otettu käyttöön kuormakaavio, jota käytetään rautatiesiltojen mitoittamiseen. Suomessa LM71 on otettu käyttöön eurokoodin myötä, 2000-luvulla. Kuormakaaviolla kuvataan pääratojen normaaleja raideliikenteen aiheuttaman pystykuormituksen staattisia vaikutuksia.

Ominaisjuna	Koko junaa esittävä kuormakaavio, jolla pyritään kuvaamaan junaliikenteen keskimääräisiä vaikutuksia. Työssä on muodostettu ominaisjunia eri aikajaksoille.
Pengerleveys	Radan alusrakenteen ylimmän kerroksen (välikerros) yläpinnan leveys.
Puskin etäisyys	Rautatiekalustoyksikön, veturin tai vaunun, kulkusuunnan suuntainen mitta puskimesta lähimmälle akselille. Puskin etäisyys löytyy yksikön molemmista päistä ja mitat voivat olla erilaiset.
Päällysrakenne (rata)	Radan rakenneosaa, johon kuuluu raide ja tukikerros.
Päällysrakenne (silta)	Sillan päällysrakenne siirtää kuormat sillan alusrakenteelle. Sillan päällysrakenteeseen kuuluu kannatinrakenteet, kansirakenteet, pintarakenteet ja varusteet ja laitteet.
Rainflow-analyysi	Yksi menetelmä käsitellä muuttuva-amplitudinen jännityshistoria yksittäisiksi jännitysvaihteluiksi.
Rataosa	Rataosa on ennalta määrätty rautatieverkon hallintaan liittyvä rataosuus. Suomen rataverkko koostuu hieman yli sadasta rataosasta. Rataosilla on tunnus, joka koostuu kolmesta numerosta ja mahdollisesta kirjaimesta.
Rataosuus	Tarkoittaa kahden pisteen välistä rautatieosuutta. Rataosuus on rataosaa vapaampi käsite ja lähtö- ja tulo-piste on vapaammin valittavissa. Rataosuuden määrittämisessä voidaan käyttää liikennepaikkoja tai kilometrijärjestelmää.
Ratasilta	Ks. RS.
RATO 3	Ratatekniset ohjeet, osa 3 eli RATO 3. Osassa 3, radan rakenne, esitetään radan alus- ja pohjarakenteiden rakenneosat ja niiden suunnittelu- ja mitoitusperusteet.
Rautatieliikennepaikka	Rautatieliikennepaikalla tarkoitetaan matkustaja- tai tavaraliikenteen palvelupaikkaa. Lisäksi osa rautatieliikennepaikoista on vain liikenteenohjaukseen perustuvia paikkoja.
Rautatieristeysilta	Ks. RRS.
Rautatiesilta	Yleisnimitys sillalle, jonka ylittää raideliikenne.
RRS	Rautatieristeysilta, rautatien ylittävä rautatiesilta.
RS	Ratasilta, vesistön tai muun maastoesteen ylittämä raideliikenteen silta.

RSO	Rautatiesiltojen suunnitteluohje. Rautatiesiltojen suunnitteluohjeet koostuvat yhdeksästä osasta, josta osa yhdeksän käsittelee rautatiesiltojen kantavuuden laskentaa. Tämä on myös ainut osa, joka on tällä hetkellä käytössä.
Sekajuna	Juna joka koostuu yhdistetyistä tavara- ja matkustajavaunuista. Nykyään harvinainen.
Sininen vaunukalusto	VR:n siniharmaat pikajunavaunut, joita käytetään edelleen matkustajaliikenteessä. Kaikki siniset vaunut on tarkoitus korvata uudemmilla 2020 mennessä. Kalusto sisältää useampia sarjatunnukseltaan erilaisia vaunuja, yleisimpiä ovat Ein, Eit, EFit ja CEmt.
SW/o	Eurokoodin kuormakaavio, jolla kuvataan pääratojen normaaleja raideliikenteen aiheuttaman pystykuormituksen staattisia vaikutuksia jatkuvilla siltarakenteilla.
T2000	Tunnuksella tarkoitetaan aikajakson 2000–2024 ominaistavarajunaa. Vastaavasti voidaan muodostaa kaikille ominaisjunille. Kun kyseessä on ominaismatkustajajuna, käytetään tunnuksessa kirjainta M.
Tukikerros	Raidesepelistä tai -sorasta muodostuva, yleensä 500 mm paksu, kerros kiskojen ja radan alusrakenteen välissä. Tukikerros pitää raiteen geometrisesti oikeassa asemassa ja asennossa, jakaa kuormia alusrakenteelle ja muodostaa raiteelle tasaisen ja kantavan alustan. Tukikerros jatkuu yleensä yhtenäisenä yli sillan. Tällöin puhutaan tukikerroksellisista silloista.
Vaihtotyö	Käsite, jolla tarkoitetaan ratapihoilla tapahtuvaa veturin (usein vaihtoveturin) kanssa tehtävää junan vaunun järjestelytyötä ja junien kokoamistyötä.
Vaihtoveturi	Vaihtotyöhön suunniteltu veturi. Vaihtoveturille on tyypillistä hitaampi huippunopeus ja suurempi veto-voima.
Vertailuliikennemäärä	Massamääräinen liikennemäärä, johon $\lambda$ -kertoimet skaalataan, jolloin $\lambda$ -kertoimista saadaan väsymisrasituksen suhteen vertailukelpoisia.
Yliraskas kalusto	Kalusto, jonka akselipainot ylittävät liikennöitävän rataosuuden suurimman sallitun akselipainorajan. Yliraskas kalusto saa liikennöidä Suomessa tietyillä rataosuuksilla erikoisluvalla.
$\lambda$ -kerroin	Ks. Ekvivalentti vauriokerroin.



# 1 Johdanto

## 1.1 Työn lähtökohdat

Diplomityö liittyy Liikenneviraston siltojen kantavuuslaskentaohjeen päivitykseen. Kantavuuslaskentaohjeen päivittämistyön päävastuu on suunnittelutoimisto Sil-tanylund Oy:llä. Nykyään siltojen kantavuuslaskennassa käytetään Tielaitoksen vuo-den 1992 lopussa ilmestynyttä Siltojen kantavuuden laskentaohjetta, TIEL 2170005 ja Ratahallintokeskuksen vuoden 1997 alussa ilmestynyttä Rautatiesiltojen suunnitte-luohjetta (RSO). Tielaitoksen Siltojen kantavuuden laskentaohje on jo 20 vuotta van-ha. Siirtyminen eurokoodiin, laskentaperiaatteiden yhteistäminen ja tarve koota maantie- ja rautatiesiltojen kantavuuden laskenta-asiat samaan ohjeeseen ovat luo-neet tarpeen päivittää kantavuuslaskentaohjetta.

Siltojen kantavuuslaskennalla on suuri merkitys taloudellisessa mielessä, kun pohdi-taan sillan korvausinvestointia. Sillan kantavuuslaskennalla pyritään selvittämään sillan jäljellä oleva käyttöikä, jossa erityisesti rautatiesilloilla väsymislaskenta on merkittävässä asemassa. Väsymislaskenta perustuu tunnettuun tai varmalle puolelle arvioituun kuormitushistoriaan. Täten tarkemmalla kuormien tuntemisella voidaan korjata normien mahdollista konservatiivista arviota kuormitushistoriasta. Kanta-vuuslaskennalla, laskelmien niin näyttäessä, voidaan osoittaa, että sillalla on riittä-västi käyttöikää jäljellä ja sillan uusimista voidaan siirtää. Tällöin investoinnit voi-daan kohdistaan niihin kohteisiin, joissa korjaus- ja uusimistoimenpiteet ovat kiireel-lisempiä.

Väsymislaskennan tarve on kasvanut sekä siltamäärien osalta että tarkemman tarkas-telun osalta. Siltojen rakentaminen Suomessa on vähentynyt kahtena viime vuosi-kymmenenä ja sen vuoksi siltojen keski-ikä on noussut. Vanhempi siltakanta on luo-nut kasvavaa tarvetta kantavuuslaskennalle. Väsymislaskentaa on alettu tehdä rauta-tiesilloille aikaisintaan 1970–80-luvun taitteessa [Sinisalo, 2013]. Tämän vuoksi rata-verkolla on runsaasti kokonaan väsymismitoittamattomia rautatiesiltoja. Taloudellin-en niukkuus on taas luonut tarpeen tarkemmalle laskennalle.

Suomessa kantavuuslaskentaa tekevät useat yritykset. Kantavuuslaskentaohjeen päivittämisellä tavoitellaan myös yhdenmukaisia ja vertailukelpoisia kantavuuslas-kentatuloksia. Kantavuuslaskentaa voidaan tehdä monella eri tarkkuustasolla ja tässä kohtaa tarvitaan ohjeistusta. Tarkkuustasojen merkitys on rationalisoida laskentaa siten, että saadaan haarukoitua suuresta siltamäärästä asteittain nopeasti pois aluksi helppoilla mutta varmoilla laskentaperiaatteilla suurin osa pois, minkä jälkeen siirytään asteittain tarkempiin ja vähemmän varmoihin laskentaperiaatteisiin. Näin voi-daan pienentää laskentatyön työmäärää selvissä tapauksissa.

Ratahallintokeskuksen julkaisemassa Rautatiesiltojen suunnitteluohjeessa (osassa yhdeksän, liitteessä yksi) on esitetty nykyiset laskentamenetelmät rautatiesiltojen jäljellä olevan käyttöiän laskemiseksi. Ohjeessa laskentamenetelmät on jaettu kol-meen tarkkuustasoon. Ohjeen tarkimmassa laskentamenetelmässä, mallissa kolme, tapahtunut kuormitushistoria esitetään bruttotonnein ainoastaan seitsemälle rata-osalle ja bruttotonnit on koottu 25 vuoden jaksoihin.

## 1.2 Työn rajaukset ja tavoite

Uusi kantavuuslaskentaohje tulee pitämään sisällä sekä tiesillat että rautatiesillat. Diplomityö rajataan koskemaan rautatiesiltojen kantavuuslaskennassa tehtävän väsymislaskennan tutkimiseen. Rautatiesiltojen kantavuuden laskentaan kuuluu väsymistarkasteluiden lisäksi myös muita rajatilatarkasteluja, kuten murto- ja käyttörajatilatarkasteluja. Nämä tarkastelut jäävät tämän tutkimuksen ulkopuolelle. Lisäksi työ koskee ainoastaan tavanomaisia, teräsbetonirakenteisia, tukikerroksellisia rautatiesilloja. Tämä rajaus tehdään, koska esimerkiksi terässilloilla kantavuuslaskennassa joudutaan usein keskittymään yksityiskohtien kestävyys, kuten ennen paljon käytettyjen teräsnittiiliitosten tutkimiseen. Työssä pääpaino on teräsbetonin väsyminen taivutusrasituksen alaisena. Yksityiskohtaisempi väsyminen, kuten leikkausrasituksen alainen tai läpileikkautumisen yhteydessä tapahtuva väsyminen jää vähäiselle huomiolle.

Diplomityön tavoitteena on tarkentaa Rautatiesiltojen suunnitteluohjeen, osan yhdeksän väsymismitoituksen tarkimpia laskentamenetelmiä. Rautatiesiltojen kuormitushistoria on selvillä tarkemmin mitä Rautatiesiltojen suunnitteluohjeessa esitetään. Rautatieliikennekuormia on tilastoitu julkaisuissa Rautatietilasto, joka on julkaistu ensimmäisen kerran vuonna 1871. Tässä työssä kuormitushistoria pyritään selvittämään aikaisempaa tarkemmin vuodesta 1900 lähtien. Tämä rajaus tehdään koska 1800-luvun rautatiesilloja on hyvin vähän jäljellä ja näin vanhat rautatiesillat ovat yleensä kivi- tai teräsrakenteisia. Tavoitteena on koota rautatiekuormitustieto rataosittain laajemmin hyödynnettäväksi rautatiesiltojen kantavuuslaskennassa. Tällä hetkellä Rautatiesiltojen suunnitteluohje esittää kuormitushistorian vain seitsemän rataosan osalta. Vanhojen kuormien koonnin ja analysoinnin lisäksi tavoitteena on selvittää tulevaisuudessa syntyvät liikennekuormat. Tässä on tarkoitus hyödyntää Liikenneviraston tekemiä liikennemäärien kasvuennustuksia.

Pääradat on luokiteltava vuonna 2016 ja muut radat vuonna 2018 standardissa SFS-EN 15528 esitettyihin luokkiin. Jotta luokitus voidaan tehdä, on siltojen kantavuus todistettava laskennallisesti. Diplomityön tavoitteena on tarkastella millä tavoin ratojen luokitusasiat saadaan huomioitua kantavuuslaskennassa.

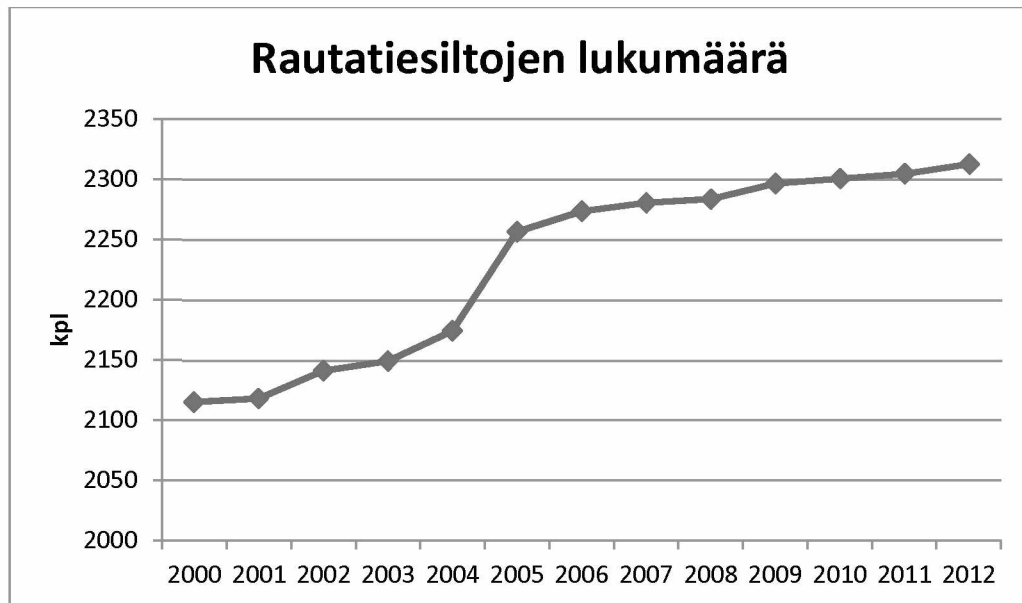
## 1.3 Rautatiesillat ja niiden kantavuuden laskenta

### 1.3.1 Rautatiesillat

Suomen rataverkolla oli vuoden 2012 lopussa 2 313 rautatiesiltaa [Wuorenjuuri. Rautatiesiltojen hallintaraportti, 2012]. Nykyään suurinta osaa rautatiesilloista hallinnoi Liikennevirasto, joka muodostettiin yhdistämällä Ratahallintokeskus, Merenkulkulaitos ja Tiehallinto vuoden 2010 alussa.

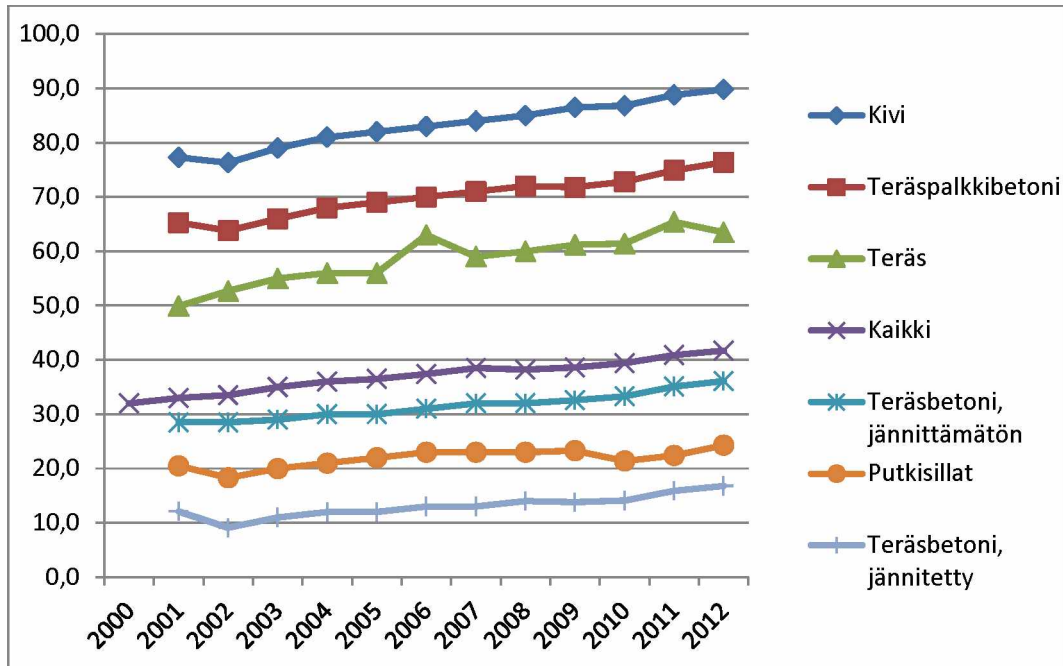
Rautatiesiltojen lukumäärä, vuosina 2000 – 2012, on esitetty kuvassa 1.1. Lukumäärä kasvaa edelleen vaikka uutta rataa ei juurikaan enää rakenneta. Rautatiesiltojen määrän kasvu selittyy pääosin tasoristeyskien poistamisilla. Tasoristeysten määrä on laskenut tasaisesti 1970-luvun puolesta välistä lähtien noin 7 500:sta noin 3 000 ta-

soristeykseen. Vuosina 2004 ja 2005 näkyvä jyrkempi rautatiesiltamäärän kasvu johtuu Kerava–Lahti oikoradan rakentamisesta. [Suomen rautatietilasto, 2012.]



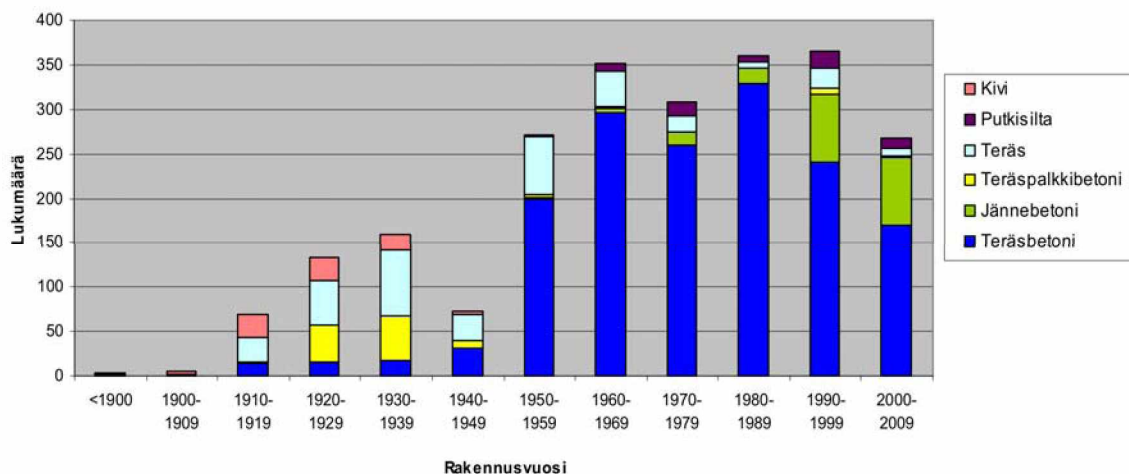
Kuva 1.1. Rautatiesiltojen lukumäärä. Lähde: Rautatiesiltojen hallintaraportit 2000–2012, Wuorenjuuri, Janne.

Rautatiesiltojen keski-ikä oli vuoden 2012 lopussa 41,7 vuotta. Keski-ikä on noussut koko 2000-luvun ajan. Kuvassa 1.2 on esitetty rautatiesiltojen keski-ian nousu sekä kaikkien rautatiesiltojen osalta että rakennusmateriaalein jaoteltuna. Kaikkien rautatiesiltojen keski-ikä on noussut 2000-luvulla keskimäärin 0,75 vuotta per vuosi. [Wuorenjuuri. Rautatiesiltojen hallintaraportit vuosilta 2000–2012.] Kun katsotaan keski-ian kehittymistä rakennusmateriaaleittain huomataan, että vanhimmat rautatiesillat ovat kivi-, teräspalkkibetoni- tai teräsrakenteisia. Näistä rakennusmateriaaleista rakennetut rautatiesillat ja putkisillat kuuluvat tämän työn rajausten ulkopuolelle. Tässä työssä keskitytään teräsbetonirakenteisiin rautatiesiltoihin. Teräsbetonisten rautatiesiltojen keski-ikä on 36,1 vuotta [Wuorenjuuri. Rautatiesiltojen hallintaraportti, 2012 s.9].



Kuva 1.2. Rautatiesiltojen keski-ään kasvu 2000-luvulla. Kuvassa tumman sini-  
sellä on esitetty kaikkien rautatiesiltojen keski-ään kasvu.

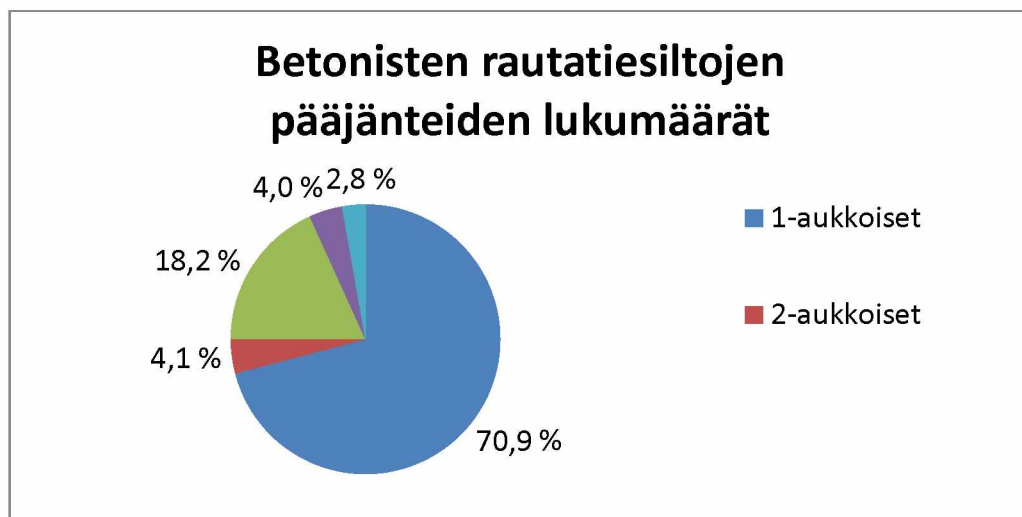
Teräsbetonisten rautatiesiltojen osuus kaikista rautatiesiltarekisterissä olevista silloista on 66,4 % ja jännebetonisten 8,8 %. Teräsbetonin käyttö rautatiesiltojen rakennusmateriaalina yleistyi 1950-luvulla, josta lähtien se on ollut vallitseva rautatiesiltojen rakennusmateriaali. Tätä ennen kivi ja teräs ovat olleet yleisimpiä rakennusmateriaaleja. Jännebetonia on alettiin käyttää 1960-luvulta lähtien rautatiesilloissa. Jännebetonin yleistymisen ei ole tapahtunut yhtä nopeasti mitä teräsbetonin yleistymisen tapahtui. [Wuorenjuuri. Rautatiesiltojen hallintaraportti, 2009 s.10]



Kuva 1.3. Rautatiesiltojen rakennusmateriaalien käyttö eri vuosikymmeninä.  
Lähde: Rautatiesiltojen hallintaraportti 2009.

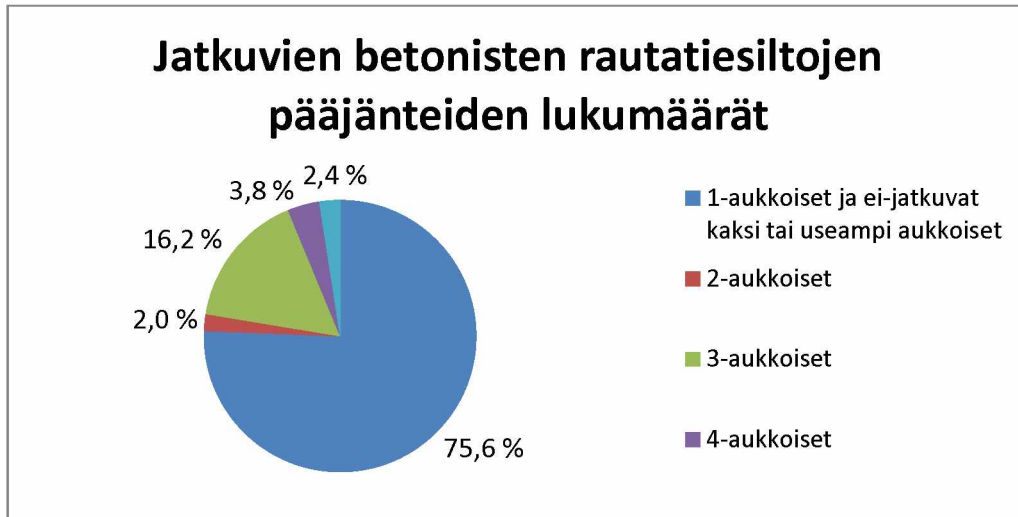
Kantavuuslaskennan väsymistarkasteluissa jännitysvaihteluiden lukumäärällä on suuri vaikutus sillan väsymisrasitukseen. Tämän takia sillan jännepituudella on merkittävä vaikutus sillan jäljellä olevan käyttöiän arviointiin. Lyhyillä jännepituuksilla jokainen junan teli tai akseli aiheuttaa oman jännitysvaihtelun, kun taas pidemmillä jännepituuksilla näin ei pääse tapahtumaan ja jännitysvaihteluita on vähemmän. Rautatiesiltojen pääjanteen keskipituus on 12,2 metriä. Rautatiesillat ovat pääsääntöisesti tiesilloja lyhyempiä. Pisimmät rautatiesillat ovat yleensä vanhoja terässilloja. Terässiltojen pääjanteen keskipituus on 26,1 m. Tässä työssä tarkasteltavien teräsbetonisiltojen pääjanteen keskipituus on 9,8 metriä. [Wuorenjuuri. Rautatiesiltojen halintaraportti, 2012 s.10]

Työn aihepiiriin kuuluvia siltoja on noin 1 800. Nämä sisältävät betoniset rautatiesillat, joissa ylittävä liikenne on raideliikennettä. Tähän kuuluu alikulkusillat (AKS), alikäytävät (AK), rautasillat (RS) ja rautatieristeyssillat (RRS). Sillan jännepituuden lisäksi väsymiseen vaikuttaa sillan jänteiden lukumäärä, sillan jatkuvuus, jännepituuksien suhteet ja mahdolliset ulokkeet siltojen päissä. Pääosa työn aihepiirin rautatiesilloista on 1-aukkoisia, noin 71 %. Toiseksi yleisempiä ovat 3-aukkoiset rautatiesillat, noin 18 %. Muut jänneyhdistelmät ovat harvinaisia. Nämä ovat esitetty kuvassa 1.4.



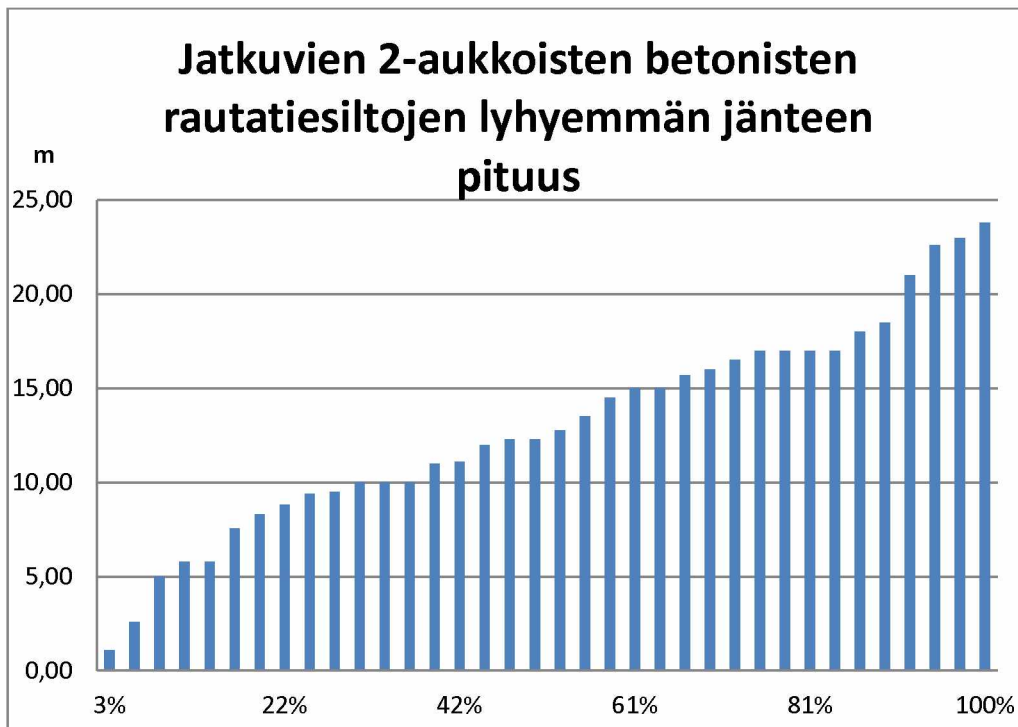
Kuva 1.4. Työn aihepiirin rautatiesillat jaoteltuna sillan jänteiden lukumäärän mukaan.

Kuvassa 1.5 on kaksi- tai useampiaukkoisista silloista poimittu ei-jatkuvat sillat 1-aukkoisten siltojen joukkoon. Useampiaukkoisissa, ei-jatkuvissa silloissa yhdessä aukossa oleva kuorma ei vaikuta viereisten aukkojen rasitukseen. Tässä mielessä moniaukkoiset ei-jatkuvat sillat ovat verrattavissa 1-aukkoisiin siltoihin.



Kuva 1.5. Työn aihepiiriin rautatiesillat jaoteltuna sillan jatkuvuuden ja jätteiden lukumäärän mukaan. Vrt. kuvaan 1.4, jossa useampiaukkoisten siltojen määrät ovat suurempia. Tämä johtuu siitä, että osa useampiaukkoisista rautatiesilloista ei ole jatkuvia.

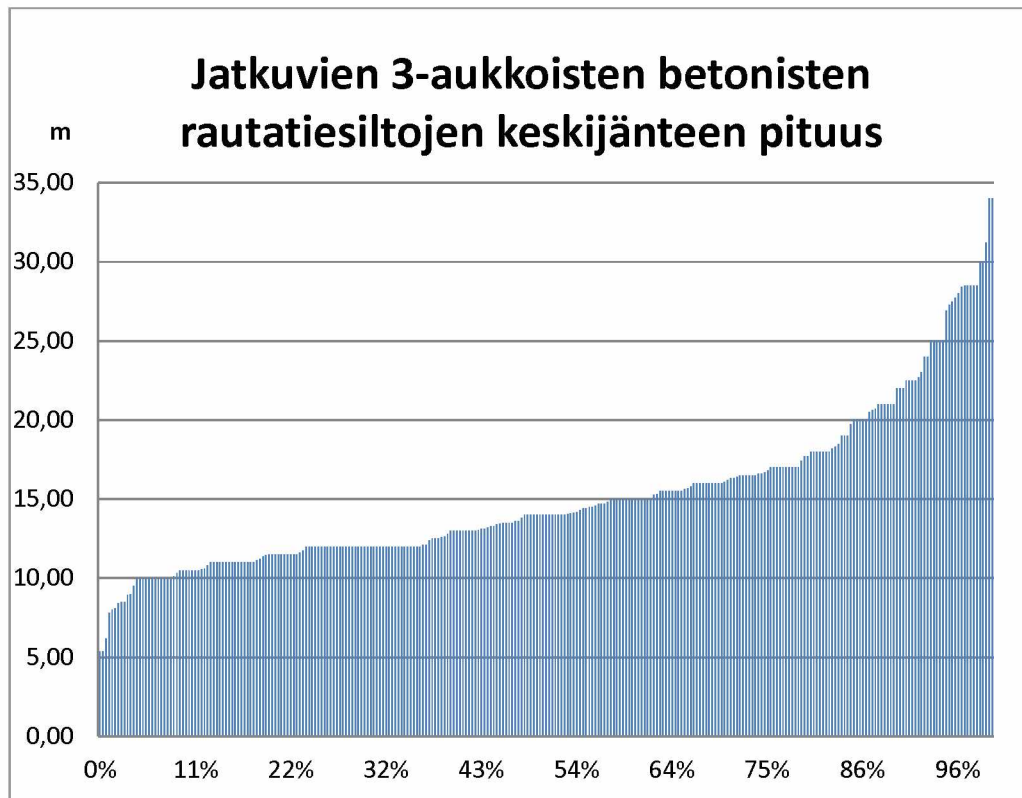
Kuvat 1.4 ja 1.5 ovat muodostettu laskemalla kaksi tai useampiaukkoiset työn aihepiiriin kuuluvat rautatiesillat, ja 1-aukkoisten rautatiesiltojen lukumäärä on saatu vähentämällä kokonaismäärästä kaksi tai useampia aukkoisten yhteenlaskettu lukumäärä. Kaksi- tai useampiaukkoisten siltojen lukumäärät ovat laskettu käsin rautatiesilta rekisteristä rekisterijärjestelmän vuoksi. Rekisterissä jännemitat ovat esitettyinä yhdessä tietokentässä plusmerkein eroteltuna. Tämän ja suuren aineistomäärän vuoksi kuvissa 1.4–1.7 saattaa olla pientä epätarkkuutta.



Kuva 1.6. Työn aihepiiriin 2-aukkoisten jatkuvien rautatiesiltojen lyhyemmän jätteen pituus.



Työn aihepiiriin kuuluvia jatkuvia 2-aukkoisia rautatiesiltoja on hieman yli 35 siltaa. Näitä rakennetaan yhä, uusimmat rekisterissä olevat ovat vuodelta 2012. Tarkasteltaessa muiden samaan kategoriaan kuuluvien siltojen rakennusvuosia, voidaan todeta, etteivät tämäntyyppiset sillat ole olleet ennen yleisempiä kuin nyt. Jatkuvien 2-aukkoisten betonisten rautatiesiltojen jänteiden keskipituus on 13,33 m. Suurimmalla osalla jatkuvien 2-aukkoisten siltojen jänteet ovat samanpituisia tai lähes samanpituisia, mutta joukossa on kuusi siltaa, joissa pidemmän jänteen suhde lyhyempää on 1,25 ja 2,10 välillä. Kuvaan 1.6 on koottu jatkuvien 2-aukkoiset rautatiesillat lyhyemmän jännemitan perusteella.



Kuva 1.7. Työn aihepiiriin jatkuvien 3-aukkoisten rautatiesiltojen keskijänteiden pituudet.

Työn aihepiiriin kuuluvia jatkuvia 3-aukkoisia rautatiesiltoja on hieman yli 290 siltaa. Siltatyyppejä on yleinen 1-aukkoisten siltojen rinnalla. Kuvassa 1.7 on esitetty työn aihepiiriin kuuluvat jatkuvat 3-aukkoiset betoniset rautatiesillat keskimäisen jännemitan perusteella. Lyhyin keskijänne on 5,32 m ja pisin 34,0 m. Näiden siltojen keskimäisen jännemitan keskiarvo on 15,13 m. Reunajänteiden pituudet ovat tyypillisesti samat tai lähes samat. Joukossa on kymmenkunta siltaa, joiden reunajänteiden mitat poikkeavat enemmän, pidemmän jänteen suhde lyhyempään on yli 1,25. Jatkuvien 3-aukkoisten rautatiesiltojen keskijänteen pituuden suhde lyhyemmän reunajänteen pituuteen on 65 %:ssa silloista 1,15 ja 1,35 välillä, 29 %:ssa yli 1,35 ja 6 %:ssa alle 1,15.

### 1.3.2 Rautatiesiltojen kantavuuden laskenta

Nykyään siltojen kantavuuslaskennassa käytetään Tielaitoksen vuoden 1992 lopussa ilmestynyttä Siltojen kantavuuden laskentaohjetta, TIEL 2170005 ja Ratahallintokeskuksen vuoden 1997 alussa ilmestynyttä Rautatiesiltojen suunnitteluohjetta (myöhemmin käytetään lyhennettä RSO). Tielaitoksen kantavuuden laskentaohje perustuu

vuodelta 1978 olevaan muistioon, jossa on esitetty teräsbetonisiltojen laskennassa käytettävistä laskentaperusteita [Siltojen kantavuuden laskentaohje, 1992]. Rautatiesiltojen suunnitteluohjeet on ensimmäinen ohje rautatiesiltojen kantavuuden laskentaan. Tästä voidaan päätellä, että 1990-luvulla rautatiesiltojen kantavuuden laskennalle on ollut kasvavaa tarvetta. RSO:n osa yhdeksän perustuu Tielaitoksen, Siltojen kantavuudenlaskenta ohjeeseen ja RSO:ssa mainitaankin, että Tielaitoksen ohjeet ovat voimassa ellei RSO:ssa ole muuta mainittu. Rautatiesiltojen suunnitteluohjeet koostuvat yhdeksästä osasta, josta osa yhdeksän käsittelee rautatiesiltojen kantavuuden laskentaa. Tämä on myös ainoa osa, joka on tällä hetkellä käytössä [Liikenneviraston internetsivut, 2013]. Uusi, päivitettävä kantavuuden laskentaohje tulee korvaamaan RSO:n osan yhdeksän, jonka jälkeen koko RSO muuttuu vanhaksi.

Kantavuuslaskennalla selvitetään sillan käytettävyys nykyiselle ja tulevalle liikenteelle. Kantavuuslaskenta sisältää murto-, käyttö- ja väsymisrajatilojen tutkimisen. Ellei akselipainoja ole nostettu, usein murtorajatilan täyttyminen pystytään osoittamaan kantavuuslaskennassa vaivattomasti. Kaikilla käyttörajatiloilla ei ole selviä raja-arvoja nykyisessä ohjeessa. RSO 9:n viittaa käyttörajatilojen kohdalla Tielaitoksen, Siltojen kantavuuden laskentaohjeeseen, jossa betonirakenteisten siltojen halkeama-levyysille on asetettu raja-arvot, mutta taipumille ei. Taipumasta todetaan, ettei sille aseteta tavallisesti raja-arvoa ja taipuman perusteella kuormia rajoitetaan ainoastaan siinä tapauksessa, että taipumasta on haittaa sillan toiminnalle. Eurokoodissa, uusien siltojen suunnittelussa, taipumarajat esitetään liikenneturvallisuuskriteerein ja mukavuuskriteerein. Liikenneturvallisuuskriteerin mukainen taipumaraja on  $L/600$ . Käyttörajatilat rajattiin tämän työn ulkopuolelle, joten kantavuuslaskennassa käytettävän taipumaraja vaatii lisäselvityksiä. Enimmäisarvona voidaan kuitenkin pitää eurokoodin liikenneturvallisuuskriteerin mukaista rajaa. [Siltojen kantavuuden laskentaohje, 1992] [Eurokoodi SFS-EN 1990-1-1 +A1+AC A2.4.4.2–A2.4.4.3.]

Vanhan rautatiesillan kantavuuden laskenta eroaa kuitenkin monessa asiassa uuden sillan suunnittelusta. Laskennoissa eri tekijöiden epävarmuus on erilainen. Olemassa olevasta sillasta pystytään määrittämään tarkat, todelliset poikkileikkaukset ja jännevälit. Täten olemassa olevan sillan omapaino pystytään selvittämään mittauksin ja näiden osavarmuuslukua voidaan pienentää. Lisäksi olemassa olevasta sillasta voidaan määrittää materiaalien lujuus koekappaleiden avulla. Toisaalta vanhoissa silloissa vaurioituminen on saattanut heikentää sillan kantavuutta [Helin, R. 2011, s.18]. Kantavuuslaskennassa käytettävät materiaaliominaisuudet määritetään alkuperäisten suunnitelmien, mahdollisen vaurioitumisen ja mahdollisesti tehtyjen koekappaleiden perusteella. Usein ensimmäisen karkeustason kantavuuslaskelmat tehdään ilman mittauksia vanhojen suunnitelmapiirustusten avulla.

Kantavuuslaskennassa ei käytetä uusien siltojen suunnittelukuormia. Olemassa olevien siltojen kuormakaavioiksi tulee valita sellaiset kuormakaaviot, jotka kuvaavat hyvin todellisen liikenteen aiheuttamia rasituksia. Lisäksi kuormakaavion valinnassa on huomioitava tuleva liikenne sillan jäljellä olevan käyttöiän ajalta. Tulevan liikenteen laadussa ja määrässä joudutaan arvioimaan mm. rataosien akselinpainonostot tulevaisuudessa. Näillä on suuri vaikutus jäljellä olevaan käyttöikään. Tämän vuoksi kantavuuslaskennassa on syytä selvittää mahdollisten akselipainonostojen todennäköisyys. Sen lisäksi, että niillä on suuri vaikutus murto- ja käyttörajatilamitoituksiin, on niillä suuri vaikutus väsymislaskentaan. Luvussa kolme on esitelty sekä uuden sillan väsymislaskentaa että nykyistä olemassa olevien siltojen kantavuuslaskennassa käytettäviä väsymislaskentamenetelmiä.

Liikennevirasto hallinnoi nykyään Suomen liikennejärjestelmiä. Tähän kuuluu tienpito, radanpito ja vesiväylienpito. Uusia ratoja ei juurikaan enää rakenneta, joten radanpidon puolella pääpaino on olemassa olevan rataverkon kehittämisellä ja kunnan ylläpidolla. Rautatiesillat ovat yksi osa-alue rataverkon ylläpidossa. Eräs rautatiejärjestelmän erityispiirre on se, että ylläpitotoimenpiteitä tehtäessä, rataverkkoa on katsottava laajemmin kuin vain yhden sillan kannalta. Suomen Rataverkko on edelleen pääosin yksiraiteista ja yksittäiset viat voivat aiheuttaa rajoitteita koko rataosalle tai rataosuudelle. Kehitettäessä rataa puhutaan tasonnostotoimenpiteistä. Tasonnostotoimenpiteet pitävät sisällä niin radan geoteknisiä tarkasteluja, päällysrakenteen korjaustoimenpiteitä, radan turvalaitepäivityksiä ja siltojen kantavuustarkasteluja. Tällä hetkellä suurin käynnissä oleva tasonnostohanke on rataosan Seinäjoki – Oulu palvelutason parantaminen. Tasonnoston tarkoituksena on parantaa liikenteen tehokkuutta, sujuvuutta ja turvallisuutta. Tehokkuutta voidaan parantaa mm. akselipainoja nostamalla. Akselipainojen nosto aiheuttaa rataosan silloille tarpeen kantavuustarkasteluille. Tällöin kantavuustarkasteluissa tulee keskittyä myös murto- tai käyttörajatiloihin, jotka voivat olla mitoitettavia. Kantavuustarkasteluja tehdään tasonnostoissa myös silloin kun akselipainoja ei nosteta. Tällöin usein murto- ja käyttörajatiloilla ei ole ongelmaa, vaan mielenkiinto kohdistuu väsymisrajatilaan ja sillan jäljellä olevaan käyttöikään. Jäljellä oleva käyttöikä kiinnostaa myös rataosilla, joissa akselipainoja nostetaan. Raskaampi kuormitus tarkoittaa lyhyempää käyttöikää. Tasonnostotoimenpiteet ovat isoja hankkeita ja tilaaja odottaa, että toimenpiteiden jälkeen uusia toimenpiteitä ei tarvitse heti tehdä lisää. Tämän vuoksi, vaikka kantavuuslaskennan tuloksena sillalla olisi vielä jäljellä muutamia vuosia käyttöikää, niin muiden töiden yhteydessä silta on tarkoituksenmukaista uusia.

Rautatiesiltojen kantavuuslaskentoja tehdään tasonnostojen yhteydessä. Lisäksi on muita tilanteita, jolloin kantavuuslaskentaa tehdään. Tällaisia syitä ovat:

- Sillan vaurioituminen
- Raiteen sijainnin muuttuminen sillan suhteen
- Raiteen geometrian muuttuminen sillalla
- Vanhempien siltojen johdonmukainen kantavuustarkastelu

Rautatiesilloille tehdään säännönmukaista tarkastustoimintaa. Sillat tarkastetaan vuosittain, mitä kutsutaan vuositarkastukseksi. Lisäksi kaikille rautatiesilloille tehdään yleistarkastus seitsemän vuoden välein. Yleistarkastus on vuositarkastusta tarkempi, mutta sekin perustuu pääasiassa näköhavaintoihin. Vuosi- ja yleistarkastuksissa havaittujen vaurioiden perusteella silta voidaan ohjata kantavuuslaskettavaksi tai erikoistarkastukseen. Erikoistarkastus voi sisältää myös kantavuuslaskentaa, jolla selvitetään esimerkiksi rasiitetuimmat kohdat sillasta. Tällöin erikoistarkastukset osataan kohdentaa oikein.

Raiteen sijainnin tai geometrian muuttuminen sillan kohdalla yleensä aiheuttaa uusin rasiitusten syntymistä tai vanhojen voimien jakautumista uudelleen. Raiteen kaarresäteen pienentyminen lisää esimerkiksi sillan kohdistuvan keskipakovoiman suuruutta ja raiteen sijainnin muuttuminen sillan suhteen, muuttaa sillan paalukuormien jakautumista. Keskipakovoiman suuruuden muuttuminen ei yleensä aiheuta merkittäviä lisärasituksia mutta paalukuormien jakautuminen uudelleen raiteen sijainnin muuttumisen vuoksi, on usein merkittävää jo pienillä siirtomatkoilla. Raiteen sijainnin muuttuminen voi muuttaa sillan rakennejärjestelmästä riippuen myös sillan päällysrakenteen rasiituksia. Muutosten vaikutukset on selvitettävä kantavuuslaskennalla. Nykyään Liikenneviraston ohjeissa ohjeistetaan mitoituksessa huomioimaan raiteen

toleranssi sillalla, 120 mm:ä ja kuormakaavion epäkeskeisyys raiteen keskiviivaan, 88 mm [Liikenneviraston ohjeita 20/2011, s.23–24]. Lähes samankaltaiset vaatimukset ovat vanhassa ohjeessa, RSO:ssa. Täten pienissä raiteen sijainnin muutoksissa kantavuuslaskentaa ei aina tarvitse tehdä.

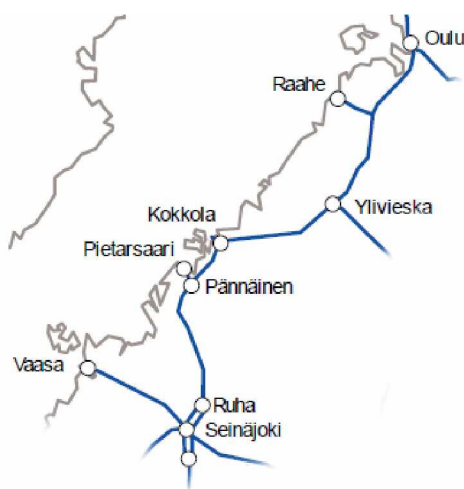
Rataverkon vanhimpien rautatiesiltojen kantavuustarkastelu joudutaan toisinaan suorittamaan erikseen. Näin käy kun vanha, olemassa oleva silta sijaitsevat hiljaisemmilla rataosilla, joille ei ole tehty tasonnostotoimenpiteitä. Mikäli akselipainonottoja ei ole tehty, mielenkiinto kohdistuu väsymislaskentaan. Syy kantavuuslaskennalle voi olla myös tavallisuudesta poikkeava rakennetyyppi, josta johtuva epävarmuus pyritään poistamaan kantavuuslaskennalla. Tähän liittyvää tutkimustyötä on tehty Tampereen teknillisellä yliopistolla Liikenneviraston rahoittamassa ”Elinkaaritehokas rata” tutkimusohjelmassa. Tutkimusohjelman puitteissa Joonas Tulosen tekemässä diplomityössä selvitettiin teräspalkkibetonisen rautatiesillan kuormituskestävyyteen vaikuttavat seikat [Tulonen, J. 2012].

## 2 Rautateiden kuormat

Rautateiden kuormitus on ollut jatkuvassa kasvussa. Kun verrataan nykyisiä liikennemääriä vuoden 1930 liikennemääriin, on henkilöliikennekilometrit 3,75-kertaistuneet ja tavaraliikenteen tonnikilometrit 5,9-kertaistuneet. Vuonna 1930 rataverkon pituus oli 5 010 kilometriä, joka on 85 % nykyisestä pituudesta. Tämän takia vain pieni osa liikennemäärien kasvusta selittyy rataverkon pituuden kasvusta. Tilastoissa näkyy sotavuodet rataverkon pituuden pienentymisenä ja tuoreimpana tapahtumana Suomen ajautuminen taantumaan vuonna 2008 maailmanlaajuisen finanssikriisin seurauksesta. Taantuman vaikutukset näkyvät vuoden 2009 sekä matkustajaliikenteen että tavaraliikenteen vähentymisenä. Laman vaikutukset kohdistuivat erityisesti tavaraliikenteeseen, joka väheni lähes 18 %. [Liikenneviraston tilastoja 4/2012, Suomen rautatietilasto 2012, s.46]

### 2.1 Suomen rataverkko

Säännöllinen rautatieliikenne alkoi Rataosalla Helsinki–Hämeenlinna 17.3.1862. Ratayhteyden pituus oli 108 km ja liikenne oli vähäistä nykyisiin liikennetiheyksiin verrattuna. Liikennetiheys oli tällöin kolme junaa suuntaansa viikossa ja matka kesti neljä ja puoli tuntia [Zetterberg, S. 2011, s.27–35]. Helsinki – Hämeenlinna rataosan avaamisen jälkeen rataverkko laajeni ensin itään päin, saavuttaen Vainikkalan vuonna 1870. Tätä seurasi ratayhteyden saaminen Hankoon vuonna 1873, Porvooseen 1874, Turku ja Tampere saavutettiin samana vuonna, 1876. Rataverkon levittäytymisestä saa hyvän kuvan Suomen rautatietilastosta 2012, jossa rataosat ovat lueteltu liikenteelle avaamisaikansa mukaan. [Liikenneviraston tilastoja 4/2012, Suomen rautatietilasto 2012, s.12–13]



Kuva 2.1. Rataosa Seinäjoki - Oulu. Lähde: Liikenneviraston väylätietoja 4/2012. Kuvaa on käsitelty.

Suomen rataverkon pituus on nykyään 5 944 km. Suomen rataverkosta on kuva liitteessä 1. Rataverkko yhdistää Suomen suurimmat kaupungit ulottuen eteläisimmästä liikennepaikasta, Hangosta pohjoisimpaan liikennöityyn liikennepaikkaan, Kolariin. Suomen rataverkko on rataosista muodostuva rautatieliikenteen liikenneverkko. Rataosa on ennalta määrätty rautatieverkon hallintaan liittyvä rataosuus. Suomen rata-

verkko koostuu hieman yli sadasta rataosasta. Rataosilla on tunnus, joka koostuu kolmesta numerosta ja mahdollisesta kirjaimesta. Kun halutaan puhua rataosista lyhyemmistä osista, puhutaan rataosuuksista. Rataosuus on rataosaa vapaampi käsite ja lähtö- ja tulopiste on vapaammin valittavissa. Nykyään Liikennevirasto käyttää käsitettä rataosuus, ilmoittaessa ratojen ominaisuuksia ja tilastoidessa esimerkiksi bruttotonneja. Rataosat ovat yleensä pidempiä osia kuin rataosuudet, ja niiden välillä voi sijaita myös suurehkoja henkilöliikennepaikkoja. Rataosan välille voi liittyä muita rataosia. Esimerkiksi rataosan Seinäjoki–Oulu pituus on 334,8 km, jonka välillä sijaitsee henkilöliikennepaikat, Kokkola ja Ylivieska. Seinäjoki–Oulu rataosaan liittyy myös muita rataosia rataosan välillä, Iisalmi–Ylivieska, Pännäinen–Pietarsaari ja Raahe–Rautaruukki. Näiden asioiden perusteella, rautatieliikenteen määriä tarkasteltaessa, kannattaa tarkastelua tehdä tarkemmalta tasolta, kuten rataosuuksilta. Osa rataosista on niin lyhyitä, että rataosa ja rataosuus tarkoittavat samaa asiaa. Näin on esimerkiksi rataosan Pännäinen–Pietarsaari kohdalla. [Liikenneviraston väylätietoja 4/2012, Rataverkon kuvaus 1.1.2013 s.16]

Rataosuuksia voidaan myös tarkastella tarkemmin. Tällöin puhutaan rautatieliikennepaikkaväleistä. Nykyiset rautatieliikennepaikat ovat lueteltu lähteessä, Liikenneviraston väylätietoja 4/2012. Rautatieliikennepaikalla tarkoitetaan matkustaja- tai tavaraliikenteen palvelupaikkaa. Lisäksi osa rautatieliikennepaikoista on vain liikenteenohjaukseen perustuvia paikkoja. Yleinen pelkästään liikenteen ohjaukseen perustuva rautatieliikennepaikka on kohta, jossa voidaan järjestää junien kohtaamisia. Kun liikennepaikka palvelee matkustajaliikennettä, puhutaan henkilöliikennepaikasta.

Rataverkon ratakilometrijärjestelmää käytetään hyväksi kun halutaan osoittaa mieltä valtainen osuus radasta tai pistemäinen kohta rataverkosta. Ratakilometrit kasvavat Helsingistä kohti pohjoista. Ratakilometrijärjestelmä on jatkuva ja haarautuva. Tämän vuoksi eri rataosilta löytyy samoja kilometrilukuja ja kilometrijärjestelmää käytettäessä pitää kilometrien lisäksi mainita rataosa. Ratakilometri on nimetty määrämittäinen osuus radasta. Ratakilometrit ovat merkitty maastoon ja kilometri on kahden kilometrimerkin välinen osuus. Osuuden pituus on usein lähellä 1000 m:ä mutta se voi poiketa paljonkin mm. aikaisemmin tehtyjen radan oikaisujen vuoksi. [Liikenneviraston ohjeita 3/2010 Ratatekniset ohjeet (RATO) osa 2, Radan geometria s.69–72]

Tässä työssä pyritään pääsääntöisesti tarkastelemaan rataosuuksittain kuormitushistoriaa. Tämä on riittävän tarkka tarkastelutaso siltojen bruttotonnimäärän selvittämiseksi. Rataosa on usein liian laaja tarkastelutasoksi rataosan välillä olevien solmu-kohtien ja suurien rautatieliikennepaikkojen vuoksi. Näiden takia liikennemäärät voivat vaihdella suurestikin samalla rataosalla. Tämän voi havaita esimerkiksi uusimmasta Rautatietilastosta 2012. Seinäjoki–Oulu rataosan vilkkaimman ja vähäliikenteisimmän rataosuuden ero on kaksinkertainen. Rataosuuden Seinäjoki–Pännäinen bruttotonnimäärä oli vuonna 2011 9,6 milj. bruttotonnia ja Kokkola–Ylivieska 20,2 milj. bruttotonnia. Aikaisempina vuosina ero ei ole ollut aivan näin selvä, mutta rataosuus Kokkola – Ylivieska on ollut pääsääntöisesti vilkkaampi. Näin ollen erot bruttotonneissa ovat merkittäviä kun tilannetta katsotaan pidemmältä aikaväliltä. Toinen syy tämän tarkastelutason valintaan on se, että vuodesta 1958 lähtien bruttotonnien tilastoinnissa on käytetty rataosuuksia tilastoinnin tarkkuustasona.

1900-luvun alun rautatietilastoissa on käytetty tilastoinnin tarkkuutena jopa rautatieliikennepaikkoja. Tämä tilastointitapa on käytössä ainakin vuoden 1915 rautatietilastossa, ei kuitenkaan enää vuoden 1936 tilastossa. Tämän huomioiminen kasvattaisi työmäärää valtavasti, eikä tähän ole aikaa tämän työn puitteissa. Saavutettava hyöty

ei olisi myöskään suuri, koska liikennemäärä 1900-luvun alun ensimmäisillä vuosikymmenillä oli vähäisempää nykyisiin liikennemääriin verrattuna. Siten näillä 1900-luvun alun ensimmäisillä vuosikymmenillä on pieni vaikutus väsymistarkasteluun kun niitä vertaa esimerkiksi 1900-luvun lopun vaikutuksiin. Tämän tarkkuustason hyötyä ei voitaisi enää saavuttaa myöskään vuodesta 1936 lähtien, koska tilastointitapa on ollut epätarkempi. Tämänkin takia valittu tarkastelutaso on hyvä. [Rautatietilastot 1900, 1915, 1936.]

Aikaisemmissa rautatietilastoissa käsitteellä, rataosa, ei tarkoitettu samaa mitä nykyään tarkoitetaan. Vielä 1980-luvun rautatietilastoissa rataosa tarkoitti lyhyempää osuutta mitä nykyään rataosalla tarkoitetaan. [Rautatietilasto 1985.]

### 2.1.1 Useampiraiteiset rataosuudet

Pääosa Suomen rataverkosta on edelleen yksiraiteista. Kaksi- tai useampiraiteisen radan osuus nykyään on karkeasti 10 %:n luokkaa. Pääosa useampiraiteisista rataosuuksista on Etelä-Suomessa [Liikenneviraston väylätietoja 4/2012, Rataverkon kuvaus 1.1.2013 s.7]. Useampiraiteisilla radoilla tavoitellaan sekä suurempaa liikenteitiheyttä että aikataulujen täsmällisyyttä. Tämän perusteella useampiraiteisten keskittymisen vilkkaasti liikennöidyille Etelä-Suomen radoille on selvää. Useampiraiteisia rataosuuksia käytetään myös liikenteen sujuvoittamiseksi. Lyhyemmilläkin kaksiraiteisilla rataosuuksilla voidaan sujuvoittaa junien kohtaamisia. Sujuvimilla kohtaamisilla saavutetaan usein etuja juna-aikataulujen täsmällisyydessä. Suomen rataverkon useampiraiteiset rataosuudet ovat esitetty kappaleissa 2.1.1.1–2.1.1.3. Lähteenä on käytetty Liikenneviraston väylätietoja 4/2012, Rataverkon kuvaus 1.1.2013 s.8. Näiden lisäksi on muutamia rautatiesiltoja, jotka sijaitsevat ratapihoilla. Tällöin raitteita voi olla jopa enemmän kuin neljä. Ratapihoja ei käsitellä tämän työn puitteissa.

#### 2.1.1.1 Kaksiraiteiset rataosuudet

Leppävaara–Kirkkonummi	Pohjois-Louko–Seinäjoki asema–Ruha
Huopalahti–Vantaankoski	Kytämaa–Hakosilta
Kytömaa–Kyrölä	Riihimäki asema–Luumäki
Purola–Riihimäki–Sääksjärvi	Tampere tavara–Lielahdi
Kouvola–Juurikorpi	Tampere Järvensivu–Orivesi

**Käyttäen tässä työssä käytettävää rataosuusjaottelua (ks. 2.2.1), kokonaan kaksiraiteisia rataosuuksia ovat**

<i>Pasila–Kirkkonummi</i>	<i>Toijala–Tampere</i>
<i>Kerava–Lahti</i>	<i>Tampere–Orivesi</i>
<i>Hyvinkää–Riihimäki</i>	<i>Lahti–Kouvola</i>
<i>Riihimäki–Lahti</i>	<i>Kouvola–Luumäki</i>
<i>Riihimäki–Toijala</i>	<i>Kouvola–Juurikorpi</i>

### 2.1.1.2 *Kolmiraiteiset rataosuudet*

Kyrölä–Purola  
Sääksjärvi–Tampere tavara

*Kokonaan kolmiraiteisia rataosuuksia ei ole, jos jaottelu perusteena käytetään tässä työssä käytettävää rataosuus jaottelua (ks. 2.2.1)*

### 2.1.1.3 *Neliraiteiset rataosuudet*

Helsinki asema–Leppävaara  
Helsinki asema–Kytömaa

*Käyttäen tässä työssä käytettävää rataosuusjaottelua (ks. 2.2.1), kokonaan neliraiteisia rataosuuksia ovat:*

*Helsinki–Pasila  
Pasila–Kerava*

## 2.2 Kuormitushistoria rataosuuksittain

Bruttotonnilla tarkoitetaan junien omapainosta ja junissa kuljetettavan rahdin nettopainon summaa. Bruttotonnitiedot lasketaan kulunvalvonnan kautta todellisina painoina. Nykyään junaliikenteen bruttotonnitiedot rataosittain tuotetaan Logican ylläpitämien Kultu- ja Veko-järjestelmien kautta. Järjestelmät eivät ole täysin automaattisia, joten käyttäjät joutuvat syöttämään datan järjestelmään. Käyttäjiä ovat mm. juna-toimistot, operaatiokeskukset, vetovoiman suunnittelijat ja tallipäivystäjät. Kultu- ja Veko-järjestelmien avulla tuotetaan tilastotietoa nykyisiin Suomen rautatietilastoihin. [Juuti, Vesa, sähköpostikeskustelu 2013.]

Tapahtunutta kuormitushistoriaa voidaan selvittää vanhojen rautatietilastojen avulla. Rautatietilasto on julkaistu ensimmäisen kerran 1871. Kaikki painetut rautatietilastot on arkistoitu Hyvinkään Rautatiemuseon arkistoon. Julkaisuja ei saa lainattua, joten tässä työssä ei ole ollut käytettävissä koko julkaisusarjaa. Rautatietilasto on pääsääntöisesti julkaistu vuosittain. Muutama ajanjakso löytyy ainakin, kun rautatietilastoja ei ole painettu eikä julkaistu. Näinäkin ajanjaksoina tilastoaineisto on ollut todennäköisesti olemassa, mutta hävinnyt sen seurauksesta, että tilastotietoa ei ole saatu painettua [Herranen, Leila, haastattelu 2013]. Yksi näistä ajanjaksoista on sotavuodet. Talvi- ja jatkosodan aikana vuosina 1939–1944, rautatietilastoja ei julkaistu. Valtioneuvoston päätös edellytti, että kaikki työt, jotka eivät olleet sodan takia välttämättömiä, oli lopetettava. Rautatietilastot sisälsivät myös paljon sotasalaisuuksina pidettäviä asioita, minkä vuoksi niitä ei julkaistu. Vuoden 1945 Rautatietilaston johdannosta saadaan vahvistusta Herrasen kertomaan. Johdannon mukaan vuosien 1941–1944 rautatietilastot on laadittu epätäydellisinä, niin että niiden ja vuosien 1939 ja 1940 rautatietilastojen julkaisemista vanhentuneina, vuonna 1945, ei pidetty enää tarkoituksenmukaisena [Rautatietilasto 1945 s.3]. Vuosina 1949 ja 1955 haluttiin säästää kirjapainokustannuksia ja sen vuoksi nämä rautatietilastot jäi painamatta [Rautatietilasto 1956 s.3]. Kolmas ajanjakso, jolloin rautatietilastot julkaistiin, mutta karsittuina, on ajanjakso 1990–1994. Karsinta kohdistui mm. tässä työssä tarvittaviin bruttotonneihin. Ajanjakso on juuri ennen Valtion liikelaitoksen VR:n eli Valtionrautatiet lopettamista ja VR osakeyhtiön perustamista vuonna 1995. Vuoden 1994 Rautatietilastos-



sa on esitettyä eri rataosuuksien suhteelliset bruttotonnit kuvana, mutta lukuarvoja ei ole julkaistu.

Tilastointitapa ja tilastoitavat asiat ovat muuttuneet vuosisadan varrella. Kuormitus-historian kannalta merkittävin muutos on bruttotonnien tilastointitavan yhdenmukaistuminen vuonna 1958. Tätä vanhemmissa rautatietilastoissa bruttotonneja ei ole tilastoitu suoraan. Näissä bruttotonnit voidaan arvioida, tavaraliikenteen tonnikilometrien, matkustajaliikenteen matkustajamäärien, junamäärien ja keskimääräisten junien kokonaismassojen perusteella. Lisäksi vanhemmissa julkaisuissa joudutaan tarkastelemaan erikseen matkustaja- ja tavaraliikenne. Vaikka tilastointitapa on yhdenmukaistunut vuoden 1958 jälkeen, on pieniä muutoksia tilastoinnissa tapahtunut tämän jälkeen. Esimerkiksi vuodesta 1995 lähtien bruttotonnilastot eivät sisällä lähiliikenteessä käytössä olevia sm1-, sm2- ja sm4-sähkömoottorijunia. Nämä ovat pääsääntöisesti käytössä pääkaupunkiseudulla, mutta niitä käytetään myös jonkin verran muualla. Junat ovat lyhyitä ja niiden akselipainot ovat pienempiä verrattuna varsinaisiin kaukoliikennejuniin. Suurin osa lähiliikenteestä liikkuu omilla raiteilla pääkaupunkiseudun useampiraiteisilla radoilla. Huomioidaan lähiliikenteen puuttuminen tilastoista vuodesta 1995 lähtien rajoittamalla bruttotonnimäärän jakamista useampiraiteisilla rataosuuksilla. Tätä on käsitelty kohdassa 2.2.6. Toinen muutos liittyy vaihtotyöliikenteeseen. Se on huomioitu bruttotonneissa vasta vuodesta 2011 lähtien. Vaihtotyöliikenteellä ei ole suurta merkitystä työn käsittelemässä aiheessa, koska suurin osa vaihtotyöstä tapahtuu rautatieliikennepaikkojen läheisyydessä ja siten se rasittaa vain vähäistä osaa rautatiesiltoja. Tämän perusteella vaihtotyöliikenteen puuttuminen aikaisemmilta vuosilta ei ole merkittävää, eikä sitä oteta tässä huomioon. Vaihtotyön vuoksi bruttotonneihin ei tehdä myöskään vähennyksiä vuosien 2011 ja 2012 määriin.

Tilastoiden tarkastelua hankaloittaa se, että rataosuudet, joilta tilastointia on tehty, ovat vaihdelleet. Muutamilla rataosuuksilla tilastointi on muuttunut tarkemmaksi, kun aikaisempi rataosuus on jaettu kahdeksi uudeksi rataosuudeksi ja tällöin bruttotonneja on alettu tilastoimaan kahdelta uudelta osalta erikseen. Näin on tapahtunut esimerkiksi vuonna 2011 rataosuuksille Oulu–Kontiomäki ja Helsinki–Kerava. Rataosuudesta Oulu–Kontiomäki on muodostettu osuudet Oulu–Vaala ja Vaala–Kontiomäki. Rataosuudesta Helsinki–Kerava on muodostettu osuudet Helsinki–Pasila ja Pasila–Kerava. Tällä on merkitystä, jos uusien osuuksien bruttotonnimäärät eroavat paljon toisistaan, tällöin vähäliikenteisemmälle rataosuudelle ei tarvitse käyttää vilkkaamman rataosuuden bruttotonneja. Käytetään rataosuuksien bruttotonnien määrien tutkimiseen samaa rataosuusjakoa mitä on käytetty vuoden 2012 Rautatietilastossa. Nämä ovat lueteltu kappaleessa 2.2.1. Tällöin tilaston muuttuminen tarkemmaksi tulee huomioitua. Vastaavanlaisia muutoksia on ollut aikaisemminkin.

Vuonna 1980 bruttotonnilastoinnissa on tehty suurempia muutoksia tarkasteltavien rataosuuksien puolesta. Tällöin rataosuudet, joilta tilastointia on tehty, on jaettu uudelleen. Tilastoitavat rataosuudet ovat muuttuneet lähemmäksi nykyistä jakoa. Vuoden 1980 jälkeen Suomen rataverkko on laajentunut ainoastaan 148 km:n verran. Tämän perusteella tilastointitavan pysyminen lähes samanlaisena vuodesta 1980 lähtien on ymmärrettävää. Tapauksissa, jossa tilastointi on muuttunut kahdesta tai useammasta lyhyemmästä rataosuudesta yhdeksi pidemmäksi osuudeksi, valitaan lyhyimmistä väleistä suurimman bruttotonnimäärän sisältämä rataosuus uuden pidemmän välin bruttotonnimääräksi. Koska suurempi kuormitusmäärä aiheuttaa suuremman väsymisrasituksen, on tilastoa hyvä käsitellä edellä mainitulla tavalla. Tällä

tarkastelutavalla tosin menetetään kevyemmin kuormitettujen lyhyempien rataosuuksien etu väsymistarkastelussa.

Vuosien 1958 ja 1975 välissä rataosuudet, joilta bruttotonniin tilastointia on tehty, ovat olleet jatkuvassa muutoksessa. Osa muutoksista johtuu vuoden 1980 tapaan tilastoitavien rataosuuksien uudelleenjaosta, mutta osa johtuu radan rakentamisesta paloittain, jolloin tilastoitavat ratavälit on muuttunut aina kun rataa on rakennettu pidemmälle.

Vanhoissa rautatietilastoissa törmää myös vanhoihin paikannimiin, mikä osaltaan hankaloittaa tilastojen tutkimista. Vanhat paikannimet ovat kuitenkin löydettävissä. Haastetta asettaa myös rataosuuksien valmistuminen paloittain. Esimerkiksi valitun rataosuuden Tornio–Kolari ensimmäinen osuus Tornio–Kukkola, valmistui vuonna 1922 ja viimeinen osuus Sieppijärvi–Kolari valmistui loppuvuodesta 1966. Näiden välissä on kuusi eri vuosina valmistunutta rataosuutta. Tässä työssä tarkastelu suoritetaan kappaleessa 2.2.1 mainittujen rataosuuksien mukaan. Tämä tarkoittaa sitä, että kun tarkastellaan ajanjakson 1900–1925 bruttotonneja, puhutaan rataosuudesta Tornio–Kolari vaikka tällä välillä rataa on olemassa tällöin vasta Tornio–Karunki välillä.

Bruttotonnimäärät on kerätty vuosien 1958–2012 rautatietilastoista taulukkoon. Alkujaan keräämisen on suorittanut Mikael Anttonen. Tätä taulukkoa on käsitelty ja täydennetty tämän työn tarpeiden mukaisesti. Tarkasteltaviksi rataosuuksiksi on valittu kappaleessa 2.2.1 mainitut 103 rataosuutta kun alkuperäisessä taulukossa oli 174 rataosuutta. Rataosuudet ovat osittain päällekkäisiä ja niiden yhdistämisessä on käytetty edellä mainittuja periaatteita. Yhdistämisen jälkeen taulukkoon on jäänyt puutteita, jotka ovat täytetty kappaleissa 2.2.2 – 2.2.4 esitetyillä arvioilla. Bruttotonnimäärät rataosittain perustuvat vuosittaisiin rautatietilastoihin ja puuteiltaan arvioihin ajanjaksona 1950–2012. Taulukko on esitetty liitteessä 2. Taulukossa vaaleansinisellä taustalla olevat bruttotonnimäärät ovat arvioita. Taulukossa punainen tarkoittaa, ettei kyseistä rataosuutta ole ollut olemassa vielä.

Ajanjakson 1900–1949 bruttotonnimäärät perustuvat yksittäiseen rautatietilastoon ja koko rataverkon kokonaisliikenteen määrään. Kokonaisliikenteen määrä voidaan selvittää uusimpien rautatietilastojen historiallisista katsauksista. Ajanjakson 1900–1949 bruttotonnitietojen käsittely on esitetty kappaleissa 2.2.5.

### **2.2.1 Bruttotonniin tarkastelussa käytetyt rataosuudet**

Käytetään bruttotonniin tarkastelussa pääosin samaa rataosuusjakoa, jota on käytetty vuoden 2012 Rautatietilastossa bruttotonniin tilastoinnissa. Lisäksi otetaan tarkasteluun rataosuudet Haapamäki–Parkano, Parkano–Pori ja Pesiökylä–Taivalkoski. Nämä rataosuudet ovat tällä hetkellä joko kokonaan tai osittain suljettu liikenteeltä. Haapamäki–Parkano rataosuudelta, väli Haapamäki–Kihniö suljettiin vuonna 1985 ja Parkano–Pori, väli Niinisalo–Ruosniemi suljettiin vuonna 2001. Pesiökylä–Taivalkoski rataosuus suljettiin kokonaan vuonna 2004. Tällöin tarkasteltavia rataosuuksia on yhteensä 103 rataosuutta. Nämä rataosuudet ovat lueteltu alla. Nämä kattavat lähes kokonaan Suomen nykyisen rataverkon. Tarkastelusta puuttuu joitain lyhyitä haararatoja, kuten esimerkiksi Murtomäki–Otanmäki, Mynttilä–Ristiina ja Turku–Turun satama rataosuudet. Vaikka käsiteltäviä rataosuuksia on lähes yhtä paljon mitä rataosia, ei näitä pidä sekoittaa toisiinsa.

Tornio–Kolari	Kuopio–Siilinjärvi	Lahti–Loviisa
Laurila–Tornio	Pieksämäki–Kuopio	Lahti–Heinola
Kemi–Laurila	Mikkeli–Pieksämäki	Lahti–Kouvola
Laurila–Rovaniemi	Kouvola–Mikkeli	Kouvola–Kuusankoski
Rovaniemi–Kemijärvi	Saarijärvi–Haapajärvi	Kouvola–Juurikorpi
Kemijärvi–Kellosoelkä	Jyväskylä–Saarjärvi	Juurikorpi–Hamina
Oulu–Kemi	Jyväskylä–Pieksämäki	Juurikorpi–Kotka
Tuomioja–Oulu	Haapamäki–Jyväskylä	Kouvola–Luumäki
Ylivieska–Tuomioja	Haapamäki–Seinäjäki	Luumäki–Vainikkala
Tuomioja–Raahe	Orivesi–Vilppula	Luumäki–Lappeenranta
Kokkola–Ylivieska	Vilppula–Haapamäki	Lappeenranta–Imatra
Pännäinen–Kokkola	Vilppula–Mänttä	Imatra–Imatrankoski
Pännäinen–Pietarsaari	Jämsänköskei–Jyväskylä	Imatra–Parikkala
Seinäjäki–Pännäinen	Orivesi–Jämsänköskei	Parikkala–Säkäniemi
Seinäjäki–Vaasa	Tampere–Orivesi	Säkäniemi–Joensuu
Seinäjäki–Kaskinen	Toijala–Tampere	Niirala–Säkäniemi
Parkano–Seinäjäki	Toijala–Valkeakoskei	Parikkala–Savonlinna
Lielähti–Parkano	Toijala–Turku	Savonlinna–Huutokoskei
Tampere–Lielähti	Turku–Raisio	Pieksämäki–Huutokoskei
Lielähti–Kokemäki	Raisio–Uusikaupunki	Huutokoskei–Varkaus
Kokemäki–Pori	Riihimäki–Toijala	Varkaus–Viinijärvi
Pori–Mäntyluoto	Hyvinkää–Riihimäki	Viinijärvi–Joensuu
Kokemäki–Rauma	Hyvinkää–Karjaa	Siilinjärvi–Viinijärvi
Oulu–Vaala	Karjaa–Hanko	Joensuu–Ilomantsi
Vaala–Kontiomäki	Karjaa–Turku	Joensuu–Uimaharju
Kontiomäki–Pesiökylä	Kirkkonummi–Karjaa	Uimaharju–Lieksa
Pesiökylä–Ämmänsaari	Helsinki–Kirkkonummi	Lieksa–Nurmes
Kontiomäki–Vartius	Helsinki–Pasila	Nurmes–Vuokatti
Iisalmi–Kontiomäki	Pasila–Kerava	Vuokatti–Kontiomäki
Iisalmi–Pyhäsalmi	Kerava–Sköldvik	Tornio–Röyttä
Pyhäsalmi–Haapajärvi	Kerava–Vuosaari	Raisio–Naantali
Pyhäsalmi–Pyhäkumpu	Kerava–Hyvinkää	Kokkola–Ykspihlaja
Haapajärvi–Ylivieska	Kerava–Lahti	Haapamäki–Parkano
Siilinjärvi–Iisalmi	Riihimäki–Lahti	Parkano–Pori
		Pesiökylä–Taivalkoskei

### 2.2.2 Vuodet 2000–2012

2000-luvulla bruttotonnit on kattavasti tilastoitu, ja tilastointitapa on pysynyt samana. Bruttotonnitilastoissa on hieman puutteita, yhteensä seitsemällä rataosuudella on aukkoja bruttotonnitilastoissa ja näistä kolme ovat kohdassa 2.2.1 mainittuja osittain tai kokonaan suljettuja rataosuuksia, Haapamäki–Parkano, Parkano–Pori ja Pesiökylä–Taivalkoskei. Loput neljä rataosuutta ovat Imatra–Imatrankoskei, Tornio–Röyttä, Raisio–Naantali ja Kokkola–Ykspihlaja.

Rataosuudella Imatra–Imatrankoskei bruttotonneja ei ole tilastoitu vuosina 1968–2006. Rataosuuden bruttotonnit ovat arvioitu ajanjaksona 1975–2012 viereisen rataosuuden, Lappeenranta–Imatra perusteella siten, että rataosuuden Imatra–Imatrankoskei bruttotonnimäärä on 0,50 kertaa rataosuuden Lappeenranta–Imatra bruttotonnimäärä kyseisenä vuotena. Kerroin 0,50 on määritetty vuosien 2007–2012

perusteella, jolloin molempien bruttotonnimäärät on ilmoitettu tilastoissa. Kerroin on ylöspäin pyöristetty keskiarvo rataosuuksien suhteista.

Rataosuuksilla Tornio–Röyttä ja Raisio–Naantali on tilastoissa ajanjaksoja, jolloin bruttotonnimäärät puuttuvat ajoittain. Nämä välit ovat täytetty arvioimalla lineaarisesti, välin ensimmäisen ja viimeisen olemassa olevien arvojen avulla. Tätä menetelyä on käytetty kaikkien lyhyempien aikavälien puutteiden arviointiin, joissa tilastoarvo löytyy puuttuvan kohdan molemmista päistä. Lyhyimmät puuttuvat kohdat ovat yksittäisiä vuosia. Tätä menettelyä on käytetty myös vuosien 1958–1999 puutteiden täyttämiseen.

Rataosuudella Kokkola–Ykspihlaja bruttotonnien tilastointi on aloitettu vasta vuonna 2010 vaikka rataosuus on valmistunut vuonna 1886. Rataosuuden pituus on vain noin viisi kilometriä. Vuosien 2011 ja 2012 perusteella rataosuudella on vilkas liikenne. Rataosuudella ei ole matkustajaliikennettä vaan se palvelee Kokkolan sataman tavaraliikennettä. Tilastoinnin aloitusvuonna 2010 bruttotonnimäärä poikkeaa huomattavasti vuosien 2011 ja 2012 bruttotonnimäärästä. Se on noin viidenneksen kahden seuraavan vuoden bruttotonnimäärästä. Todennäköisesti tämä johtuu rataosuuden Kokkola–Ykspihlaja sähköistyksestä, jota tehtiin vuosien 2009 ja 2010 välillä. Kyseisinä vuosina näkyivät myös maailmanlaajuisen finanssikriisin aiheuttaman taantuman vaikutukset pahimmillaan. Rataosuudessa Kokkola–Ykspihlaja on suurimmat puutteet bruttotonnitilastoissa. Rataosuuden bruttotonnimäärät arvioidaan viereisten rataosuuksien avulla rataosuuden Imatra–Imatrankoski tapaan. Koska tilastoissa on suuret puutteet, käytetään arvioinnissa kahta viereistä rataosuutta. Rataosuuden Kokkola–Ykspihlaja arvio lasketaan kaavalla,  $\max(0,55 \times \text{Kokkola–Ylivieska} ; 1,15 \times \text{Pännäinen–Kokkola})$ . Kertoimet ovat muodostettu vuosien 2011 ja 2012 avulla. Oletus perustuu ajatukseen, että koska rautatieliikenne on tehokasta pitkillä ja keskipitkillä matkoilla, on lyhyen satamaraiteen bruttotonnimäärän seurattava hyvin viereisten raiteiden bruttotonnimääriä.

Rataosuus Haapamäki–Parkano osuus on osittain suljettu liikenteeltä. Nykyään liikennettä on vain liikennepaikkavälillä Parkano–Kihniö. Välin bruttotonnien tilastointi on lopetettu vuonna 1985, samana vuonna kun liikennepaikkaväli Haapamäki–Kihniö suljettiin. Bruttotonnimäärät ovat arvioitu rataosuudella siten, että sulkemisvuonna bruttotonnimäärä puolittui, jonka jälkeen se on vähentynyt tasaisesti 0,3 milj. bruttotonnista 0,1 milj. bruttotonniin. 0,1 milj. bruttotonnia tarkoittaa noin 150 tilastollisesti vuoden 2011 keskipainoisen junan ohiajoa vuodessa. [Rautatietilasto 2012 s.28]

Rataosuus Parkano–Pori osuus on osittain suljettu liikenteeltä. Nykyään liikennettä on vain liikennepaikkaväleillä Pori–Ruosniemi ja Parkano–Niinisalo. Liikenne on tavaraliikennettä ja välillä Parkano–Niinisalo kulkee myös armeijan sotilasjunia. Liikennepaikkaväli Niinisalo–Ruosniemi suljettiin vuonna 2001. Välin bruttotonnien tilastointi on lopetettu vuonna 1985. Rataosuuden bruttotonnien arvioinnissa on oletettu, että liikenteen bruttotonnimäärä on pysynyt samana vuodesta 1984 vuoteen 2001 saakka, jonka jälkeen liikenne on vähentynyt viidesosaan, 0,2 milj. bruttotonniin.

Rataosuus Pesiökylä–Taivalkoski suljettiin liikenteeltä vuonna 2004. Rataosuuden bruttotonnien tilastointi on lopetettu vuonna 1980. Rataosuuden bruttotonnit ovat arvioitu olevan samoja mitä viereisen, vielä liikenteessä käytettävän, rataosuuden, Pesiökylä–Ämmänsaari. Rataosuuden sulkemisesta voi päätellä, että väli on ollut vähäliikenteisempi kuin rataosuus Pesiökylä–Ämmänsaari. Tämän perusteella arvio

on todennäköisesti yläkanttiin. Välin bruttotonnimäärät ovat kuitenkin vähäiset eikä yläkanttiin arvioituista määrillä ole suurta merkitystä tämän vuoksi.

### 2.2.3 Vuodet 1975–1999

Ajanjaksona 1975–1999 bruttotonnitilastoissa on puutteita entistä useammalla rataosuudella, kaiken kaikkiaan 12:sta rataosuudella. 2000-luvulle jatkuvat rataosat, joissa on puutteita, puuttuvat bruttotonnimäärät on arvioitu kappaleessa 2.2.2. mainitulla tavalla. Uusina rataosuksina, joilla on puutteita tilastoissa, on Tornio–Kolari ja Pyhäsalmi–Pyhäkumpu. Loput 12:sta ovat pieniä yksittäisiä aukkoja bruttotonnitilastoissa. Lisäksi tähän jaksoon kuuluvat vuodet 1990–1994, jolloin bruttotonneja ei tilastoitu miltään rataosalta. Vuosien 1990–1994 bruttotonnimäärät ovat arvioitu, paremman tiedon puuttuessa, lineaarisesti vuosien 1989 ja 1995 avulla.

Rataosuuden Tornio–Kolari bruttotonnitilastot puuttuvat vuosilta 1968–1979 välin bruttotonnimäärät ovat arvioitu lineaarisesti. Rataosuuden Pyhäsalmi–Pyhäkumpu bruttotonnimäärät on arvioitu viereisen rataosuuden Pyhäsalmi–Haapajärvi avulla siten, että rataosuuden Pyhäsalmi–Pyhäkumpu bruttotonnimäärä on 0,62 kertaa rataosuuden Pyhäsalmi–Haapajärvi bruttotonnimäärä kyseisenä vuotena. Kerroin 0,62 on määritetty vuosien 1995–1999 perusteella. Kerroin on ylöspäin pyöristetty keskiarvo rataosuuksien suhteista.

### 2.2.4 Vuodet 1950–1974

Ajanjaksona 1975–1999 bruttotonnitilastoissa on puutteita kymmenellä rataosuudella. Suurin osa näistä on samoja rataosuuksia, jotka ovat mainittu edellisissä kappaleissa. Rataosuuden Tornio–Röyttä bruttotonnimääriä on tilastoitu ajoittain ja tarkasteluväliltä 1958–2012 määrät puuttuvat kolmelta ajanjaksolta. Ajanjaksoilta, joilta tilastointia on tehty, on bruttotonnimäärät hyvin tasaisia, noin 1,0 milj. bruttotonnia vuosittain. Tämän perusteella rataosuudelle Tornio–Röyttä on arvioitu 1,0 milj. bruttotonnia per vuosi vuosille, joille tilastointia ei ole tehty.

Ajanjaksona 1975–1999 rataosuudelta Imatra–Imatrankoski löytyy tilastomerkinä. Määrät ovat huomattavasti pienempiä kuin kappaleessa 2.2.2 esitettyllä tavalla laskien saadaan arvioksi. Tämän takia rataosuuden arviointi on tehty lineaarisesti vuosina 1968–1974.

Rautatietilastojen bruttotonnitilastointi alkaa vuonna 1958, joten tästä vanhempien bruttotonnien määrittäminen pitää tehdä eri tavalla. Ne on määritetty kokonaisvaunuakselikilometrien ja vuoden 1958 bruttotonnimäärien avulla. Suomen rataverkon vaunuakselikilometrit löytyvät ainakin vuoden 1985 rautatietilaston historiallisesta katsauksesta. Vaunuakselikilometrit voidaan suhteuttaa vuoden 1958 vaunuakselikilometreihin ja näin saaduilla vuosittaisilla suhteilla voidaan kertoa vuoden 1958 bruttotonnimäärä. Näin saadaan arviot bruttotonneista rataosittain vuosille 1950–1957.

### 2.2.5 Vuodet 1900–1949

Ennen vuotta 1958 rautateillä liikkuvia bruttotonneja ei ole tilastoitu. Tämän takia bruttotonnit ovat arvioitava muiden tilastojen perusteella. Junien määriä on tilastoitu ainakin 1930–1950-luvuilla [Rautatietilastot 1936, 1937, 1938, 1945, 1956]. Tilastoissa on esitetty erikseen matkustajajunat, tavarajunat ja yksi sarake on varattu seka-, pikatavara- ja sotilasjunille. Osassa tilastoja myös moottorivaunut ovat eroteltu. Ti-

lastot on esitetty liikenneyhteyksittäin eli liikennepaikkavälein. Sen lisäksi, että tilastoissa olevat liikennepaikkavälit ovat lyhyempiä kuin tässä työssä käytettävässä rataosuusjaottelussa, menee jako myös ristikkäin tässä työssä käytettävän jaon kanssa. Vuoden 1936 rautatietilaston junamäärien taulukossa on yli 300 liikennepaikkaväliä. Tilastoituja junamääriä voidaan hyödyntää bruttotonnien arviointiin. Tällöin junamäärät tulee laskea uudestaan 103:lle tässä esitetylle rataosuudelle ja huomioida rataosuuksien päällekkäisyydet. Tämän jälkeen erityyppisten junien (matkustajajunat, tavarajunat, sekajunat ja moottorivaunut) arvioituilla keskipainoilla voidaan laskea bruttotonnit. Tällä tavoin on käsitelty vuoden 1936 rautatietilasto ja näin on saatu bruttotonnit kappaleen 2.2.1 mukaiselle rataosuusjaottelulle. Laskennassa on käytetty seuraavia arvioita erityyppisten junien keskimääräisille massoille:

- matkustajajunat, 246 tn
- tavarajunat, 681 tn
- sekajunat, 333 tn ja
- moottorivaunut, 75 tn

Keskimääräiset junapainot ovat laskettu tilastoitujen junassa olevien akselimäärien ja arvioitujen vaunujen akselipainojen perusteella. Vuoden 1936 tilaston perusteella matkustajajunissa oli keskimäärin 19,52 akselia, tavarajunissa 66,81 ja sekajunissa 29,76. Tavarajunille on arvioitu 9,0 tn keskimääräinen akselipaino ja matkustaja- ja sekajunille 8,5 tn. Moottorivaunuja lukuun ottamatta, junissa veturin massaksi on arvioitu 80 tn. Yhden vuoden tilaston käsittely on jo hyvin työlästä tällä tavoin, joten tässä työssä ei ole muiden vuosien tilastoja käsitelty. Vuosien 1900–1949 bruttotonnimäärillä on pienempi vaikutus siltojen väsymiseen, koska liikenne on tällöin ollut vähäisempää ja kevyempää verrattuna myöhempään vuosikymmeneen. Työn käsittelemiä betonirakenteisia siltoja on myös vähän ko. aikajaksona.

Vuoden 1936 lasketuilla bruttotonnimäärillä saadaan parempi kuva aikajakson 1925–1949 bruttotonneista. Tutkittu vuoden 1936 tilasto sijoittuu aikaan, ennen talvi- ja jatkosotaa. Tällä tavoin pystytään huomioimaan mahdollinen sotavuosien vaikutus rataosuuksien liikennemääriin. Vuosien 1936 ja 1950 bruttotonnimäärillä on arvioitu lineaarisesti vuosien 1937–1949 bruttotonnimäärät.

Vuoden 1936 bruttotonnimääriä on hyödynnetty myös vuosien 1900–1935 bruttotonnien arviointiin. Tässä arvioinnissa on käytetty lisäksi koko rataverkon vaunuakselikilometrejä ja vanhoja mitoituskuormakaavioiden tavaravaunujen akselipainoja. Kahdella jälkimmäisellä on pyritty arvioimaan jokaisen vuoden tarkasteltavien rataosuuksien yhteenlaskettua bruttotonnimäärää. Vuoden 1936 bruttotonnien jakautumisen perusteella, on jaettu yhteenlaskettu bruttotonnimäärä rataosuuksien kesken. Laskennassa on huomioitu rataosuuksien valmistumisvuodet, joten yhteenlaskettua bruttotonnimäärää on jaettu ainoastaan olemassa olevien rataosuuksien kesken.

Kappaleissa 2.2–2.2.5 esitetyillä periaatteilla on saatu muodostettua liitteen 2 taulukko. Taulukkoa tarkastelemalla, suurin bruttotonnimäärä 112 vuodessa on kertynyt rataosuudelle Helsinki–Pasila, 1636 milj.br.tn. Tämä on vähemmän kuin karkeimmalla RSO 9:n tarkastelutasolla käytettävä bruttotonnimäärän olettamus, 1900 milj.br.tn. / 100 vuotta. Tässä pitää kuitenkin muistaa, että Helsinki–Pasila on ollut pitkään useampiraiteinen, jolloin yhden raiteen bruttotonnimäärä on pienempi kuin 1636 milj.br.tn. Tästä voidaan päätellä, että bruttotonnimäärä olettamus, 1900 milj.br.tn. / 100 vuotta, on jokaisella rataosuudella yliarvioiva, niin kuin sen pitääkin olla. Lisäksi voidaan todeta, että tarkemmilla väsymislaskennan tarkkuustasoissa

voidaan aina saada laskettua pienempi väsymisrasitus. Taulukossa esitetyn, 112 vuoden yhteenlaskettuja rataosuuksittaisia bruttotonnimääriä tarkastelemalla todetaan myös, että vaihtelu eri rataosuuksien bruttotonnimäärissä on laajaa. Tarkastelemalla 1800-luvulla rakennettuja rataosuuksia, vaihtelee bruttotonnimäärä alle kahdesta sadasta miljoonasta bruttotonnista, rataosuuden Helsinki–Pasilan, runsaaseen 1600 miljoonaan bruttotonniin.

### 2.2.6 Useampiraiteiset rataosuudet

Kappaleessa 2.1.1 on lueteltu nykyiset Suomessa olevat useampiraiteiset rataosuudet. Edellä esitetyt bruttotonnit ovat tietyllä rataosuudella kulkeneita bruttotonneja. Siinä ei ole huomioitu sitä kuinka moniraiteinen rataosuus on. Kun raiteita on useampi, jakautuu kyseisen rataosuuden bruttotonnimäärä näille raiteille jossakin suhteessa. Edullisin tilanne on, kun kuormitus jakaantuu tasan kaikille raiteille. Näin ei voida olettaa kuitenkaan tapahtuvan. Vierekkäisten raiteiden välisestä etäisyydestä ja tukikerroksen ohuudesta johtuen, jokaisen raiteen ajatellaan aiheuttavan väsymisrasitusta ainoastaan oman raiteen alapuoliseen betonikanteen. Todellisuudessa rasitus jakaantuu osittain viereisen raiteen alle. Tämän jakaantumisen seurauksesta syntyvä sillan pituussuuntainen rasitus kuitenkin niin pieni, ettei sillä katsota olevan merkitystä väsymistilaa tarkasteltaessa.



Kuva 2.2. Kaksiraiteinen rata rataosuudella Kouvola–Juurikorpi. Kuva rataosalta 221 Kouvola–Kotka ratakilometriltä 200+588.



Useampiraiteisilla rataosuuksilla sijaitsevien rautatiesiltojen väsymistarkastelussa voidaan hyödyntää ajatusta, että rataosuuden bruttotonnimäärä jakaantuu jollain periaatteella raiteiden kesken. Tällä ajatuksella saavutetaan niin suuri etu väsymismitoituksessa, ettei sitä kannata jättää hyödyntämättä. Pyritään seuraavaksi arvioimaan prosenttiosuus enemmän kuormitetun raiteen bruttotonnimäärälle. Asiat, jotka vaikuttavat bruttotonnien jakautumiseen ovat:

- eri raiteilla liikkuvien junien massa
- eri raiteilla liikkuvien junien määrä

Pääsääntöisesti kaksiraiteisilla osuuksilla junat noudattavat oikeanpuoleisen liikenteen -sääntöä. Tämä mahdollistaa suuremman liikennetiheyden rataosuudella. Lisäksi tässä oletetaan, että sillan ylittävien junien akselien lukumäärä on molemmilla raiteilla sama eli oletetaan, että sama kalusto liikkuu molempiin suuntiin. Näiden oletuksien jälkeen ainoa asia, joka vaikuttaa bruttotonnien jakautumiseen eri raiteiden kesken, on junien nettopaino. Matkustajaliikenteen nettopainon suhde kaluston massaan on aina ollut pieni, eivätkä matkustajavirrat eri suuntiin poikkeaa huomattavasti samalla rataosuudella. Tämän vuoksi tarvittavan prosenttiluvun arvioiminen tehdään tavaraliikenteen nettopainovaihteluiden avulla. Rautatietilastoissa on tilastoitu vaunujen tyhjänä kulkuprosentteja rataosittain. Tällaiset tilastot löytyvät ainakin vuosien 1956, 1957 ja 1985 rautatietilastoista. 1950-luvulla tilastoitavat rataosuudet olivat suppeammin esitetty kuin vuoden 1985 tilastossa. Uusimmissa, 2006–2011, rautatietilastoissa tyhjänäkulkuprosentti on esitetty vain koko rataverkon osalta. Tyhjänä kulkuprosentteja kannattaa katsoa ainoastaan rataosuuksilta, joissa nykyään on useampi raiteinen rata. Vuonna 1957 kaksoisraidetta oli ainoastaan taulukossa 2.1 mainituilla radoilla.

*Taulukko 2.1. Vuosien 1956 ja 1957 tyhjänäkulkuprosentteja kahdella radalla.*

Rata	Tavaravaunujen tyhjänä kulkemat akselikilometrit %:ina	
	1956	1957
Helsingin – Hämeenlinnan – Parikkalan rata	18,0 %	20,3 %
Turun – Tampereen – Hämeenlinnan rata	12,0 %	15,7 %

Vuosina 1956–1957 tyhjänäkulkuprosentti vaihteli koko Suomen rataverkolla 12,0 %:n ja 46,6 %:n välillä. Tyhjänäkulkuprosentteja ei ole esitetty suunnittain. Vuoden 1985 rautatietilastossa tyhjänä kulkuprosentit ovat esitetty samalla rataosuus jaottelulla kuin on esitetty bruttotonnit samana vuonna. Osittain tyhjänäkulkuprosentit ovat esitetty suunnittain. Prosentit ovat vaihdelleet 5 %:n ja 99 %:n välillä. Taulukossa 2.2 tarkastellaan taas ainoastaan rataosuuksia, joissa useampiraiteista rataa on ollut olemassa. Taulukossa 2.2 on esitetty tyhjänäkulkuprosentti liikenteen molempiin suuntiin.



Taulukko 2.2. Vuoden 1985 tyhjänäkulkuprosentit kaksiraiteisilla rataosuuksilla. Prosentin ovat esitetty kulkusuunnittain.

Rata	Tavaravaunujen tyhjänä kulke- mat akselikilometrit %:ina vuonna 1985
Helsinki–Kerava / Kerava–Helsinki	25 % / 32 %
Hyvinkää–Riihimäki / Riihimäki–Hyvinkää	22 % / 41 %
Riihimäki–Toijala / Toijala–Riihimäki	42 % / 28 %
Tampere–Lielähti / Lielähti–Tampere	42 % / 32 %
Tampere–Orivesi / Orivesi–Tampere	55 % / 27 %
Riihimäki–Lahti / Lahti–Riihimäki	22 % / 55 %
Lahti–Kouvola / Kouvola–Lahti	22 % / 55 %
Kouvola–Juurikorpi / Juurikorpi–Kouvola	15 % / 82 %
Kouvola–Luumäki / Luumäki–Kouvola	50 % / 28 %
Helsinki–Kirkkonummi / Kirkkonummi–Helsinki	46 % / 28 %

Taulukosta 2.2 voi huomata, että rataosuudella Kouvola–Juurikorpi on suurimmat erot eri suuntien liikenteen vaunujen tyhjänä kulussa. Kouvolan suunnasta Juurikorpeen päin tavaravaunut ovat keskimäärin 15 %:sesti tyhjinä kun taas toiseen suuntaan keskimäärin 82 %:sesti tyhjinä. Taulukosta huomataan myös, että vaihtelua on paljon eri rataosuuksien välillä. Taulukon prosentit ovat vain yhden vuoden otos. Puutteellisten tilastojen ja tässä tehtyjen oletusten vuoksi, bruttotonnien jakautumista useampi-  
raiteisilla radoilla ei ole mahdollista selvittää rataosuuskohtaisesti. Määritetään yksi prosentti, jolla voidaan selvittää kaksiraiteisten rataosuuksien bruttotonnien jakautuminen raiteiden kesken ja käytetään sitä kaikille rataosuuksille. Käytetään tähän rataosuuden Kouvola–Juurikorpi, vuoden 1985, tyhjänäkulkuprosentteja ja nykyisiä tavaravaunujen taarapainojen suhteita vaunun bruttopainoon. Oletuksena käytettiin, että matkustajaliikenteen bruttotonnimäärä on sama molempiin suuntiin. Matkustajaliikenne vaikuttaa myös toisella tavalla. Mikäli matkustajaliikenteen suhde tavaraliikenteeseen on suuri, jakautuu bruttotonnimäärät tasaisemmin eri raiteiden kesken. Kouvola–Juurikorpi rataosuudella on nykyään ainoastaan vähäistä taajamajunaliikennettä ja tämän vuoksi matkustajaliikennettä ei huomioida mitenkään.

Nykyisin käytössä olevien kotimaisten tavaravaunujen taarapainot ja niihin lastattavan kuorman enimmäistonnimäärät löytyvät VR Transpointin internet-sivustolta. Taarapainolla tarkoitetaan vaunun omapainoa eli kalustoyksikön massaa tyhjänä. Tavaravaunujen taarapainojen osuus kokonaismassasta on useimmilla vaunutyypeillä 26–36 %:n välillä. Tällä prosentilla ja tyhjänäkulkuprosentilla voidaan laskea arvio bruttotonnien jakautumisesta kaksiraiteisilla radoilla. Taulukkoon 2.3 on laskettu bruttotonnipainoltaan 80 tn olevan neliakselisen tavaravaunun keskimääräinen toteutunut massa rataosuudella Kouvola–Juurikorpi suunnittain. Taulukossa on käytetty vuoden 1985 tyhjänäkulkuprosentteja.

Taulukko 2.3. Bruttotonniin jakautuminen eri raiteiden kesken.

Taarapainon osuus ja taarapaino		Kouvola-Juurikorpi [tn]	%	Juurikorpi-Kouvola [tn]	%
26 %	20,80	71,12	69,3	31,46	30,7
27 %	21,60	71,24	68,9	32,11	31,1
28 %	22,40	71,36	68,5	32,77	31,5
29 %	23,20	71,48	68,1	33,42	31,9
30 %	24,00	71,60	67,8	34,08	32,2
31 %	24,80	71,72	67,4	34,74	32,6
32 %	25,60	71,84	67,0	35,39	33,0
33 %	26,40	71,96	66,6	36,05	33,4
34 %	27,20	72,08	66,3	36,70	33,7
35 %	28,00	72,20	65,9	37,36	34,1
36 %	28,80	72,32	65,5	38,02	34,5

Taulukon 2.3 perusteella hyvä arvio bruttotonnimäärien jakautumisesta kaksiraiteisella rataosuudella on 65:35 ja 70:30 välillä eli bruttotonneja kertyy 65–70 % bruttotonniin kokonaismäärästä enemmän kuormitetulle raiteelle. Tämä tarkoittaa sitä, että kaksiraiteisella rataosuudella sijaitsevan kantavuuslaskettavan sillan bruttotonnimäärästä voidaan vähentää ainakin 30 %. Koska tässä on tarkasteltu rataosuutta, jossa eri suuntien liikenteen erot ovat suurimmat, voidaan samaa arviota käyttää kaikille kaksiraiteisille radoille. Hyvä periaate kantavuuslaskentaohjeeseen on, että kaksiraiteisilla rataosuuksilla yhden raiteen bruttotonniin määrä on 65–70 % rataosuuden kokonaisbruttotonnimäärästä ja, että samaa määrää käytetään molemmilla raiteilla. On mahdotonta sanoa täysin varmaksi kumpi raide on pitkällä ajalla enemmän kuormitettu. Tässä mainittua vähennystä ei pidä tehdä kaksiraiteisiin, lyhyisiin kohtaamisraiteisiin, joissa yllä mainitut oletukset eivät pidä paikkansa. Ohitusraiteita käytetään ainoastaan junien kohtaamistilanteissa, minkä vuoksi suurin osa liikenteestä keskittyy toiselle raiteelle.

Kolmi- ja useampiraiteiset radat sijaitsevat pääsääntöisesti pääkaupunkiseudulla, jossa osa raiteista on varattu ainoastaan lähiliikenteen käyttöön. Koska kaikkea lähiliikennettä ei ole huomioitu vuoden 1995 jälkeen rautatietilastojen bruttotonnimäärissä ja koska lähiliikenne liikkuu pääsääntöisesti omilla raiteilla, ei yli kaksiraiteisia kauko- ja tavarajuna rataosuuksia katsota olevan. Tämän vuoksi bruttotonnimääriä ei pidä jakaa rohkeammin useampiraiteisten ratojen tapauksissa.

Vuonna 1957 kaksoisraidetta oli Suomen rataverkolla 290 km. Suurin osa tästä muodostui ratayhteydestä Helsingistä Juurikorpeen ja ratayhteydestä Toijalasta Tampereelle [Rautatietilasto 1957]. Jotta useampi raiteisen radan väsytytkuormitusta vähentävä vaikutus voidaan huomioida, on useampi raiteisten ratojen rakentamisvuodet selvitettävä. Vähennyksen voi huomioida vain siltä ajalta, jolloin useampiraiteinen rata on ollut olemassa.

### 2.2.6.1 Kaksoisraiteiden rakentamisvuodet

Useampiraiteisella radalla bruttotonnimäärä jakautuu raiteiden kesken, kuten kappaleessa 2.2.6 on tutkittu. Jotta tämä bruttotonnimäärää vähentävä vaikutus voidaan huomioida, on tiedettävä radan rakentamis- tai perusparannusvuosi, jolloin rata on muuttunut useampiraiteiseksi. Tarkastelu tehdään ainoastaan työn tarpeiden mukaan

kaksoisraiteille. Pääkaupunkiseudun useampiraiteisten ratojen rakentamisvuodet jätetään tarkastelematta. Alla on esitetty tutkittujen kaksoisraideosuuksien rakentamisvuodet. Kaikkien rataosuuksien kaksoisraiteiden rakentamisvuosia ei onnistuttu selvittämään. Vuoden 1956 rautatietilastossa on lueteltu tällöin olemassa olleet kaksoisraiteet. Tämän perusteella voidaan todeta rataosuuksista, joiden kaksoisraiteeksi muuttumisvuotta ei onnistuttu selvittämään, että kyseiset rataosuudet ovat olleet kaksoisraiteisia ainakin vuodesta 1956 lähtien.

Pohjois-Louko–Seinäjäki, 1992  
 Seinäjäki–Ruha, 2012  
 Tampere–Orivesi, 1967  
 Tampere–Lielähti, ainakin 1985  
 Toijala–Tampere, 1953  
 Riihimäki–Toijala, 1961  
 Hyvinkää–Riihimäki, 1910  
 Kerava–Hyvinkää, ainakin 1956

Pasila–Kerava, ainakin 1956  
 Helsinki–Pasila, ainakin 1956  
 Helsinki–Kirkkonummi, noin 1963  
 Kerava–Lahti, 2006  
 Riihimäki–Lahti, ainakin 1956  
 Lahti–Kouvola, ainakin 1956  
 Kouvola–Juurikorpi, ainakin 1956  
 Kouvola–Luumäki, 1957

## 2.3 Rautatiekalusto

Rautatiekalusto on kehittynyt jatkuvasti ensimmäisen rautatieyhteyden rakentamisesta lähtien Helsingin ja Hämeenlinnan välille vuonna 1862. Kaluston kehitys on näkynyt akselipainojen nousuna ja junapituuksien kasvuna. Kaluston kehitystä tulee katsoa yhdessä radan kehittymisen kanssa. Suuremmat akselipainot ovat vaatineet suuremman kiskopainon ja asettaneet lisävaatimuksia ratapenkereelle. Junapituuksia on voitu kasvattaa joko hankkimalla tehokkaimpia vetureita tai muotoilemalla ratojen pituuskaltevuutta siten, että suurimman nousut on saatu loivimmiksi.

Rautatiekalusto voidaan jakaa vetureihin, vaunuihin ja moottorivaunuihin. Veturit ovat junan vetämiseen tarkoitettuja kulkuneuvoja. Veturit voidaan jakaa käyttövoiman perusteella höyry-, diesel- ja sähkövetureihin. Vaunut ovat moottorittomia, joko matkustajien tai tavaroiden kuljettamiseen tarkoitettuja junaan liitettäviä yksiköitä. Moottorivaunut ovat omalla voimallaan kulkevia junayksiköitä. Ne eivät siten tarvitse veturia liikkuaakseen. Moottorivaunu voi olla yksivaunuinen yksikkö tai siihen voidaan liittää liitevaunuja, jolloin puhutaan moottorijunasta. Veturien tapaan, moottorijunat voidaan jakaa käyttövoiman mukaan diesel- ja sähkömoottorijuniin. [Eonsuu et al. 1975] [Eonsuu et al. 1995.]

Liikenne alkoi vuonna 1862 neljällä höyryveturilla ja 12:sta matkustajavaunulla. Lisäksi oli tavaravaunuja. Ensimmäiset kuusi höyryveturia saivat sarjamerkin A1. Höyryveturi painoi 28,7 tonnia ja veturissa oli kahdeksan akselia. Höyryveturit palvelivat rautatieliikenteessä yli sata vuotta. Niiden tilaaminen lopetettiin vuonna 1955 ja viimeiset höyryveturit poistuvat käytöstä vuonna 1975. [Zetterberg, S. 2011, s.29 ja 280–284]

Höyryvetureita tuli korvaamaan 1930-luvulla dieselveturit ja – moottorivaunut. Dieselveturit ja –moottorivaunut alkoivat kuitenkin yleistyä vasta 1950-luvun lopulla johdettua sota-ajan katkoksesta. Dieselvetureita käytetään edelleen Suomen rataverkolla, pääasiassa sähköistämättömillä rataosuuksilla. Vuonna 2011 dieselvetureita oli käytössä 223 kappaletta. Enimmillään dieselvetureita oli 1980-luvulla, noin 400 kappaletta. Dieselmoottorivaunut olivat yleisiä 1950–1980-luvulla. 1970-luvulla näitä oli lähes kolmesataa. Sarjamerkiltään dieselmoottorivaunut olivat tällöin Dm1–Dmg.

Dieselmoottorivaunut poistuivat liikenteestä vuonna 1990, mutta uusia dieselmoottorivaunuja on otettu käyttöön vuonna 2005 lähtien. Nykyään näitä on liikenteessä 16 kappaletta. [Zetterberg, S. 2011, s.29 ja 280–284] [Rautatietilasto 2012 s.46]

Rautateiden sähköistämistä alettiin valmistella 1950-luvun lopulla. Vuoden 1960 dieselveurien tarjouspyynnössä oli vaatimus, että nämä voitaisiin myöhemmin muuttaa sähkökäyttöisiksi. Ensimmäisen sähkörataosuus Helsingin ja Kirkkonummen välillä vihittiin käyttöön 24. tammikuuta 1969 ja liikenne aloitettiin viidellä sähkömoottorijunalla. Sähköveturit ilmestyivät liikenteeseen muutama vuosi myöhemmin. Sähkömoottorivaunut ja -veturit ovat lisääntyneet tasaisesti 1970-luvulta tähän päivään asti samalla kun dieselkäyttöiset veturit ja moottorivaunut ovat vähentyneet. Vuonna 2011 sähkövetureita oli 155 kappaletta ja sähkömoottorivaunuja 158 kappaletta. [Zetterberg, S. 2011, s.29 ja 284–295] [Rautatietilasto 2012 s.46]

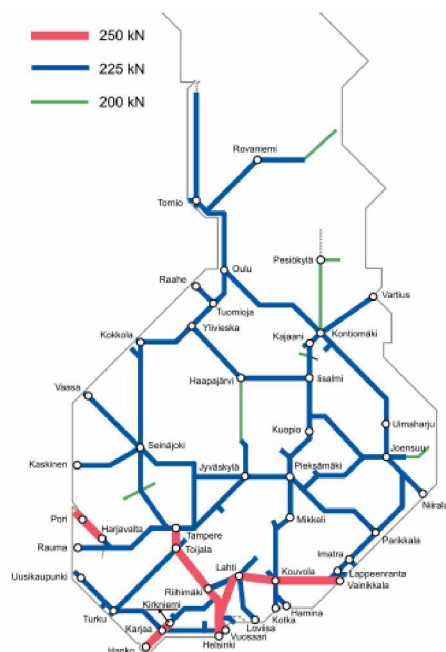
Erilaisten junavaunujen määrä on moninkertainen erilaisten veturien määrään verrattuna. Vaunut voidaan jakaa matkustaja- ja tavaravaunuihin. Erilaisia matkustajavaunuja ovat olleet eri luokkien matkustajille tarkoitettut vaunut, makuuvaunut, konduktöörivaunut, matkatavaravaunut, erilaiset erikois- ja virkavaunuja. Erilaisia tavaravaunuja ovat olleet katetut vaunut, kattamattomat vaunut, säiliövaunut, autovaunut, muut erikois- ja virkavaunut. Lisäksi jokaista tässä mainittua vaunulajia on ollut usein montaa eri tyyppiä. Erityyppisillä vaunuilla on omat sarjatunnukset. Sarjatunnus koostuu usein yhdestä kuuteen olevasta kirjaimesta. [Junaturvallisuussäätöön liittyvät tekniset määräykset ja ohjeet (Jtt) Muutoslehti 4, Rautatievirasto, 2007.]

Junien tavaravaunut lastataan taloudellisesti täyteen joko niin, että akselipaino tai rahdin tarvitsema tila rajoittaa lastausta. Lastatut vaunut kuljetetaan usein järjestelyratapihalle, jossa eri lastauspaikoista tulleista vaunuista kootaan juna. Harvoin kuljettava tavaramäärä on rataosuuksilla molempiin suuntiin sama, joten junaan yhdistetään täysien vaunujen lisäksi tyhjiä vaunuja. Sen vuoksi tavarajunat koostuvat suurimmaksi osaksi täysistä tai tyhjiä vaunuista [Sinisalo, Ilkka, haastattelu 2013]. Siltojen väsymisen kannalta edullisinta olisi mahdollisimman pienet ja tasaiset akselipainot eli vaunut lastattaisiin tasaisesti puolityhjiksi; näin ei kuitenkaan todellisuudessa menetellä. Täysistä ja tyhjiä vaunuista koostuva ominaisjuna vastaa paremmin todellisuutta. Tarkemman ominaisjunan muodostaminen vaatisi esimerkiksi todellisten junien punnitsemista.

Kaluston akselimäärä vetureissa on vaihdellut raskaimpien höyryveturien 12 akselista nykyaikaisten sähkövetureiden neljään akseliin. Vaunujen akselimäärä on tavallisesti kaksi tai neljä. Lisäksi on kolmiakselisia ja useampiakselisia erikoisvaunuja. Neliakseliset vaunut koostuvat usein kahdesta kaksiakselisesta telistä. Suomessa alettiin käyttää telivaunuja matkustusliikenteessä vuonna 1898. Niillä oli merkittävä vaikutus matkustusmukavuuteen. Nykyään lähes kaikki matkustajavaunut ovat telivaunuja, mutta tavaraliikenteessä edelleen on käytössä runsaasti kaksiakselisia tavaravaunuja. [Zetterberg, S. 2011, s.63] [Junaturvallisuussäätöön liittyvät tekniset määräykset ja ohjeet (Jtt) Muutoslehti 4, Rautatievirasto, 2007.]

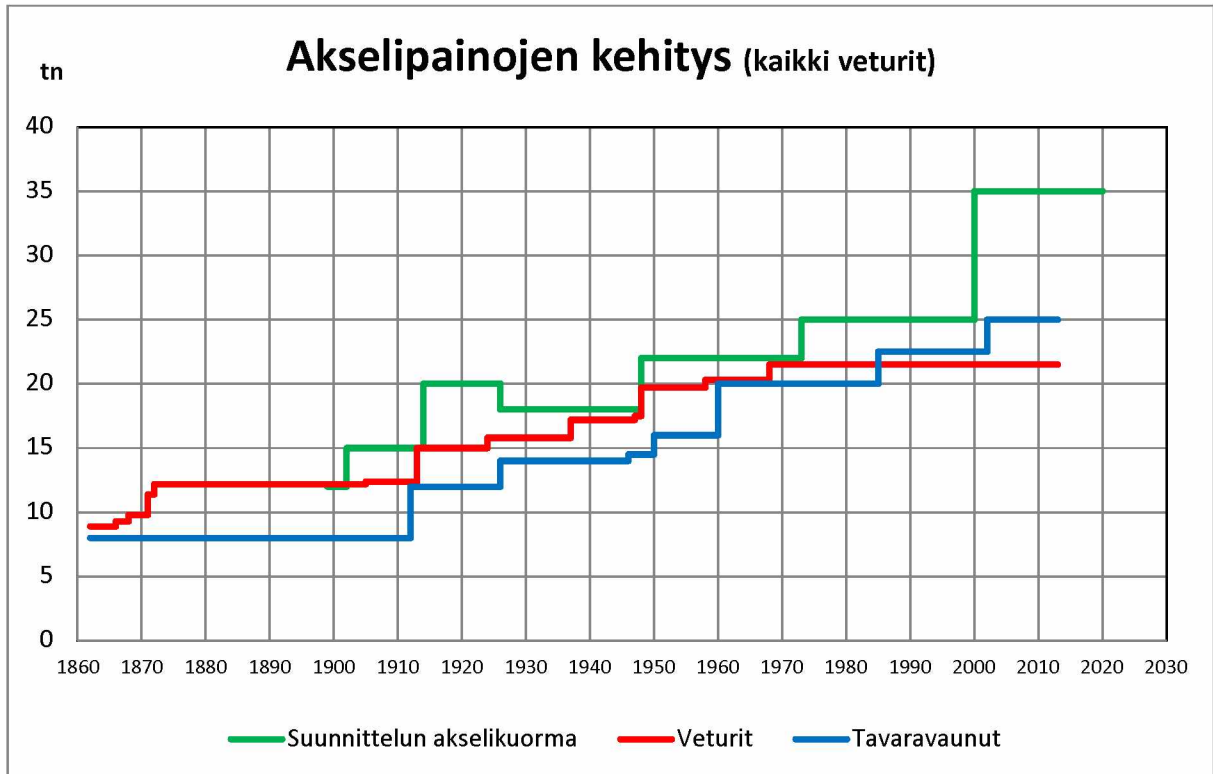
### 2.3.1 Suurimpien akselipainojen kehitys

Ensimmäisen Suomessa liikennöivän, sarjamerkiltään A1 olevan höyryveturin suurin akselipaino oli 8,9 tonnia [Suomen höyryveturit, internetsivu]. Tämän jälkeen akselipainot ovat nousseet aivan näihin päiviin asti. Raskaimmat akselit aiheuttavat suurimmat jännitysvaihtelut siltakannelle lyhyillä silloilla, jossa jokainen teli tai jopa akseli aiheuttaa oman jännitysvaihtelun. Suurimmilla jännitysvaihteluilla on merkittävä vaikutus sillan väsymiskestävyyteen vaikka lukumääräisesti raskaita akseleita on murto-osa vuosien 1900–1985 junissa. Tämä johtuu siitä, että vetureissa on ollut suurimmat akselipainot vaunuihin verrattuna vuoteen 1984 asti. Tämän jälkeen tavaravaunujen akselipainot ovat nousseet veturien akselipainojen ohi. Nykyään akselipainoltaan raskain veturi on sarjamerkiltään Sr1 oleva sähköveturi, jossa on 21,5 tonnin akselipainot. Vaunuja tarkasteltaessa tulee huomata, että venäläiselle kalustolle on sallittu 23,5–24,5 tonnin akselipaino Suomen tietyillä 22,5 tonnin rataosuuksilla erikoisluvalla tietyin edellytyksin. 2000-luvulla valmistuneet rataosuudet on suunniteltu 25 tonnin akselipainolle kuten Kerava–Lahti oikorata. 2000-luvulla rakennetut radan päällysrakenteet ja sillat ovat suunniteltu kuitenkin yleensä 35 tn akselipainoilta. Vanhojen ratojen akselipainoja on myös korotettu tasonnostojen yhteydessä. Kuvassa 2.3 on esitetty rataverkolla suurimmat sallitut akselipainot. Kuvassa ei ole esitetty venäläisen kaluston poikkeusluvalla sallittavia suurimpia akselipainoja.



Kuva 2.3. Rataverkon suurimmat sallitut akselipainot. Lähde: Liikennevirasto 2011.

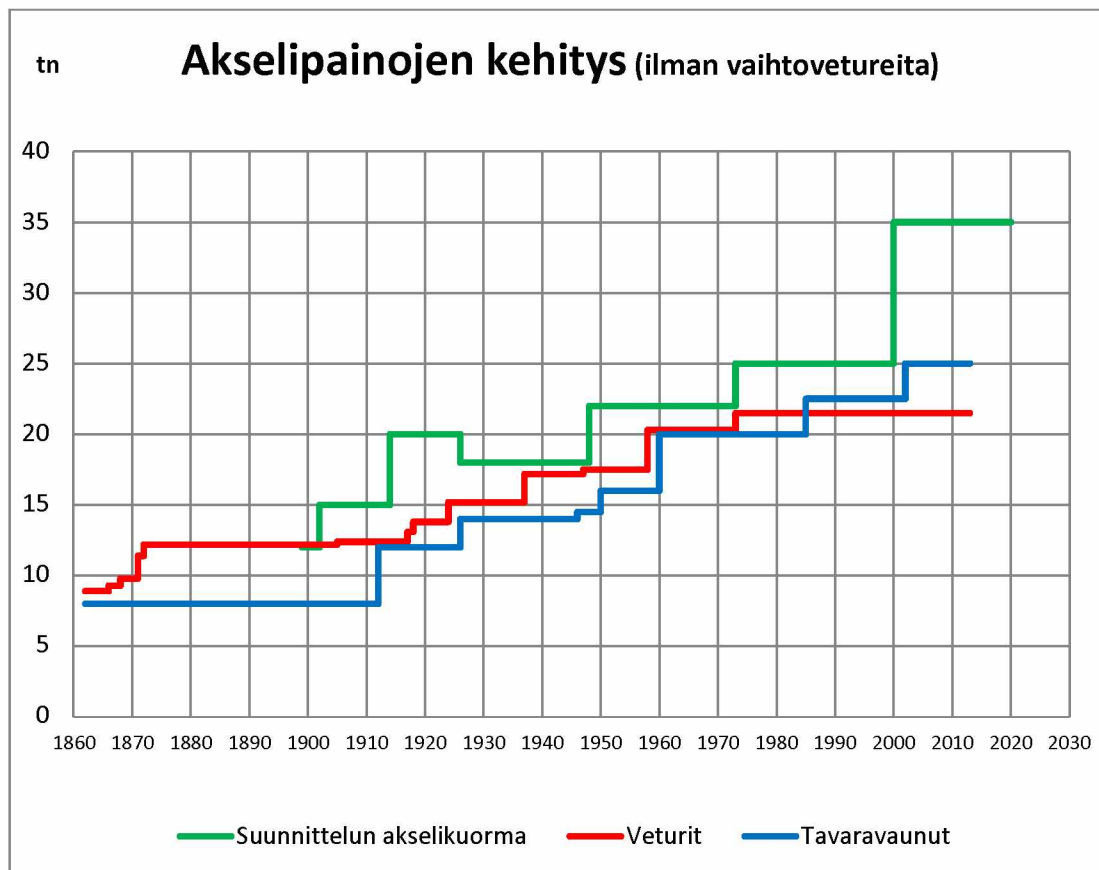
Nykyään Suomen rataverkolla tavaravaunut liikkuvat kuitenkin pääasiassa korkeintaan 22,5 tonnin akselipainolla. Tämä on enemmän mitä raskaimpien vetureiden akselipaino on tällä hetkellä. Raskaimmat akselipainot on huomioitava eri aikajaksojen ominaisjunissa johtuen niiden suuremmasta merkityksestä sillan väsymiseen.



Kuva 2.4. Akselipainojen kehitys Suomessa. Kuvassa on huomioitu kaikki veturit.

Kuvassa 2.4 on esitetty rautatieliikenteen akselipainojen kehitys Suomessa. Kuvassa ei ole huomioitu venäläiselle kalustolle sallittuja suurempia akselipainoja. Nykyään uudet sillat suunnitellaan 35 tonnin akselipainolle ja sadan vuoden käyttöiälle. Vuonna 2000 tehdyllä suunnittelukuorman nostolla on haluttu ennakoita akselipainojen kasvu tulevaisuudessa.

Alla oleva, kuva 2.5 on muuten vastaava kuva kuin kuva 2.4, mutta tarkastelusta on jätetty pois hitaat ja raskaat vaihtoveturit Vr1 (1913), Vr2 (1930), Vr3 (1924), Vr4 (1948), Vr5 (1955) ja Dr14 (1968). Suluissa on esitetty liikenteeseen tulovuosi. Tämä kuva antaa paremman kuvan rautatiesilloilla liikkuvasta veturikalustosta, koska vaihtovetureita käytetään pääasiassa ratapihoilla. Vaihtovetureilla on yleensä muuta veturikalustoa suurempi vetovoima, mutta ne ovat hitaampia. Tämän vuoksi niitä ei juuri käytetä pitkillä matkoilla.



Kuva 2.5. Akselipainojen kehitys Suomessa. Tarkastelusta on jätetty pois hitaat ja raskaat vaihtoveturit Vr1–Vr5 ja Dr14.

### 2.3.2 Rautatiekaluston akselipainot ja mitat

Väsymislaskentaa voidaan tarkentaa sekä ottamalla huomioon paremmin rataosuuden todellinen bruttotonnimäärä sillan elinikänä että huomioida tarkemmin radoilla liikkuva todellinen kalusto. Jälkimmäinen voidaan huomioida muodostamalla eri aikajaksojen ominaisjunat. Ominaisjunalla pyritään kuvaamaan kyseisenä aikakautena liikkuvaa junaa, joka pituudeltaan, kokonaismassaltaan, akselipainoltaan, akselimäärältään ja akseliväleiltään kuvaa mahdollisimman hyvin aikakautensa keskimääräistä junaa.

Nykyään kalusto on erilaista eri rataosuuksilla. Vilkkailta matkustajareiteillä kalusto on usein uudempaa ja junat ovat pidempiä. Vähäliikenteisimmillä reiteillä käytetään vanhempaa kalustoa ja lyhyempiä junia. Tavaraliikenteessä junien pituus on myös riippuvainen rataosuudella kuljetettavan rahdin määrästä. Ominaisjunia ei pystytä muodostamaan rataosuuskohtaisesti, vaikka tämä olisi tarkempien tulosten kannalta parempi. Ominaisjunien muodostaminen rataosuuskohtaisesti vaatisi tilastotietoa kullakin rataosuudella kulkeneista junatyypeistä ja näiden käyttösuuksista. Tämänkaltaisia tilastoja ei ole olemassa. Ko. menettely kasvattaisi myös ominaisjunien lukumäärän erittäin suureksi, pelkästään erilaisia vetureita, moottorijunia ja -vaunuja kun on toista sataa. Muodostetaan jokaiselle 25 vuoden ajanjaksolle yksi ominaismatkustajajuna ja yksi ominaistavarajuna. Näin saadaan huomioitua matkustaja- ja tavaraliikenteen junien erilaiset ominaisuudet. Kohdassa 2.3.3 tutkitaan rataosuuskohtaisesti liikenteen jakautumista matkustaja- ja tavaraliikenteen välillä. Tämän jälkeen pystytään, rataosuuden bruttotonnimäärien avulla, määrittämään sekä matkustajajunien että ominaistavarajunien sillan ylityskerrat ko. rataosuudella.



Vilho Roos on tutkinut rautatiesiltojen väsymistä 1980-luvulla ja RSO 9:n jäljellä olevan käyttöiän laskeminen perustuu tähän tutkimukseen. Roos esittelee tekemäänsä tutkimusta vuoden 1988 Rakennustekniikka-lehdessä, artikkelissa Rautatiesillan väsymiskestävyyden laskeminen. Artikkelissa on esitetty ominaisjunat aikajaksoille 1898–1922, 1923–1947, 1948–1972 ja 1973–1997. Nämä poikkeavat kahdella vuodella tässä työssä esitetyssä aikajaksojaosta, mutta tällä ei katsota olevan suurta merkitystä. Roos on muodostanut kullekin aikakaudelle yhden keskimääräistä tavarajunaa ja yhden keskimääräistä matkustajajunaa vastaavan ominaisjunan. Roosin tutkimuksen mukaiset ominaisjunat ovat esitetty liitteessä 4. Tässä työssä hyödynnetään näitä kahdeksaa ominaisjunaa. Nämä ovat esitetty kuvassa 2.5. Aikakauden 1973–1997 ominaisjunat perustuvat osalta arvioihin, koska artikkeli on julkaistu vuonna 1988. Tämän vuoksi aikakauden 1973–1997 ominaisjunia on syytä tarkastella tarkemmin. Lisäksi muodostetaan uudet kaksi ominaisjunaa, tavaraja- ja matkustajajuna, aikakaudelle 2000–2024. [Artikkeli, Rautatiesillan väsymiskestävyyden laskeminen. 1988. Roos, Vilho.]

### ***Ominaisjunien veturit***

Rautatiesillan väsymiskestävyyden laskeminen, 1988. Roos, Vilho – artikkelin ominaisveturit ovat koottu kuvaan 2.6. Kuvasta voi huomata, että moniakseliset höyryveturit tendereineen ovat olleet yleisimpiä vetureita aikajaksona 1900–1972. Tämä pitää paikkansa, koska dieselveturit alkoivat yleistyä vasta 1950-luvun lopulla ja viimeiset höyryveturit poistettiin käytöstä 1975. Vetureiden liikenteessä oloaikoja on kerätty liitteen 3 taulukkoon. Taulukon muodostamiseen on käytetty lähteinä Suomen veturit, Osa 1, Suomen veturit, Osa 2 ja internet -lähde, Suomen höyryveturit (ks. URL liiteluettelosta).

Roosin tutkimuksessa ominaisveturit ovat muodostettu tutkimalla kunkin aikajakson veturien määrää, veturien pituutta, akselimäärää, akselivälejä ja kokonaismassaa. Tutkimuksessa on laskettu ekvivalentti veturin massa 25-vuotisaikajakson erilaisten veturien avulla. Ekvivalentilla massalla tarkoitetaan Wöhler-käyrän eksponentilla painotettua massaa. Artikkelissa esitetään kaava ekvivalentin veturin massan määrittämiseen, kaava 2.1. Kaava painottaa raskaimpia vetureita. Ekvivalentin veturin massan avulla on valittu veturin pituus, akselivälit ja askelten lukumäärä 25-vuotisjakson kalustoa tutkimalla. Todennäköisesti akselivälit ja -painot ovat valittu todellisesta veturista, joka on ollut lähinnä laskettua ekvivalenttia veturin massaa. Tähän viittaa mm. Roosin muistiinpanot, joissa Hv4-höyryveturin valokuvasta on mitattu akselivälejä. Kokonaispituuden ja kuvasta mitattujen akselivälien avulla on voitu laskea todelliset akselivälit. Näin ollen vuoden 1923–1947 ominaismatkustajajunan akselivälit perustuvat todelliseen Hv4-höyryveturiin. Akselipainoja on kuitenkin muutettu jonkin verran, jotta laskettu Wöhler-käyrän potenssilla painotettu veturin massa on saatu oikeaksi. Kuvaa 2.6 katsomalla voidaan todeta, että myös muissa ominaisvetureissa on käytetty vastaavaa menettelyä. Osa akselikuvioista vastaa täysin ole-massa olevaa kalustoa. Aikajakson 1973–1997 matkustajajuna vastaa pituudeltaan ja akseliväleiltään yleistä sähköveturia Sr1:stä ja tavarajuna Dr13:sta. [Roos, Vilho, 1988] [Eonsuu et al. 1995] [Roos, Vilho, muistiinpanot tutkimukseen Rautatiesillan väsymiskestävyyden laskemiseen liittyen.]

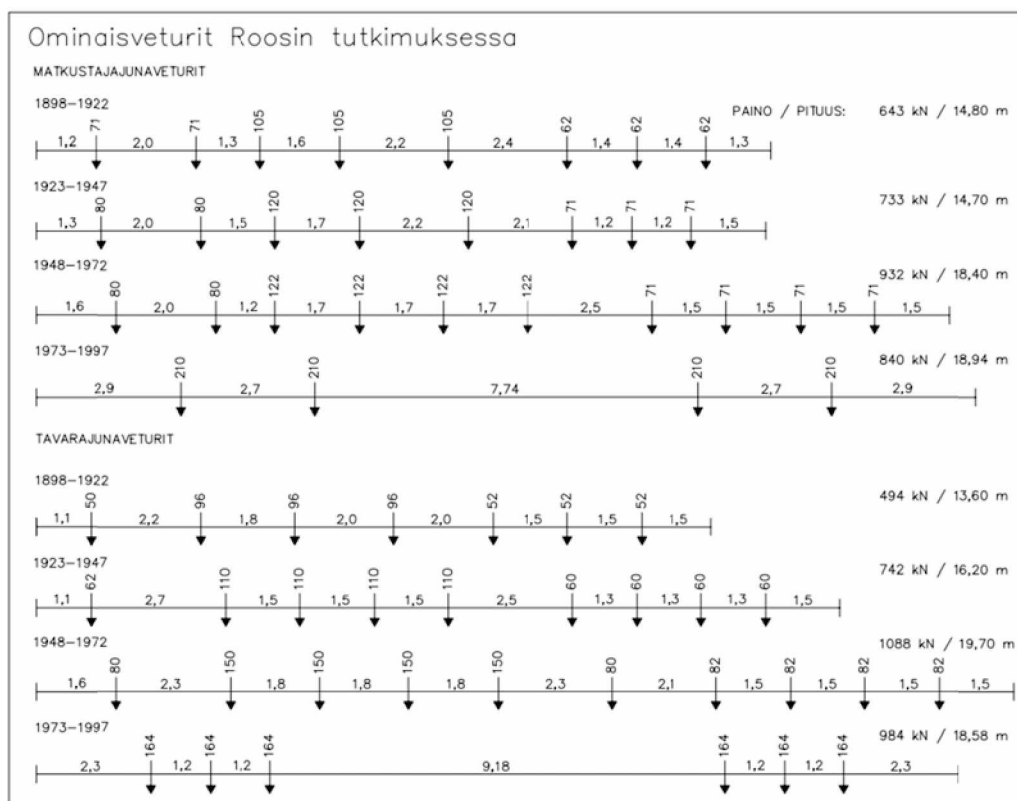
$$Q_{ekv} = \sqrt[m]{\frac{\sum n_i * Q_{im}}{\sum n_i}} \quad (\text{kaava 2.1})$$



Kaava 2.1 on virheellinen, painovirheen vuoksi. Oikea kaava on alla esitetty, kaava 2.2. Artikkelissa on myös muita painovirheitä, kuten artikkelin taulukon 5 sysäyslisän kaavoissa. Palataan näihin kappaleessa 2.5.4. [Haastattelu, Roos, Vilho.]

$$Q_{ekv} = \sqrt[m]{\frac{\sum n_i \cdot Q_i^m}{\sum n_i}} \quad (\text{kaava 2.2})$$

Kaavassa 2.2  $Q_{ekv}$  tarkoittaa tarkasteltavan aikakauden ominaisjunan Wöhler-käyrän eksponentilla painotettua kokonaismassaa,  $Q_i$  aikakauden eri sarjamerkkisten vetureiden kokonaismassoja,  $n_i$  kunkin sarjamerkin kappalemäärää tarkasteltavana aikakautena ja  $m$  on Wöhler käyrän eksponentti [Roos, V. 1988]. Artikkel ei kerro, mitä Wöhler käyrän eksponenttia on käytetty. Laskettaessa aikakauden 1973–1997 ekvivalenttia tavaraveturin massaa kaavalla 2.2, vaikuttaa siltä, että eksponenttina on käytetty neljää.

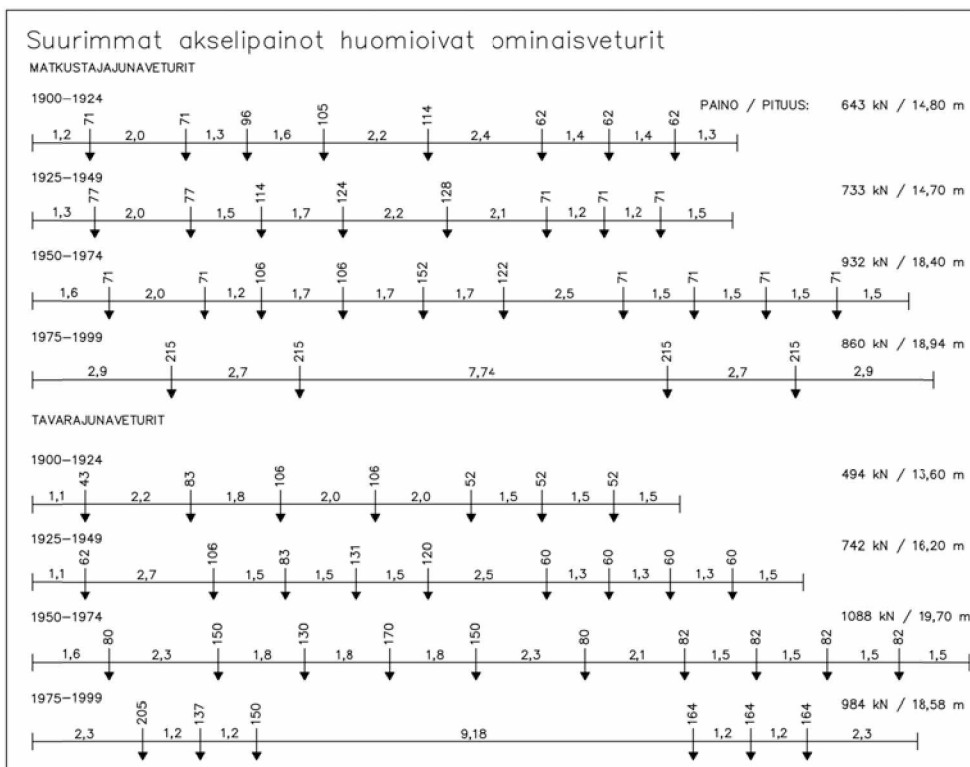


Kuva 2.6. Ominaisveturit Vilho Roosin tutkimuksessa. Lähde: Roos, Vilho. Rautatiesillan väsymiskestävyyden laskeminen. Rakennustekniikka-lehti, 1988. Vol. 44:1. s. 47-60. ISSN 0033-913X.

Ominaisjunia muodostettaessa on huomioitava kappaleessa 2.3.1 kerrottu asia, raskaimpien akselipainojen merkityksestä. Kuvan 2.5 mukaan junan raskaimmat akselit ovat sijainneet veturissa aina 1980-luvun puoleen väliin asti. Roosin tutkimuksessa akselipainoltaan raskaimpia vetureita ei ole painotettu, vaan ominaisjunien veturit ovat määritetty veturin kokonaismassan perusteella painottaen kunkin aikajakson raskaimpia vetureita. Tämän vuoksi myös aikakauden kaikkien ominaisjunien vetureita on syytä tarkastella tarkemmin.

Muokataan Roosin tutkimuksessa käytettyjä ominaisvetureita siten, että ne huomioivat kunkin aikakauden raskaimmat akselit. Tällä on suuri merkitys lyhyille silloille, joiden jännitysvaihtelut kasvavat. Tässä työssä käytettävät ominaisveturit, 2000-luvun ominaisvetureita lukuun ottamatta, on kuvattu kuvassa 2.7. Vain akselipainoja on muutettu verrattuna Roosin tutkimuksen vetureihin. Veturin kokonaispaino on pidetty samana, joten korotettaessa joitain akselipainoja, on toisia kevennetty. Akselipainojen muutoksissa on käytetty seuraavia periaatteita:

- höyryveturien tendereiden akselipainoja ei ole muutettu
- raskaimpia akselipainoja tutkiessa, pois on jätetty vaihtoveturit, työkoneet ja harvinaiset muutaman veturin sarjat
- raskaimman akselipainon omaavan veturin on oltava liikenteessä vähintään puolet kunkin 25-vuotisaikajakson ajasta.
- kunkin aikajakson ominaisjunassa on raskain akselipaino edustettuna vähintään yhtenä akselina. Mikäli raskaimman akselipainon omaava veturi on yleinen ko. aikajakson veturien kokonaismäärään, on raskaimpia akseleita useampia
- raskain ja kevennetty akseli on sijoitettu vierekkäin, jottei veturin massa keskeytä liikaa raskaimman akselin ympärille
- kevennetyissä akseleissa on pyritty käyttämään tyypillisiä aikajakson akselipainoja



Kuva 2.7. Tähän työhön muokatut ominaisveturit. Vetureissa on nyt huomioitu kunkin aikajakson suurimmat akselipainot.

Taulukkoon 2.4 on koottu veturityypit, joihin ominaisjunien raskaimmat akselipainot perustuvat. Taulukossa M tarkoittaa matkustajajunaa ja T tavarajunaa. Lukumäärä tarkoittaa kyseistä sarjamerkkiä valmistettujen vetureiden kokonaismäärää. Sr1-sarjatyypin veturin suurimmaksi akselipainoksi esitetään eri lähteissä 21,0 ja 21,5 tonnia. Valtionrautateiden koneteknillisen toimiston tekniset tiedot -lehtisestä sarja-

merkin Sr1 sähköveturin suurimmaksi akselipainoksi on esitetty 21,0 tn. Rekisterissä saman veturin akselipainoksi on esitetty kuitenkin 21,5 tn. Pidetään luotettavampana tietona viimeistä rekisteritietoa eli 21,5 tonnin akselipainoa. Rekisterissä veturin kokonaismassaksi on merkitty 86 tonnia, joka myös viittaa 21,5 tonnin akselipainoon [VR:n eKalre järjestelmä]. Ristiriidan Sr1 veturin akselipainoissa saattaa selittää myös Sr1 vetureiden korjaustyöt, jossa akselipainoa on saatettu nostaa.

*Taulukko 2.4. Eri aikajaksojen raskaimman akselipainon määrittämiseen käytetyt veturit.*

Veturi ja aikajakso	Käytössä	Sarjatyypit	Lukumäärä	Suurin akselipaino
M 1900–1924	1871–1930	A3	25	11,4 tn
M 1925–1949	1921–1965	Hv3	24	12,8 tn
	1919–1969	Hv2	33	12,7 tn
M 1950–1974	1924–1972	Pr1	16	15,2 tn
M 1975–1999	1973–	Sr1	109	21,5 tn
T 1900–1924	1892–1960	Sk3	88	10,6 tn
	1898–1960	Sk4	20	10,6 tn
T 1925–1949	1917–?	Tv1	142	13,1 tn
T 1950–1974	1940–1957	Tr1	67	17,0 tn
T 1975–1999	1985–	Dr16	23	20,5 tn
	1959–1991	Dr12	42	20,3 tn

#### ***Ominaisjunien vaunut***

Nykyisen kaluston akselipainot ja mitat on koottu Trafín (Liikenteen turvallisuusvirasto) ylläpitämään kalustorekisteriin. Tätä ennen nämä tiedot painettiin Rautatieviraston julkaisemaan lehtiöön, joista uusin muutoslehti on Junaturvallisuussääntöön liittyvät tekniset määräykset ja ohjeet (Jtt) Muutoslehti 4, Rautatievirasto, 2007–09. Tästä ja vanhemmista muutoslehtiöistä on mahdollista selvittää nykyisen kaluston akselipainoja ja kaluston mittoja. Lisäksi VR pitää omaa kalustorekisteriä, eKalre. Hyödynnetään näitä ominaisjunien muodostamiseen aikajaksolle 2000–2024 ja ominaisjunien tarkistamiseen aikajaksolle 1975–1999. Nykyään on yhä käytössä 1960-luvun alun tavaravaunuja. Näitä ovat sarjamerkiltään mm. Hkb, Ob, Oa ja Ome. [Mälkiä Juha, sähköpostikeskustelu 2013.]

1960-lukua vanhempaa vaunukalustoa ei ole tutkittu tämän työn yhteydessä. Aikajakson 1900–1974 ominaisjunien vaunut ovat tässä työssä Roosin tutkimuksen mukaisia. Näille ei ole nähty tarvetta lisätarkasteluihin.

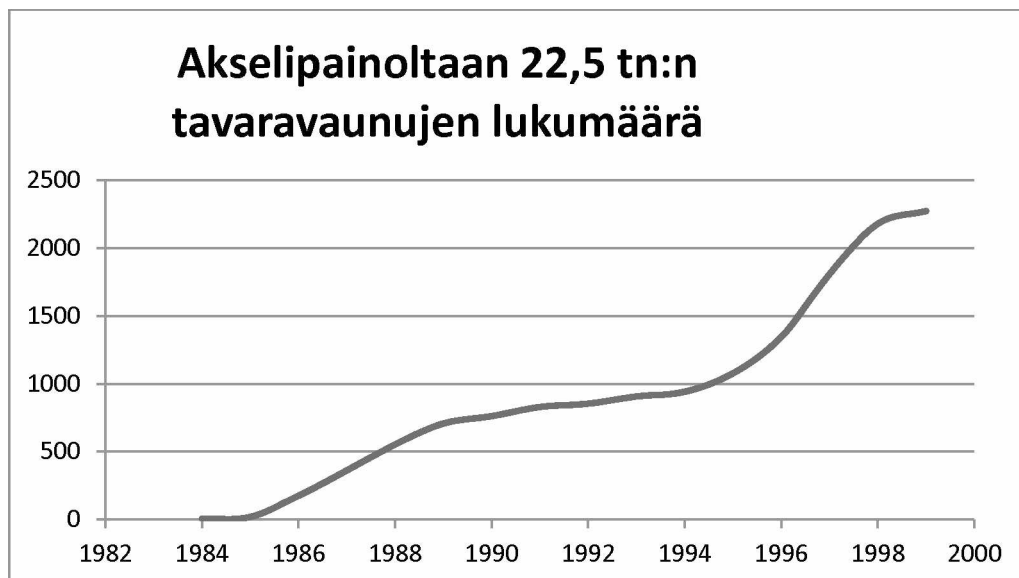
Aikajakson 1975–1999 ominaisjunien vaunuja tulee tarkastella tarkemmin, koska ne perustuvat osalta arvioihin. Matkustajaliikenteen osalta vaunuihin ei tarvitse tehdä muutoksia vaunujen mittojen tai akselivälien puolesta. Uuden yksikerroksisen IC-kaluston liikennöinti alkoi 1980-luvun lopulla ja kaksikerroksisen IC2-kaluston liikennöinti alkoi vuonna 1998. Lisäksi Sm3 (Pendolino) liikennöinti alkoi vuonna 1995. Yksikerroksisen IC-kaluston mitat ja akselipainot eivät juuri poikkea vanhasta sinisestä kalustosta. Sm3 kalusto aloitti liikennöinnin aivan aikajakson lopussa, joten sitä ei kannata ottaa huomioon aikajakson 1975–1999 ominaisjunissa. Lisäksi Sm3 kalus-

to liikkuu ainoastaan tietyillä rataosuuksilla ja työssä tarkastellaan suurempaa kokonaisuutta, koko rataverkkoa. Tämä on toinen syy minkä vuoksi sitä ole mielekästä ottaa huomioon ominaisjunassa. Kappaleessa 2.3.2.1, Uudet ominaisjunat 2000–2024, otsikon alla, Ominaismatkustajavaunut, tutkittujen matkustajavaunujen akselipainojen perusteella kevennetään Roosin aikajakson 1975–1999 ominaismatkustajajunan viiden ominaisvaunutyyppin A akseleita 14,2 tonnista 13,0 tonniin. Kutsutaan näin saatua uutta ominaisvaunua ominaisvaunutyyppiksi C. Muutos keventää ominaisjunaa 24,0 tn. Tällä ei katsota olevan suurta merkitystä. Kevennys lisää hieman laskenneita sillan ylityskertoja, jotta kappaleessa 2.2, Kuormitushistoria rataosuuksittain tutkitut bruttotonnit saadaan täytettyä. Näin ollen veturin ylityskerrat lisääntyvät hieman. Muutoksen myötä, aikajakson 1975–1999 ominaisjuna muodostuu veturista, yhdestä A-tyypin, kahdesta B-tyypin ja viidestä C-tyypin ominaisvaunusta.

Aikajakson 1975–1999 Roosin ominaistavarajunassa oli 35 vaunua, joista 11 kulki tyhjänä. Ominaistavarajunassa ei ole huomioitu 1980-luvun akselipainojen korotusta 22,5 tonniin. 1980-luvun puolivälin tienoilla tuli ensimmäiset 22,5 tonnin vaunut käyttöön Suomen rautateillä [Mälkiä, Juha, Sähköpostikeskustelu 2013]. VR:n kalustorekisterin perusteella ensimmäinen 22,5 tn akselipainoinen tavaravaunu on valmistettu vuonna 1984 ja akselipainoltaan 25 tonnin tavaravaunut 2001 [eKalre järjestelmä, 2013]. Tämä vahvistaa Mälkiän antaman tiedon ja lisäksi voidaan todeta, että aikajakson 1975–1999 ominaistavarajunaan ei kuulu sijoittaa 25 tn tavaravaunuja. Keskimäärin vuosina 1975–1999 Suomessa oli noin 18 200 tavaravaunua [Rautatietilasto 2012]. Jotta ominaisjunaan voisi lisätä yhden 22,5 tonnia akselipainoltaan olevan täyden tavaravaunun tulisi koko aikajaksona 1974–1999 olla keskimäärin käytössä tämän tyyppisiä vaunuja vuosittain:

$$\frac{18200}{35} \approx 520 \text{ kpl}$$

Vuoden 1999 loppuun mennessä Suomessa oli 2274 tavaravaunua, joiden akselipaino on 22,5 tonnia. Olettaen, että näitä uusia raskaamman akselipainon tavaravaunuja on hankittu lineaarisesti vuodesta 1984 lähtien, saadaan vuosittaiseksi keskiarvoksi 730 kpl. Tarkasteltaessa tarkemmin tavaravaunujen hankinta-aikataulua, voidaan huomata, että 1990-luvun lama näkyy hankintojen selvänä vähenemisenä. Kuvassa 2.8 on esitetty akselipainoltaan 22,5 tn tavaravaunujen lukumäärä ajan funktiona. [eKalre järjestelmä, 2013.]



Kuva 2.8. Akselipainoltaan 22,5 tn olevia tavaravaunuja on valmistettu Suomeen vuodesta 1984 lähtien. Lähde: eKalre.

Ottaen huomioon hankinta-ajat on aikajaksona 1975–1999 ollut keskimäärin käytössä 592 ko. akselipainon mukaista tavaravaunua. Näin ollen Roosin aikajakson 1975–1999 ominaistavarajunaa päivitetään korvaamalla yksi, akseleiltaan 20,9 tonnin tavaravaunu akseleiltaan 22,5 tonnin tavaravaunulla. Tällöin ominaisjunan kokonaismassa kasvaa 6,4 tn. Tämä on 4,2 promillea ominaisjunan kokonaismassasta, joten ei pidetä kokonaismassan muutosta merkityksellisenä. Kohdassa 2.3.2.1 esitetään uusien ominaisjunien muodostaminen aikakaudelle 2000–2024, nykyisin käytössä olevan kaluston perusteella.

#### 2.3.2.1 Uudet ominaisjunat 2000–2024

Tässä kappaleessa muodostetaan ominaisjunat ensimmäiselle 25-vuotisajanjaksolle 2000-luvulla. Ominaisjunat muodostetaan vuosien 2011–2013 käytössä olevan kalustotietojen perusteella. Nämä vuodet ajoittuvat sopivasti aikajakson 2000–2024 puoleen väliin. Tämän vuoksi ei huomioida vaikutusta, joka syntyy kaluston korvaamisesta uudempaan.

Ominaisveturit muodostetaan vanhempien ominaisveturien tapaan, Roosin esittämällä kaavalla, kaava 2.2. Kaavan avulla saadaan ominaisvetureiden massa. Tämän perusteella valitaan todellisen kaluston joukosta sopiva veturi ominaisveturiksi. Käytetään samaa Wöhler käyrän eksponenttina kuin Roos käytti, neljää. Yleisesti metalleilla (myös betoniteräs) eksponentti on kolmen ja viiden väliltä. Ilmeisesti Roosin käyttämä eksponentti neljä on yksinkertaistettu likiarvo, jottei materiaaliikohtaisia ominaisjunia tarvitse määrittää. Ominaismatkustajaveturin määrittämisessä eksponentin arvolla ei ole juurikaan väliä, koska erilaisten veturityyppien kokonaismassat ovat hyvin lähellä toisiaan. Tämän vuoksi Wöhler-käyrän eksponentilla painotetuksi massaksi saadaan lähes sama tulos, eksponentin arvoilla 3–9. Ominaisvaraveturia määrittäessä raskaimman ja kevyimmän todellisen veturin ero on 65,6 tonnia. Tämän vuoksi eksponentti vaikuttaa enemmän ominaistavarajunan määrittämiseen. Mitä suurempi eksponentti sitä enemmän kaava 2.2. painottaa kokonaismassaltaan raskaampia todellisia vetureita. Aikakauden 2000–2024 ominaistavaraveturissa raskaimmat akselit ovat tavaravaunuissa, ei veturissa. Tämän vuoksi 2000-luvun omi-



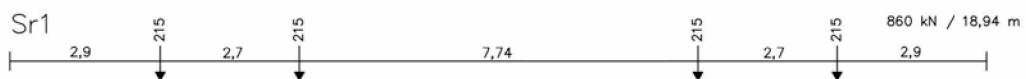
Taulukko 2.5: Matkustajaliikenteen ominaisveturin muodostamiseen käytettävät todelliset veturit.

Sarjamerkki	Lukumäärä tarkastelussa (valmistettu)	Suurin akselipaino	Kokonaismassa
Sr1	73 (109)	21,5 tn	86 tn
Sr2	46 (46)	21,1 tn	82 tn
Dr16	12 (23)	20,5 tn	82 tn

Taulukon 2.5 sarake, lukumäärä tarkastelussa, tarkoittaa ominaismatkustajaveturin Wöhler-käyrän eksponentilla painotetun massan laskentaan otettavien vetureiden lukumäärän. Suluissa on esitetty kyseisen sarjatyypin vetureiden kokonaisvalmistusmäärä. Laskennassa on oletettu, että kaikki Sr2 veturit, kaksi kolmasosaa sarjamerkin Sr1 vetureista ja puolet sarjamerkin Dr16 vetureista palvelevat matkustajaliikennettä. Lasketaan näiden avulla Wöhler-käyrän eksponentilla painotettu massa ominaisveturille kaavalla 2.2.

$$Q_{ekv} = \sqrt[4]{\frac{73 * 86^4 + 46 * 82^4 + 12 * 82^4}{73 + 46 + 12}} \text{ tn} = 84,30 \text{ tn}$$

Laskennassa mukana olevien vetureiden kokonaismassa on lähellä toisiaan. Tämän vuoksi Wöhler-käyrän eksponentilla painotettu veturin massakin poikkeaa vähän todellisista veturien massoista. Wöhler-käyrän eksponentilla painotettu massa on lähellä Sr1 sarjamerkin veturia. Valitaan sarjamerkin Sr1 veturin akselivälit ja kokonaismassa ominaisveturiksi. Näin saadaan sama ominaisveturi, jota käytetään aikajakson 1975–1999 matkustajajunan ominaisveturina. Ominaisveturi on kuvattu kuvassa 2.10.



Kuva 2.10. Matkustajaliikenteen ominaisveturi 1975–2024.

### Ominaismatkustajavaunut

Ominaismatkustajajunan vaunut määritetään VR-Yhtymä Oy kalustorekisterin perusteella. Valtaosa Suomessa olevasta rautatiekalustosta on VR-Yhtymä Oy:n omistamaa. Kalustorekisterissä jokainen liikenteessä oleva vaunu on erikseen rekisteröity. Vaunuilla on sarjatunnus, esimerkiksi sarjatunnukseltaan Ed on normaali IC2-junan kaksikerroksinen vaunu. Saman sarjatunnuksen vaunujen ominaisuudet ovat suurimalta osalta samanlaisia, mutta varsinkin taarapaino saattaa vaihdella saman sarjatunnuksen vaunujen kesken. Lisäksi löytyy vaunuja, joilla on sama sarjatunnus, mutta vaunujen mitoissakin on eroja. Ominaisvaunutyyppejä muodostettaessa, tarkastelusta on jätetty pois sotilasvaunut, autovaunut, lähiliikenteen vaunut, puukoriset vaunut ja VR-Yhtymä Oy:n omatarvevaunut. Lisäksi ei huomioida vain tietyillä rataosilla liikuvia Sm3- (Pendolino) ja Sm6-moottorijunia (Allegro). Tämän jälkeen jää tutkittavaksi 36 eri sarjatunnuksesta matkustajavaunua. Lähes kaikille on yhteistä, pituus, 26 400 mm, akseliväli telissä, 2 500 mm ja akselien lukumäärä, 4 akselia. Akseli-

painoltaan nämä vaunut erottuvat kuitenkin kahteen selkeään ryhmään, vanhojen sinisten vaunujen runsaaseen 14 tonniin ja uusien ICS–vaunujen noin 19 tonniin.

Kalustorekisterissä oleva akselipaino tarkoittaa suurinta sallittua akselipainoa. Matkustajajunat kulkevat ainoastaan erikoistapauksessa maksimi akselipainoisena. Tämän vuoksi on väärin käyttää ominaismatkustajajunassa kalustorekisterin mukaisia akselipainoja. Tämän voi todeta tarkastelemalla kalustorekisterin tietoja esimerkiksi Ed–sarjatunnuksisesta vaunusta. Vaunun taarapaino on 54,0 tn ja kantavuus 22,0 tn. Nämä summaamalla yhteen ja jakamalla neljällä saadaan kalustorekisterissä oleva akselipaino, 19,0 tn. Vaunun kantavuus, 22,0 tn, tarkoittaa 220 henkilön (á 100 kg) määrää samanaikaisesti junavaunussa. Istumapaikkoja vaunussa on 113 kappaletta. Sinisissä vaunuissa kantavuus on pienempi, mutta myös istumapaikkoja on vähemmän. Näin ollen myös näissä on väärin käyttää kalustorekisterin mukaista akselipainoa. [eKalre järjestelmä, 2013.]

Jotta mahdolliset raskaampiakseliset erikoisvaunut ja ruuhkavuorot tulevat huomioitua, muodostetaan ominaisjunaan ominaisvaunuja, joissa on myös kalustorekisterin mukaiset akselipainot (ominaisvaunutyypit A ja C). Sijoitetaan ominaismatkustajajunaan yksi kumpaakin vaunutyyppejä. Muissa vaunutyypeissä käytetään kevyempiä akselipainoja, jotka vastaavat paremmin todellisuutta. Määritetään kevyempi akselipaino siten, että kantavuudesta on keskimäärin 50 % käytössä. Näin saadaan akselipainot vaunutyypeille B ja D. Näin saadaan alun perin kahden selkeän ominaisvaunutyypin sijaan neljä ominaisvaunutyyppejä. Nämä on esitetty taulukossa 2.6. Roosin tutkimuksessa ei ole kevennetty matkustajajunavaunujen akselipainoja, vaan on käytetty vaunujen maksimiakselipainoja.



Taulukko 2.6. Vaunutyyppit aikajakson 2000–2024 ominaismatkustajajunassa.

Vaunutyyppi A						
Akseli lkm.	Pituus	Akselipaino	Kokonais- massa	akseliväli telissä	Sisin akseli- väli	Puskin etäi- syys
4 kpl	26 400 mm	19,0 tn	76,0 tn	2 500 mm	17 300 mm	2 050 mm
Vaunutyyppi B						
Akseli lkm.	Pituus	Akselipaino	Kokonais- massa	akseliväli telissä	Sisin akseli- väli	Puskin etäi- syys
4 kpl	26 400 mm	16,3 tn	65,2 tn	2 500 mm	17 300 mm	2 050 mm
Vaunutyyppi C						
Akseli lkm.	Pituus	Akselipaino	Kokonais- massa	akseliväli telissä	Sisin akseli- väli	Puskin etäi- syys
4 kpl	26 400 mm	14,2 tn	56,8 tn	2 500 mm	16 500 mm	2 450 mm
Vaunutyyppi D						
Akseli lkm.	Pituus	Akselipaino	Kokonais- massa	akseliväli telissä	Sisin akseli- väli	Puskin etäi- syys
4 kpl	26 400 mm	13,0 tn	52,0 tn	2 500 mm	16 500 mm	2 450 mm

Intercity- ja pikajunien keskimääräinen kokonaismassa (veturi mukaan luettuna) on ollut vuonna 2011 499,3 tn [Rautatietilasto 2012 s. 30]. Tämän avulla muodostetaan ominaismatkustajajunan kokonaispituus ja vaunujen lukumäärä. Vähentämällä kokonaismassasta ominaisveturin massa, 84 tn, saadaan vaunujen osuus, 415,3 tn. Tämä tarkoittaa 6–8 vaunua riippuen vaunujen suhteellisista osuuksista. Selvitetään vaunujen suhteelliset osuudet kalustorekisterin perusteella. Oletetaan, että rekisterissä olevat vaunut vastaavat liikenteessä olevia vaunuja, voidaan laskea akselipainoltaan raskaampien ominaisvaunutyyppien (vaunutyyppit A ja B) suhde akselipainoltaan kevyempiin vaunutyyppeihin (vaunutyyppit C ja D). Kappaleen alussa tehtyjen rajausten jälkeen A ja B vaunutyyppijä vastaavia vaunuja on rekisterissä 203 vaunua ja vaunutyyppijä C ja D vastaavia 425 vaunua. Tämän perusteella ominaisjunaan tulee sijoittaa noin kaksi kertaa enemmän vaunutyyppijä C ja D kuin A ja B. Vaunutyyppien lukumäärät ovat esitetty taulukossa 2.7.

Taulukko 2.7. Ominaismatkustajajuna muodostuu seitsemästä vaunusta. Nämä jakautuvat neljään eri vaunutyyppiin, joiden määrät ovat esitetty taulukossa.

Vaunutyyppi A	Vaunutyyppi B	Vaunutyyppi C	Vaunutyyppi D
1 kpl	2 kpl	1 kpl	3 kpl

Taulukon 2.7 mukaisen ominaisjunan kokonaismassaksi tulee 503,2 tn. Tämä vastaa hyvin tilastoitua keskimääräistä matkustajajunan massaa vuonna 2011, 499,3 tn. Kokonaismassa on myös hyvin lähellä Roosin tutkimuksen mukaista ominaismatkustajajunan massaa, 504,0 tn. Tämän perusteella voidaan todeta, että matkustajajunan keskimääräinen massa ei ole noussut 30 vuodessa. Osaltaan tämä johtuu kaksikerroksisista vaunuista, joiden vuoksi junan massa henkilöä kohden on laskenut. Vaunutyyppien C ja D suhde ominaisvaunutyyppisiin A ja B on neljä kolmasosaa, tavoitellun kahden sijaan. Pidetään tätä kokoonpanoa kuitenkin parhaimpana ratkaisuna. Ominaismatkustajajunan vaunujärjestyksellä ei ole kovin paljon merkitystä, koska matkustajavaunujen massat eivät suuresti vaihtelevat, vrt. tavarajuna, jossa on tyhjiä ja täysiä vaunuja. Kappaleen, Ominaisvaunuveturin, lopussa tarkemmin vaunujärjestyksen merkityksestä. Valitaan vaunujärjestykseksi, järjestys, jossa raskaimmat akseliset vaunut ovat junan edessä. Tällöin samanpainoiset vaunut ovat peräkkäin, joka vastaa hyvin todellisuutta. Uusi aikajakson 2000–2024 ominaismatkustajajuna on kuvattu liitteessä 5.

#### Ominaisvaunuveturin

Muodostetaan aikajakson 2000–2024 ominaisvaunuveturin vuonna 2013 käytössä olevien tavaraliikenteeseen käytettävien veturien joukosta. Poistetaan, matkustajaveturitarkastelujen tapaan, tarkastelusta työkoneet, lukumäärältään vähäiset veturisarjamerkit ja akselipainoltaan vaunuja vastaavat moottorijunat ja -vaunut. Tällöin tarkasteluun jää Sr1, Dv12 ja Dr16.

Taulukko 2.8. Tavaraliikenteen ominaisveturin muodostamiseen käytettävät todelliset veturit.

Sarjamerkki	Lukumäärä tarkastelussa (valmistettu)	Suurin akselipaino	Kokonaismassa	Pyörästöpituus / Pituus puskim.
Sr1	36 (109)	21,5 tn	86 tn	13 140 mm / 18 960 mm
Dv12	180 (192)	16,4 tn	65,6 tn	9 800 mm / 14 000 mm
Dr16	11 (23)	20,5 tn	82 tn	12 100 mm / 17 600 mm

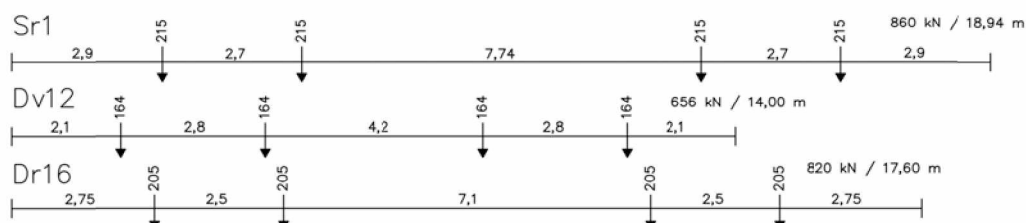
Taulukossa 2.8 on esitetty ominaismatkustajaveturin Wöhler-käyrän eksponentilla painotetun massan laskentaan otettavien vetureiden lukumäärän. Suluissa on esitetty kyseisen sarjatyypin vetureiden kokonaisvalmistusmäärä. Laskennassa on oletettu, että yksi kolmasosa sarjamerkin Sr1 vetureista ja puolet sarjamerkin Dr16 vetureista palvelevat tavaraliikennettä. Dv12-sarjamerkin veturimäärä, 180 veturia, on vuonna 2011 käytössä olevien veturien määrä. Sarjamerkin Dv12-veturia on valmistettu eri malleja, joiden suurin akselipaino on vaihdellut välillä 15,5–16,45 tonnia. Käytetään Wöhler-käyrän eksponentilla painotetun massan laskennassa 16,4 tn.

Suurin junapaino yksinvedossa taulukon 2.8 vetureille on noin 900 tonnia Dv12 veturille, 2000 tonnia Sr1 ja Dr16 vetureille. Keskimääräinen veturivetoisen tavarajunan massa vuonna 2011 oli 1394,7 tonnia [Rautatietilasto 2012 s.30]. Tämä tarkoittaa sitä,

että Dv12 veturi on usein parivedossa. Huomioidaan tämä Wöhler-käyrän eksponentilla painotetun veturin massan laskennassa siten, että puolet Dv12 vetureista on yksinvedossa ja puolet parivedossa. Lasketaan Wöhler-käyrän eksponentilla painotettu massa ominaistavaraveturille kaavalla 2.2.

$$Q_{ekv} = \sqrt[4]{\frac{36 * 86^4 + 90 * 65,6^4 + 90 * 131,2^4 + 11 * 82^4}{36 + 90 + 90 + 11}} tn = 107,93 tn$$

Kaikki tarkasteltavat veturit sisältävät kaksi kaksiakselillista teliä. Taulukon 2.8 vetureiden akselikuviot ovat esitetty kuvassa 2.11.



Kuva 2.11. Kolme tavaraliikenteen käytössä olevaa todellisen veturin akselikuviota.

Wöhler-käyrän eksponentilla painotettu veturin massa ei vastaa täysin minkään todellisen veturin massaa. Tämän vuoksi muodostetaan ominaistavaraveturi seuraavin periaattein:

- kokonaismassa 108,6 tn, joka vastaa edellä laskettua Wöhler-käyrän eksponentilla painotettua veturin massaa
- veturien lukumäärien suhteessa, yksi raskas teli (2 x 21,5 tn) ja kaksi kevyempää teliä (2 x 16,5 tn).
- veturin metripaino suurin piirtein yleisimmän Dv12 veturin mukaan (4,7 tn/m)

Näillä periaatteilla muodostettu ominaistavaraveturi aikajaksolle 2000–2024 on kuvattu kuvassa 2.12.



Kuva 2.12. Tavaraliikenteen ominaisveturi 2000–2024.

### Ominaisvaravaunut

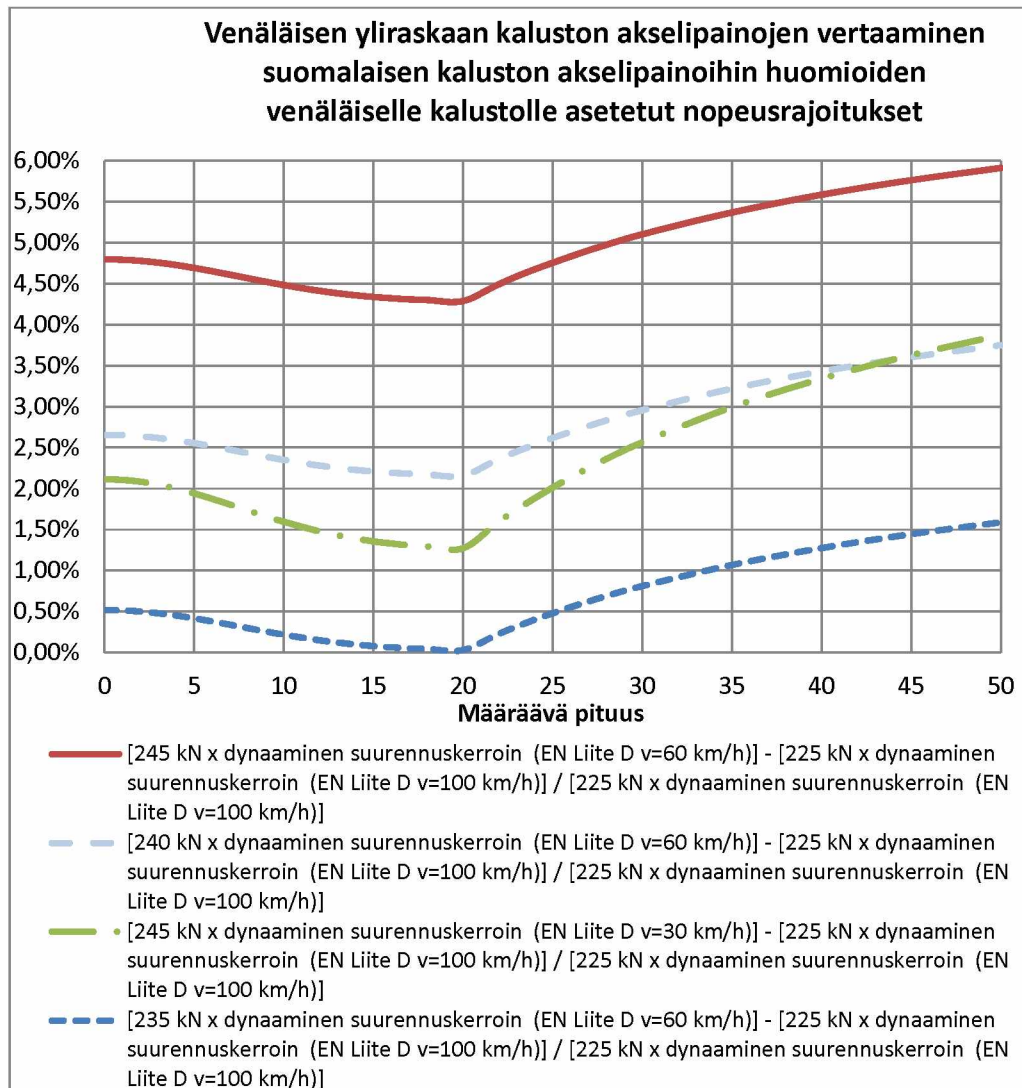
Ominaisvaravaunun vaunut muodostetaan ominaismatkustajajunan mukaisesti. Tavaravaunuilla on matkustajavaunujen tapaan sarjatunnukset. Tavaravaunuilla vaunun ominaisuudet voivat hieman vaihdella saman sarjanumeron sisällä. Tätä ei ole huomioitu vaan tarkasteluun on otettu kunkin sarjatunnuksen tyypillisimmät ominaisuudet. Matkustajavaunuihin verraten, Suomessa käytössä olevia tavaravaunun sarjatunnuksia on huomattavasti enemmän, ainakin yli 120. Tarkastelusta jätetään pois VR-Yhtymä Oy:n omatarvevaunut, virkavaunut, koevaunut, suurkuormaavaunu ja 23 vaunua joiden akseliväleistä ei ole tietoa. Yhteensä poisjätettyjä vaunuja on 87, määrä on pieni verrattuna tarkasteluun olevien tavaravaunujen kokonaismäärään, noin

10 000:teen. Tarkastelussa on 102 eri sarjatunnuksista tavaravaunua, nämä edustavat yli 98 % kaikista kotimaisista VR-Yhtymä Oy:n omistamista tavaravaunuista. Muiden omistamia tavaravaunuja on marginaalinen osuus verrattuna VR-Yhtymä Oy:n omistamien tavaravaunujen lukumäärään. [eKalre järjestelmä, 2013.]

Venäläistä tavaravaunukalustoa ei ole tutkittu tässä työssä. Kuitenkin kappaleessa 2.3.1 mainitaan osan venäläisistä vaunuista olevan akselipainoltaan yli 225 kN ja kulkevan suomalaisilla radoilla, joille on sallittu suurimmillaan 225 kN akselipaino. Jotta venäläinen kalusto voidaan jättää tutkimatta ja rinnastaa suomalaiseen kalustoon, on osoitettava, että ylliraskaalle venäläiselle kalustolle asetetut rajoitukset ovat sitä luokkaa, että rinnastus suomalaiseen 225 kN kalustoon voidaan tehdä. Lähteessä, Rataverkon kuvaus 1.1.2013 (LO 4/2012), esitetään vaatimukset ylliraskaan kaluston liikennöinnille. Ko. lähteessä venäläisestä kalustosta käytetään nimitystä itäinen yhdysliikenne. Ylliraskaita kuljetuksia sallitaan ainoastaan tilapäisen tarpeen esiintyessä. Tällaiseksi voidaan lukea esimerkiksi Venäjältä tulevat valmiiksi lastatut ylliraskaat vaunut, joiden kuorman uudelleensijoittamista massan pienentämiseksi rajalla ei voida pitää järkevänä. Kuorman uudelleensijoittamista edullisempi ratkaisu on rajoittaa junan nopeutta. Ylliraskaat kuljetukset jaetaan kahteen luokkaan akselipainon mukaan, 225–235 kN ja 235–245 kN. Useampia akselipainoltaan 225–235 kN olevia vaunuja sisältävän junan nopeus rajoitetaan 60 km/h. Tätä raskaamman liikenteen (akselipaino 235–245 kN) liikennöinnille haetaan lupaa Liikenneviraston Rataliikennekeskuksesta tai Väylätekniikkaosastolta. Luvassa annetaan tapauskohtaiset vaatimukset ylliraskaan liikenteen liikennöinnille. Yksittäisiä ylliraskaita vaunuja sisältäviä junia edellä mainitut määräykset eivät koske. [Liikenneviraston väylätietoja 4/2012. Rataverkon kuvaus 1.1.2013. Helsinki 2012 s.25–27]

Yksi menetelmä tarkastella itäisen yhdysliikenteen nopeusrajoitusten vaikutusta, on vertailla nopeuden huomioivalla dynaamisella suurennuskertoimella kerrottuja akselipainoja. Kappaleessa 2.5 on käsitelty erilaisia dynaamisia suurennuskertoimia. Käytetään vertailuun eurokoodin 1991-2, liitteen D mukaista nopeudesta riippuvaa dynaamista suurennuskerrointa. Lasketaan suomalaisen kaluston maksimiakselipaino, kun huomioidaan dynaamiset vaikutukset suomalaisen tavarajunan maksiminopeudella, 100 km/h. Verrataan näin saatua akselipainoa kevyemmän luokan (225–235 kN) ylliraskaan liikenteen akselipainoon, jossa on huomioitu dynaamiset vaikutukset rajoitetulla maksiminopeudella, 60 km/h. Samanlaiset tarkastelut on tehty raskaamman luokan (235–245 kN) ylliraskaan liikenteelle. Koska määrätyt rajoitukset raskaamman luokan (235–245 kN) ylliraskaan liikenteelle ovat tapauskohtaisia, on tyydytty tarkastelemaan tätä kahdella eri nopeudella, 60 km/h ja 30 km/h.

Tarkastelun tulokset ovat esitetty kuvassa 2.13. Kuvasta voidaan havaita, että akselipainoltaan 235 kN olevan junan vaikutukset huomioiden kyseisen liikenteen alennettu nopeus, eivät ole merkittävästi suurempia kuin nopeammin liikkuvan, akselipainoltaan 225 kN olevan junan. Silloilla, joilla määräävä pituus (jänneväli) on alle 25 m, on ero alle puoli prosenttia. Suurin osa betonisista rautatiesilloista on alle 25 m pitkiä. 20 m määräävällä pituudella ero on häviävän pieni, alle 8 kiloa. Pidemmällä jänneväleillä, yli 25 m, ero kasvaa, koska jännevälin kasvaessa kaluston nopeuden merkitys dynaamiseen suurennuskertoimeen vähenee. Todetaan tarkastelun perusteella, että betonisten rautatiesiltojen kohdalla ainakin akselipainoltaan korkeintaan 235 kN oleva ylliraskas liikenne voidaan jättää huomioimatta ominaistavarajunasta.



Kuva 2.13. Yliraskaan liikenteen pystykuormituksen vaikutusten ero normaaliin, akselipainoltaan 225 kN olevaan liikenteeseen verrattuna. Eri käyrät kuvaavat eri akselipainoltaan erilaisten ja eri nopeuksilla liikkuvaa ylraskasta liikennettä.

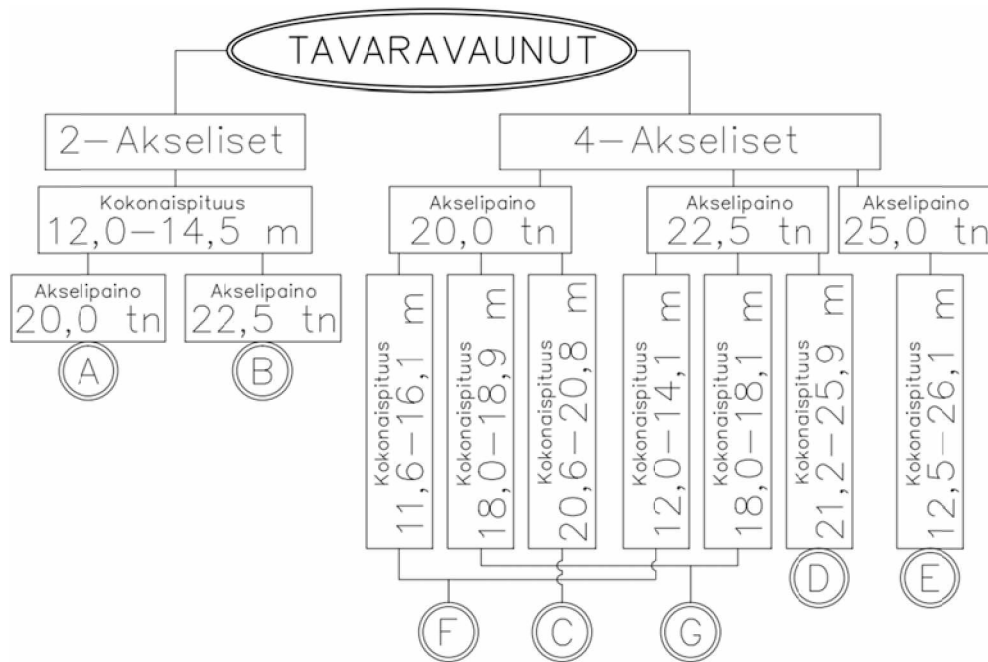
Akselipainoltaan 235–245 kN olevan ylraskaan liikenteen vaikutus on suurempi. Kuvan 2.13 perusteella yksittäisen massaltaan 245 kN ja nopeudeltaan 60 km/h liikkuvan akselin vaikutus on sillan jännevälillä riippuen 4,3–6 % suurempi kuin sallittu 225 kN akseli aiheuttaa nopeudella 100 km/h. Tarkasteltaessa pidempiä jännevälisiä kuin kuvassa 2.13 on esitetty, ero kasvaa entisestään. Betoniset rautatiesillat ovat kuitenkin lähes aina määräväältä pituudeltaan alle 30 m. Erikoisluvalla liikkuvat junat eivät kuitenkaan aina sisällä suurimman mahdollisimman akselipainon, 245 kN, olevia aksleita, vaan todellisuudessa akselipainot ovat 235 kN ja 245 kN välillä. Lisäksi usein erikoisluvalla liikkuvassa junassa on vain joitakin ylraskaita aksleita. Harvemmin junan kaikki akselit ovat ylraskaita.

Liikennevirasto pitää kirjaa ylraskaille junille myönnettyistä erikoisluvista. Tässä tutkimuksessa on ollut käytettävissä tilastot, myönnettyistä erikoisluvista aikaväliltä 1.1.2012–3.6.2013. Tämän perusteella erikoislupia on myönnetty vuonna 2012 58 erikoislupaa. Nämä luvat ovat sisältäneen reilut 550 yli 235 kN painoista akselia. Vuosi 2013 näyttää lupien määrän suhteen seurailevan vuoden 2012 tasoa, mutta lupien

sisältämiä yli 235 kN:n aksleita tulee olemaan muutama sata enemmän. Keskimäärin erikoisluvalla liikkuvassa junassa on ollut 12 yli 235 kN:n painoista akselia. Keskiarvo erikoisluvalla liikkuvien junien suurimmasta akselipainosta on 239,1 kN. Lähes kaikkien erikoisluvalla liikkuvien junien lähtöpaikka on Vainikkala. Tyypillisimmät ylitaskaiden junien määräasemat aikavälillä 1.1.2012–3.6.2013 ovat Kotkan Mussalo (78 %), Kouvola (6 %), Lahti (5 %) ja Kuusankoski (4 %). Vain kahdelle junalle, aikavälillä 1.1.2012–3.6.2013, on myönnetty erikoislupa muille rataosuuksille kuin Lahti–Kouvola, Kouvola–Mussalo, Kouvola–Kuusankoski tai Kouvola–Vainikkala. Kuvan 2.3 mukaan näistä rataosuuksista Lahti–Kouvola ja Kouvola–Vainikkala on sallittu 25 tn akselipainolle. Näillä kahdelle junalle on määrätty tavallista alhaisempi suurin sallittu nopeus, 35 km/h. [Toikkanen, Simo, sähköpostikeskustelu 2013.]

Näiden tarkasteluiden perusteella akselipainoltaan yli 235 kN oleva ylitaskas liikenne rajoittuu muutamalle Etelä-Suomen rataosuudelle. Lisäksi 500–1000 ylitaskasta akselia on murto-osa rataosuuksilla liikkuvasta bruttotonnimäärästä. Nämä yli 235 kN painavat ylitaskaat akselit muodostavat alle 0,2 % rataosuuden Luumäki–Vainikkala vuoden 2012 kokonaisbruttotonnimäärästä, 14,3 milj. br. tn. Ylitaskaan liikenteen sijoittumisen vuoksi ylitaskaan liikenteen aiheuttamaa 0–5 %:n korotusta akselipainoihin ei tarvitse ottaa huomioon koko Suomen kattavassa ominaisjunassa. Ongelman voisi ratkaista muodostamalla kaksi aikajakson 2000–2024 ominaistavarajunaa, jossa toisessa on mukana 25 tn tavaravaunu ja toisessa ei ole. Tällöin rataosuuksille, joille on sallittu ainoastaan 22,5 tn, ei tarvitsisi käyttää ominaistavarajunaa, jossa on 25 tn akselipainoja. Toisella junalla, jossa on 25 tn aksleita, huomioitaisiin yli 235 kN:n ylitaskaan liikenteen pääasialliset reitit ja rataosuudet, joille on sallittu 25 tn akselipainot. Toinen yksinkertaisempi vaihtoehto on käyttää koko Suomeen ominaistavarajunaa, jossa on mukana 25 tn aksleita. Päädytään käyttämään yksinkertaista vaihtoehtoa.

Tavaravaunuja on hankittu moneen eri käyttötarkoituksen, esimerkiksi säiliövaunuja nesteiden ja kaasujen, avovaunuja tukkien ja teräksen kuljettamiseen. Tämän vuoksi erilaisia tavaravaunuja on runsaasti. Käytössä olevat todelliset vaunut pyritään jakamaan matkustajavaunujen tapaan ominaistyyppivaunuihin. Tavaravaunuja vastaavia ominaisvaunutyyppejä tulee olemaan enemmän kuin matkustajavaunutyyppejä joutuessaan erilaisten tavaravaunujen runsaudesta. Lisäksi tavaravaunuissa tulee huomioida, että osa vaunuista kulkee tyhjänä. Tämä lisää entisestään ominaisvaunutyyppeiden määrää. Jaettaessa todellisia tavaravaunuja ominaisvaunutyyppeihin, ei välitetä vaunun käyttötarkoituksesta vaan jaetaan tavaravaunut ryhmiin kokonaispituuden, akselimäärän, akselivälien, puskin etäisyyden ja akselipainon perusteella. Vaunut ovat jaettu tyyppivaunuihin kuvassa 2.14 olevan kaavion mukaisesti. Vaikka kaaviossa esitetään tekijöinä ainoastaan akselien lukumäärä, kokonaispituus ja akselipaino, on jaottelussa katsottu myös termien, akseliväli telissä ja puskin etäisyys asettuvan hyvin jaettavien A–G luokkien kesken.



Kuva 2.14. Kaavio, jonka perusteella tavaravaunut on jaettu tyyppivaunuiksi A, B, C, D, E, F ja G.

Ominaistavarajunan täydet ominaisvaunut ovat esitetty taulukoissa 2.9–2.11. Täysiä vaunuja esittäviä vaunutyyppijä on yhteensä seitsemän kappaletta. Määrää saatiin pienennettyä yhdistelemällä kahden kokonaispituudeltaan vastaavan mutta akselipainoiltaan eroavan luokan ominaisuuksia yhdeksi tyyppivaunuksi. Näin muodostetut vaunutyyppit ovat F ja G. Kuvassa 2.14 on esitetty mihin kahteen luokkaan vaunutyyppit F ja G perustuvat.

Ominaistavarajunan vaunutyyppit on muodostettu kunkin luokan keskimääräisistä ominaisuuksista tai mikäli lukumäärällisesti joku todellinen tavaravaunu on hallitseva, on todellisen vaunun ominaisuudet otettu suoraan ominaistyyppivaunun ominaisuuksiksi. Vaunutyyppit A ja B ovat kaksiakselisia vaunuja, joita on lähes kolmasosa kaikista tavaravaunuista. Kaksiakselisia vaunuja on kahta eri akselipainoa, 20,0 tn ja 22,5 tn, joten nämä nähtiin selkeinä tyyppivaunuina. Vaunutyyppit A ja B on esitetty taulukossa 2.9.

Taulukko 2.9. Kaksiakseliset täydet ominaisvaunutyytit A ja B.

Vaunutyyppi A					
Akseli lkm.	Pituus	Akselipaino	Kokonaismassa	Sisin akseliväli	Puskin etäisyys
2 kpl	14 000 mm	20,0 tn	40,0 tn	8 600 mm	2 700 mm
Vaunutyyppi B					
Akseli lkm.	Pituus	Akselipaino	Kokonaismassa	Sisin akseliväli	Puskin etäisyys
2 kpl	14 000 mm	22,5 tn	45,0 tn	8 000 mm	3 000 mm

Taulukko 2.10. Neliakseliset täydet ominaisvaunutyytit C, D ja E.

Vaunutyyppi C						
Akseli lkm.	Pituus	Akselipaino	Kokonaismassa	akseliväli telissä	Sisin akseliväli	Puskin etäisyys
4 kpl	20 680 mm	20,0 tn	80,0 tn	2 000 mm	13 000 mm	1 840 mm
Vaunutyyppi D						
Akseli lkm.	Pituus	Akselipaino	Kokonaismassa	akseliväli telissä	Sisin akseliväli	Puskin etäisyys
4 kpl	21 240 mm	22,5 tn	90,0 tn	1 800 mm	14 200 mm	1 720 mm
Vaunutyyppi E						
Akseli lkm.	Pituus	Akselipaino	Kokonaismassa	akseliväli telissä	Sisin akseliväli	Puskin etäisyys
4 kpl	18 040 mm	25,0 tn	100,0 tn	1 800 mm	11 200 mm	1 620 mm

Neliakselisia vaunuja on noin kaksi kolmasosaa kaikista tavaravaunuista. Näiden jakaminen rajalliseen määrään vaunutyyppiä ei ole täysin selkeää, vaunujen ominaisuudet ovat moninaisia. Vaunutyytit C ja D edustavat oman akselipainoluokan kokonaispituudeltaan pisimpiä vaunuja. Vaunutyyppi E sisältää kaikki todelliset akselipainoltaan 25,0 tonnin tavaravaunut, kokonaispituudesta riippumatta. Vaunutyytin E kokonaispituus on valittu lukumäärällisesti yleisimmän akselipainoltaan 25,0 tonnin todellisesta tavaravaunusta. Vaunutyytit C, D ja E on esitetty taulukossa 2.10.



Erialaisten vaunutyyppien määrää vähennettiin, yhdistelemällä vaunujen ominaisuuksia samaan vaunutyyppiin. Nämä yhdistetyt ominaisvaunutyyppit ovat F ja G. Ominaisvaunutyyppiin F on yhdistetty neliakselisia, kokonaispituudeltaan 11,6–16,1 m ja akselipainoltaan 20,0 tn tai 22,5 tn olevia todellisia tavaravaunuja. Kokonaispituudeltaan 11,6–16,1 m ja akselipainoltaan 20,0 tn olevia todellisia vaunuja on lähes yhtä paljon mitä samanpituisia, mutta akselipainoltaan 22,5 tn olevia vaunuja on. Tämän vuoksi valittiin tyyppivaunuun yksi teli kumpaakin akselipainolajia. Vaunutyyppiin G muodostaminen perustuu samaan ajatteluun. Vaunutyyppien F ja G kokonaispituudet ja puskin etäisyydet ovat todellisten vaunutyyppien lukumäärän perusteella painotettuja keskiarvoja. Vaunutyyppit F ja G on esitetty taulukossa 2.11.

Taulukko 2.11. Neliakseliset täydet ominaisvaunutyyppit F ja G.

Vaunutyyppi F						
Akseli lkm.	Pituus	Akselipaino	Kokonais-massa	akseliväli telissä	Sisin akseli-väli	Puskin etäisyys
4 kpl	13 140 mm	20,0 / 22,5 tn	85,0 tn	2 000 / 1 800 mm	5 700 mm	1900 / 1 740 mm
Vaunutyyppi G						
Akseli lkm.	Pituus	Akselipaino	Kokonais-massa	akseliväli telissä	Sisin akseli-väli	Puskin etäisyys
4 kpl	18 020 mm	20,0 / 22,5 tn	85,0 tn	2 000 / 1 800 mm	10 100 mm	2 500 / 1 620 mm

Todellisia vaunuja tarkasteltaessa, voidaan huomata, että mitä suurempi akselipaino sitä pienemmät ovat akseliväli telissä ja sitä pienemmät puskin etäisyydet. Tämä on huomattavissa myös muodostetuista tyyppivaunuista.

Matkustajavaunujen mukaisesti oletetaan, että rekisterissä oleva vaunukalusto vastaa liikenteessä olevaa kalustoa. Tällöin voidaan valita ominaistavarajunan vaunujen suhteelliset osuudet kunkin todellisten vaunulukumäärien perusteella. Vaunujen sarjatunnuskohtaiset lukumäärät katsotaan kuuluvan yrityssalaisuuden piiriin, jonka vuoksi sarjatunnuskohtaisia vaunulukumääriä ei julkaista tässä työssä. Taulukossa 2.12 on esitetty kunkin geometrisen ominaisvaunutyyppiin osuus ominaisjunassa. Geometrisen ominaisvaunutyyppiin osuuksia, koska täysien ominaisvaunutyyppien lisäksi ominaisjunaan tulee tyhjiä ominaisvaunutyyppijä.

Taulukko 2.12. Geometrinen ominaisvaunutyyppien suhteelliset osuudet ominaistavarajunassa.

A/H	B/I	C/J	D	E	F/K	G/L
15,2 %	21,1 %	28,2 %	3,5 %	3,3 %	15,0 %	13,7 %

Tyhjät ominaisvaunutyyppit ovat geometrisesti samanlaisia kuin ominaisvaunutyyppit A–G, mutta akselipainot ovat huomattavasti pienempiä. Ominaisjunaan tulee ominaistyyppivaunuja 25–35, jotta ominaistavarajuna vastaisi todellisen tavarajunan keskimääräistä massaa. Tämän ja taulukon 2.12 perusteella ominaistavarajunassa on yksi D ja yksi E tyyppin ominaistyyppivaunu. Vaunutyyppin E mukaan ottamisen voi kyseenalaistaa sillä perusteella, että Suomen rataverkolla ei ole paljon 25,0 tonnin rataosuuksia. Vaunutyyppi on kuitenkin otettu mukaan, koska Suomen rataverkolla liikkuu venäläistä tavaravaunukalustoa, joissa on yli 22,5 tonnin akselipainoja. Vaunutyyppien D ja E prosentuaaliset osuudet ovat niin pieniä, ettei geometrisesti vastaavia tyhjiä vaunutyyppijä kannata muodostaa. Muodostetaan geometrisesti vastaavia tyhjiä ominaisvaunutyyppijä täysistä vaunutyypeistä A, B, C, F ja G. Tyhjät vaunut saavat kirjaintunnukset H, I, J, K ja L.

Taulukko 2.13. Kaksiakseliset tyhjät ominaisvaunutyyppit H ja I.

Vaunutyyppi H					
Akseli lkm.	Pituus	Akselipaino	Kokonais-massa	Sisin akseli-väli	Puskin etäisyys
2 kpl	14 000 mm	6,7 tn	13,4 tn	8 600 mm	2 700 mm
Vaunutyyppi I					
Akseli lkm.	Pituus	Akselipaino	Kokonais-massa	Sisin akseli-väli	Puskin etäisyys
2 kpl	14 000 mm	7,3 tn	14,6 tn	8 000 mm	3 000 mm

Taulukossa 2.13 on esitetty kaksiakselisten tyhjien vaunujen ominaisvaunutyyppit H ja I. Nämä vastaavat geometrisiltä ominaisuuksiltaan täysiä ominaisvaunutyyppijä A ja B. Kuten aiemmin on todettu, tavaravaunut lastataan joko täyteen tai muuten ne kulkevat tyhjinä. Puolitäysiä vaunuja syntyy käytännössä ainoastaan tapauksissa, jossa rahti on tilavuudeltaan niin suurta, ettei vaunun maksimikantavuutta voida hyödyntää. Näitä puolitäysiä vaunuja ei huomioida ominaisjunnassa, vaan vaunut ovat joko täysiä tai tyhjiä.

Tyhjien vaunutyyppien akselipainoja on laskettu sen verran, että koko vaunun kokonaismassa on saatu vastaamaan rekisterissä olevaa taarapainoa. Laskennassa on käytetty todellisten vaunujen lukumäärällä painotettua keskiarvoa taarapainosta. Näin on menetelty myös taulukossa 2.14 esitettyjen neliakselisten tavaravaunujen kanssa.

Taulukko 2.14. Neliakseliset tyhjät ominaisvaunutyyppit J, K ja L.

Vaunutyyppi J						
Akseli lkm.	Pituus	Akselipaino	Kokonais-massa	akseliväli telissä	Sisin akseli-väli	Puskin etäisyys
4 kpl	20 680 mm	5,7 tn	22,8 tn	2 000 mm	13 000 mm	1 840 mm
Vaunutyyppi K						
Akseli lkm.	Pituus	Akselipaino	Kokonais-massa	akseliväli telissä	Sisin akseli-väli	Puskin etäisyys
4 kpl	13 140 mm	6,1 / 6,3 tn	24,8 tn	2 000 / 1 800 mm	5 700 mm	1900 / 1 740 mm
Vaunutyyppi L						
Akseli lkm.	Pituus	Akselipaino	Kokonais-massa	akseliväli telissä	Sisin akseli-väli	Puskin etäisyys
4 kpl	18 020 mm	6,1 / 6,5 tn	25,2 tn	2 000 / 1 800 mm	10 100 mm	2 500 / 1 620 mm

Aikajakson 2000–2024 ominaistavarajuna muodostuu yhteensä 12 erilaisesta ominaisvaunutyyppistä, A–L. Tavarajunan keskimääräinen massa (veturi mukaan luettuna) on ollut vuonna 2011 1394,7 tn. Tavaravaunujen tyhjänäkulkuprosentti on ollut vuosina 2009–2011 45 %. [Rautatietilasto 2012 s. 29–30] Näiden tietojen ja taulukon 2.12 avulla voidaan laskea kunkin ominaisvaunutyyppin lukumäärä ominaistavarajunassa.

Taulukko 2.15. Ominaisvarajuna muodostuu 29 vaunusta. Nämä jakautuvat kahdeksatoista eri vaunutyyppiin, joiden määrät ovat esitetty taulukossa.

Vaunutyyppi A	Vaunutyyppi B	Vaunutyyppi C	Vaunutyyppi D
2 kpl	4 kpl	4 kpl	1 kpl
Vaunutyyppi E	Vaunutyyppi F	Vaunutyyppi G	Vaunutyyppi H
1 kpl	2 kpl	2 kpl	2 kpl
Vaunutyyppi I	Vaunutyyppi J	Vaunutyyppi K	Vaunutyyppi L
3 kpl	4 kpl	2 kpl	2 kpl

Aikajakson 2000–2024 ominaistavarajuna muodostuu yhteensä 29 ominaisvaunusta. Määrä jakautuu ominaisvaunutyypeihin taulukon 2.15 mukaisesti. 13 ominaisvaunua edustaa tyhjiä vaunuja. Tämä on 44,8 % koko ominaisjunan vaunumäärästä. Massaa näistä 29 ominaisvaunusta kertyy 1371,8 tn. Tähän kun lisätään ominaistavaraveturin massa, 107,6 tn, saadaan kokonaisuudessaan ominaistavarajunalle, 1479,4 tn.

Ominaisavarajunan vaunujärjestyksellä on suuri merkitys pitkillä silloilla. Lyhyillä jänneväleillä jokainen teli tai akseli aiheuttaa oman suuren jännitysheilahduksen. Tämä johtuu siitä, että sillalla on vuorotellen teli/akseli ja vuorotellen ei. Kun jänneväliä pidennetään, tulee jossain vaiheessa vastaan tilanne, että sillalla on aina akselita. Tällöin jännitysheilahdusten amplitudi pienenee. Pienentynyt amplitudi tarkoittaa pienempää väsyttävää vaikutusta. Pitkillä silloilla jännitysvaihteluiden amplitudiin vaikuttaa tyhjiä tavaravaunujen sijainti ominaisavarajunassa. Vuorotteleva vaunujärjestys, tyhjä vaunu, täysi vaunu, suurentaa jännitysheilahdusten amplitudia. Lyhyillä, noin vaunun mitan pituisilla tai lyhyemmällä silloilla vaunujärjestyksellä ei taas ole merkitystä. Huomattavaa on myös, että sillan pituuden kasvaessa väsyttävien vaunujärjestys vaatii vuorottelua joissa useampi tyhjä ja useampi täysi vaunu vuorottelevat, esimerkiksi kaksi täyttä, kaksi tyhjää ja kaksi täyttä. Tämän vuoksi ominaisavarajunan vaunujärjestystä tulee miettiä tarkemmin

Suomen tavaraliikenteen rautatiekuljetusjärjestelmä koostuu neljäntyyppisistä tavarajunista. Nämä ovat:

- Asiakasjunat, jotka ovat kokojunia suurasiaikkaiden kuljetuksia varten
- raakapuujunat ja
- lähiverkko- ja runkojunat vaunuryhmäkuljetuksiin.

Asiakas- ja raakapuujunille on tyypillistä, että ne kulkevat kaikki vaunut täysinä toiseen suuntaan ja palaavat kaikki vaunut tyhjinä. Tämän perusteella voidaan päätellä, ettei näissä junissa esiinny tyhjiä ja täysien vaunujen vuorottelua. Runkojunajärjestelmän junilla tarkoitetaan runkojunia, joilla liikennöidään järjestelyratapihojen välillä sekä jakelu- että keräilyliikenteen lähiverkkojunia. Runkojärjestelmän junan vaunuilla on useita määräasemia, järjestelyratapihoilla junat järjestellään määräaseman mukaisiin vaunuryhmiin. Tähän perustuu myös runkojunajärjestelmän junan vaunujärjestys, samalle liikennepaikalle jätettävät vaunut ovat aina peräkkäin ja eri liikennepaikkojen vaunut sijoitetaan kuljetusreitillä mukaisessa järjestyksessä siten, että ne ovat aina pudotettavissa junan perästä. Runkojunajärjestelmän junat sisältävät usein sekä tyhjiä että täysisiä vaunuja. Liikennepaikka perusteisen vaunujärjestyksen vuoksi tyhjiä ja täysien vaunujen sattumanvaraista vuorottelua esiintyy runkojunajärjestelmän junissa. Yksi marginaaliryhmä, jossa esiintyy myös tyhjiä ja täysien vaunujen vuorottelua on VAK-junat (vaarallisten aineiden kuljetusten junat). Näissä käytetään tyhjiä turvavälivaunuja, jonka vuoksi vuorottelu on säännöllistä. Junat, joissa voi esiintyä tyhjiä ja täysien vaunujen vuorottelua, runkojunajärjestelmän junien ja VAK-junien, osuus kaikista tavarajunista on 35–40 %:n luokkaa. [Mähönen, Nina, sähköpostikeskustelu 2013.]

Vaunujärjestys on laadittu siten, että ominaisjuna koostuu peräkkäisistä täysistä vaunuista (13 täyttä vaunua), peräkkäisistä tyhjiä vaunuista (8 tyhjää vaunua) ja vuorottelevasta osuudesta (8 vaunua). Vuorotteleva järjestys on täysi–tyhjä–kaksi täyttä–kaksi tyhjää–kaksi täyttä. Näin saadaan sekä yhden tyhjän ja kahden tyhjän vaunun välinen vuorottelu. Vuorottelevan osuuden täysiksi vaunuiksi on valittu akselipainoltaan 20 tn:n vaunut, koska ominaisjunalla on tarkoitus hakea keskimääräisiä vaikutuksia, ei äärivaikutuksia. Ominaisjunan peräkkäisissä täysissä vaunuissa, ominaisvaunutyyppit F ja G sijoitetaan vuorotellen toisinpäin. Näin saadaan samanpainoiset akselit ja samanpituiset puskin etäisyydet kohdakkain. Tämä vastaa paremmin todellisuutta. Uusi aikajakson 2000–2024 ominaisavarajuna, oikealla vaunujärjestyksellä, on kuvattu liitteessä 5.

Katsoessa Roosin tutkimuksen mukaisia ominaisjunia, vaikuttaa siltä, ettei vaunujärjestykseen ole kiinnitetty huomiota. Ominaisjunien vaunujärjestys näyttää olevan laadittu periaatteella, samanlaiset vaunut peräkkäin. Tarkasteltaessa aikajakson 1975–1999 ominaistavarajunaa, huomataan, että siihen on muodostunut, ilmeisesti tarkoituksetta, vuorotteleva osuus. Ominaisjunan lopussa täydet ja tyhjät vaunut vuorottelevat, neljä täyttä–kaksi tyhjää–neljä täyttä–kaksi tyhjää. Todetaan, että vaunujärjestys sisältää myös vuorottelevaa järjestystä, jonka vuoksi ei nähdä syytä vaunujärjestyksen muuttamiseen. Vuotta 1975 aikaisemmat ominaistavarajunat eivät sisällä vuorottelevaa osuutta. Näiden vähäisemmän väsymisvaikutuksen ja tiedon, tämän ajan junan muodostamiskäytäntöjen, puuttuessa, päätetään pitää myös näiden ominaisjunien vaunujärjestys samana.

### 2.3.2.2 Ominaisjunat 1900–1999

Aikajakson 1900–1999, neljän 25-vuotisjakson ominaisjunat ovat muodostettu yhdistämällä kuvan 2.7 ominaisveturit Roosin tutkimuksen ominaisvaunuihin. Vain aikajakson 1975–1999 ominaisvaunuihin tehtiin, kappaleessa 2.3.2 esitetyt pienet muutokset. Uudet 2000-luvun ominaisjunat ovat esitetty kappaleessa 2.3.2.1. Kaikki tässä työssä käytettävät kahdeksan ominaisjunaa on esitetty liitteessä 5.

### 2.3.3 Ominaisjunien nopeus ja ratojen kunnossapitotaso

Ominaisjunien nopeus ja ratojen kunnossapitotaso eri aikajaksoina vaikuttavat dynaamisen suurennskertoimen suuruuteen. Väsymisvauriolaskelmissa eurokoodi velvoittaa käyttämään dynaamista suurennskeroointia [SFS-EN 1991-2 liite C (2) s.112]. Tämän vuoksi määritetään ominaisjunille nopeudet ja radoille kunnossapitotaso eri aikajaksoina.

#### *Ominaisjunien nopeudet*

Eri aikajaksojen nopeudet ovat koottu taulukkoon 2.16. Koska työssä käytetään kahden tyyppistä ominaisjunaa, tavaraliikenteen, ja matkustajaliikenteen ominaisjunaa, voidaan erityyppisille ominaisjunille käyttää eri nopeutta ja täten myös eri dynaamista suurennskeroointia.

Aikavälin 1900–1999 ominaisjunien nopeudet perustuvat Roosin tutkimuksiin [Roos, Vilho, 1988]. Näiden muuttamiseen ei ole nähty tarvetta. Aikajakson 2000–2024 nopeudet perustuvat julkaisuun, Rataverkon kuvaus 1.1.2013, LO 4/2012. Eri rataosuuksilla on erilainen rakenteellinen maksiminopeus. Tähän vaikuttaa mm. kaarresäteiden suuruudet, kallistuksen vajoaus, alus- ja päällysrakenne. Tämän vuoksi dynaamisen lisän suuruuden voisi laskea rataosuuskohtaisesti tai jopa siltakohtaisesti. Tätä ei nähdä kuitenkaan järkevänä, koska se lisäisi laskentatyön määrää monin verroin. Lisäksi rautatiekalustolla, vetureilla, moottorijunilla, mutta myös vaunuilla on oma rakenteellinen maksiminopeus.

Aikajakson 2000–2024 tavarajunan nopeus perustuu akselipainoltaan 200–225 kN olevan junan sallittuun maksiminopeuteen. Julkaisussa, Rataverkon kuvaus 1.1.2013, LO 4/2012, suurimmalla osalla rataosuuksista akselipainoltaan tällaisen junan maksiminopeus on 100 km/h. Osa tavaraliikenteen kalustosta on rakenteelliselta nopeudeltaan vain 80 km/h [Mähönen, Nina, sähköpostikeskustelu 2013]. Tämän perusteella valitaan aikajakson 2000–2024 ominaistavarajunan nopeudeksi 90 km/h. Matkustajaliikenteen maksiminopeudessa on enemmän vaihteluväliä rataosuuksittain tarkasteltuna, vaihteluväli on 30–220 km/h. Ominaismatkustajajunan nopeudeksi ei

ole järkevää valita aikajakson suurinta nopeutta kahdesta syystä, nopeimmat junat ovat usein akselipainoltaan kevyempiä ja ratoja, joilla aikajakson suurin nopeus on sallittu, on koko rataverkolla murto-osa. Akselipainoltaan kevyellä junalla laskettua dynaamista suurennuskerrointa ei kannata yhdistää akselipainoltaan raskaaseen ominaisjunaan. Tämä johtaa liian suureen dynaamiseen lisään. Roos on menetellyt tutkimuksessaan vastaavanlaisesti. Tasoristeyksiä sisältävillä rataosuuksilla suurin nopeus on rajoitettu 140 km/h. Tämä nopeus onkin suurin nopeus suurimmalla osalla Suomen rataverkolla. Tasoristeyksiä on poistettu vilkkaimmin liikennöidyiltä radoilta, joilla nopeus on suurempi. Rautatietilastossa 2012 on esitetty yli 10 km:n pituiset rataosuudet, joilta tasaristeykset ovat poistettu. Suurin osa näistä rataosuuksista sijaitsee pääradalla, Helsingistä Kokkolaan saakka ja Etelä-Suomen radoilla väleillä Helsinki–Turku, Helsinki–Imatra, Tampere–Jyväskylä ja Hamina–Mikkeli [Rautatietilasto 2012 s.24]. Lisäksi nykyisin yleisimmän sähköveturin Sr1 suurin nopeus on myös 140 km/h [eKalre järjestelmä, 2013]. Näiden asioiden perusteella valitaan ominaismatkustajajunan nopeudeksi 140 km/h. Vaikka junat kulkevat Sr2 vetäminä, em. vilkkaimmin liikennöidyillä radoilla tätä nopeampaa, on näiden ratojen kunnossapitoluokka myös yleensä parempi [Rataverkon kuvaus 1.1.2013]. Tämän vuoksi voidaan katsoa 140 km/h nopeudella lasketun dynaamisen kertoimen edustava hyvin koko rataverkon keskimääräisiä nopeudesta riippuvia dynaamisia vaikutuksia matkusjalikenteen ominaisjunalle.

*Taulukko 2.16. Ominaisvetureiden dynaamisen suurennuskertoimen laskennassa käytettävät nopeudet eri aikajaksoina.*

Nopeus [km/h]	1900–1924	1925–1949	1950–1974	1975–1999	2000–2024
Tavarajuna	40	40	60	80	90
Matkustajajuna	60	80	100	120	140

### ***Ratojen kunnossapitotaso***

Junien nopeuden lisäksi dynaamisen suurennuskertoimen suuruuteen vaikuttaa ratojen kunnossapitotaso. Käytetään Roosin tutkimuksen mukaista kolmiportaista kunnossapitotasojakoa. Tämä poikkeaa eurokoodin liitteiden C ja D kunnossapitojakoon siten, että näissä kunnossapitotaso otetaan huomioon ainoastaan kaksiportaisena, normaalisti ja huolellisesti kunnossapidettävänä ratana. Kolmiportainen jako nähdään kuitenkin parempana tapana huomioida radan kuntoa, koska tällöin voidaan huomioida paremmin rataverkon kehitys kiskoatkosraiteista jatkuvakiskoraiteiksi. Jaetaan kunnossapito kolmeen eri tasoon, jotka ovat:

- A = jatkuvakiskoraide, huolellisesti kunnossapidettävä
- B = jatkuvakiskoraide, tavallisesti kunnossapidettävä
- C = lyhyt- tai pitkäkiskoraide

Tämä kolmiportaista kunnossapitotasoluokitusta ei pidä sekoittaa ratojen kahdeksan portaiseen kunnossapitotasoluokitukseen (1AA, 1A, 1, 2, 3, 4, 5, 6). Tämä luokitus on tehty mm. kunnossapitoa varten.

Dynaamisen suurennuskertoimen laskennassa käytettävät kunnossapitotasot ovat esitetty taulukossa 2.17. Nykyisin jatkuvakiskoraide on kiskoatkosraidetta yleisempi ja ratoja pidetään huolellisesti kunnossapidettyinä. [Rautatietilasto 2012 s.18] [Liikenneviraston ohjeita 20/2011. s.27]

*Taulukko 2.17. Ominaisvetureiden dynaamisen suurennuskertoimen laskennassa käytettävät kunnossapitotasot eri aikajaksoina.*

	1900–1924	1925–1949	1950–1974	1975–1999	2000–2024
Kunnossapitotaso	C	C	C	B	A

#### **2.3.4 Matkustaja- ja tavarajunien suhteellinen osuus bruttotonneista kunakin aikakautena**

Tässä kappaleessa selvitetään, miten kunkin rataosuuden (kappaleen 2.2.1 mukainen jaottelu) bruttotonnimäärä jakaantuu matkustaja- ja tavaraliikenteen välillä. Tämän ja ominaisjunien kokonaismassan avulla pystytään laskemaan ominaistavarajunan ja ominaismatkustajajunan ohiajokerrat tietyllä rataosuudella. Matkustaja- ja tavaraliikenteen suhteellisia osuuksia joudutaan tutkimaan hyvin karkeasti, koska 103 rataosuuden tarkka jakautuminen on hankala selvittää. Vuosittaisten tilastoiden järjestelmällinen läpikäyminen on myös hyvin työlästä, joka todettiin jo kappaleessa, jossa tarkasteltiin vuosien 1900–1957 bruttotonneja.

Pyritään kunkin 25-vuotisaikajakson arvio matkustaja- ja tavaraliikenteen jakautumisesta perustaa yhden vuoden tilastoon. Käytetään vuosien 2012, 1985, 1959 ja 1936 rautatietilastoja hyödyksi. Aikajakson 1900–1924 arvio perustetaan myös vuoden 1936 rautatietilastoon, koska aikaisempia tilastoja ei ole käytettävissä.

Bruttotonniin jakautuminen matkustaja- ja tavarajunien välillä eri aikajaksoina on esitetty liitteessä 6. Vuoden 1936 rautatietilastossa bruttotonneja ei ole esitetty, mutta junamäärät ovat esitetty kappaleessa 2.2.5 esitetyllä tavalla. Junamäärät ovat esitetty jaoteltuna henkilöjuniin, moottorijuniin, sekajuniin ja tavarajuniin eri rataosuuksilla. Näiden avulla voidaan laskea bruttotonniin jakautuminen matkustaja- ja tavarajunien välillä. Moottorivaunut on laskettu matkustajajuniin kuuluvaksi ja sekajunista kertyvät bruttotonnit ovat jaettu siten, että 1/3 kuuluu matkustajajuniin ja 2/3 tavarajuniin. Näin on saatu vuosien 1900–1949 rataosuuskohtaiset bruttotonniin jakautumisprosentit.

Aikajaksojen 1950–1974 ja 1975–1999 rataosuuskohtaisien bruttotonniin jakautumisprosenttien selvittäminen on tehty vuosien 1959 ja 1985 rautatietilastojen perusteella. Molempien vuosien tilastoista löytyy samanlainen taulukko, jossa on esitetty bruttotonnimäärät vetokalustolle, matkustajavaunuille, täysille tavaravaunuille ja tyhille tavaravaunuille. Kolme viimeistä näistä on helppo jakaa matkustajaliikenteen ja tavaraliikenteen kesken. Vetokaluston bruttotonneilla on useimmilla rataosuuksilla vähäisin merkitys vaunuihin verrattuna. Sitä ei voida kuitenkaan jakaa matkustajavaunujen ja tavaravaunujen bruttotonniin suhteessa näille, koska matkustajajunat ovat lähes aina kevyempiä kuin tavaravaunut ja siksi vetokaluston bruttotonneista suurempi osa kuluu matkustajaliikenteen bruttotonneihin. Tämän vuoksi tilastoista on selvitetty rataosuuskohtaiset matkustaja- ja tavarajunien keskimassat. Näiden avulla on voitu jakaa totuudenmukaisemmin vetokaluston bruttotonnit matkustaja- ja tavaraliikenteelle. Vuoden 1985 rautatietilaston rataosuuskohtaisten junamassojen

taulukko eroaa vuoden 1959 vastaavasta taulukosta siten, että siinä on junamassat tilastoitu ilman veturia. Tämä on huomioitu vähentämällä veturin massa, 85 tn, laskiessa aikajakson 1950–1974 rataosuuskohtaisia bruttotonnien jakautumisprosentteja.

Aikajakson 2000–2024 rataosuuskohtaisien bruttotonnien jakautumisprosenttien perustuvat vuoden 2012 Kultu- ja Veko-järjestelmien avulla tuotettuun bruttotonnidataan. Tästä datasta muodostetaan rautatietilasto, mutta rautatietilastossa ei julkaista kaikkea tietoa. Vuoden 2012 Rautatietilastosta bruttotonnien jakautuminen tavara- ja matkustajaliikenteen kesken on työlästä, mutta jalostamattomasta datasta se onnistuu vaivattomammin. Datassa on eroteltu tavara- ja matkustajaliikenteen bruttotonnit, joista on vaivatonta laskea näiden jakautumisprosentit. Bruttotonnidata ei sisällä lähiliikenteessä käytössä olevia sm1-, sm2- ja sm4-sähkömoottorijunia. Tämän vuoksi, joiltain rataosuksilta, jossa matkustajaliikenteessä käytetään ainoastaan em. sähkömoottorijunia, jää vähäinen matkustajaliikenne kokonaan pois. Tällainen rataosuus on esimerkiksi Juurikorpi–Kotka. Tätä ei huomioida mitenkään, koska tavaraliikenne aiheuttaa henkilöliikennettä enemmän väsymisrasitusta mm. raskaampien akselipainojen ja raskaamman nauhakuorman vuoksi. Tämän vuoksi todellista suurempi tavaraliikenteen osuus ei vie laskentaa epävarmalle puolelle.

## 2.4 Kuormien kehittymisen ennustaminen rataosittain

Kappaleessa 2.2, Kuormitushistoria rataosittain, tutkittiin kuormitushistoriaa. Jotta tulevana vuosina tehtäviä kantavuuslaskentoja voidaan tehdä ilman, että suunnittelijan tarvitsee tutkia vuosittaisia bruttotonnilastoja, on bruttotonnit ennustettava tuleville vuosille. Tässä kappaleessa tehdään bruttotonniennustukset työssä valitulle rataosuusjaottelulle (kappaleessa 2.2.1 mainittu jaottelu) ja esitetään millä tavoin ennustukset ovat tehty.

### 2.4.1 Vanhan ohjeen bruttotonniennustusten tarkastelu

Vanhassa ohjeessa, RSO 9, esitetään bruttotonniennuste seitsemälle rataosuudelle, Kouvola–Luumäki, Riihimäki–Toijala, Helsinki–Hyvinkää, Riihimäki–Kouvola, Hyvinkää–Riihimäki, Seinäjoki–Kokkola ja Kokkola–Oulu [Rautatiesiltojen suunnitteluohje (RSO), 1997 osa 9, liite 1, 2/3, taulukko 1]. Ennustukset esitetään muodossa, keskimäärin bruttotonneja per vuosi. RSO:n ennuste on tehty aikajaksolle 2000–2025. Taulukossa 2.18 on esitetty RSO:ssa tehdyt bruttotonniennustukset ja esitetty keskimääräinen toteuma br. tn/vuosi aikajaksolta 2000–2012. Lisäksi sama toteumatarkastelu on tehty aikajaksolle 2000–2006, jolloin finanssikriisin seuraukset eivät häiritse pidemmän ajan tarkastelua.



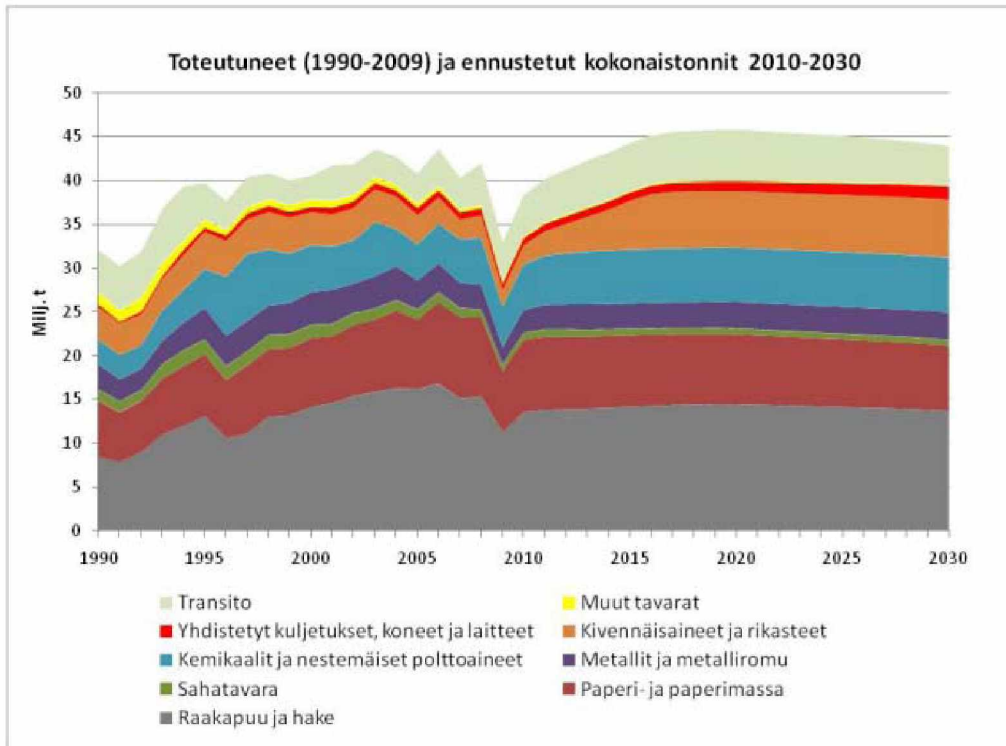
Taulukko 2.18. RSO:ssa esitettyjen 1900-luvun lopulla, aikajaksolle 2000–2024, tehtyjen bruttotonnien ennusteiden toteutumistarkasteluja.

Rataosuus	Kouvola-Luumäki	Riihimäki-Toijala	Helsinki-Hyvinkää	Riihimäki-Kouvola	Hyvinkää-Riihimäki	Seinäjoki-Kokkola	Kokkola-Oulu
Ennuste RSO	35	26	36	28	42	10	17
<b>Toteuma 2000–2012</b>	<b>28,6</b>	<b>19,6</b>	<b>19,2</b>	<b>18,8</b>	<b>21,6</b>	<b>10,7</b>	<b>15,5</b>
erotus	6,4	6,4	16,8	9,2	20,4	-0,7	1,5
erotus %	22,4 %	32,7 %	87,5 %	48,9 %	94,4 %	-6,5 %	9,7 %
<b>Toteuma 2000–2006</b>	<b>29,9</b>	<b>19,7</b>	<b>22,8</b>	<b>19,1</b>	<b>26</b>	<b>10,9</b>	<b>14</b>
erotus	5,1	6,3	13,2	8,9	16	-0,9	3
erotus %	17,1 %	32,0 %	57,9 %	46,6 %	61,5 %	-8,3 %	21,4 %

Taulukosta 2.18 voidaan todeta, että 1900-luvun lopussa tehdyissä arvioissa on arvioiden osuvuus vaihdellut paljon. Kolmelle rataosuudelle bruttotonnit ovat selvästi yliarvioitu; nämä ovat esitetty vihreällä. Nämä erottuvat joukosta tarkasteltiin toteumaa sitten lyhyemmällä tai pidemmällä aikajaksolla. Näiden kolmen rataosuuden ennustukset viittaavat siihen, että ennustuksia tehdessä oikoradan Kerava–Lahti rakentamisesta ei ole ollut varmuutta. Tämä selittäisi huomattavan yliarvioinnin. Rataosittaisten bruttotonnimäärien arviointi on haastavaa, koska yksittäiset panokset rataverkkoon voivat vaikuttaa rajusti liikennemäärien jakautumiseen eri rataosuksien kesken. Seinäjoki–Kokkola rataosuuden liikennemäärä on taas aliarvioitu. Tämä on esitetty taulukossa punaisella molemmissa aikajaksotarkasteluissa. Olettaen, että rautatieliikenteen bruttotonnit kasvavat tasaisesti vuoteen 2025 asti, on ennusteen oltava suurempi kuin edellisten vuosien toteuma. Tämän perusteella taulukossa keltaisella merkityt RSO:n ennusteet vaikuttavat relevanteilta.

#### 2.4.2 Julkaistut liikennemääräennusteet

Liikennevirasto on julkaissut Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä sarjassa kaksi rautatieliikenteen ennustetarkasteluja koskevaa julkaisua. Toinen näistä koskee tavaraliikennettä ja toinen henkilöliikennettä. Julkaisut ovat Rataverkon tavaraliikenne-ennuste 2030 (LO 37/2010) ja Liikenneolosuhteet 2035, rautateiden henkilöliikenteen ennustetarkasteluja (LO 32/2011). Tavaraliikennettä käsittelevässä julkaisussa esitetään rataosakohtaiset ennustukset kuljetetuille nettotonneille vuosille 2020 ja 2030. Kuvassa 2.15 on esitetty kokonaisnettotonniennuste Suomen rataverkolla.



Kuva 2.15. Tavaraliikenteen kokonaisnettotonniennuste 2010–2030. Lähde: Rataverkon tavaraliikenne-ennuste 2030 (LO 37/2010) s. 49.

Tarkasteltaessa vuoden 2011 toteutuneita nettotonneja, 34,8 milj. nettotonnia, voidaan todeta, että ennuste on jo noin 10 milj. nettotonnia yli toteutuneen. Ennustetta tehtäessä ei ole osattu arvioida talouden alavireen jatkuvan useamman vuoden. Kuvassa ennustetaan tavaraliikenteen kuljetettujen nettotonniin maltillinen vähentyminen vuodesta 2020 lähtien. Tämä ennuste perustuu siihen, että vuodesta 2020 eteenpäin metsäteollisuuden kapasiteettileikkaukset alkavat näkyä rautatiekuljetuksissa. Kuvan perusteella rautateillä kuljetetut kokonaisnettotonnit eivät kasva lähivuosikymmeninä talouden alavireestä toipumisen jälkeen. Vaikka kokonaistavaraliikenne ei tule kasvamaan, keskittyy nettotonniin entistä pienemmälle joukolle rataosuuksia. Tämän voi todeta ko. julkaisun luvun kuusi kuvista, joissa esitetään nettotonniennusteet rataosuuksittain. Rataosuudet, joissa nettotonniin on arvioitu lisääntyvän, ovat Pohjois-Suomen rataosuuksia, Iisalmen pohjoispuolelta. Lisäksi kasvua on ennustettu Pohjanmaan radalla, Tampere ja Oulun välillä ja Pietarin radalla, Riihimäen ja Vainikkalan välillä. Tavaraliikenteen on ennustettu taas vähenevän tai pysyvän ennallaan monilla Keski-, Itä-Suomen ja länsirannikon radoilla. Ennustukset perustuvat rautatiekuljetusten asiakkaiden haastatteluihin. Suomen tavaraliikenteen rautatiekuljetusten asiakaskunnalle on ominaista, että noin 15 suurinta asiakasta vastaa yli 85 %:n kuljetusosuudesta. Julkaisua, Rataverkon tavaraliikenne-ennuste 2030, varten haastateltiin lähes 50 rautatiekuljetuksia käyttävän yrityksen tai muun sidosryhmän edustajaa. [Iikkanen, P et al. LO 37/2010 s.49, 54–59]

Henkilöliikennettä käsittelevässä julkaisussa, Liikenneolosuhteet 2035, rautateiden henkilöliikenteen ennustetarkasteluita, tarkastellaan liikennemallin avulla viiden eri vaihtoehdon henkilöliikenteen määrää rataosakohtaisesti vuonna 2035. Nämä vaihtoehdot ovat:

- vaihtoehto A: 10–20 kaupunkiseudun kehityksen tukeminen
- vaihtoehto B: Rahoitus suunnataan suurten kaupunkien ratayhteyksien parantamiseen
- vaihtoehto C: Keskeisenä asiakkaana raskasliikenne
- vaihtoehto PTS: Eroa vaihtoehdosta C siten, että lisäksi parannetaan pääradan kapasiteettiä, kehittämällä pääkaupunkiseudun rataliikennettä, kuten rakentamalla Pisara-rata.
- vaihtoehto PTS+henkilöautoilun hinta +20 %: Herkkyystarkastelu henkilöautoilun hinnan nousulle suhteessa junamatkustamisen kustannuksiin

Kaikissa vaihtoehdoissa henkilöliikenteen kokonaismäärän ennustetaan kasvavan vuoteen 2035 asti. Ennustusten perusteella kasvua tapahtuu lähes kaikilla rataosuuksilla. Vaihtoehto B sisältää suurien ratakankkeiden toteutumisia Suomen etelärannikolla, kuten uusien ratayhteyksien rakentamisen välille Espoo–Salon ja Helsinki–Vainikkalan. Tämän vuoksi siihen liittyy myös suuria matkustajamäärien vähentymisiä rataosuuksilla, joita uudet radat korvaavat. Tässä on samasta asiasta kyse, mikä tapahtui oikoradan, Keravan–Lahti, rakentamisen myötä. Nyt tehtäviä ennustuksia ei voida perustaa vaihtoehdon B mukaisesti ratakankkeiden toteutumiseen niiden epävarmuuden vuoksi. Tutkituista viidestä vaihtoehdosta suurimmat erot ovat vaihtoehdossa PTS+henkilöautoilun hinta +20 %. Tässä matkojen lukumäärä kasvaa kaksinkertaisesti muihin vaihtoehtoihin nähden. Vaihtoehdoissa A, C ja PTS matkamäärien ennusteet ovat samansuuntaisia. Näissä kolmessa kaukojunien henkilöliikennekilometrien kokonaismäärän oletetaan kasvavan hieman yli 30 % vuodesta 2011 vuoteen 2035 asti. [Liikenneolosuhteet 2035, rautateiden henkilöliikenteen ennustetarkasteluita, LO 32/2011.]

Maailman ja Suomen talous ovat suurimpia vaikuttavia syitä kuljetusten kysyntään. Talouden alavire vaikuttaa suoraan viennin määrään ja täten myös rautatiekuljetusten määrään. Vuonna 2008 Suomen ajautuminen taantumaan näkyi myös henkilöliikenteessä [Rautatietilasto 2012 s.46]. Lähde, Liikenneolosuhteet 2035, rautateiden henkilöliikenteen ennustetarkasteluita, osoittaa myös, että eri liikennemuotojen hintasuhteiden muutoksilla on suuri vaikutus eri liikennemuotojen kysyntään. Ko. lähde arvioi, että henkilöautoilu saattaa kallistua pitkillä matkoilla, jos verotuksen painopistettä muutetaan omistamisesta käyttämiseen. Tällä on positiivinen vaikutus juna-liikenteen matkojen kysyntään. Esimerkki osoittaa myös sen, että myös politiikalla voidaan vaikuttaa rautatieliikenteen määrään kasvuun. Tämä lisää ennustamisen haastavuutta pidemmällä aikajaksolla.

Tavaraliikenteen kuljetusten ennustamiseen vaikuttaa useat toimintaympäristön muutokset. Näitä ovat edellä mainittujen lisäksi:

- teollisuustuotannon ja tuotantorakenteen kehitys
- Venäjän talous
- metsäteollisuuden rakennekehitys
- Venäjän tullit
- energiapuun hyödyntämisen lisääminen
- kaivoshankkeet

- rataverkon kehittäminen ja kilpailukyvyyn muutokset muihin kuljetusmuotoihin nähden
- Venäjän satamien kehitys ja transitokuljetukset Suomen kautta
- päästörajoitukset

Näistä osa vaikuttaa rajusti yksittäisten rataosuuksien bruttotonnimääriin. Esimerkiksi uusien raskasta kuljetusta tarvitsevien kaivosten ja tehtaiden perustaminen voi moninkertaistaa tehtaan tai kaivoksen läheisten rautatieosuuksien bruttotonnimäärät. Venäjä toimet vaikuttavat myös paljon Suomen rautatieliikenteeseen. Venäjän sisäiset päätökset tulleista ja panokset oman maan infraan vaikuttavat tietyillä transi-  
toliikenteen ratojen bruttotonnimääriin Suomessa. Muut toimintaympäristön muutokset vaikuttavat enemmänkin rautatieliikenteen kokonaismäärään.

### 2.4.3 *Bruttotonniennustukset vuosille 2013–2050*

Työssä on tarkoitus tehdä bruttotonniennustukset tarkastelluille 103 rataosuudelle. Yksittäisten rataosuuksien ennustamisen on hankalaa, koska yksittäiset päätökset rataverkon kehittämiseen tai toimintaympäristön muutoksilla saattaa olla suuria paikallisia vaikutuksia. Ennustukset perustuvat pääasiassa Liikenneviraston liikenneennusteisiin. Ennustukset tehdään seuraavalle 38 vuodelle, koska on haluttu pysyä 25 vuoden aikajaksoissa ja vuosi 2025 on liian lähellä, ajatellen, että kantavuuslaskentaohje on noin 20 vuotta käytössä. Näiden asioiden vuoksi on hyvin todennäköistä, että osa rataosuuskohtaisista ennusteista tulee poikkeaa suuresti toteutuneesta. Poikkeama bruttotonniennusteissa olisi oltava toteutumaan nähden positiivista.

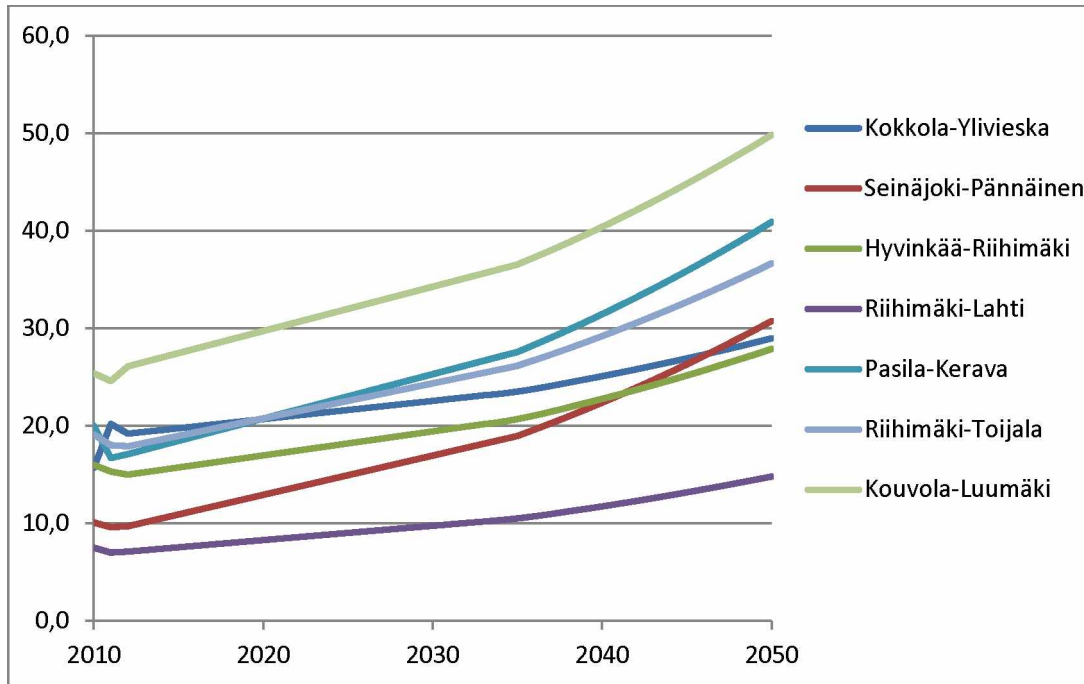
Rataosuuskohtaisten bruttotonniennusteiden laskemisessa huomioidaan seuraavat seikat:

- julkaisun, Rataverkon tavaraliikenne-ennuste 2030, ennuste tavaraliikenteestä rataosuuksittain
- julkaisun, Liikenneolosuhteet 2035, rautateiden henkilöliikenteen ennustetarkasteluita, ennustevaihtoehto PTS
- bruttotonnien jakautuminen matkustaja- ja tavaraliikenteen kesken aikajaksona 2000–2024 kappaleessa 2.3.4 esitetyn mukaisesti
- oletetaan, ettei ratakapasiteetti rajoita bruttotonnien määrän kasvua, vaan kapasiteettia rakennetaan kysynnän mukaan
- bruttotonnien vuosimäärä eivät vähene millään rataosuudella nykyisestä vaikka liikenneviraston julkaisemat ennusteet niin ennustaisivat
- epävarmuustekijät huomioiva kerroin vuosille 2036–2050, jonka suuruus kasvaa sitä suuremmaksi mitä pidemmäksi ennustus tehdään.

Lähtökohdaksi bruttotonniennusteissa on otettu lineaarinen bruttotonnien lisääntyminen vuodesta 2013 vuoteen 2050 asti. Liikenneolosuhteet 2035, rautateiden henkilöliikenteen ennustetarkasteluita – julkaisun perusteella matkustajaliikenteen määrä kasvaa ennusteen mukaisesti lineaarisesti. Tavaraliikenteen on taas ennustettu kasvavan vuoteen 2020 saakka, jonka jälkeen liikenteen määrä alkaa hieman laskea. Näiden perusteella lineaarinen ennuste bruttotonnien kehittymiselle todetaan hyväksi. [Liikenneolosuhteet 2035, rautateiden henkilöliikenteen ennustetarkasteluita, LO 32/2011 s.27] [Iikkanen, P et al. LO 37/2010 s.49]

Lineaariset bruttotonniennusteet on määritetty jokaiselle tässä käsiteltävälle 103 rataosuudelle. Nämä perustuvat Liikenneviraston tilaamiin liikenne-ennusteita koskeviin julkaisuihin, Rataverkon tavaraliikenne-ennuste 2030 ja Liikenneolosuhteet 2035, rautateiden henkilöliikenteen ennustetarkasteluita. Jälkimmäisestä julkaisusta on valittu vaihtoehto PTS, jonka on katsottu edustavan parhaiten nykyistä linjaa rataverkkoon investoidessa. Tässä vaihtoehdossa investoinnit kohdistuvat raskaan tavaraliikenteen radoille ja koko rataverkon kapasiteettia parannetaan kehittämällä pääkaupunkiseudun solmupistettä mm. Pesararadan rakentamisella. Tavaraliikennettä koskevassa julkaisussa ennustetaan rataosuuskohtaisesti nettotonnit vuodelle 2030. Ennusteiden laskennassa on oletettu, että vuoden 2030 tavaraliikenteen ennuste pätee myös vuoteen 2035. Kuvasta 2.15 voidaan huomata, että tavaraliikenteen kokonaisnettotonnit ovat laskusuunnassa vuoden 2030 kohdalla. Tämän vuoksi oletuksesta ei ainakaan seuraa bruttotonniennusteiden aliarvioimista. Oletuksen avulla voidaan laskea vuoden 2035 bruttotonniennusteet edellä mainittujen Liikenneviraston julkaisujen avulla. Näin ollen bruttotonniennusteissa tulee huomioitua sekä tavaraliikenteen että matkustajaliikenne-ennusteet.

Liikenneviraston ennusteessa, Rataverkon tavaraliikenne-ennuste 2030, on esitetty nettotonniennusteet rataosuuskohtaisesti. Näitä on verrattu vuoden 2011 toteutuneisiin nettotonneihin ja laskettu kuinka monta prosenttia nettotonnit ovat kasvaneet tai vähentyneet. Matkustajaliikenteen osalta on toimittu samoin vuodelle 2035 ennustettujen matkamäärien mukaan. Tavara- ja matkustajaliikenteen muutosprosentit ovat yhdistetty huomioimalla kunkin rataosuuden, kappaleessa 2.3.4 tutkittujen, vuoden 2012 tavara- ja matkustajaliikenteen jakautumisprosentit. Näin ollen pelkästään tavaraliikenteen radoilla huomioidaan ainoastaan tavaraliikenteen ennuste. Painotetulla muutosprosentteilla voidaan laskea bruttotonniennuste vuodelle 2035 rataosuuskohtaisesti. Vuoden 2035 lasketuilla ja vuoden 2011 toteutuneilla bruttotonniennusteilla voidaan laskea kulmakerroin kullekin rataosuudelle. Kulmakertoimen avulla voidaan muodostaa bruttotonniennusteet vuosien 2013 ja 2050 välille. Liikenneviraston liikenne-ennusteet on tehty ainoastaan vuosiin 2030 ja 2035 saakka. Koska vuosien 2035–2050 bruttotonniennusteita ei voida perustaa mihinkään tutkimukseen tai laskentaan, on päädytty käyttämään bruttotonniennusteissa epävarmuustekijää vuodesta 2036 eteenpäin. Epävarmuustekijällä aiheutetaan kunkin rataosuuden kulmakertoimeen suhteessa oleva bruttotonnilisä. Lisäksi tämä bruttotonnilisää kasvaa sitä suuremmaksi mitä pidemmälle ennustus tehdään. Toisin sanoen vuoden 2035 kohdalla muutetaan bruttotonniennusteen kulmakerrointa. Kuvassa 2.16 on esitetty muutamien rataosuuden bruttotonniennusteet. Taite vuoden 2035 kohdalla johtuu epävarmuustekijästä.



Kuva 2.16. Muutaman rataosuuden bruttotoniennusteet esitettynä viivakaaviona.

Osa lasketuista bruttotonnien kulmakertoimista oli negatiivisia eli Liikenneviraston liikenne-ennusteet ennustavat joidenkin rataosuuksien liikenteen vähenevän. Tehdyissä bruttotoniennusteissa ei ole kuitenkaan ennustettu minkään rataosuuden vuosittaisen bruttotonnimäärän vähenevän. Tämän vuoksi lasketun kulmakertoimen ollessa negatiivinen, on rataosuuden bruttotonnien oletettu pysyvän samalla tasolla. Pääasiassa negatiivisen kulmakertoimen saanneista rataosuuksista on jo tällä hetkellä vähäliikenteisiä rataosuuksia. Ennustetut rataosuuskohtaiset bruttotonnit ovat esitetty liitteessä 7. Ennusteista voidaan todeta, että rautatieliikenteen bruttotonnit tulevat keskittymään tulevaisuudessa entistä pienemmälle osalle rataosuuksia.

Tehdyt bruttotoniennusteet ulottuvat lähes 40 vuoden päähän. Lisäksi bruttotoniennusteisiin sisältyy runsaasti yksittäisiä rataosuuskohtaisia epävarmuustekijöitä. Näiden vuoksi tulevaisuudessa on syytä tarkastella toteutuneet bruttotonnit ja tehdä uudet ennusteet. Nyt tehtyjä ennusteita ja niiden toteutumista tulee seurata ja valita ennusteiden päivitysajankohta tämän perusteella. Kaikkia rataosuuksia ei kannata lähteä päivittämään yhtä rataosaa koskevan suuren muutoksen vuoksi, joten suunnittelijalle jää vastuu huolehtia, että suuret toimintaympäristön muutokset tulee huomioida ja väsymislaskennassa käytettävä bruttotonnimäärä vastaa toteutunutta. Suunnittelija pystyy seuraamaan toteutuneita bruttotonneja Rautatietilastoista, mikäli niissä jatkossakin julkaistaan toteutuneet vuosittaiset bruttotonnimäärät.

## 2.5 Dynaamiset vaikutukset

Eurokoodi velvoittaa huomioimaan dynaamiset vaikutukset väsymisvauriolaskelmissa. [SFS-EN 1991-2 liite C (2) s.112] Rautatiesiltojen dynaamiset vaikutukset syntyvät rakennetta kuormittavan hyötykuorman liikkeestä. Dynaamiset vaikutukset voidaan jakaa kolmeen syntytapaan, nopeudesta aiheutuva sysäys, rakenteen resonanssiominaisuudet ja raiteen ja kaluston epätarkkuudet. Sysäyksellä tarkoitetaan kuormituksen nopeasta muutoksesta aiheutuvaa dynaamista lisää. Sysäyksen suuruuteen

vaikuttaa eniten liikenteen nopeus. Rautatieliikennekuorma muodostuu peräkkäisistä akselikuormista (pistekuormista). Peräkkäisten pistekuormien ylittäessä rakenne suurin piirtein tasavälein, saattaa ne toimia herätteenä rakenteelle ja saada rautatiesillan resonoimaan. Resonanssissa värähtely voimistuu (dynaamiset vaikutukset kasvavat) ja tämän vuoksi rautatiesillat pyritään suunnittelemaan siten, ettei ole vaaraa resonanssista. Raiteen ja kaluston epätarkkuuksilla tarkoitetaan esimerkiksi pyörien epäsäännöllisyyttä, kuten lovipyörää. Lovipyörä aiheuttaa liikkeessä pyöräkuorman vaihtelevaa kuormitusta, joka huomioidaan dynaamisella suurennuskertoimella suunnittelussa. Raiteen epäsäännöllisyydessä on kyse samasta asiasta. Rautatiesillan päihin muodostuu usein epäsäännöllisyyskohta, koska sillan ja ratapenkereen jäykkyys on erilainen. Tätä pyritään tasoittamaan sillan päihin asennettavilla siirtymärakenteilla. [SFS-EN 1991-2 6.4.1 s.62]

Dynaamisiin ominaisuuksiin vaikuttavia tekijöitä on lueteltu lähteessä, SFS-EN 1991-2. Näitä ovat:

- a) sillan ylittävän liikenteen nopeus
- b) rakenneosan jännemitta ja tarkasteltavan rakenneosan taipuman vaikutusviivan pituus
- c) rakenteen massa
- d) koko rakenteen ja rakenteen asianomaisten osien ominaistajuudet ja niihin liittyvät ominaismuodot raiteen linjaa pitkin
- e) akselien lukumäärä, akselikuormat ja akselivälit
- f) rakenteen vaimennus
- g) raiteen pystysuuntaiset epäsäännöllisyydet
- h) liikennevälineen jousittamaton/jousitettu massa ja ripustusominaisuudet
- i) kansilaatan tai raiteen säännöllisesti sijaitsevien tukien (poikkikannattimien, ratapölkkyjen jne.) olemassaolo
- j) liikennevälineen epätarkkuudet (lovipyörät, pyörien poikkeavuus pyöreästä muodosta, ripustuksen viat jne.)
- k) raiteen dynaamiset ominaisuudet (tukikerros, ratapölkkyt, kiskonliikkeet jne.). [SFS-EN 1991-2 6.4.2 s.63]

Nämä tekijät huomioidaan dynaamisissa suurennuskertoimessa tai vaadittaessa dynaamisessa analyysissä. Dynaamisella suurennuskertoimella tarkoitetaan kerrointa, jolla pystysuuntaisia ominaiskuormia suurennetaan. Dynaamiselle suurennuskertoimelle on useita erilaisia laskukaavoja. Useimmissa dynaamisen suurennuskertoimen kaavoissa on muuttujina jännemitta, nopeus ja raiteen kunnossapitotaso. Muuttujat sijoitetaan kaavoihin usein ilman dimensioita. Dynaamisessa analyysissä eri tekijöiden vaikutukset tarkastellaan tarkemmin. Suomessa tämän työn aiheen käsittelemät sillat suunnitellaan lähes aina ilman dynaamista analyysiä. Tämän vuoksi tässä tarkastellaan ainoastaan dynaamisia suurennuskertoimia.

### **2.5.1 Dynaaminen suurennuskerroin: Uusien rautatiesiltojen eurokoodin mukainen mitoitus**

Uusien rautatiesiltojen suunnittelussa käytettävä dynaaminen suurennuskerroin voidaan määrittää kansallisesti tai hankekohtaisesti. Suomessa on käytössä eurokoodin esittämät kaavat dynaamiselle suurennuskertoimelle. Nämä perustuvat kansainvälisen rautatiejärjestön UIC:in suosituksiin [UIC CODE 776-1 R s.11]. Näissä muuttujina on kunnossapitotaso ja määräävä pituus (jännemitta). Kunnossapitotasoa on kaksi, tavanomaisesti ja huolellisesti kunnossapidetty raide. Eri kunnossapitotasojen dy-



naamiset lisät lasketaan eri kaavoilla. Suomessa rataverkkoa pidetään tässä mielessä huolellisesti kunnossapidettynä, vain hankekohtaisesti rautatiesillat mitoitetaan tavanomaisesti kunnossapidetyn raiteen dynaamiselle lisälle. Huolellisesti kunnossapidetylle raiteelle dynaaminen suurennuskerroin lasketaan kaavasta:

$$\phi_2 = \frac{1,44}{\sqrt{L_\phi - 0,2}} + 0,82, \quad 1,00 \leq \phi_2 \leq 1,67 \quad (\text{kaava 2.3})$$

jossa  $L_\phi$  on standardin SFS-EN 1991-2 taulukon 6.2 määritelty määräävä pituus [m]. Tavanomaisesti kunnossapidetyille raiteille dynaaminen suurennuskerroin lasketaan kaavasta:

$$\phi_3 = \frac{2,16}{\sqrt{L_\phi - 0,2}} + 0,73, \quad 1,00 \leq \phi_3 \leq 2,00 \quad (\text{kaava 2.4})$$

Kun sillalla on peitettä yli metrin (sillan kannen yläpinnan ja ratapölkyn alapinnan välinen etäisyys = h) voidaan pienentää dynaamista suurennuskerrointa kaavan 2.5 mukaisesti.

$$\text{red } \phi_{2,3} = \phi_{2,3} - \frac{h-1,00}{10} \geq 1,00 \quad (\text{kaava 2.5})$$

Uusien siltojen suunnittelussa dynaaminen suurennuskerroin pyrkii huomioimaan äärimmäisen dynaamisen vaikutuksen rautatiesillan koko elinkaaren aikana. Murto-rajatilassa tämä on oikea tapa, ominaiskuorman suuruuden on vastattava tietyllä luotettavuudella rakenteen koko eliniän aikana odotettavissa olevaa suurinta todellista kuormaa, joka sisältää dynaamiset vaikutukset.

Väsymismurto-rajatilassa ei voida olettaa, että jokaiselle sillan ylittävälle akselille käytetään tätä pahimman mitoitustilanteen huomioivaa dynaamista lisää. Tämä johtaisi siihen, että jännitysvaihtelut kasvaisivat todellisuutta suurimmiksi liian suuren dynaamisen lisän vuoksi ja väsymisvauriot kehittyisivät laskennallisesti todellisuutta nopeammin. Tämän vuoksi väsymismurto-rajatilassa, laskettaessa olemassa olevan rakenteen väsymisvaurioastetta, on käytettävä muuta dynaamista suurennuskerrointa, joka edustaa paremmin dynaamisen lisän keskimääräistä suuruutta. Lisäksi tarkasteltaessa olemassa olevia rakenteita voidaan hyödyntää tietoa junaliikenteen nopeudesta ja tämän avulla pienentää dynaamista suurennuskerrointa todellista junaliikenteen nopeutta vastaavaksi.

### 2.5.2 Dynaaminen suurennuskerroin: SFS-EN 1991-2 liite C

Uusien siltojen suunnittelussa käytettävän dynaamisen suurennuskertoimen lisäksi eurokoodissa esitetään kaksi muuta laskutapaa dynaamiselle suurennuskertoimelle. Nämä dynaamiset suurennuskertoimet ovat tarkoitettu todellisille junille ja väsymisvauriolaskelmiin. Kohdassa 2.5.1 esitettyjen dynaamisten suurennuskertoimien tapaan myös nämä perustuvat kansainvälisen rautatiejärjestön UIC:in suosituksiin. [UIC CODE 776-1 R s.47–52] Toinen on esitetty standardin SFS-EN 1991-2 liitteessä C ja toinen saman standardin liitteessä D. Liitteen D dynaaminen suurennuskerroin on liitteen C yksinkertaistettu muoto. Liitteen D dynaaminen suurennuskerroin esitetään seuraavassa kappaleessa.



Standardin SFS-EN 1991-2 liitteessä C dynaaminen suurennuskerroin lasketaan tavallisesti kunnossapidetylle raiteelle kaavalla 2.6 ja huolellisesti kunnossapidetylle raiteelle kaavalla 2.7

$$1 + \varphi = 1 + \varphi' + \varphi'' \quad (\text{kaava 2.6})$$

$$1 + \varphi = 1 + \varphi' + 0,5 * \varphi'' \quad (\text{kaava 2.7})$$

joissa  $\varphi'$  lasketaan kaavojen 2.8–2.10 mukaan.  $\varphi'$  huomioi kaluston nopeuden ( $v$ ), sillan pituuden ( $L$ ) ja pysyvien kuormien kuormittaman sillan taivutusvärähtelyn alimman ominaistaajuuden ( $n_0$ ).

$$\varphi' = \frac{K}{1-K+K^4} \quad \text{kun } K < 0,76 \quad (\text{kaava 2.8})$$

$$\varphi' = 1,325 \quad \text{kun } K \geq 0,76 \quad (\text{kaava 2.9})$$

$$K = \frac{v}{2 * L * n_0} \quad (\text{kaava 2.10})$$

$\varphi''$  huomioi radan kunnan. Termi on sovitettu maksimissaan 2 mm:n painumalle yhden metrin matkalla ja 6 mm:n painumalle kolmen metrin matkalla. Lisäksi termi huomioi 2 tonnin jousittamattoman massan per akseli [UIC CODE 776-1 R s.49]. Huolellisesti kunnossa pidetyillä radoilla termin  $\varphi''$  arvo on puolet pienempi mitä se on tavallisesti kunnossa pidetyillä raiteilla.  $\varphi''$  lasketaan kaavoilla 2.11–2.14.

$$\varphi'' = \frac{\alpha}{100} \left[ 56 * e^{-\left(\frac{L}{10}\right)^2} + 50 * \left(\frac{L * n_0}{80} - 1\right) * e^{-\left(\frac{L}{20}\right)^2} \right] \quad (\text{kaava 2.11})$$

$$\varphi'' \geq 0 \quad (\text{kaava 2.12})$$

$$\alpha = \frac{v}{22} \quad \text{jos } v \leq 22 \text{ m/s} \quad (\text{kaava 2.13})$$

$$\alpha = 1 \quad \text{jos } v > 22 \text{ m/s} \quad (\text{kaava 2.14})$$

Standardin SFS-EN 1991-2 esittää termille  $n_0$  kaavan vapaasti tuetulle sillalle, johon kohdistuu ainoastaan taivutusta. Standardin mukaan tällöin ominaistaajuutta voidaan arvioida pysyvien kuormien aiheuttaman taipuman avulla, kaavan 2.15 mukaan.

$$n_0 [Hz] = \frac{17,75}{\sqrt{\delta_0}} \quad (\text{kaava 2.15})$$

jossa  $\delta_0$  on pysyvien kuormien aiheuttaman taipuma jänteen keskellä [mm], ja joka lasketaan betonisilloille käyttämällä sillan ominaistaajuuteen sopivaa lyhytaikaista kuormitusta vastaavaa kimmokerrointa. Rataverkolla on myös runsaasti vapaasti tukemattomia betonirakenteisia rautatiesiltoja. Standardi SFS-EN 1991-2 ei esitä näille kaavaa termin  $n_0$  laskemiseksi.

Standardin SFS-EN 1991-2 liitteen C dynaamisen suurennuskertoimen laskumenetelmää voidaan käyttää myös yleisemmin, ilman, että lasketaan siltakohtainen taivutusvärähtelyn alin ominaistaajuus. Tällöin dynaaminen suurennuskerroin määritetään käyttämällä ominaistaajuuden  $n_0$  ylä- ja alaraja-arvoja. Ominaistaajuuden  $n_0$  yläraja voidaan laskea kaavasta 2.16 ja alaraja kaavoista 2.17 ja 2.18.

$$n_0 = 94,76 * L^{-0,748} \quad (\text{kaava 2.16})$$

$$n_0 = \frac{80}{L} \quad \text{kun } 4 \text{ m} \leq L \leq 20 \text{ m} \quad (\text{kaava 2.17})$$

$$n_0 = 23,58 * L^{-0,592} \quad \text{kun } 20 \text{ m} < L \leq 100 \text{ m} \quad (\text{kaava 2.18})$$

### 2.5.3 Dynaaminen suurennuskerroin: SFS-EN 1991-2 liite D

Toinen dynaamisen suurennuskertoimen laskentamenetelmä on esitetty standardin SFS-EN 1991-2 liitteessä D. Tämä laskentamenetelmä on liitteen C yksinkertaistettu menetelmä. Tässä menetelmässä dynaaminen suurennuskerroin riippuu ainoastaan määräävästä pituudesta (L) ja kaluston nopeudesta (v). Radan kunnossapitotaso ei vaikuta kertoimen suuruuteen kuten liitteessä C. Liitteen D dynaaminen suurennuskerroin lasketaan samoista kaavoista mitä liitteessä C, kaavoista 2.6 ja 2.7. Lisäksi liitteessä C ohjeistetaan, että kun lasketaan keskimääräisiä rakenteen 100 vuoden käyttöiän aikaisia dynaamisia vaikutuksia, voidaan dynaamisena suurennuskertoimeksi käyttää pienempää arvoa, kaavan 2.19 mukaisesti. Tässä kaavassa on nähtävästi kyse huolellisesti kunnossa pidetystä raiteesta. Kaava eroaa kaavasta 2.7 ainoastaan pienennyskerroimen 0,5 puolesta. Olettaen samaan malliin, voidaan menetellä tavallisesti kunnossapidetylle raiteelle, lisäämällä pienennyskerroin 0,5 kaavaan 2.6.

$$1 + \varphi = 1 + 0,5 * (\varphi' + 0,5 * \varphi''), \quad (\text{kaava 2.19})$$

missä termi  $\varphi'$  ottaa huomioon liikenteen nopeuden [Herwig, A. 2008. s. 48] ja se lasketaan liitteen C mukaisesti kaavalla 2.20 mutta termi K lasketaan eri tavalla, kaavojen 2.21 ja 2.22 mukaisesti.

$$\varphi' = \frac{K}{1-K+K^4} \quad (\text{kaava 2.20})$$

$$K = \frac{v}{160} \quad \text{kun } L \leq 20 \text{ m} \quad (\text{kaava 2.21})$$

$$K = \frac{v}{47,16 * L^{0,408}} \quad \text{kun } L > 20 \text{ m} \quad (\text{kaava 2.22})$$

Kaavan 2.19 toinen termi  $\varphi''$  ottaa huomioon radan epäsäännöllisyyden [Herwig, A. 2008. s.48] ja se lasketaan kaavan 2.23 mukaan. Termi  $\varphi''$  huomioi raiteen epätasaisuutta määräävän pituuden avulla. Se vaihtelee välillä 0,56–0, ollessaan suurimmillaan lyhyillä määräävän pituuden mitoilla. Termi  $\varphi''$  saa arvon  $< 0,01$  kun määräävä pituus on  $> 20$  m. Epätasaisuuskerroin

$$\varphi'' = 0,56 * e^{-\frac{L^2}{100}} \quad (\text{kaava 2.23})$$

Teräsbetonisten rautatiesiltojen pääjätteen (ovat usein 1-aukkoisia siltoja) keskipituus on 9,8 m [Wuorenjuuri, Rautatiesiltojen hallintaraportti, 2012 s.10]. Tämän perusteella kaavassa 2.20 oleva termi K lasketaan lähes aina kaavan 2.21 mukaan.

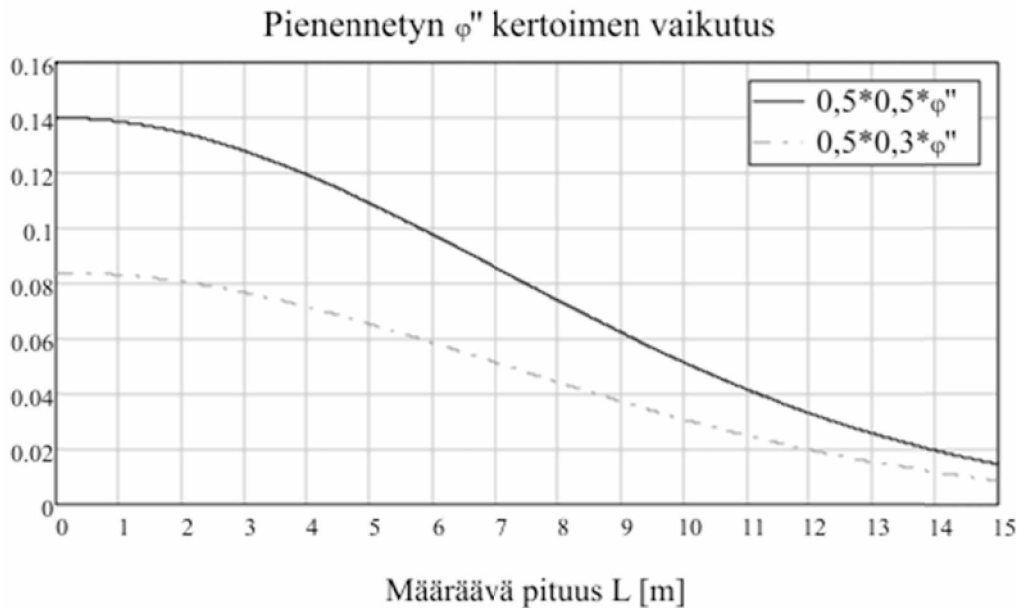
### ***Eräiden tutkimusten ehdotus väsymisrajatilan dynaamiseksi suurennuskertoimeksi***

Muutamassa tutkimuksessa on päädytty siihen, että standardin SFS-EN 1991-2 liitteen D dynaaminen suurennuskerroin voisi olla hieman pienempi [Herwig, A. 2008. s.47–49] [Sustainable bridges, Dynamic Railway Traffic Effects on Bridge Elements Background document D4.3.3. 30.11.2007. s.31–32]. Näissä tutkimuksissa termit  $\varphi'$  ja  $\varphi''$  lasketaan, vastaavasti kuten eurokoodissa, kaavojen 2.20–2.23 mukaisesti, mutta kaavasta 2.19 poiketen dynaaminen suurennuskerroin lasketaan kaavan 2.24 mukaisesti. Ainoa ero on, että dynaamisen suurennuskertoimen raiteen epätasaisuuden huomioonottava termi on hieman pienempi, kertoimen 0,5 sijasta on käytetty kerrointa 0,3.

$$1 + \varphi = 1 + 0,5 * (\varphi' + 0,3 * \varphi'') \quad (\text{kaava 2.24})$$

Herwig, A. toteaa tutkimuksessaan, että usein dynaamisen suurennuskertoimen laskemisessa huomioidaan kaluston nopeus, sillan ominaistaajuus ja jänneväli. Kuitenkin akselikuorman vaikutusta ei huomioida. Herwig, A. osoittaa oman tutkimuksensa luvussa 4, että dynaaminen suurennuskerroin on selkeästi pienempi raskailla juna-vaunuilla (=suurilla akselipainoilla). Sama asia on osoitettu monissa muissa tutkimuksissa. Samassa tutkimuksessa todetaan, että kaava 2.24 saattaa johtaa dynaamisten vaikutusten aliarviointiin kevyen kaluston osalta, kuten tyhjien tavaravaunujen osalta [Herwig, A. 2008. s.36, 47–49]. Väsymisrajatilassa suuret jännitysvaihtelut ovat suhteellisesti merkittävämpiä pieniin verrattuna. Tämän perusteella dynaamisen suurennuskertoimen laskemisessa on järkevämpää käyttää kaavaa 2.24. Tällöin kevyiden akselien dynaaminen vaikutus saattavat tulla aliarvioitua. Ominaisjunissa on kuitenkin mahdollisuus käyttää kahta eri laskentamenetelmää dynaamiselle suurennuskertoimelle. Kevyet akselit voidaan huomioida esimerkiksi eurokoodin esittämän kaavan mukaan, kaava 2.19.

Helin, R. on omassa tutkimuksessaan selvittänyt pienennetyn  $\varphi''$  kertoimen merkitystä dynaamiseen suurennuskertoimeen. Kuvassa 2.17 on esitetty pienennetyn  $\varphi''$  kertoimen merkitys määrävän pituuden (jännemitan) funktiona. Merkitys on vähäinen koko dynaamiselle suurennuskertoimelle, suurimmillaan ero on 0,056. Ero on suurin lyhyt jänteisillä silloilla. 10 m:n jänteisellä sillalla ero on 0,021 ja 15 m:n jänteisellä ero on jo alle 0,01 [Helin, R. 2011. s. 58–59]. Teräsbetoniset rautatiesillat ovat kuitenkin usein lyhyitä siltoja, niiden keskipituus on 9,8 m. Tämän vuoksi Herwig, A. ehdotuksen mukaisella dynaamisen suurennuskertoimen laskumenetelmällä voidaan tarkentaa dynaamisten vaikutusten huomiointia väsymisrajatilassa. Kaavassa ei kuitenkaan huomioida radan kunnossapitotasoa. Onkin ilmeistä, ettei kaavalla 2.24 (eikä kaavalla 2.19) voida laskea dynaamisia vaikutuksia vuosien 1900–1974 ominaisjunille, jolloin rata muodostui lyhyt- ja pitkäkiskoraiteista ja radan kunnossapitovaatimukset olivat kevyempiä.



Kuva 2.17. Pienennetyin  $\varphi''$  kertoimen vaikutus dynaamiseen suurennuskertoimeen määrävän pituuden (sillan jännemitan) funktiona. Lähde: Helin, R. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 23/2011. 2011. s. 59.

#### 2.5.4 Dynaaminen suurennuskertoimen: Roosin tutkimus

Roos, V. laskee dynaamisen suurennuskertoimen eri tavalla mitä edellä on esitetty. Roosin käyttämä laskentamenetelmä on esitetty hänen artikkelissaan Rakennustekniikka-lehdessä. Tuohon aikaan dynaamisesta suurennuskertoimesta käytettiin nimitystä, sysäyskerroin ja sen aiheuttamasta kuormalisästä, sysäyslisä [Roos, V. 1988]. Artikkelissa on painovirheitä myös sysäyskertoimien kaavoissa. Tämä selviää vertailtaessa artikkelin kaavoja Roosin muistiinpanoihin. [Roos, Vilho, muistiinpanot tutkimukseen Rautatiesillan väsymiskestävyyden laskeminen liittyen.]

Roosin käyttämässä dynaamisessa suurennuskertoimen laskentamenetelmässä on samankaltaisia piirteitä kuin eurokoodin SFS-EN 1991-2 liitteen C laskentamenetelmässä. Roosin käyttämässä menetelmässä radan kunnossapitotaso huomioidaan kolmiportaisella asteikolla A, B ja C. Kunnossapitotaso A:n dynaamisen suurennuskertoimen, kaava 2.25, on sama kuin ko. eurokoodissa liitteessä C esitetty huolellisesti kunnossapidetyn raiteen kaava. Kunnossapitotason B, kaava 2.26, vastaa taas tavallisesti kunnossapidetyn kaavaa. Roosin käyttämässä menetelmässä kuitenkin termit  $\varphi'$  ja  $\varphi''$  lasketaan hieman eritavalla kuin standardin SFS-EN 1991-2 liitteen C laskentamenetelmässä. Kunnossapitotasolla C, kaava 2,27, on pyritty huomioimaan paremmin rautatieverkon päällysrakenteen kehittyminen lyhyt- ja pitkäkiskoraiteesta jatkuva-kiskoraiteeksi. Kunnossapitotaso C tarkoitti tavallisesti kunnossapidettyä kiskojaatkolista rataa. Roos käytti tätä kunnossapitotasoa radoille vuosina 1900–1974.

$$\Phi_{M.A.R} = 1 + \varphi = 1 + \varphi' + 0,5 * \varphi'' \quad (\text{kaava 2.25})$$

$$\Phi_{M.B.R} = 1 + \varphi = 1 + \varphi' + \varphi'' \quad (\text{kaava 2.26})$$

$$\Phi_{M.C.R} = 1 + \varphi = 1 + \varphi' + 1,5 * \varphi'' \quad (\text{kaava 2.27})$$

Lisäksi leikkausvoimalle Roosin tutkimuksessa on esitetty pienempiä dynaamisia vaikutuksia, kaavat 2.28–2.30.

$$\Phi_{Q.A.R} = 1 + \varphi = 1 + \frac{2}{3} * \varphi' + \frac{1}{3} * \varphi'' \quad (\text{kaava 2.28})$$

$$\Phi_{Q.B.R} = 1 + \varphi = 1 + \frac{2}{3} * \varphi' + \frac{2}{3} * \varphi'' \quad (\text{kaava 2.29})$$

$$\Phi_{Q.C.R} = 1 + \varphi = 1 + \frac{2}{3} * \varphi' + 1 * \varphi'' \quad (\text{kaava 2.30})$$

joissa  $\varphi'$  lasketaan kaavojen 2.31–2.33 mukaan.  $\varphi'$  huomioi kaluston nopeuden ( $v$ ), sillan pituuden ( $L$ ) ja ominaisvärähtelyn ( $f_0$ ). Artikkelissä ei Roosin muistiinpanot kerro mitä termi B tarkoittaa. Artikkelissä on kuitenkin annettu raja-arvot termille B, kaava 2.33.

$$\varphi' = \frac{K}{1-K+K^4} \quad (\text{kaava 2.31})$$

$$K = \frac{v}{7,2 * f_0 * L} = \frac{v}{72 * B * L^{0,28}} \quad (\text{kaava 2.32})$$

$$f_0 = B * L^{-0,72} \quad (B = 39,5 \dots 85,9) \quad (\text{kaava 2.33})$$

$\varphi''$  huomioi radan kunnon.  $\varphi''$  lasketaan kaavoilla 2.34–2.37.

$$\varphi'' = \frac{a_0}{100} \left[ 56 * e^{-\left(\frac{L}{10}\right)^2} + 50 * \left( \frac{B * L^{0,28}}{80} - 1 \right) * e^{-\left(\frac{L}{20}\right)^2} \right] \quad (\text{kaava 2.34})$$

$$\varphi'' \geq 0 \quad (\text{kaava 2.35})$$

$$a_0 = \frac{v}{22} \quad \text{jos } v \leq 22 \text{ m/s} \quad (\text{kaava 2.36})$$

$$a_0 = 1 \quad \text{jos } v > 22 \text{ m/s} \quad (\text{kaava 2.37})$$

## 2.6 Ratojen luokitus ja sn liittymisen kantavuuden laskentaan

Pääradat on luokiteltava vuonna 2016 ja muut radat vuonna 2018 standardissa SFS-EN 15528 esitettyihin luokkiin. Jotta luokitus voidaan tehdä, on siltojen kantavuus todistettava laskennallisesti standardin 15528 luokille. Rautatiesiltojen luokitus siis aiheuttaa siltojen luokitusarpeen lähes kaikille Suomen rautatiesilloille, ainoastaan eurokoodin mukaisesti mitoitettujen sillat voidaan jättää tarkastelematta. Ratojen luokitteluun vaikuttaa myös muut ratarakenteet kuin vain sillat. Siltojen kantavuustarkasteluiden lisäksi, suuri työ on tarkastella ratapenkereiden geotekninen vakavuus. Lisäksi

muutkin rakenteet radassa tai radan vieressä saattaa tulla tutkittavaksi, kuten esimerkiksi ratarummut, tukimuurit tai rakennusten maanpainesoinnit radan vieressä.

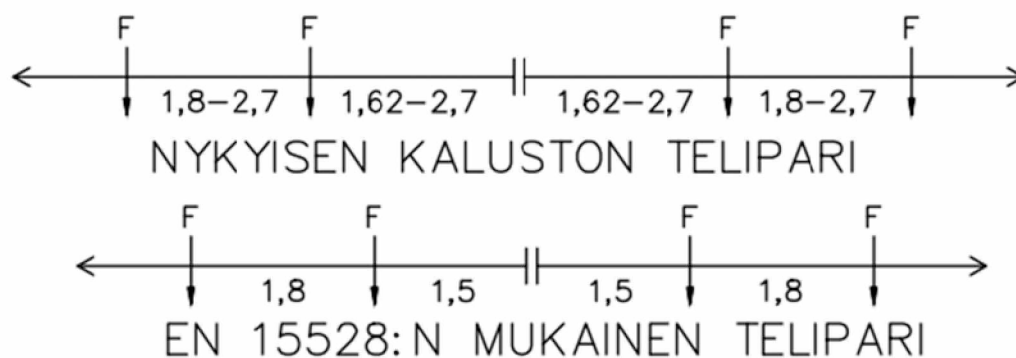
Standardi SFS-EN 15528+A1 *Railway applications. Line categories for managing the interface between load limits of vehicles and infrastructure* on eurooppalaisen standardisointikomitean *European Committee for Standardization* (CEN) julkaisema ratojen ja rautatiekaluston luokittelua koskeva standardi, joka on vahvistettu muutoksin 11.2.2013. Tämä korvaa vanhan vuonna 2008 vahvistetun standardin. Standardi SFS-EN 15528+A1 määrittelee linjan ratojen luokittelulle kunkin maan ratainfrastruktuuria hallinnoivalle taholle, Suomessa Liikennevirastolle. Standardi esittää tekniset vaatimukset olemassa oleville ja uusille radoille, joilla turvataan yhteensopivuus rautatieinfrastruktuurin ja – kaluston välillä kantavuuden puolesta. Standardin tarkoituksena on edistää rautatieliikennettä yli jäsenvaltioiden rajojen Euroopassa. Standardi koskee ainoastaan tavanomaista raideliikennettä, suurnopeuskalusto ja kallistuvakorinen kalusto on rajattu tämän standardin ulkopuolelle. [Standardi SFS-EN 15528+A1 s. 4–6]

Eurokoodin mukaan suunnitellut rautatiesillat täyttävät automaattisesti standardin SFS-EN 15528+A1 vaatimukset. Vanhat muilla normeilla suunnitellut sillat on tarkastettava (kantavuuslaskettava) ja luokiteltava standardin SFS-EN 15528+A1 luokkiin. Sillat ja radat luokitellaan kantavuudeltaan standardin liitteen A mukaisten kuormakaavioiden avulla. Liitteen A kuormakaaviot ovat esitetty tämän työn liitteessä 8.

### **2.6.1 Ratojen luokitteluun liittyvä tutkimus Suomen rataverkolla**

Rataverkon luokittelua on tutkittu julkaisussa Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 21/2010. Julkaisussa vertaillaan Suomen nykyistä ratojen luokittelujärjestelmää Euroopan Unionin antamiin direktiiveihin perustuviin Yhteentoimivuuden teknisten eritelmien (YTE) vaatimiin EN-standardien (EN-1991-2, EN 15528+A1) noudattamiseen ja niiden mukaiseen luokitukseen. Suomen nykyinen ratojen luokittelujärjestelmässä sekä päällystys- että alusrakenne luokitellaan erikseen. Päällysrakenneluokka kertoo päällysrakenteen kuorman kantokyvyn, mutta se ei huomioi mitenkään alusrakennetta. Alusrakenneluokkaan vaikuttaa radan pengerialue ja routamitoitus. Sillä kuvataan kaluston akselipainon mukaista suurinta nopeutta, mutta se ei kerro suoraan radan kantavuutta. [Tuominen, Arttu, 2010.]

Suomen ratojen todellista kantavuutta ei tiedetä. Uusi EN-standardien mukainen luokittelujärjestelmä perustuu koko ratainfrastruktuurin kantavuuteen. Annettaessa tietylle rataosuudelle standardin EN 15528+A1 mukainen luokka, on rataosuuden kaikkien rakennekerrosten, rakenneosien ja varusteiden täytettävä luokan tekniset vaatimukset. Tuomisen tutkimuksen pääpaino on ollut radan geoteknisessä kantavuudessa, eikä luokittelussa ole juuri keskitytty siltoihin. Tutkimuksessa junakuormia vertaillaan kolmen lähteen kesken, RATO 3 (ratatekniset ohjeet 3, radan rakenne), EN 15528+A1 ja EN 1991-2. Kaksi viimeistä ovat EN-standardia, joihin on jo osittain siirrytty. RATO 3 on Suomen kansallinen ohje. Standardin EN 15528+A1 mukainen mitoituskerto on noin 15 % suurempi mitä RATO 3:sen mukainen mitoituskerto on. Tämä johtuu standardista EN 15528+A1, joka sallii vaunuille nykyistä pienemmät puskinetäisyydet eli vaunun akselit voidaan sijoittaa nykyistä lähemmäs vaunun päätyä.



Kuva 2.18. Kaluston geometriset vaatimukset muuttuvat standardin EN 15528 johdosta. Tämä aiheuttaa stabiliteettilaskennassa mitoituskuorman kasvun.

Tämä todetaankin Tuomisen tutkimuksessa [Tuominen, Arttu, 2010]. RATO 3:n juna-kuormia ei kuitenkaan käytetä siltojen mitoitukseen. Tätä ei ole tuotu selkeästi esiin Tuomisen tutkimuksessa. Tutkimuksen pääpaino on nähtävästi ollut radan luokittelussa, jossa sillat on jätetty vähemmälle huomiolle. Väärä johtopäätös on, että silloilla mitoituskuormat kasvavat ratapenkereen mitoituskuormien mukaisesti noin 15 %. RATO 3 velvoittaa käyttämään rautatiesiltojen mitoitukseen Rautatiesiltojen suunnitteluohjetta (RSO), joka on tällä hetkellä vanhentunut ohje. Nykyään rautatiesillat mitoitetaan yhdessä eurokoodien ja Liikenneviraston ohjeiden mukaisesti [Ratatekniset ohjeet (RATO), osa 3, Ratahallintokeskus s. 21].

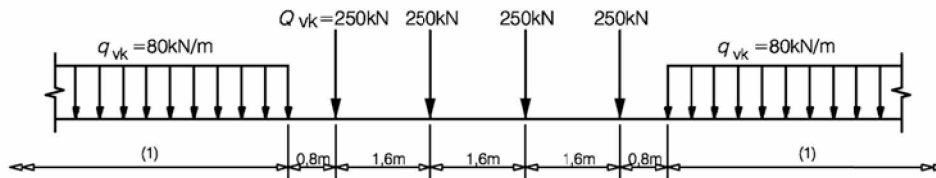
### 2.6.2 Vanhojen rautatiesiltojen kuormakaavioiden vertaaminen standardiin EN 15528+A1

Standardin EN 15528+A1 mukaisia luokiteltuja kuormia, siltojen osalta, tulee verrata siltojen mitoituksessa käytettäviin kuormakaavioihin, ei RATO 3:n mukaisiin stabiliteettilaskennan junakuormiin. Standardin EN 15528+A1 liitteessä E on esitetty menetelmät olemassa olevien rakenteiden kantavuuden toteen näyttämiseen. Menetelmät ovat:

1. Rakenteen kapasiteetin uudelleenlaskenta
2. Alkuperäisten suunnittelukuormamääräysten vertailu
3. Tilanteissa, joissa ei tehdä sillan rakenteen kapasiteetin uudelleenlaskentaa tai alkuperäiset suunnittelukuormatiedot puuttuvat, määrittämään sillan luokan asiantuntija-arviointina, joka perustuu sillan käyttäytymisen tarkkailuun määritettävän luokan mukaisen kaluston kulkiessa sillan yli. Lisäksi kaluston nopeuden on oltava tarkkailua tehtäessä määritettävän maksimi nopeuden mukainen.

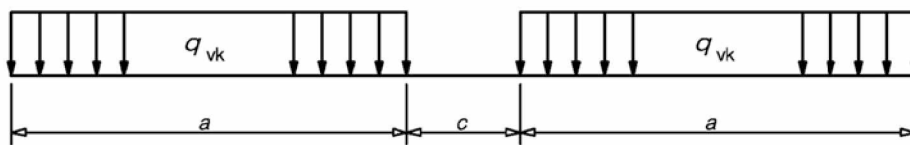
Lisäksi standardi vaatii rakenteen kunnan huomioimisen kaikkien menetelmien kohdalla. Käydään tässä kappaleessa läpi menetelmän 2 periaatteita. Menetelmä soveltuu ainoastaan murtorajatilan tarkastamiseen. Menetelmä saattaa kuitenkin soveltua uudempien 1900-luvun lopun siltojen luokitukseen. 2000-luvulla uusien siltojen mitoituksessa on ollut käytössä eurokoodin mukainen kuormakaavio, joka esitetään myös uusimmassa RSO:n versiossa. Näiden siltojen osalta ei ole ongelmaa. Eurokoodin mukainen kuormakaavio LM71 (load model 71) on esitetty kuvassa 2.19. Kuormakaavio luokitellaan alfa-kertoimella. Suomessa uusilla rautatiesilloilla kuormakaavio luokitellaan alfa-kertoimella 1,46, joka tarkoittaa 370 kN akselikuormia ja 120 kN/m nauhakuormaa. Tällä kuormakaaviolla suunnitelluille silloille sallitaan maksimissaan 35 tonnin akselipainoltaan olevaa liikennettä. Uusien jatkuvien rautatiesiltojen mitoi-

tuksessa tulee käyttää kuormakaavion LM71 lisäksi kuormakaaviota SW/0, joka on kuvattu kuvassa 2.20. Näiden kahden tärkeimmän uusien siltojen mitoituksessa käytettävien kuormakaavioiden lisäksi on muutama harvemmin tarvittava kuormakaavio. Ennen vuotta 2000 käytettävät rautatiesiltojen kuormakaaviot ovat esitetty liitteessä 9. [Standardi SFS-EN 15528+A1 s.10, 25] [Rautatiesiltojen suunnitteluohje (RSO), osa 2, Ratahallintokeskus, 1997 s.4–10] [Standardi SFS-EN 1991-2 s. 56–58]



Selite  
(1) rajoituksesta

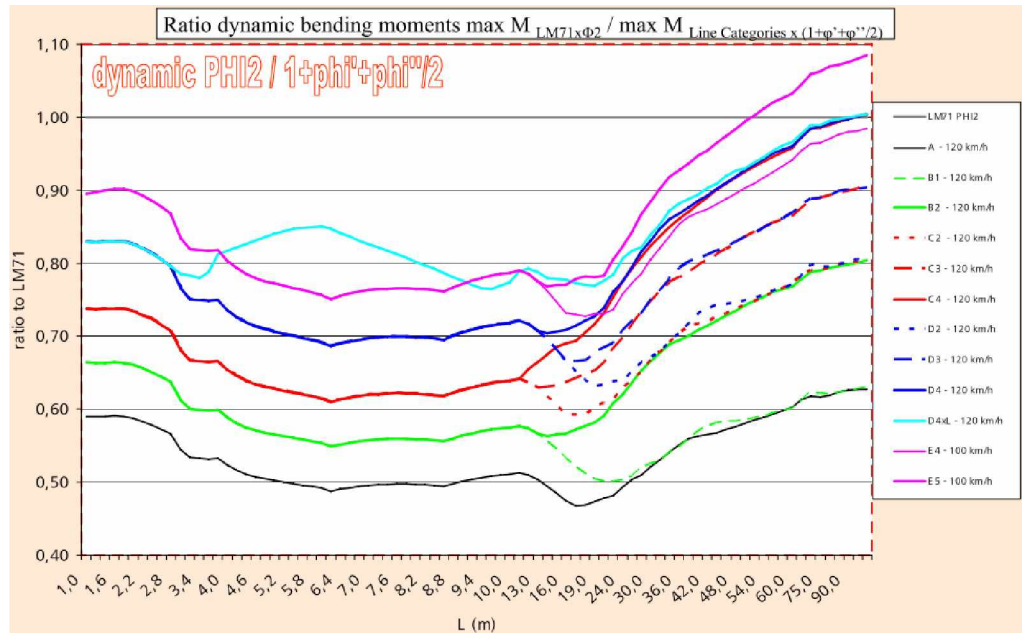
Kuva 2.19. Eurokoodin kuormakaavio uusille rautatiesilloille, LM71. Kaavio on kuvattuna luokiteltuna alfa-kertoimella 1,00. Lähde: Standardi SFS-EN 1991-2 s. 57.



Kuva 2.20. Eurokoodin kuormakaavio uusille jatkuville rautatiesilloille, SW/0. Kuormakaavio luokitellaan samojen alfa-kertoimien avulla kuin kuormakaavio LM71. Alfa-kertoimen olleessa 1,0,  $q_{vk} = 133 \text{ kN/m}$ ,  $a = 15,0 \text{ m}$  ja  $c = 5,3 \text{ m}$ . Lähde: Standardi SFS-EN 1991-2 s. 58.

UIC on laatinut raportin, Calculations – Simply supported spans, CR TSI Structures Working Group, jossa on vertailtu standardin SFS-EN 15528+A1 kuormakaavioita kuormakaavioon LM71. Raportissa on tarkasteltu ainoastaan rakennemalliltaan yksinkertaisesti tuettuja rakenteita. Vertailu on tehty sekä dynaamisella suurennuskertoimella suurennetuille kuormakaavioille että suurentamattomille kuormakaavioille. Lisäksi tarkastelut on tehty sekä momentille että leikkausvoimalle. Raportissa on nähtävästi pyritty selvittämään miten standardin SFS-EN 15528+A1 kuormavaatimukset suhteutuvat kuormakaavioon LM71. Menetelmänä on käytetty standardin EN 15528+A1 liitteessä E esitettyä menetelmää, alkuperäisten suunnittelukuormamääräysten vertailu. Kuvassa 2.21 on esitetty raportissa julkaistu kuva standardin SFS-EN 15528+A1 kuormavaatimukset suhteutuvat kuormakaavioon LM71. Kuva antaa hyvän kokonaiskuvan siitä, aiheuttaako standardin vaatimukset suurempia vai pienempiä rasituksia verrattuna kuormakaavioon LM71. Kuvan otsikon momenttisuhteen nimittäjä ja osoittaja ovat väärinpäin.





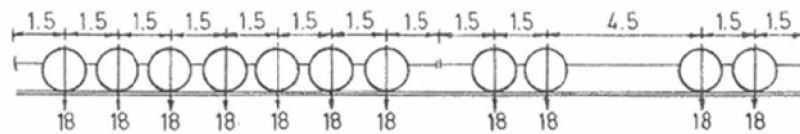
Kuva 2.21. UIC on raportissa, Calculations – Simply supported spans, CR TSI Structures Working Group, vertailut standardin EN 15528 kuormakaavioiden aiheuttamien rasitusten suhdetta kuormakaavion LM71 aiheuttamiin rasituksiin. Raportissa on tehty tarkasteluja sekä dynaamisilla lisällä korotettujen pystykuormien että korottamattomien pystykuormien rasitusten suhteille.

UIC laatiman raportin, Calculations – Simply supported spans, CR TSI Structures Working Group, tietoa ei voida hyödyntää 1900-luvulla rakennettujen rautatiesiltojen luokitteluun. Tämä, johtuu siitä, ettei Suomessa ole 1900-luvulla käytetty kuormakaaviota LM71. Raportin mukaiset kuvat tulisi tehdä myös 1900-luvulla Suomessa käytetyistä kuormakaavioista. Tällöin selviäisi suuruusluokka suunnittelutyömäärästä, jonka standardin EN 15528+A1 vaatimukset aiheuttavat. Tätä vertailua ei tehdä tässä työssä, mutta esitetään vanhat kuormakaaviot joihin vertailu tulee tehdä.

Vuosien 1926, 1948 ja 1974 kuormakaaviot ovat esitetty kuvassa 2.22. Tarkasteltaessa näitä tarkemmin, voidaan huomata, että kuormakaaviot muodostuvat veturista ja tavaravaunuista. Kuormakaavion veturi muodostuu useista peräkkäisistä akseleista, kuvaten moniakselista höyryveturia. Lähteen, Tekniikan käsikirja, viides muutettu ja laajennettu painos, avulla saadaan lisätietoa vuoden 1926 kuormakaavion käytöstä. Laskelmissa on huomioitava kaksi veturia jokaisella raiteella ja rajaton määrä vaunuja epäedullisimmassa järjestyksessä. Lisäksi kuormakaaviojono voidaan katkaista millä kohtaa tahansa, jotta epäedullisin vaikutus saadaan aikaiseksi. Vaikka vuoden 1926 kuormakaavio esitetään vain 18 tonnin akselipainolla, Tekniikan käsikirja mainitsee lisäksi kaksi muuta variaatiota kuormakaaviosta. Kuormakaavio nro I on kuvassa 2.22 ylimpänä esitetty. Kaksi muuta ovat siitä varioituja, nro II ja nro III. Kaaviot nro II ja nro III ovat geometrisesti identtisiä kaavion nro I kanssa, mutta kaavion nro II kaikki akselit ovat massaltaan 16 tonnia ja kaavion nro III kaikki akselit painavat 14 tonnia. Käsikirjassa mainitaan, että kaaviota nro I käytetään yleensä ja kahta muuta ainoastaan rautatiehallituksen määräämissä tapauksissa. Käsikirjan perusteella pelkästään sillan rakentamisvuoden perusteella ei voida päätellä mille kuormakaaviolle silta on mitoitettu, eikä tällä perusteella voida määrittää standardin EN 15528+A1 mukaista luokitusta sillalle. Tässä mielessä sillat joudutaan tarkastamaan erikseen. [Heiniö, S. et al. 1929] [Heiniö, S. et al. 1942, s. 300–301]

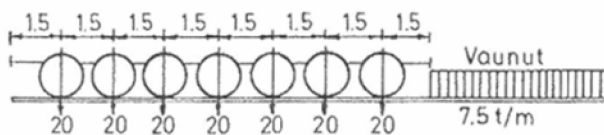
Kuormakaavio LM71 otettiin käyttöön vasta 2000-luvulla. Kuvassa 2.22 esitetyn vuoden 1974 kuormakaavion ja kuormakaavion LM71 välissä ei ole ollut muita kuormakaavioita. Näin voidaan päätellä Suomen rakennusinsinöörien liiton (RIL) julkaisemista rakenteiden kuormitusohjeista. [RIL 144 – 1982, Rakenteiden kuormitusohjeet, s. 76–78] [RIL 144 – 1997, Rakenteiden kuormitusohjeet, s. 82–83]

V. 1926 kuormakaavio:

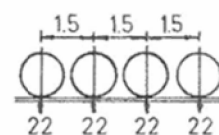


Akseliryhmä 126 t eli 10.5 t/m

V. 1948 kuormakaavio:



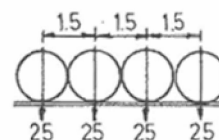
Vaihtoehtoisesti:



Akseliryhmä 140 t eli 11.7 t/m

V. 1974 kuormakaavio:

Kuten v. 1948, mutta vaihtoehtoisesti:



Kuva 2.22. Vuosien 1926, 1948 ja 1974 rautatiesiltojen kuormakaaviot.

Vuoden 1942 Tekniikan käsikirjassa on lisäksi esitetty uusien siltojen mitoituksessa käytettävä sysäysluku. Sysäysluvusta käytetään nykyään nimitystä dynaaminen suurennerroin. Standardi edellyttää suunnitteluvoimien vertailussa dynaamisen suurennerroimen huomioimista kuormien vaikutusten vertailussa. Kuvassa 2.23 on esitetty vuoden 1942 Teknillisessä käsikirjassa oleva taulukko uusien rautatiesiltojen suunnittelussa käytettävistä sysäysluvuista. Sama taulukko on esitetty vuoden 1929 Teknillisessä käsikirjassa. Nykykäytännöstä poiketen, aikaisemmin on sysäysluvulla kerrottu hyötykuormasta aiheutuvia momentteja, leikkausvoimia ja sauvojen normaalivoimia. Tulosten kannalta tälle ei kuitenkaan ole merkitystä. Vuoden 1920 käsikirjassa ei mainita sysäyslisestä mitään ja vuoden 1914 käsikirjassa todetaan, että pyörien kuormitusta lisätään 50 % tärinän varalta. Tämä vastaa suuruudeltaan 1,50 dynaamista suurennerrointa. [Heiniö, S. et al. 1942, s. 329] [Heiniö, S. et al. 1929, s. 486-487] [Heiniö, S. et al. 1920, s. 434-443] [Saraoja, E. & Valkola, V. et al. 1914, s. 391]

*Rautatiesiltojen sysäysluku  $\varphi$ .*

Jänne- mitta m	$\varphi$			Jänne- mitta m	$\varphi$		
	1.	2.	3.		1.	2.	3.
0	1,84	1,68	1,52	26	1,52	1,49	1,45
1	1,81	1,67	1,52	28	1,51	1,48	1,45
2	1,79	1,66	1,51	30	1,50	1,47	1,44
3	1,77	1,65	1,51	35	1,48	1,45	1,43
4	1,75	1,64	1,51	40	1,45	1,44	1,42
5	1,73	1,63	1,51	45	1,44	1,42	1,41
6	1,72	1,62	1,50	50	1,42	1,41	1,40
7	1,70	1,61	1,50	60	1,39	1,39	1,39
8	1,69	1,60	1,50	70	1,37	1,37	1,37
9	1,68	1,59	1,49	80	1,36	1,36	1,36
10	1,66	1,58	1,49	90	1,35	1,35	1,35
12	1,64	1,57	1,49	100	1,34	1,34	1,34
14	1,62	1,55	1,48	110	1,33	1,33	1,33
16	1,60	1,54	1,48	120	1,32	1,32	1,32
18	1,58	1,53	1,47	130	1,31	1,31	1,31
20	1,57	1,52	1,47	140	1,30	1,30	1,30
22	1,55	1,51	1,46	150	1,30	1,30	1,30
24	1,54	1,50	1,46	—	—	—	—

1. sarake: kiskot välittömästi tai aluslevyjen välityksellä pää-, poikki- tai pituuskannattajien päällä.  
2. " " puiset ratapölkkyt pää- tai pituuskannattajien päällä.  
3. " " sillalla sorastus.

Kuva 2.23. Vuonna 1942 uusien rautatiesiltojen mitoituksessa käytettävät sysäysluvat eli dynaamiset suurennuskertoimet. Lähde: Tekniikan käsikirja, viides muutettu ja laajennettu painos, 1942, Sulo, Heiniö, s. 329.

Standardin EN 15528+A1 liitteen E menetelmässä 2, alkuperäisten suunnittelukuormamääräysten vertailu, tulee vertailla dynaamisella suurennuskertoimella suurennettujen kuormien vaikutuksia. Tämän perusteella olisi luontevaa verrata standardin 15528+A1, eurokoodin 1991-2 liitteen C mukaisella dynaamisella suurennuskertoimella kerrottuja kuormakaavioita tarkasteltavan sillan suunnittelussa käytettyyn vanhaan kuormakaavioon, joka on kerrottu aikakautensa sysäysoilla.

### 2.6.3 Standardin EN 15528+A1 vaatimukset ja suositukset

#### Vaatimukset

Standardin EN 15528+A1 keskeisin vaatimus on luokitella radat luokkiin A, B1, B2, C2, C3, C4, D2, D3, D4, D4xL, E4 ja E5, osoittaen radalle asetetun luokan vaatimukset. Luokkakohtaisten vaatimusten osoittaminen perustuu standardin liitteen A kuormakaavioihin (esitetty tämän työn liitteessä 8) ja dynaamisten vaikutusten huomioimiseen. Standardin mukaan nopeus sidotaan luokkaan ja täten sama rataosuus voi saada useamman luokan. Tätä on havainnollistettu standardin liitteessä F. Standardi velvoittaa käyttämään dynaamisten vaikutusten huomioimiseen menetelmää, joka huomioi kaluston nopeuden, mutta se ei yksilöi menetelmää tämän enempää. Mikäli menetelmää etsitään EN-standardien joukosta, ainoa relevantti menetelmä on standardissa EN 1991-2 liitteessä C, ja tämän työn kappaleessa 2.5.2 esitetty menetelmä, todellisen junan dynaamisten vaikutusten laskemiseksi. [Standardi SFS-EN 15528+A1.]

Standardin velvoittaman radan kantavuuden luokittelun toinen puoli on kaluston luokittelu. Standardi luokittelee kaluston geometristen ominaisuuksien ja akselipainojen perusteella. Vaatimuksena on, että kaluston luokka vastaa radan luokkaa tai se on vaativampi. Tavaravaunut voivat saada useita luokkia, koska tavaravaunulle voidaan määrittää hyötypainorajoitukset kunkin luokan vaatimukset huomioiden. [Standardi SFS-EN 15528+A1.]

Suomessa valtaosa rataosuuksista pyritään saamaan luokkiin E4 tai E5. Nämä luokat vastaavat 25 tonnin akselipainoja. Luokitellessa rata luokkiin E4 tai E5, sille määritetään luokkaa vastaava maksiminopeus. E4 ja E5 ratojen kohdalla standardi velvoittaa määrittämään näille myös maksiminopeuden luokan D4 kalustolle. Muuten rataosuuksien luokka-maksiminopeus-yhdistelmät ovat raitainfrastruktuuria hallinnoivan tahon vapaasti määritettävissä. [Standardi SFS-EN 15528+A1 s. 9]

### **Suosituks**

Standardin vaatimusten lisäksi se antaa myöskin joitain suosituksia.

- Luokkien E4 ja E5 tavaraliikenteelle suositellaan maksimissaan 100 km/h nopeutta. Muille luokille tavaraliikenteen standardin velvoittama maksiminopeus on 120 km/h [Standardi SFS-EN 15528+A1 s. 8–9]
- Luokkien E4 ja E5 radoilla suositellaan noudatettavan standardia EN 15687.

#### **2.6.4 Väsymislaskennan liittyminen ratojen luokitteluun**

Standardi SFS-EN 15528+A1 ei mainitse mitään rautatiesiltojen väsymisestä. Standardi kuitenkin velvoittaa osoittamaan rakenteiden kestävyuden, jonka yhdeksi osaksi tulee lukea väsymisrajatila. Uudemmissa silloilla voidaan väsymisrajatila tarkastella vertailemalla sillan suunnittelussa käytettyä bruttotonnimäärää ja verrata sitä toteutuneeseen bruttotonnimäärään. Toteutunut bruttotonnimäärä voidaan selvittää tämän työn liitteiden 2 ja 7 avulla. Vanhemmilla rautatiesilloilla, 1980-luvulla rakennettujen tai tätä vanhempien rautatiesiltojen suunnittelussa ei ole todennäköisesti huomioitu mitenkään väsymisilmiötä. Näille silloille tulee tehdä väsymismitoituskalkelmia.

Siltojen luokittelun vuoksi tehtävän kantavuuslaskennan yhteydessä kannattaa samalla tehdä myös väsymiseen perustuva jäljellä olevan käyttöiän arviointi. Valittu standardin EN 15528+A1 luokka vaikuttaa jäljellä olevaan käyttöikänsä. Luokka voidaan valita murto-, käyttö- ja väsymisrajatilamitoitusten perusteella niin vaativaksi kuin mahdollista. Tämä ei ole kuitenkaan aina järkevin ratkaisu. Vaativampi luokka vähentää jäljellä olevaa käyttöikää. Tarpeen mukaisen luokan valinnalla voidaan pidentää siltojen käyttöikää. Tämän vuoksi rataverkkoa hallinnoivan, Liikenneviraston on tehtävä pidemmän ajan suunnitelma ratojen luokituksen suhteen. Siltojen osalta tulee myös harkita onko syytä sitoa jäljellä oleva käyttöikä valittuun luokkaan. Näin tehtäessä jäljellä oleva käyttöikä määrittäisi sillan luokan viimeisen voimassaolopäivän.

### *Väsymismitoitus*

Ensimmäinen materiaali, jolle on tehty väsymistutkimusta ja tutkimus on dokumentoitu, on rauta. Ensimmäinen metallin väsymiseen liittyvä tutkimus on todennäköisesti tehty vuoden 1829 tienoilla. Tutkimus on saksalainen insinöörin Wilhelm Albertin tekemä. Albert teki kokeita raudasta valmistetulle, kaivoskäyttöön suunnitellulle rautaketjuiselle taljalle. Toinen tunnettu väsymisilmiöön liittyvää tutkimusta tehnyt henkilö on August Wöhler. Wöhlerin tutkimukset sijoittuvat vuosien 1852 ja 1869 väliin. Wöhlerin tutkimuksensa sai alkunsa rautatiekaluston akseleihin muodostuneista murtumista. Tutkimuksen perusteella hän teki päätelmät, että väsymismurtumiseen vaikuttaa kuormituskertojen lukumäärä eikä kokeeseen kulunut aika. Lisäksi hän löysi tutkimistaan metalleista rajan jännitykselle, jonka alapuolella metalli kesti äärettömän monta kuormituskertaa.

Väsymisilmiötä betonissa on alettu tutkia paljon myöhemmin. Ensimmäinen betoni-kuution puristuskokeisiin liittyvä väsymistutkimus on julkaistu vuonna 1903, tutkijana Van Ornum. Hän ei löytänyt selvää rajaa betonin väsymiskestävyydelle, mutta teki tutkimuksen perusteella päätelmän, että betonin väsymiskestävyys on noin 55 % staattisesta kestävydestä 7 000 kuormitussyklillä. Betonin väsymistutkimusta on myöhemmin tehostettu erityisesti Skandinaviassa 1970-luvun aikana. [Outinen et al. 2007, s.367] [Thun, H. 2006. s. 19-20]

### 3 Väsyminen

Väsymisellä tarkoitetaan materiaalin lujuusominaisuuksien heikkenemistä pitkäaikaisen vaihtuvan kuormituksen alaisuudessa. Pitkäaikaisuudella ei pidä ymmärtää tässä ajan kulumista vaan suurta määrää kuormitusvaihtelusyklejä, kuten Wöhler totesi tutkimuksissaan. Väsyminen etenee jännitysarvoilla, jotka ovat pienempiä kuin materiaalin nimellinen lujuus. Mikäli väsyminen pääsee etenemään riittävän pitkälle, materiaali murtuu. Tätä kutsutaan väsymismurtumiseksi.

Väsymismurtuma on staattista murtumaa huomattavasti monimutkaisempi ilmiö. Staattinen murtuma voidaan katsoa hyvällä tarkkuudella riippuvan ainoastaan tarkastelupisteen jännitystilasta. Väsymismurtumaan taas vaikuttavat materiaaliominaisuudet, sekä tarkastelupisteen jännitystila että lähiympäristön jännitystilakenttä. Lisäksi tähän vaikuttaa runsas joukko erilaisia muita tekijöitä, kuten kappaleen koko (kokovaikutus), pinnan laatu, mikroskooppiset materiaali- ja pintaviat. Lähiympäristön jännitystilakentällä tarkoitetaan esimerkiksi kappaleen muodosta aiheutuvia jännitusvaihteluita. Kappaleessa oleva lovi aiheuttaa loven juureen jännityspiikin, joka on edesauttamaan väsymisen etenemistä. Runsaan määrän väsymiseen vaikuttavien tekijöiden vuoksi, väsymisen teoreettinen mallintaminen rakenteiden suunnittelussa siten, että saavutetaan riittävä luotettavuus, on vaikeaa. Tästä seuraa, että yleispäteviä laskentaohjeita ei ole voitu antaa. Olemassa olevat väsymismitoitussuunnitelmat tukeutuvat mahdollisimman tehokkaaseen kokeellisten väsymiskokeiden tulosten hyödyntämiseen. [Outinen, et al. 2007, s.367–369]

Väsymismurtuman synnyssä on kyse mikroskooppisen pienistä säröistä teräksellä ja halkeamista betonilla. Säröilyä ja halkeamia kutsutaan väsymisvaurioiksi. Väsymisvaurion syntyminen jaetaan kolmeen vaiheeseen:

- säröjen synty eli ydintyminen
- säröjen kasvu ja yhdentyminen ja
- äkillinen murtuminen

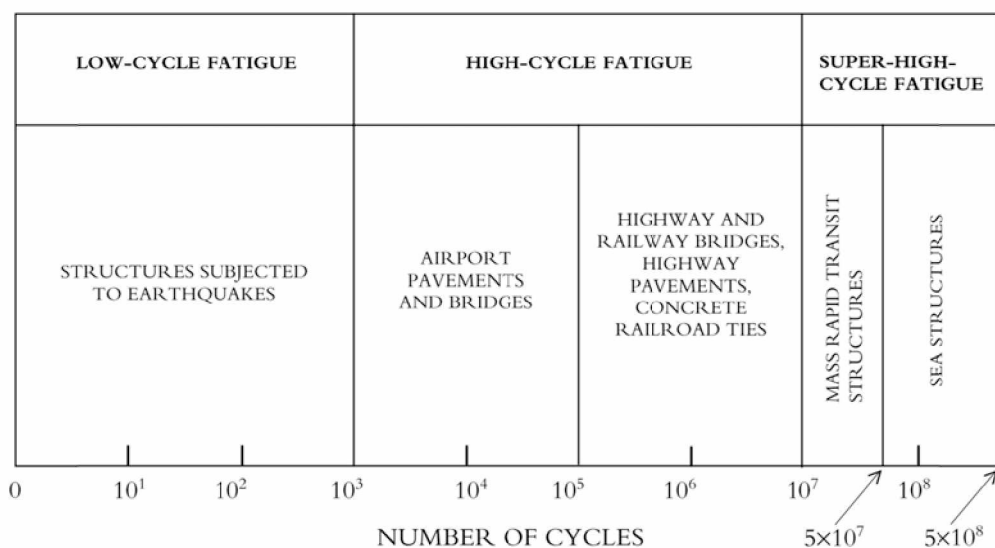
Väsymismurtuman ensimmäinen vaihe, ydintyminen, on pitkäkestoisin vaihe. Väsymismurtuma saa usein alkunsa materiaalissa olevista jännityshuipuista. Jännityshuippuja esiintyy esimerkiksi materiaalissa olevien reikien, lovien tai kierteiden kohdalla. Muodoltaan säännöllisten ja tasaisten kappaleiden kohdalla väsymismurtuma saa alkunsa pinta- tai materiaalivian kohdalla. Tällöin jännityshuippu hakeutuu näiden vikojen reunoille. Jännityshuipun kohdalla, paikallisten ja pienelle alueelle rajoituneiden, plastisten muodonmuutoksen johdosta, syntyy alkusärö. Materiaalin väsymislujuus on satunaismuuttuja. Väsymislujuus riippuu ainevikojen ja suurimpien jännitys tilojen keskinäisestä sijainnista. Tämän kautta on myös helppo ymmärtää väsymisilmiöön vaikuttava kokovaikutus. Samalla teräsjännityksellä, kahdella pinta-alaltaan erikokoisella sauvalla, on eri väsymislujuus. Pinta-alaltaan suuremmassa sauvassa on todennäköisemmin pinta- tai materiaalivikoja enemmän kuin pinta-alaltaan pienemmässä sauvassa. [Outinen et al. 2007, s.367–380] [Rabb, R. 2012.]

Toisessa vaiheessa säröt kasvavat ja yhdentyvät yhdeksi tai useammaksi säröksi vaihteluvan kuormituksen alaisuudessa. Säröjen reunoihin syntyy jännityshuippuja, jotka kasvattavat säröjä edelleen. Lopuksi, viimeisessä vaiheessa yksi ainoa jännitusvaihtelu aiheuttaa materiaalissa äkillisen murtuman. Väsymismurtuma on aina hauras- murtuma vaikka vastaavalla materiaalilla ja rakenteella oleva staattinen murtuma

olisi sitkeä. Väsymismurtuma on periaatteessa mahdollista ennakoida havaitsemalla materiaalissa särö, särön kasvu ja yhdentymisvaiheessa. Mikrosärön havaitseminen ydintymisvaiheesta on hyvin vaikeaa. Betonisten rautatiesiltojen tapauksessa särön havaitseminen on miltei mahdotonta, koska betoniteräkset ovat peitettynä suoja-betonin sisään ja rasitetuin betoni, johon voidaan olettaa ensimmäisten väsymishalkeamien syntyvän, on radan alla, peitettynä vesieristeellä ja suojabetonilla. Betonisten rautatiesiltojen kohdalla ainoa menetelmä ennakoida väsymismurtuma on väsymiskokeisiin perustuvat likimääräiset laskentamenetelmät. [Outinen et al. 2007, s.367–369]

Väsymisvaurioiden syntyminen edellyttää väsyttävältä kuormalta sekä toistuvuutta eli riittävää määrää kuormitusyklejä että riittävää suuruutta eli jännitysvaihteluväliä. Joiltakin materiaaleilta on löydetty väsymisraja, joka tarkoittaa sitä, että jos jännitykset jäävät ko. rajan alapuolelle, niin väsymisvauriot eivät etene ja materiaali kestää rajattomasti tällaista jännitysvaihtelua. Väsymisraja on löydetty esimerkiksi teräkseltä, mutta ei betonilta. [Thun, H. 2006. s. 20]

Väsyminen voidaan jakaa kahteen osa-alueeseen kuormitusykkien mukaan, pienten kuormitusmäärien väsyminen (low-cycle fatigue, LCF) ja suurten kuormitusmäärien väsyminen (high-cycle fatigue, HCF). Joissain lähteissä jälkimmäisestä erotetaan vielä todella suurten kuormitusmäärien väsyminen (super-high-cycle fatigue, SHCF). Pienten kuormitusmäärien väsymisestä käytetään myös nimitystä myötöväsyminen. Tämä nimitys kuvaa paremmin väsymisen luonnetta. Myötöväsymiseen liittyy makroskooppista plastista muodonmuutosta ja siinä ylitetään materiaalin myötölujuus, mutta pysytään murtolujuuden alapuolella. Klassinen esimerkki väsymisestä, rautalangan katkaiseminen taivutteleamalla, on myötöväsymistä. Rakenteet ja koneet suunnitellaan siten, ettei myötöraja saavuteta normaalikäytössä. Tämän vuoksi varvinaisella väsymisellä ymmärretään suurten kuormitusmäärien väsymistä. Sillat kuuluvat suurten kuormitusmäärien väsymisen yläpäähän, niillä kuormitusykkien lukumäärä elinkaaren lopussa on usein  $1 \cdot 10^5$  ja  $1 \cdot 10^7$  välissä. Hsu T. T. C on esittänyt vuonna 1981 rajat pienten ja suurten kuormitusmäärien kuormituskerroille. Nämä on esitetty kuvassa 3.1. [Thun, H. 2006. s. 20]



Kuva 3.1. Väsyminen jaettuna osa-alueisiin kuormituskertamäärien mukaan. Lähde: *Fatigue of Plain Concrete*. Hsu T. T. C. (1981).

Väsymistä aiheuttava jännitysvaihtelu voi olla vakioamplitudista (kuva 3.2) tai muuttuva-amplitudista (kuva 3.3). Vakioamplitudinen jännitysvaihtelu koostuu jännityssyklistä, joka toistuu samanlaisena. Kahden peräkkäisen samassa vaiheessa olevan jännityksen väliä kutsutaan jännitysjaksoksi. Vakioamplitudisessa jännitysvaihtelussa keski-jännitys ja jännitysamplitudi määritellään seuraavasti:

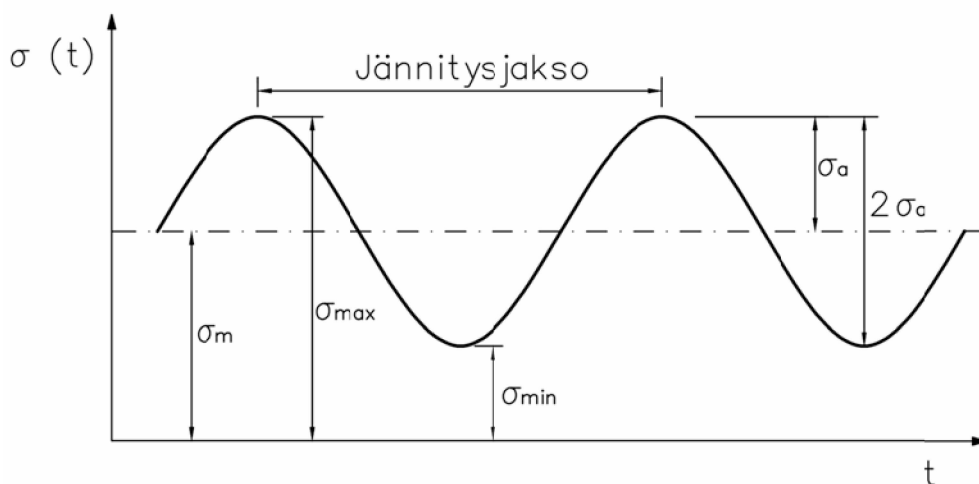
$$\text{Keski-jännitys: } \sigma_m = 0,5 * (\sigma_{max} + \sigma_{min}) \quad (\text{kaava 3.1})$$

$$\text{Jännitysamplitudi: } \sigma_a = 0,5 * (\sigma_{max} - \sigma_{min}) \quad (\text{kaava 3.2})$$

$$\text{Jännityssuhde: } R_s = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}, \quad (\text{kaava 3.3})$$

missä  $\sigma_{max}$  on jännitysjakso suurimman jännityksen arvo ja  $\sigma_{min}$  on jännitysjakson pienimmän jännityksen arvo. Lisäksi vakioamplitudisessa jännitysvaihtelussa jännityksen vaihteluväli on  $2 * \sigma_a$ . Termiä, amplitudi, käytetään eri lähteissä eri tavalla, toisinaan väsymislaskennassa amplitudilla tarkoitetaan edellä esitettyä vaihteluväliä. Puhutaan niin sanotusta ”huipusta huippuun” amplitudista (peak-to-peak amplitude). Tämän vuoksi käsitteen kanssa tulee olla tarkka. Tässä tutkimuksessa amplitudilla,  $\sigma_a$ , tarkoitetaan kaavan 3.2 määrittelemää merkitystä ja termiä, vaihteluväli, taas käytetään yhden jännitysjakson maksimi- ja minimiarvon erotuksesta. Käytetään termille, vaihteluväli, symbolia S.

Vakioamplitudinen jännitysvaihtelu voi tulla kyseeseen esimerkiksi koneissa, jotka toimivat vakio kierrosnopeudella ja samansuuruisella kuormitustasolla. Yleensä koneisiin liittyy myös muuttuva-amplitudisia vaiheita kuten koneen käynnistys. Väsymiskokeet perustuvat yleensä sinimuotoiseen vakioamplitudiseen jännitysvaihteluun. Vakioamplitudisen jännitysvaihtelun tapauksessa väsymisen taso voidaan laskea jännitysvaihtelujen suuruuden,  $2 * \sigma_a$ , tason  $\sigma_m$  ja kuormitusyhtäisten lukumäärän, N avulla.

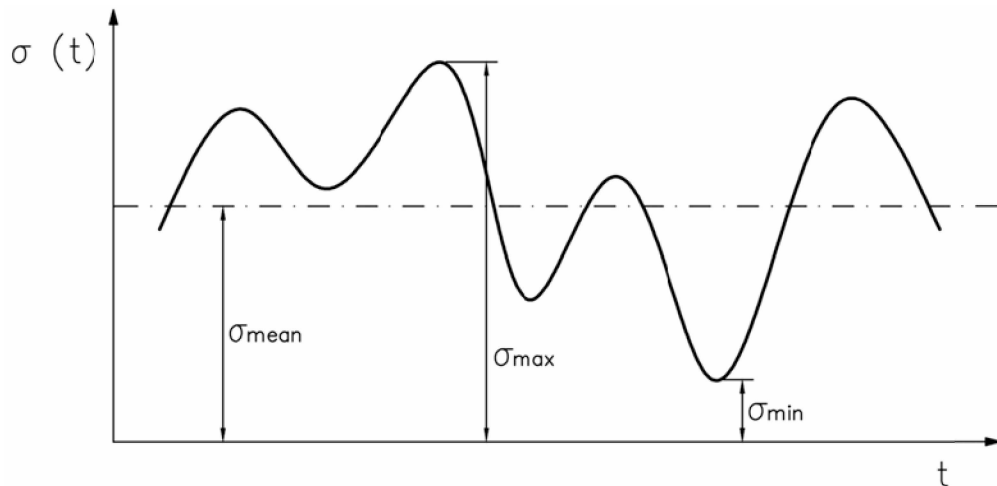


Kuva 3.2. Vakioamplitudinen jännitysvaihtelu.

Muuttuva-amplitudinen jännitysvaihtelu tulee useimmin kyseeseen. Varsinkin rakennustekniikassa vakioamplitudinen jännitysvaihtelu on erittäin harvinaista. Rakennustekniikassa väsymisilmiö tulee kyseeseen rakenteiden kanssa, joihin kohdistuu erittäin suuria määriä kuormitusyhtäisiä. Tällaisia ovat esimerkiksi erilaiset nosturit ja sillat. Rautatiesillan yli ajava juna aiheuttaa sillan poikkileikkaukseen muuttuva amp-



litudisen jännitysvaihtelun. Jännitysvaihtelukuvio saadaan laskettua siirtämällä juna pienin askelein sillan yli ja laskemalla kunkin askeleen kohdalla samasta poikkileikkauksesta jännitykset. Muuttuva-amplitudisesta jännitys vaihtelusta voidaan vakio-amplitudisen jännitysvaihtelun tapaan löytää tarkasteluvälin jännityksen suurin,  $\sigma_{max}$  ja pienin,  $\sigma_{min}$  arvo. Lisäksi voidaan määrittää muuttuva-amplitudisen jännityshistorian valitun tarkasteluvälin keskijännitys,  $\sigma_{mean}$ .

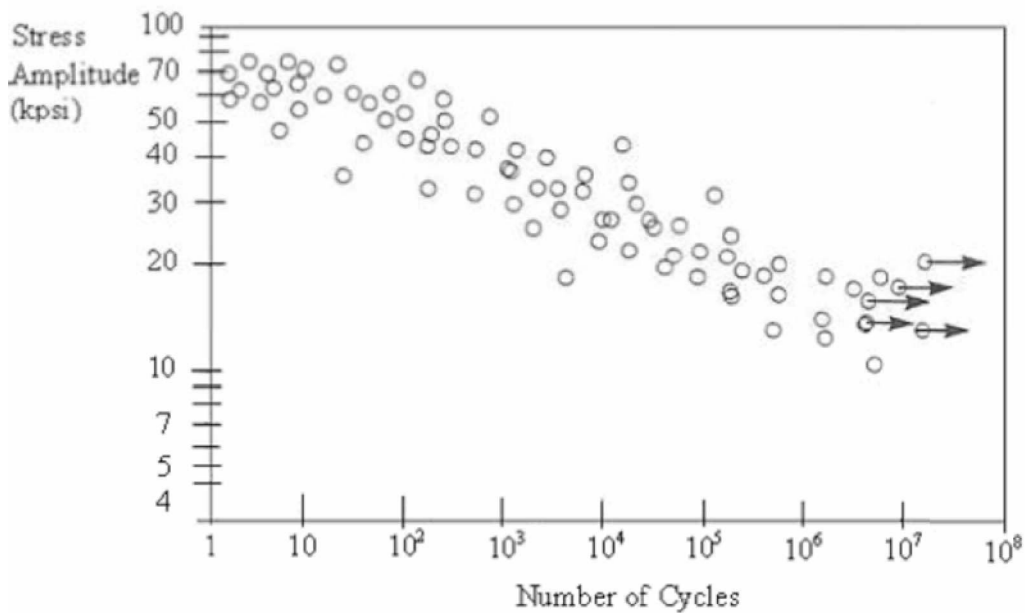


Kuva 3.3. Muuttuva-amplitudinen jännitysvaihtelu.

Muuttuva-amplitudisessa jännitysvaihtelussa ei voida käyttää jaksolliselle kuormitukselle tarkoitettuja käsitteitä,  $\sigma_m$  ja  $\sigma_a$ . Tämän vuoksi muuttuva-amplitudisen jännitysvaihtelun väsymiskertymän määrittäminen on vakioamplitudista jännitysvaihtelua monimutkaisempaa. Muuttuva-amplitudisen jännitysvaihtelu tulee muokata mitoitus-ta varten käyttökelpoisempaan muotoon. Menetelmiä tähän on monia, mutta niille on yhteistä se, että muuttuva-amplitudinen jännitysvaihtelukuvio hajotetaan yksittäisiksi jännityssykleiksi ja ne luokitellaan sopivalla porrastuksella vaihtelutasoihin. Kukin vaihtelutaso sisältää tietyn määrän yksittäisiä syklejä. Tämän jälkeen kukin vaihtelutaso voidaan käsitellä vakioamplitudisen kuormituksen tapaan ja väsymisvauriot voidaan summata.

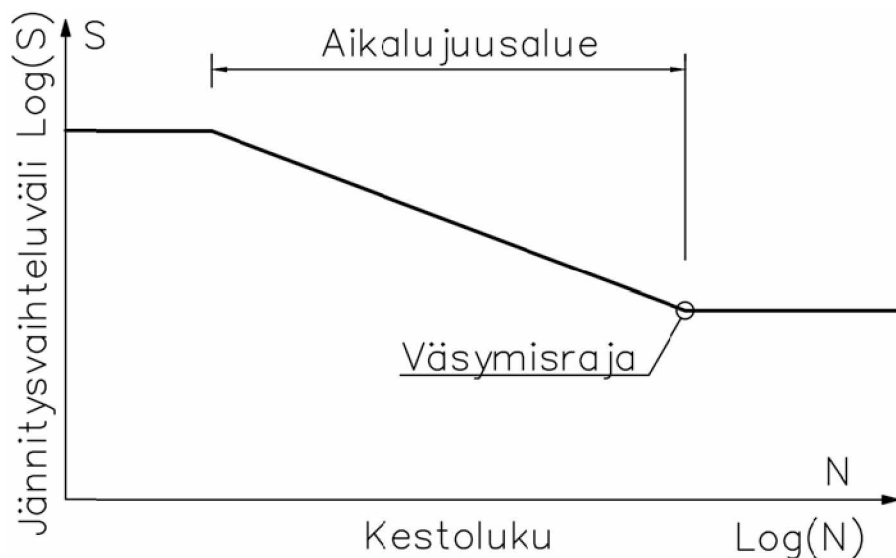
### 3.1 Wöhler- eli S-N-käyrä

Edellä todettiin, että nykyinen väsymismitoitus perustuu tehokkaaseen väsymisko-keiden hyödyntämiseen. Väsymiskoe on aina materiaali- ja kappalekohtainen. Väsymiskoe on pitkäkestoinen ja usein kallis koe, siinä koestetaan usein suuri määrä samasta materiaalista valmistettuja, samanmuotoisia koekappaleita, jotka kuormitetaan eri jännitysamplitudilla. Lisäksi saatetaan tehdä omat koesarjat eri keskijännityksen arvoilla. Koekappaleet kuormitetaan väsymismurtoon tai ennalta sovittuun kuormituskertojen määrään asti. Standardi SFS 3099, Metallien väsytykskokeiden yleiset periaatteet, esittää suurimmiksi kuormituskertojen lukumääräksi  $10^7$  rakenne-teräksille ja  $10^8$  muille metalleille ja epärautametalleille. Kuvassa 3.4 on esitetty periaatteellinen kuva, miltä väsymiskokeen tulokset näyttävät sijoitettuna kaksoislogaritmiselle S–N-asteikoille. Kuvasta voi huomata tulosten hajonnan, joka on tyypillistä väsymiskokeille. Nuolet osoittavat, että kyseisen materiaali-kappale-yhdistelmän vaihtolujuus saavutetaan noin  $10^7$  kuormituskerran kohdalla. [Standardi SFS 3099, Metallien väsytykskokeiden yleiset periaatteet, s.6] [Outinen et al. 2007, s.373–374] [Ariduru S. 2004.]



Kuva 3.4. Tyypillinen väsymiskokeen tulos esitettynä kaksoislogaritmisella S–N-astoikolla. Lähde: *Fatigue life calculation by rainflow cycle counting method*, Ariduru S. 2004.

Väsymiskokeen tulokset esitetään pääsääntöisesti graafisesti. Tyypillisin tapa esittää väsymiskokeen tulokset on S–N-käyrä, jota kutsutaan myös Wöhlerin käyräksi. Tulokset voidaan esittää yhtenä käyränä tai, jos tarkoituksen mukaista, kahden käyrän rajoittamana vaurioalueena. Nimitys S–N-käyrä tulee sanoista *Stress range* (jännitys-heilahdus) ja *Number of cycles* (kuormituskertojen lukumäärä). Kuvassa 3.5 on esitetty periaatteellinen piirros S–N-käyrän mallista. Kuormituskertojen lukumäärälle käytetään logaritmista asteikkoa ja jännitysheitähdyksille joko logaritmista tai lineaarista asteikkoa. S–N-käyrän vinoa osuutta kutsutaan aikalujuusalueeksi, se on lähes suora useimilla metalleilla. Materiaaleilla, joilta on löydettävissä väsymisraja, rajan jälkeen alkaa vaakasuora osuus. Mikäli koe on suoritettu keskijännityksen arvolla 0 MPa, kutsutaan väsymisrajan jännitysheitähdusarvoa vaihtolujuudeksi  $\sigma_w$ . Väsymiskokeet voidaan tehdä myös eri keskijännityksen arvoilla, jolloin jokaiselle keskijännityksen arvolla voidaan muodostaa oma S–N-käyrä. Kun keskijännitys on kasvaa, väsymiskestävyys pienenee. Keskijännityksen sijaan voidaan käyttää jännityssuhdetta  $R_s$ . [Standardi SFS 3099, Metallien väsytykokeiden yleiset periaatteet, s.8] [Hitsatut profiilit EN-1993 –käsikirja. 2010 Rautaruukki Oyj. s. 430] [Outinen et al. 2007, s.373–374]



Kuva 3.5. S-N-käyrä yleinen malli.

S-N-käyrän yleinen muoto on:

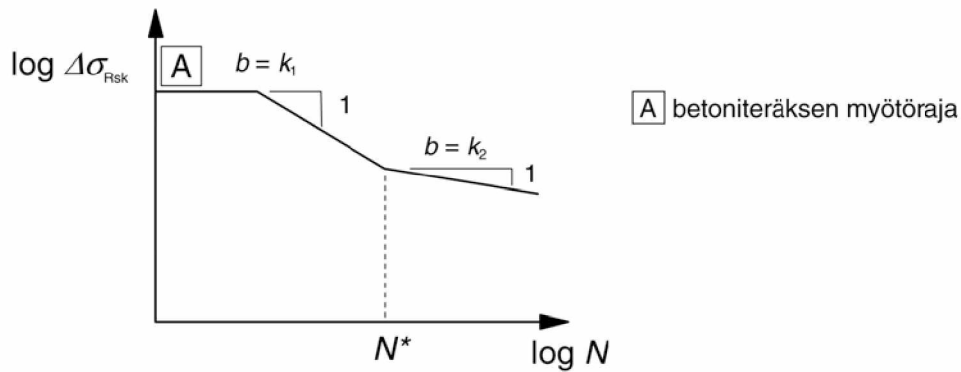
$$N * \sigma_a^m = C, \quad (\text{kaava 3.4})$$

missä  $N$  on kuormituskertojen lukumäärä,  $\sigma_a$  on jännitysamplitudi (jännitysheilahdus),  $m$  on jännityseksponentti ja  $C$  on vakio, joka riippuu mm. materiaalista. Mitä suurempi on jännityseksponentti  $m$ , sitä loivemmin käyrä laskee. [Milne, I. et al. 2003. Volume 4, s. 259]

S-N-käyristä on vaivatonta lukea vakioamplitudisen jännitysvaihtelun väsymiskestävyys kuormituskertoina. Kun tutkittava jännitysvaihteludata on muuttuvaamplitudista, on se käsiteltävä sellaiseen muotoon, että voidaan käyttää hyväksi vakioamplitudisia väsymiskoetuloksia. Rainflow-analyysillä muuttuva-amplitudinen jännitysvaihtelu voidaan jakaa jännitysvaihtelutasoihin ja Palmgren–Miner’in säännöllä voidaan summata väsymisvauriot. Nämä käydään läpi kohdissa 3.1.2 ja 3.1.3.

### 3.1.1 S – N-käyrät eurokoodin mukaan sekä betoniteräkselle että betonille

Betoniteräs on yksi riittävän laajoin väsymiskokein tutkittu materiaali. Tästä huolimatta betoniteräksen S – N-käyrä on eri stantardeissa määritetty erilaisiksi, sekä eksponenttien arvot että  $N^*$  (ks. kuva 3.6) taitepisteen sijainti vaihtelee. Eri standardien määritettyjä betoniteräksen S – N-käyriä on esitelty julkaisussa, Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 23/2011. Teräsbetonisten rautatiesiltojen väsymiskestävyys määrittäminen. Helsinki 2011. Helin, Ristomatti s 28. Eurokoodin mukainen betoniteräksen S – N-käyrä on yksi varimmalla puolella. Lisäksi on huomattavaa, että keskijännitys ei vaikuta standardin mukaisen S – N-käydän muotoon tai paikkaan vaikka, kuten myöhemmin esitetään, keskijännityksellä on vaikutusta näihin. Eurokoodin standardissa SFS-EN 1992-1-1, kohdassa 6.8.4, Betoniteräksen ja jänneteräksen väsymistarkastelu, esitetään betoni- ja jänneteräksen S – N-käyrä, kuva 3.6.



Kuva 3.6. Eurokoodin standardin SFS-EN 1992-1-1 mukainen S – N-käyrä sekä betoni- että jänneteräkselle.

Kuvan 3.6 parametrit  $k_1$ ,  $k_2$  ja  $N^*$  valitaan taulukosta betoniteräksen tyyppin mukaan. Suoralle betoniterästangolle arvot ovat  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$  ja  $N^* = 10^6$ . Jänneteräkselle standardissa esitetään omat arvot.

Betonin S – N-käyrä esitetään standardissa SFS-EN 1992-2+AC, kohdassa 6.8.7, Puristuksen tai leikkauksen kuormittaman betonin väsymistarkastelu. Standardi ei esitä suoraan käyräparvea kuvana, mutta käyrille annetaan kaava, kaava 3.5.

$$N_i = 10^{(14 \cdot \frac{1 - E_{cd,max,i}}{\sqrt{1 - R_i}})}, \quad (\text{Kaava 3.5})$$

$$R_i = \frac{E_{cd,min,i}}{E_{cd,max,i}}, \quad (\text{Kaava 3.6})$$

$$E_{cd,min,i} = \frac{\sigma_{cd,min,i}}{f_{cd,fat}}, \quad (\text{Kaava 3.7})$$

$$E_{cd,max,i} = \frac{\sigma_{cd,max,i}}{f_{cd,fat}}, \quad (\text{Kaava 3.8})$$

missä parametrit ovat:

$N_i$  = puristusjännitysvaihtelun itseisarvon maksimitaso  $E_{cd,max,i}$  vastaavien, vaurion aiheuttavien jännitysjaksojen lukumäärä.

$R_i$  = jännityssuhde

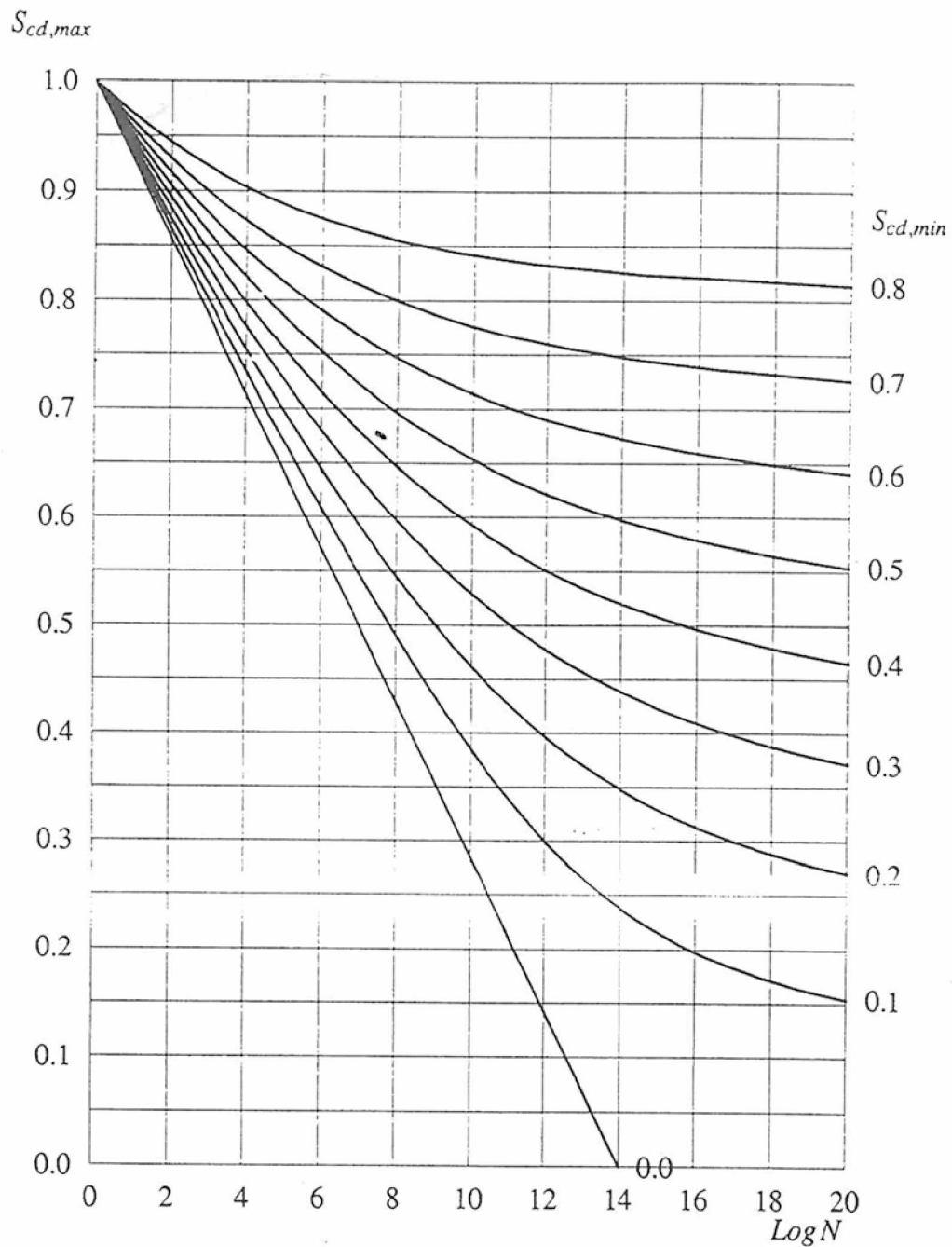
$E_{cd,max,i}$  = puristusjännitysvaihtelun itseisarvon minimitaso

$E_{cd,max,i}$  = puristusjännitysvaihtelun itseisarvon maksimitaso

$f_{cd,fat}$  = betonin väsymislujuuden mitoitusarvo

$\sigma_{cd,max,i}$  = jakson jännityksen yläraja

$\sigma_{cd,min,i}$  = jaksossa vaikuttavan jännityksen alaraja



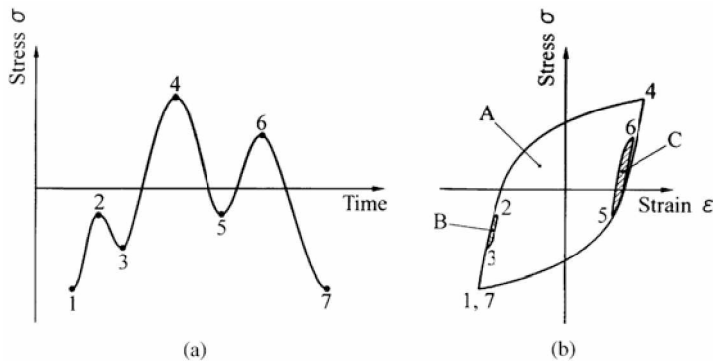
Kuva 3.7. Betonin  $S - N$ -käyrä puristukselle. Lähde: *Fatigue in concrete railway bridges, Final report. ERRI D 216/RP 3. January 2002. Main Authors: L. Frýba (report), Ch. Bousquet (Annexe A), E. Brühwiler (Annexe A) s. 40.*

Kuvassa 3.7 esitetään kaavan 3.5 mukainen betonin  $S - N$ -käyräparvi. Betonin puristukselle on esitetty myös kuvasta 3.7 hieman poikkeavia käyräparvia. Tällainen on esitetty esimerkiksi Helinin R. julkaissa.

## 3.2 Rainflow-analyysi

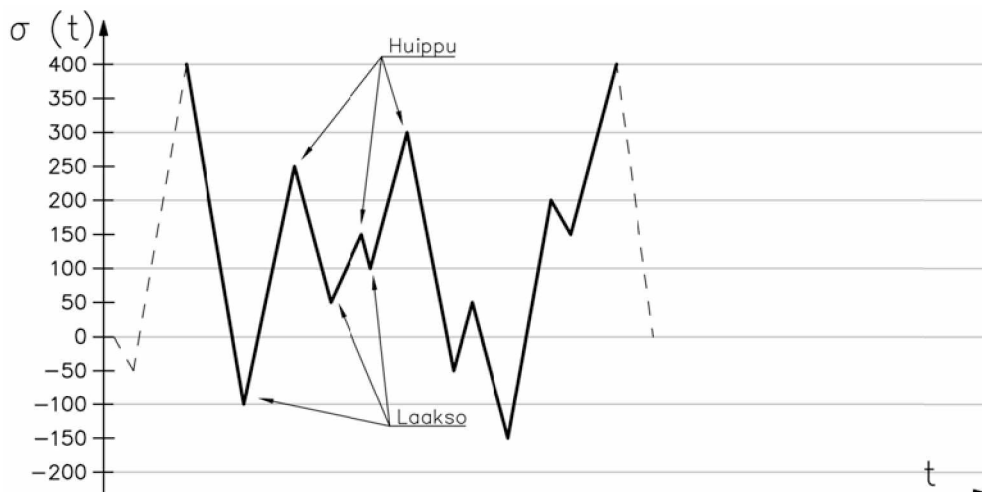
Rainflow-analyysin eli sadevirtauslaskennan on kehittänyt Endo, T. ja Matsuishi, M. Se on yksi menetelmä käsitellä muuttuva-amplitudinen jännityshistoria yksittäisiksi jännitysvaihteluiksi. Muita vastaavaan käyttötarkoitukseen tehtyjä malleja ovat vesi-

säiliöanalogia, räystäsanalogia, huippumenetelmä (peak method), range method ja range-pair method. Rainflow analyysi on yleisin käytetty menetelmä. Se on luultavasti myös paras menetelmä, koska se ottaa huomioon aikaisemmat venymät ja jännitykset. Väsymisvaurio perustuu täysin suljettuihin jännitys-venymäsilmiin. Tällaisia jännitys-venymäsilmiä on kuvattu kolme kappaletta kuvassa 3.8. Kuvan silmukan venymät kuvaavat kasvavassa väsymisvauriossa, särössä, tapahtuvia pieniä paikallisia, plastisia venymiä. Rainflow-analyysiä käyttämällä muodostuu kuvan 3.8 mukaisia jännitys-venymäsilmiä, kuten myöhemmin tämän työn esimerkissä esitetään. [Milne, I. et al. 2003. Volume 4, s. 255–257]



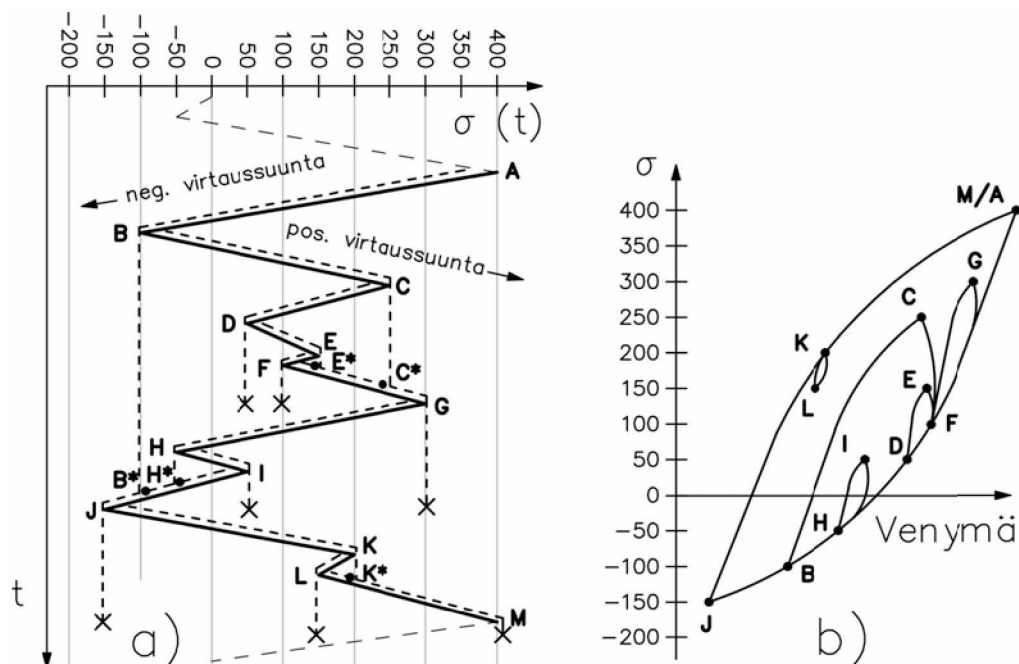
Kuva 3.8. Muuttuva-amplitudinen jännityshistoria ja tästä muodostetut kolme täysin suljettua jännitys-venymäsilmiä, A, B ja C. Lähde: *Comprehensive Structural Integrity*. Milne, I. & Ritchie, R. O. & Karihaloo, B. 2003. Volume 4, s.255.

Käydään seuraavan esimerkin avulla läpi miten rainflow-analyysillä muuttuva-amplitudinen jännityshistoria muutetaan jännitysvaihtelutasoihin. Lasketaan kuvan 3.9 mukainen jännityshistoria. Käytetään esimerkissä metallista materiaali, joka kestää sekä vetoa että puristusta. Käsineläskennassa, ennen kuvan 3.9 muotoa, tulee jännitys historiasta poistaa hyvin pienet jännitysheilahdukset, jolloin jäljelle jää vain huippujen ja laaksojen muodostama murtoviiva. Käytetään nimitystä "huippu" murtoviivan kärjistä, jotka osoittavat kohti positiivisia jännitysarvoja ja nimitystä "laakso", jotka osoittavat kohti negatiivisia jännitysarvoja.



Kuva 3.9. Esimerkkinä laskettava muuttuva-amplitudinen jännityshistoria. Laskettava osuus esitetty yhtenäisellä viivalla.

Käsinlaskennassa jännityshistoriakuvio käännetään kuvan 3.10, kohdan a) mukaisesti. Veden virtaus alkaa murtoviivan jokaisesta taitteesta kuvan mukaisesti. Virtaukset alkavat vaiheittain, uusi virtaus ei ala ennen kuin edellinen on loppunut. Virtaukset voidaan laittaa valumaan järjestyksessä A, B, C jne. tai ensin voidaan käsitellä negatiivisen suunnan virtaukset ja tämän jälkeen palata jännityshistorian alkuun ja käsitellä positiivisen virtaussuunnan virtaukset.

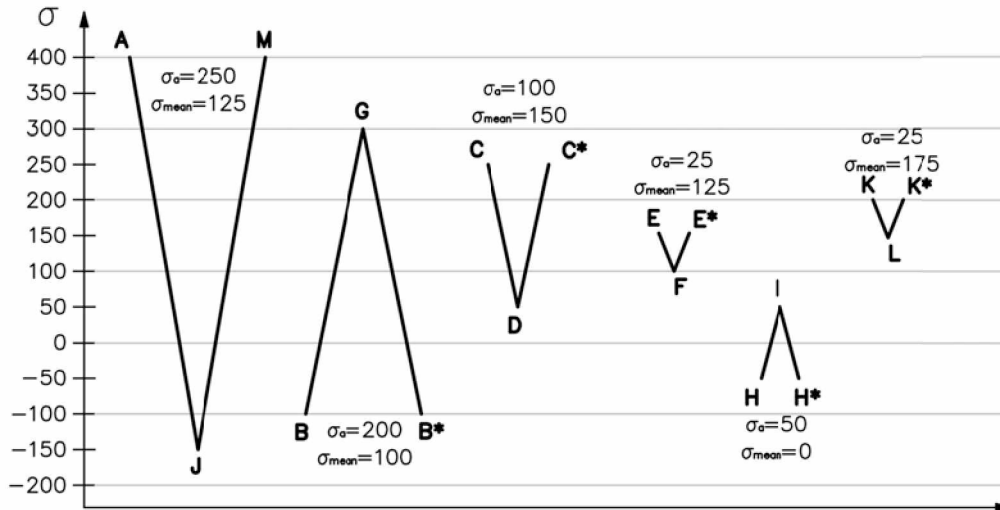


Kuva 3.10. a) Rainflow- eli sadevirtauslaskenta. b) Periaatteellinen kuva esimerkin sadevirtauslaskennassa muodostuvista suljetuista jännitysvenymäsilmukoista.

Tehdään rainflow-analyysi ja käsitellään negatiivinen virtaussuunta ensin. Ensimmäinen virtaus alkaa murtoviivan taitteesta A. Virtaus valuu niin pitkälle kunnes tulee vastaan joko suurempi tai yhtä suuri huippu kuin virtauksen lähtöpiste on. Tässä tapauksessa virtaus valuu pisteeseen M saakka. Seuraava negatiiviseen virtaussuuntaan lähtevä virtaus lähtee pisteestä C. Virtaus päättyy pisteen G kohdalle, koska huippu G on korkeampi kuin lähtöpiste, huippu C. Sama tapahtuu pisteestä E lähtevälle virtaukselle. Virtaus päättyy myös siinä tapauksessa, jos sen tielle tulee vanha virtaus. Näin käy pisteestä G lähtevälle virtaukselle. Virtaus kulkee H:n ja H\*:n kautta, mutta törmää vanhaan virtaukseen pisteessä B\*. Seuraava virtaus lähtee pisteestä I, joka päättyy pisteeseen H\*, vanhan virtauksen törmäykseen. Viimeinen negatiiviseen suuntaan tapahtuva virtaus lähtee pisteestä K ja päättyy pisteen M kohdalle. Tämän jälkeen käydään läpi jännityshistorian positiivinen virtaussuunta samalla tavalla menetellen. Ainoa poikkeus on, että virtaus päättyy, kun vastaan tulee joko suurempi tai yhtä suuri laakso kuin virtauksen lähtöpiste on.

Kuvan 3.10 kohdassa b) on esitetty periaatteellinen kuva edellä tehdyn rainflow-analyysin suljetuista jännitysvenymäsilmukoista. Kuvassa on kuusi selvää silmukkaa. Silmukan suuruus on kuvastaa väsymisvaurion suuruutta. Rainflow analyysin perusteella yksittäiset jännitysjakson voidaan esittää kuvan 3.11 mukaisesti. Kukin kahdesta janasta muodostuva murtoviiva edustaa yhtä jännitysjaksoa. Näitä on myös

kuusi kappaletta, jokainen näistä edustaa yhtä kuvan 3.10, kohdan b) jännitys-venymäsilmukkaa. Kuvan 3.11 mukaiset jännitysjakso ovat löydettävissä kuvan 3.10, kohdan a) sadevirtauskuvasta, etsimällä katkoviivan muodostamia suljettuja murtoviivoja. Suljetun murtoviivan äärijännitysarvot ovat yksittäisen jännitysjakson  $\sigma_{\max}$  ja  $\sigma_{\min}$ . Esimerkin tapauksessa suurimman jännitysarvon löytämiseksi tulee kuvitella sadevirtaus pisteestä A pisteeseen M.



Kuva 3.11. Suljetut jännitys-venymäsilmukat voidaan esittää jännitysjaksoina, joilla on omat amplitudit ja keskiännitykset.

Kuvan 3.9 muuttuva-amplitudinen jännityshistorian voidaan katsoa muodostuvan kuudesta erilaisesta jännitysjaksoista, jokaisella on oma amplitudinsa, keskiännityksensä, minimi- ja maksimijännitysarvonsa. Taulukkoon 3.1 on koottu nämä arvot. Muuttuva-amplitudinen jännityshistoria voi sisältää myös täysin samanlaisia jännitysjaksoja. Tämä ei tule selväksi edellä käydystä esimerkistä.

Taulukko 3.1. Kuvan 3.9 silmukoiden eli jännitysjaksojen jännitysarvot koottuna taulukkoon.

Silmukka	Max $\sigma_{\max}$	Min $\sigma_{\min}$	Vaihteluväli	Amplitudi $\sigma_a$	Keskiännitys $\sigma_{\text{mean}}$	Jännitys-suhde $R_s$
A-J-M	400	-150	550	275	125	-0,375
B-G-B*	300	-100	400	200	100	-0,333
C-D-C*	250	50	200	100	150	0,200
E-F-E*	150	100	50	25	125	0,667
H-I-H*	50	-50	100	50	0	-1,000
K-L-K*	200	150	50	25	175	0,750

Rainflow-analyysin jälkeen tiedetään jännitysjakso ja niiden lukumäärät. Väsymisvaurion suuruudesta ei kuitenkaan voida sanoa tämän perusteella mitään. Erilaiset jännitysjakso aiheuttavat erisuuren väsymisvaurion. Väsymisvaurion suuruudesta saadaan käsitys summaamalla erilaiset jännitysjakso. Tähän on kehitetty menetelmä, Palmgren–Minerin kumulatiivinen vauriosääntö.



### 3.3 Palmgren–Minerin kumulatiivinen vauriosääntö

Palmgren–Minerin malli on yleisin menetelmä summata väsymisvauriot ja näin määrittää väsymisen käyttöaste. Palmgren–Miner mallia kutsutaan myös yksinkertaisemmin Minerin säännöksi. Säännön on ensimmäisenä esittänyt ruotsalainen tutkija Palmgren, A. vuonna 1924. Hänen työnsä ei kuitenkaan herättänyt mielenkiintoa ja vasta Miner, M. A. työ vuonna 1945 samasta aiheesta teki sen yleisemmin tunnetuksi. [Rabb, R. 2012. s. 169]

Palmgren–Minerin malli on lineaarinen, jonka vuoksi malli on helppokäyttöinen. Mallin peruskaava on

$$\sum_{i=1}^N \frac{n_i}{N_i} = D, \quad (\text{kaava 3.9})$$

missä  $D$  on vaurioaste,  $n_i$  on jännitysheilahdusten lukumäärä tietyllä jännitysvaihteluvälillä  $i$  ja  $N_i$  on väsymismurtumiseen vaadittavien jännitysheilahdusten lukumäärä jännitysvaihteluvälillä  $i$ . Mallin mukaan väsymismurto tapahtuu kun vaurioaste  $D = 1$ . [Milne, I. et al. 2003. Volume 4, s. 257-258]

Jatketaan, kohdassa 3.1.2 Rainflow analyysi, käytyä esimerkkiä esittäen miten Palmgren–Minerin mallilla summataan kumulatiivinen vaurio. Oletetaan laskettavan, vaurioon johtavan, muuttuva-amplitudisen jännityshistorian koostuvan ainoastaan kuvassa 3.11 esitetyistä jännitysjaksoista, joiden kertymät ovat taulukon 3.2 mukaiset.

*Taulukko 3.2. Esimerkin jännityshistorian tapahtuneet eri jännitysjaksojen lukumäärät.*

A-J-M	B-G-B*	C-D-C*	E-F-E*	H-I-H*	K-L-K*
1 000 kpl	10 000 kpl	150 000 kpl	5 000 kpl	1 000 000 kpl	700 000 kpl

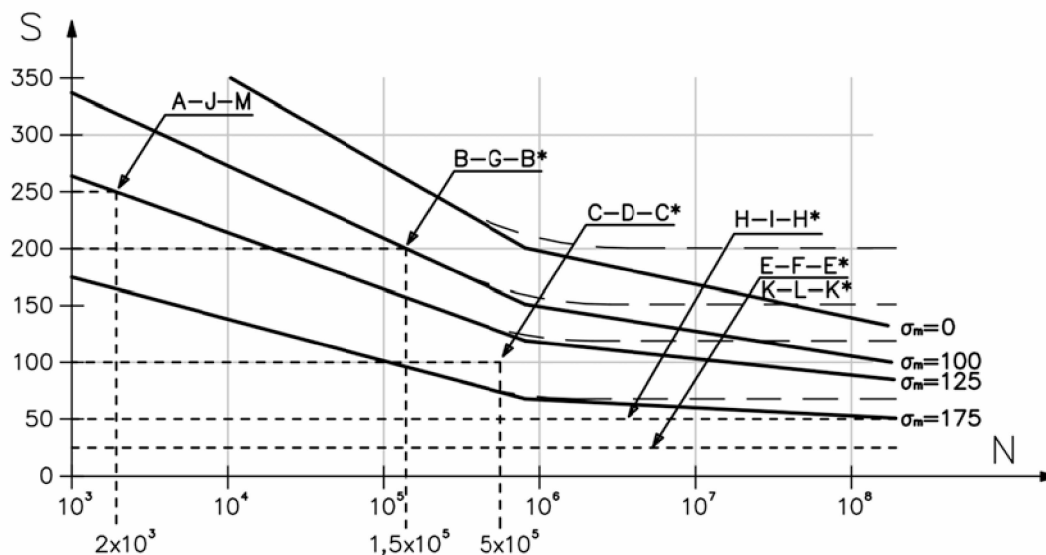
Jännityshistorian yksittäisten jännitysjaksojen ominaisuuksien ja kunkin toteutuneen lukumäärän jälkeen selvitetään erilaisten jännitysjaksojen kestävyysmäärät kuormituskerroille wöhler-käyrien avulla kuvan 3.12 tapaan. Kuvasta luetut toistokertojen kestävyysmäärät ovat taulukoitu taulukkoon 3.3. Tämän jälkeen voidaan summata kumulatiivinen vaurio Palmgren–Minerin säännöllä, kaava 3.10.

$$D = \sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_i} = \frac{1\,000}{2 * 10^3} + \frac{10\,000}{1,5 * 10^5} + \frac{150\,000}{5 * 10^5} + \frac{5\,000}{\infty} + \frac{1\,000\,000}{\infty} + \frac{700\,000}{\infty} = 0,500 + 0,067 + 0,300 + 0 + 0 + 0 = \frac{13}{15} = 0,87$$

(kaava 3.10)

Vaurioasteeksi saadaan 0,87, joka on alle yhden. Väsymismurto ei ole siis laskennallisesti vielä tapahtunut, mutta kappale on väsymistarkastelun näkökulmasta elinkaaren lopussa. Kaavasta 3.10 huomaa selvästi isojen jännitysvaihteluiden suuremman vaikutuksen väsymisvaurioon. 1 000 suurinta jännitysvaihtelua aiheuttaa väsymiskertymästä puolet, vaikka nämä edustavat lukumäärällisesti noin puolta promillea kaikista jännitysvaihteluista. Esimerkin mukaista menettelyä voidaan käyttää myös betonin väsymistarkastelussa.

Palmgen–Minerin malli ei aina vastaa todellista vaurion kertymistä. Malli ei huomioi mitenkään sitä, missä järjestyksessä erikokoiset jännitysheilahdukset tulevat. Järjestyksellä on kuitenkin väliä, väsymisvaurio suurempi mikäli suuret jännitysheilahdukset tulevat ennen pienempiä. Lisäksi Palmgen–Minerin mallia on kritisoitu siitä, että jäännösjännitykset materiaalissa saattavat pienentyä eritavalla muuttuva-amplitudisen ja vakioamplitudisen jännitysvaihtelun välillä johtuen mm. relaksaatiosta tai virumasta. Kritiikkiä on kohdistettu myös väsymisrajan läheisyydessä tapahtuviin ilmiöihin, jotka ovat erilaisia muuttuva-amplitudisessa ja vakioamplitudisessa jännitysvaihtelussa. [Helin, R. LO 23/2011, s. 23]



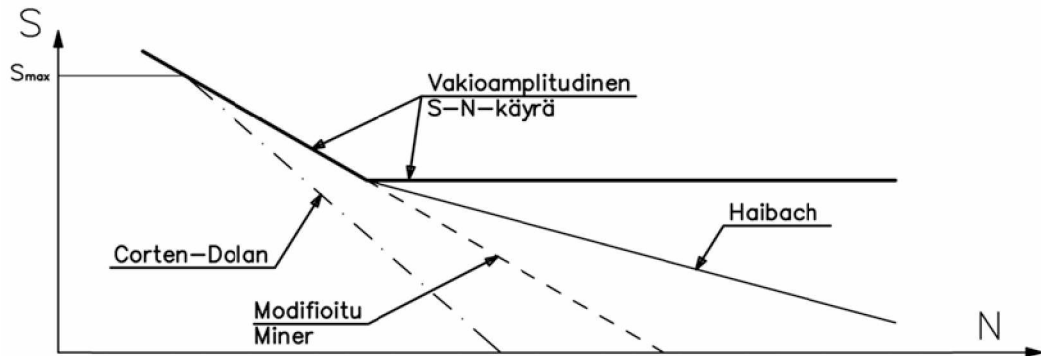
Kuva 3.12. Esimerkin kappaleen wöhler-käyrät eri keskijännityksen arvoilla ja etsityt kestävyysmäärät kuormituskerroille jokaiselle erilaiselle jännitysjaksolle. Kuvan wöhler-käyrät eivät perustu todellisiin tuloksiin vaan ovat sovitettu esimerkkiin sopiviksi.

Taulukko 3.3. Eri jännitysjaksojen kestävyysmäärät kuormituskerroille, kuvan 3.12 perusteella.

A-J-M	B-G-B*	C-D-C*	E-F-E*	H-I-H*	K-L-K*
2x10 <sup>3</sup> kpl	1,5x10 <sup>5</sup> kpl	5x10 <sup>5</sup> kpl	∞ kpl	∞ kpl	∞ kpl

Kuvassa 3.12 esiintyvissä wöhler-käyrissä ei ole vaakasuoraa osuutta suurten kuormituskertojen puoleisessa päässä. Tämä ei tarkoita sitä, että materiaalilta ei ole löydettävissä väsymisrajaa. On todettu, että muuttuva-amplitudisessa jännitysvaihtelussa myös väsymisrajan alapuolella olevat jännitysheilahdukset lisäävät väsymisvauriokertymää. Tämän vuoksi muuttuva-amplitudisen jännitysvaihtelun tapauksessa wöhler-käyrissä ei ole lopussa vaakasuoraa osuutta. Alkuperäinen Palmgen–Minerin

malli ei huomionnut väsymisrajan alapuolella olevia jännitysheilahduksia ja kuormituskertojen kestävyysmääriä etsittiin vakioamplitudiselta wöhler-käyrältä. Wöhler-käyrän modifiointimenetelmiä muuttuva-amplitudiselle jännityshistorialle on useita. Näistä tunnetuimpia ovat Haibach, Corten–Dolan ja modifioitu Miner. Menetelmät ovat esitetty kuvassa 3.13. [Rabb, R. 2012 s. 170] [Milne, I. et al. 2003. Volume 4, s. 259–260]



Kuva 3.13. Wöhler-käyrän modifiointimenetelmiä muuttuva-amplitudisen jännityshistorian kumulatiivisen vaurion summaamiseen.

E. Haibachin modifiointimenetelmä on luultavimmin suosituin menetelmä Euroopassa. Siinä väsymisrajan jälkeen wöhler-käyrä laskee mutta laskee loivemmin mitä se laskee varsinaisella aikalujuusalueella. Haibachin vaurioviivan kaava on muotoa, kaava 3.11.

$$N * \sigma_a^{(2*m-1)} = C \quad (\text{kaava 3.11})$$

Corten–Dolanin ja modifioitun Minerin mukaiset modifioitut wöhler-käyrät ovat suoria viivoja kaksoislogaritmisella asteikolla. Modifioitu Miner on yksinkertainen menetelmä summata vaurio. Tässä menetelmässä käyrä jatkuu samassa kaltevuudessa väsymisrajalta eteenpäin. Corten–Dolan modifioinnissa etsitään muodostettavan käyrän päätepiste vakioamplitudisen S–N-käyrän ja analysoitavan jännityshistorian suurimman jännitysheilahduksen,  $S_{\max}$ , risteyspisteestä. Tästä pisteestä piirretään käyrä, jonka yhtälön muoto on kaavan 3.12 mukainen tapauksissa, jossa vakioamplitudinen wöhler-käyrä on kaavassa 3.4 esitetyn muotoinen.

$$N * \sigma_a^{m'} = N * \sigma_a^{\beta m} = C \quad (\text{kaava 3.12})$$

Kaavassa 3.12 termi  $\beta$  on materiaalivakio, joka määritellään kokemukseräisesti. Sen määrittämiseksi tulisi tehdä väsymiskokeita tai määrittämisen tulisi perustua kokeuksiin todellisten kappaleiden väsymisvaurioista. Vakion  $\beta$  arvo riippuu sekä materiaalista että jännityshistoriasta. Se on tyypillisesti 0,70 ja 0,95 välissä. [Milne, I. et al. 2003. Volume 4, s. 259–260]

## 3.4 Väsymismitoitus olemassa olevilla silloilla RSO:n mukaan

Nykyisin väsymiseen perustuva, sillan jäljellä oleva käyttöikä lasketaan ohjeen RSO 9, liitteen 1 mukaan. Ohje on vuodelta 2002 ja tämän vuoksi ohjeen kanssa on käytetty rakennusmääräyskokoelman osaa B4 ja Betonirakenneohjeita. Ohje esittää kolme erilaista mallia, jäljellä olevan käyttöiän laskentaan. Malli 1 on epätarkin, mutta yksinkertaisin tarkastella. Malli 2 on mallia 1 tarkempi ja malli 3 tarkin menetelmä. Mitä tarkempaa mallia käytetään, sitä tarkemmin joudutaan huomioimaan todellisen liikenteen vaikutuksia.

Kolmen erilaisen mallin tarkoituksena on pienentää laskentatyön työmäärää selvissä tapauksissa. Helpoilla mutta varmoilla laskentaperiaatteilla saadaan haarukoitua suuresta sillamäärästä nopeasti pois aluksi suurin osa pois, minkä jälkeen siirrytään muiden siltojen kanssa asteittain tarkempiin ja vähemmän varmoihin laskentaperiaatteisiin.

RSO 9 ohjeen mallien laskentakaavat eivät anna suoraan tulokseksi jäljellä olevaa käyttöikää vaan niillä lasketaan vaurioitumisen suhteen ekvivalentti jännitysvaihteluväli, jota verrataan väsymislujuuteen. Tämän vertailun perusteella saadaan tietoa siitä, että onko silta käyttökelpoinen väsymismitoituksen perusteella. Väsymistarkastelut tulee tehdä sekä betonille että betoniteräksille. Lisäksi tulee tarkastaa väsyminen sekä momentti- että leikkausvoimarasitukselle. Halutessa selvittää sillan laskennallinen käyttöikä, saadaan se selville iteroimalla. Poikkeuksen tekee malli 1, jossa tarkastellaan sitä, että kestäkö silta suunnitteluperusteena olevan liikennemäärän. Suunnitteluperusteena käytetään 1900 milj. br. tn / 100 vuotta. [Rautatiesiltojen suunnitteluohje RSO 9, liite 1, 1/3.]

### 3.4.1 Malli 1

Mallilla 1 ei määritetä sillan jäljellä olevaa käyttöikää. Malli 1 vastaa vanhan normin RSO:n mukaista, uuden sillan suunnittelussa käytettävää väsymisrajatilan tarkastelua. Tällä tarkastetaan kestäkö silta suunnitteluperusteena olevan väsymiskuormituksen 1900 milj. br. tn / 100 vuotta.

Kaikissa kolmessa mallissa ekvivalentti jännitysvaihteluväli lasketaan käyttäen peruskaavaa, jossa kuormakaavion mukaista jännitysvaihteluväliä kerrotaan  $\lambda$ -kertoimella. Peruskaava ekvivalentin jännitysvaihteluvälin laskemiseksi on esitetty kaavassa 3.13.

$$\Delta\sigma_{ekv} = \lambda_{m,\alpha} * \Delta\sigma_{LM71-XX}, \quad (\text{kaava 3.13})$$

missä  $\Delta\sigma_{LM71-XX}$  on luokitellun ja dynaamisella suurennuskertoimella,  $\Phi_2$ , kerrotun LM71 kuormakaavion aiheuttama jännitysvaihteluväli. Jännitysvaihteluväli voidaan laskea millä tahansa luokitellulla LM71 kuormakaaviolla, koska lambda-kerroin,  $\lambda_{m,\alpha}$ , skaalaa jännitysvaihteluvälin kuormakaaviota LM71-35 vastaavaksi.  $\lambda_{m,\alpha}$  lasketaan kaavan 3.14 mukaisesti.

$$\lambda_{m,\alpha} = \frac{1,46}{\alpha} * \lambda_m, \quad (\text{kaava 3.14})$$

missä  $\alpha$  on käytetyn luokitellun kuormakaavion kerroin. Tämä määräytyy taulukon 3.4 mukaan.

Taulukko 3.4. Kuormakaavion LM71 luokitukseen käytettävät  $\alpha$ -kerroimet.

LM71-17	LM71-22,5	LM71-25	LM71-27,5	LM71-30	LM71-35
0,75	1,00	1,10	1,21	1,33	1,46

Mallissa 1 lambda,  $\lambda_m$ , lasketaan kaavan 3.15 mukaisesti. Kaavassa kertoimet  $\lambda_{2,2}$  ja  $\lambda_{m,3}$  ovat arvoltaan 1,0, koska mallissa 1 ei huomioida sillan toteutunutta bruttotonnimäärää eikä sillan käyttöikä.

$$\lambda_m = \lambda_{m,1} * 1,0 * 1,0 * \lambda_{m,4}, \quad (\text{kaava 3.15})$$

Kerroin  $\lambda_1$  huomioi sillan määräävän pituuden. Se määritetään RSO 3:n mukaan teräsbetonirakenteelle seuraavasti:

$$\lambda_{m,1} = 0,67, \quad L \leq 2,0 \text{ m} \quad (\text{kaava 3.16})$$

$$\lambda_{m,1} = 0,67 + (0,32 - 0,67)[\log(L) - 0,3], \quad 2,0 \text{ m} < L < 2,0 \text{ m} \quad (\text{kaava 3.17})$$

$$\lambda_{m,1} = 0,32, \quad L \geq 20,0 \text{ m} \quad (\text{kaava 3.18})$$

Kerroin  $\lambda_4$  huomioi raiteiden lukumäärän sillalla. Yksiraiteisella sillalla  $\lambda_4$  saa arvon 1,0. Kaksi tai useampiraiteisella sillalla  $\lambda_4$  lasketaan kaavan 3.19 mukaisesti.

$$\lambda_{m,4} = \sqrt[m]{n + (1 - n) * (s_1)^m + (1 - n) * (s_2)^m}, \quad (\text{kaava 3.19})$$

missä termit  $s_1, s_2$  ja  $n$  lasketaan kaavojen 3.20–3.22 mukaisesti.

$$s_1 = \frac{\Delta\sigma_1}{\Delta\sigma_{1+2}} \quad (\text{kaava 3.20})$$

$$s_2 = \frac{\Delta\sigma_2}{\Delta\sigma_{1+2}} \quad (\text{kaava 3.21})$$

$$n = \frac{N_0}{N_T} \quad (\text{kaava 3.22})$$

Kaavoissa 3.19–3.22 olevat termit tarkoittavat:

$m$  = materiaalin wöhler-käyrän eksponentti, teräsbetonirakenteella  $m = 9$

$\Delta\sigma_1, \Delta\sigma_2$  = jännitysheilahdukset kuormakaaviosta yhdellä raiteella

$\Delta\sigma_{1+2}$  = jännitysheilahdukset kuormakaaviosta kahdella raiteella

$n$  = eri raiteilla kulkeva osuus liikenteestä

$N_0$  = kokonaisjunamäärä, joka ylittää sillan ja

$N_T$  = kokonaisjunamäärä, joka ylittää sillan pitkin yhtä raidetta.

Verrattaessa suunnitteluperusteena olevaa bruttotonnimäärää (1900 milj. br. tn / 100 vuotta) kappaleessa 2.2 tutkittujen rataosuuksien eniten kuormitettuun rataosuuteen, Pasila–Kerava, voidaan huomata, että vanhoille silloille vaadittu bruttotonnimäärä on

todella suuri. Rataosuuden, Pasila–Kerava, toteutunut bruttotonnimäärä vuodesta 1913 vuoteen 2012 on vajaa 1600 milj. br. tn. Tässä tulee kuitenkin huomata, että kyseinen rataosuus on ollut yli puolet tästä ajasta kaksiraiteinen, joten yhtä raidetta kohden toteutunut bruttotonnimäärä jää alle 1000 milj. br. tonniin. Tämä on siis eniten kuormitettu rataosuus. Suurimmalla osalla, yli 70 prosentilla, tutkituista rataosuuksista toteutunut 100 vuoden bruttotonnimäärä jää alle 500 milj. br. tonnin. Tämä on yksi syy miksi malli 1 antaa ylivarvoja tuloksia.

### 3.4.2 Malli 2

RSO 9:n mallissa 2 huomioidaan tarkemmin toteutunut bruttotonnimäärä. Tässä työssä tutkittuja toteutuneita bruttotonnimääriä voidaan nyt hyödyntää mallissa 2 ja 3. Toteutuneet bruttotonnimäärät ovat selvitetty 103 rataosuudelle, joka edustuu lähes koko rataverkkoa. Tämä on selvä parannus aiemman seitsemän selvillä olleen rataosuuden bruttotonnitietoihin verrattuna.

Malli 2 perustuu myös peruskaavaan 3.1. Tässä mallissa lambda laskennassa huomioidaan mallissa 1 esitetyn lisäksi liikenteen bruttotonnimäärä ja sillan käyttöikä. Mallin 2 lambda lasketaan kaavalla 3.11.

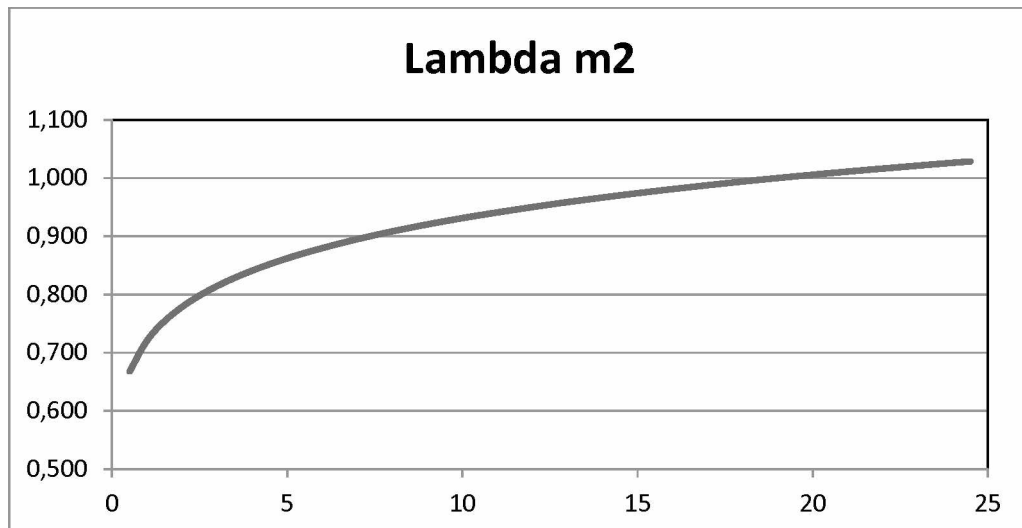
$$\lambda_m = \lambda_{m,1} * \lambda_{m,2} * \lambda_{m,3} * \lambda_{m,4}, \quad (\text{kaava 3.23})$$

missä  $\lambda_{m,2}$  huomioi rakenteen ylikulkevan bruttotonnimäärän sen eliniän aikana ja  $\lambda_{m,3}$  huomioi rakenteen suunnitellun käyttöiän. Nämä lasketaan kaavojen 3.24 ja 3.25 mukaan.

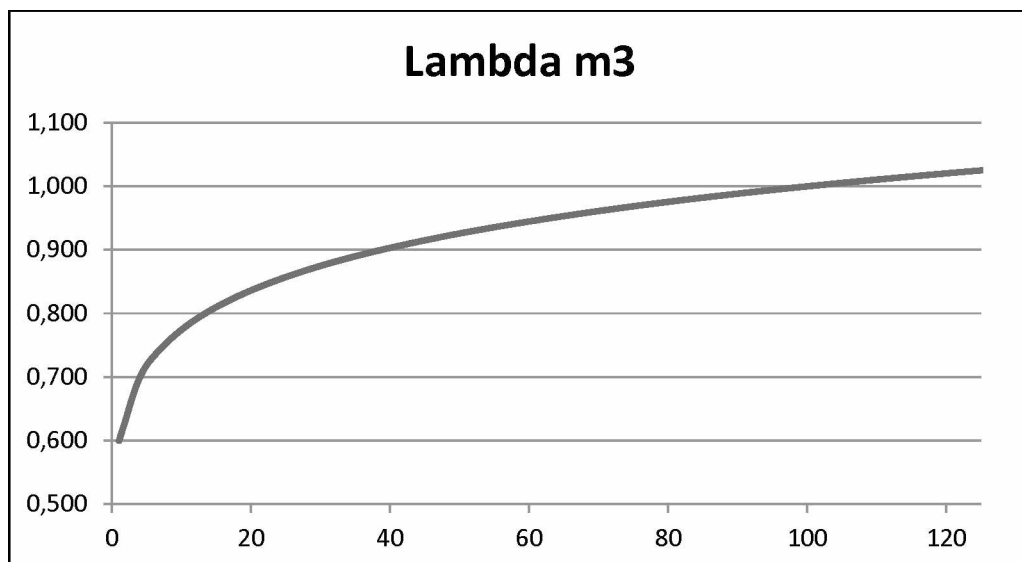
$$\lambda_{m,2} = \sqrt[m]{\frac{Q_r}{19 * 10^6}} \quad (\text{kaava 3.24})$$

$$\lambda_{m,3} = \sqrt[m]{\frac{N_r}{100}} \quad (\text{kaava 3.25})$$

missä  $Q_r$  on rataosuuden liikenteen bruttotonnit vuodessa [tn/v] ja  $N_r$  on sillan suunniteltu käyttöikä. Termi m on sama mitä edellä eli 9 teräsbetonirakenteelle. Arvot sijoitetaan yhtälöihin ilman yksiköitä. Kaava 3.24 on esitetty kuvassa 3.14 bruttotonnien funktiona ja kaava 3.25 on esitetty kuvassa 3.15 sillan suunnitellun käyttöiän funktiona.



Kuva 3.14. Kaava 3.24 esitettyinä bruttotonnien funktiona.



Kuva 3.15. Kaava 3.25 esitettyinä sillan suunnitellun käyttöiän funktiona.

### 3.4.3 Malli 3

Malli 3 on laskentamenetelmistä tarkin. Tässä menetelmässä huomioidaan liikennemäärä todellisen toteutuman mukaan kuten mallissa 2. Lisäksi huomioidaan tyypillinen kalusto 25 vuoden aikajaksoissa ominaisjunien avulla. Suunnittelijan ei tarvitse laskea ominaisjunien avulla väsymiskertymää, vaan ominaisjunien avulla on laskettu etukäteen  $k_i$ -kertoimet, joilla huomioidaan kaluston kunkin aikajakson tyypillisiä ominaisuuksia kuten akselipainoja ja akselivälejä.  $k_i$ -kertoimet perustuvat Roosin tutkimukseen. Mallin 3 lambda lasketaan kaavalla 3.26, jossa  $k_i$ -kerroin valitaan taulukon 3.5 mukaan.

$$\lambda_k = \frac{\lambda_{m,\alpha}}{\sqrt[m]{19 \cdot 10^8}} * \sqrt[m]{\sum_{i=1}^5 Q_i * (k_i)^m} \quad (\text{kaava 3.26})$$

Taulukko 3.5. Kaavassa 3.26 käytettävän  $k_i$ -kertoimen valinta.

		Kerroin $k_i$		
Aikajakso	$i$	$L < 5$	$5 < L < 20$	$L > 20$
1900–1924	1	0,56	$0,493 + 0,013 * L$	0,76
1925–1949	2	0,64	$0,553 + 0,017 * L$	0,90
1950–1974	3	0,73	$0,653 + 0,015 * L$	0,96
1975–1999	4	1,00	1,00	1,00
2000–2024	5	1,10	1,10	1,10

Kaavassa 3.26,  $m$  on materiaalikohtainen jännitysekspONENTTI, RSO:n mukaan betonille  $m = 9$  ja teräkselle  $m = 3$ , ja  $Q_i$  on kunkin aikajakson  $i$  sillan ylittänyt bruttotonni määrä. Materiaalikohtaisessa jännitysekspONENTTissa tulee huomata, että teräsbetonirakenteella lasketaan oma  $\lambda$  sekä betoniteräkselle että betonille. Tämä eroaa mallista 2, jossa jännitysekspONENTTIA ei määritetä materiaalikohtaisesti vaan teräsbetonirakenteen ollessa kyseessä käytetään yhtä jännitysekspONENTTIA,  $m = 9$ .

Kaavan 3.26 termi  $\lambda_{m,\alpha}$  lasketaan RSO:n perusteella kaavojen 3.14 ja 3.23 mukaan. Näin tehtäessä, vaikuttaa siltä, että liikennemäärä tulee huomioitua kahteen kertaan. Lähteessä, Teräsbetonisten rautatiesiltojen väsymiskestävyyden määrittäminen LO23/2011, todetaan, että termin  $\lambda_{m,\alpha}$  arvona tulee käyttää mallilla 1 laskettua arvoa, joka huomioi ainoastaan sillan määrävän pituuden (jännevälin) [Helin, R. LO23/2011, s. 70].



## 4 Ehdotus käytettäväksi väsymimitoitusmenetelmäksi kantavuuslaskentaan

Tässä tutkimuksessa ei käydä läpi rautatiesiltojen koko väsymimitoitusta vaan keskitytään ekvivalentin väsymisvauriokertoimen,  $\lambda$ -kertoimen, määrittämiseen. Lisäksi laskenta kohdistetaan ainoastaan betoniteräksen  $\lambda$ -kertoimen tarkasteluun. Toinen väsymismurtotapa, betonin väsymismurtuminen, on hyvin harvinaista, mikäli betoni on hyvässä kunnossa [Plos, M. et al. 2007. Kerokoski et al. 2013. s. 42 mukaan]. Tämän takia keskitytään betoniteräksen ekvivalentteihin vauriokertoimiin. Tutkimuksen aiheen, olemassa olevien betonisten rautatiesiltojen, väsymimitoitusta ehdotetaan suoritettavan eurokoodin uusille rautatiesilloille käytettävän väsymimitoituksen, *SFS-EN 1992-2+AC* ja tässä esitettyjen ekvivalenttien väsymisvauriokertoimien avulla. Uusien betonisten rautatiesiltojen koko väsymimitoituksesta voi lukea lisää julkaisusta, Teräsbetonisten rautatiesiltojen väsymiskestävyyden määrittäminen LO23/2011, Helin, Ristomatti. Kyseistä aihetta käsitellään julkaisun kappaleessa 3.5.

Tämän tutkimuksen mukaista laskentaa on tietävästi tehty Suomessa aiemmin ainoastaan kahden henkilön johdosta, Roos, Vilho 1980-luvun loppupuolella ja Ryyänen, Markus vuosina 2009–2010. Roos laski, kuten tässäkin tutkimuksessa lasketaan, olemassa olevien rautatiesiltojen väsymiskertymää. Ryyänen tutkimuksen tarkoitus oli selvittää, voidaanko eurokoodissa esitettyjä ekvivalentteja väsymisvauriokertoimia soveltaa Suomessa, joten tämä tutkimus kohdistui uusien rautatiesiltojen väsymiskestävyyteen.

### 4.1 Käytettävä kuormakaavio

Käytettävällä kuormakaaviolla tarkoitetaan sitä kuormakaaviota, jolla olemassa olevan rautatiesillan rasitukset lasketaan väsymiskertymisen saamiseksi. Käytetään myöhemmin tästä myös nimitystä vertailukuormakaavio. Koska käytettävät ekvivalentit vauriokertoimet ovat todellista liikennettä kuvaavien ominaisjuniiden ja mitoituskuormakaavioiden rasitusvaihteluväliden suhteita, voidaan käytettävä mitoituskuormakaavio valita.

Kuormakaavioksi on kaksi luontevaa valintaa joko eurokoodin kuormakaaviot tai standardin 15528+A1 liitteen A kuormakaaviot. Eurokoodin mukaiset kuormakaaviot on esitetty kuvissa 2.19 ja 2.20, ja standardin kuormakaaviot liitteessä 8. Kantavuuslaskennassa tarkastellaan usein väsymisrajatilan lisäksi myös muitakin rajatiloja. Tämän vuoksi kantavuuslaskijalle on yksinkertaisempaa, mikäli kuormakaavioita ei ole useita. Standardin 15528+A1 liitteen A kuormakaavioiden käyttäminen aiheuttaisi sen, että sillat laskettaisiin tietyille luokalle, joita on toistakymmentä. Nähdään järkevämpänä käyttää uusien siltojen mitoituksessakin käytettävää kuormakaaviota LM71. Näin ollen ei myöskään sidota väsymislaskentaa siltojen luokitukseen. Siltojen luokitus voidaan tehdä myöhemmin erikseen kuvan 2.21 mukaisilla viivakaavioilla, joissa on esitetty standardin 15528+A1 luokituksen kuormakaavioilla lasketun rasituksen suhde kuormakaaviolla LM71 laskettuun jännemitan funktiona. Kuvan 2.21 mukainen kaavio on laadittu myös leikkausrasitukselle.

Eurokoodin kuormakaavioiden käytön kanssa nähdään tärkeänä se, että käytetään samoja kuormakaavioita millä eurokoodissa on laskettu uusien siltojen ekvivalentit vauriokertoimet. Pyritään siis yhdenmukaisiin menettelytapoihin kuormakaavioiden suhteen sekä uusien että olemassa olevien siltojen kanssa. Kuormakaavion LM71-22,5 käyttö ekvivalenttien vauriokertoimien laskennassa on selkeästi esitetty eurokoodissa, mutta jatkuvien siltojen mitoituksessa käytettävän kuormakaavion SW/0-22,5 käyttö herättää kysymyksiä. Eurokoodisarjan kohdassa, jossa asia tulisi mainita, standardissa SFS-EN 1991-2, kohdassa 6.9, Väsyttävät liikennekuormat, mainitaan ainoastaan kuormakaavion LM71 käyttö. Kuitenkin saman standardin liitteessä D, kaavan D.6 kohdalla mainitaan sulkuihin sijoitettuna, että tarvittaessa käytetään SW/0 kuormakaaviota. Vastaavanlainen, sulkuihin sijoitettu, maininta löytyy standardista SFS-EN 1992-2+AC liitteestä NN, kaavan NN.106 kohdalta. Oletetaan, että käytetyn asian esitystavan tarkoittavan sitä, että kuormakaavion LM71 lisäksi käytetään kuormakaaviota SW/0 kun tämä tuottaa määrävän vaikutuksen ja kuormitettava silta on jatkuva. Näin ollen päädytään käyttämään luokiteltuina vertailukuormakaavioina sekä LM71-22,5 että SW/0-22,5.

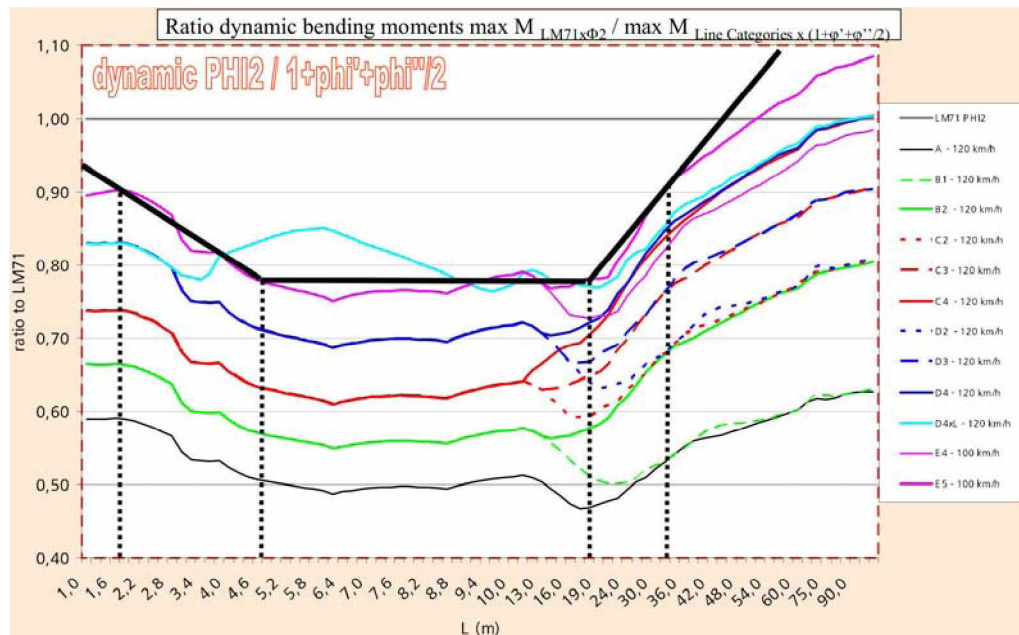
## 4.2 Tutkittavat siltajänteet

Tutkittavat siltajänteet ovat laskentaan valittuja siltarakenteita, joille tehdään väsymiskertymälaskentoja. Siltajänteiksi valitaan yksi- ja useampiaukkoisia siltajänteitä.

### 4.2.1 1-aukkoiset siltajänteet

Tutkittavien 1-aukkoisten siltojen jännevälit valitaan kuvan 4.1 mukaisesti, 2 m, 5 m, 20 m ja 35 m. Tällä tavoin tehden, voidaan muodostaa yksinkertainen laskentatapa, jolla voidaan tarkastella 1-aukkoisten rautatiesiltojen standardin EN 15528 mukainen luokitus väsymiskestävyyden puolesta. 1-aukkoisten laskentapisteiksi valitaan jokaisen eripituisen sillan jännevälin puoliväli.

Kuva 4.1 esittää standardin EN 15528 eri luokkien kuormakaavioilla saadun momentin suhdetta kuormakaaviolla LM71-22,5 saatuun momenttiin. Tämän vuoksi kuvan momenttisuhteiden avulla voidaan helposti muuttaa vertailukuormakaaviolla LM71-22,5 saatu momenttivaihteluväli vastaamaan standardin EN 15528 halutun luokan mukaisista momenttivaihteluväliä. Näin ollen voidaan tarkistaa olemassa olevan rautatiesillan väsymiskestävyys ja jäljellä oleva käyttöaika halutulle standardin EN 15528 mukaiselle luokalle. Kuvan 4.1 momenttisuhteet sillan jännemitan funktiona voidaan yksinkertaistaa kuvan mukaisesti kolmeksi suoraksi viivaksi ja nämä voidaan esittää kaavoina laskentaa yksinkertaistaen. Tarkempaa laskentaa voi tehdä kuvan 4.1 avulla. Tarkemmasta laskennasta saa suurempaa etua vaadittaessa luokkia A, B1, C2, D2 tai D3 sillan jännemitan ollessa yli 15 m. Luokitukset D4xL ja C4 poikkeavat hieman kuvassa 4.1 esitetyistä kolmen suoran viivan yksinkertaistuksesta. Näille tulee tehdä omat yksinkertaistukset.



Kuva 4.1. UIC on raportissa, Calculations – Simply supported spans, CR TSI Structures Working Group, vertaillut standardin EN 15528 kuormakaavioiden aiheuttamien rasiusten suhdetta kuormakaavion LM71 aiheuttamiin rasiuksiin. Lisäksi kuvassa hahmotelma, jolla tulokset voidaan yksinkertaistaen ottaa laskennassa huomioon.

#### 4.2.2 Useampiaukkoiset jatkuvat siltajänteet

Jatkuvista useampiaukkoisista rautatiesilloista ei ole olemassa kuvan 4.1 mukaista kaaviota. Tämän vuoksi näiden valinta tulee perustaa johonkin muuhun. Jatkuvat 2-aukkoiset ja jatkuvat neljä- tai tätä useampiaukkoiset rautatiesillat ovat harvinaisia. Tämä käy ilmi kuvasta 1.5. Tämän vuoksi päädytään useampiaukkoisista rautatiesilloista tarkastelemaan ainoastaan jatkuvia 3-aukkoisia siltoja. Tutkittavien 3-aukkoisten rautatiesiltojen valinta perustetaan seuraaviin asioihin:

- Siltarekisteritietoihin olemassa olevien jatkuvien 3-aukkoisten rautatiesiltojen jännemitoista
- eurokoodin SFS-EN 1992-2+AC liitteeseen NN.3
- alustavien momenttistorian koelaskuihin eri keskijännemitoilla ja keskijänteen ja reunajänteen suhteilla.

Rautatiesiltarekisteristä on poimittu jatkuvien 3-aukkoisten rautatiesiltojen keskijännemitat kuvaan 1.6. Olemassa olevien jatkuvien 3-aukkoisten rautatiesiltojen keskijänteen pituus vaihtelee noin 5 metristä noin 35 metriin, 90 %:lla silloista keskijännemitta on 10 metrin ja 25 metrin välillä. Nähdään järkevänä valita tutkittavien siltojen keskijänteet samalle 10–25 metrin välille. Rautatiesiltarekisteristä selviää myös että reunajänteet ovat lähes aina keskijännettä lyhyempiä ja keskijänteen pituuden suhde lyhyemmän reunajänteen pituuteen on suurimmassa osassa 1,15 ja 1,35 välillä.

Alustavien momenttistorian koelaskujen perusteella voidaan todeta, että suurimmat momenttiheilaukukset aiheutuvat peräkkäisten vaunujen akseli- tai telipareista ja suurten momenttiheilaukusten lukumäärä vähenee sitä pienemmäksi, mitä pidemmät sillan jännemitat ovat. Koelaskuilla voidaan myös huomata miten, keskijänteen pituuden suhde lyhyemmän reunajänteen pituuteen, vaikuttaa momenttistoriaan. Momenttistorian muotoon tällä ei ole vaikutusta, mutta vaikutus momenttistorian

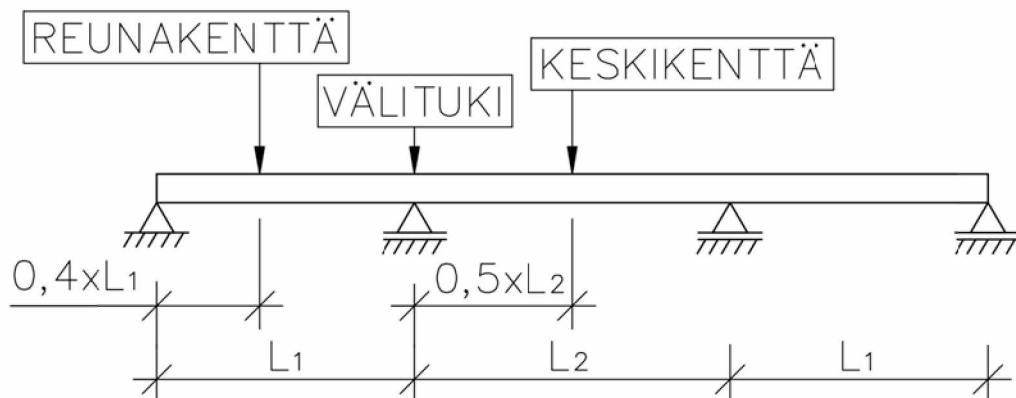
keskimomenttiin, ja näin ollen myös keskijännitykseen, on selvästi havaittavissa. Suhteen vaikutus keskijännitykseen on esitetty taulukossa 4.1.

*Taulukko 4.1. Suhteen, keskijänteen pituuden suhde reunajänteen pituuteen, vaikutus keskijännitykseen.*

Tarkastelupiste	Suhde pienenee	Suhde kasvaa
Keskiaukko	Keskijännitys laskee	Keskijännitys nousee
Tuki	Keskijännitys laskee	Keskijännitys nousee
Reuna-aukko	Keskijännitys nousee	Keskijännitys laskee

Vaikutus momenttistorian yksittäisten syklien momenttivaihteluväliin jäi pieneksi kun tarkastelupisteinä oli reuna- tai keskiaukko, mutta tarkasteltaessa tukea, oli vaihteluväleissäkin havaittavissa eroja. Suurempi keskijännitys väsyttää enemmän, mutta tätä ei huomioida eurokoodissa mitenkään. Tämän vuoksi keskijännitykseen ei kiinnitetä tässäkin tutkimuksessa huomiota.

Tutkittavien 3-aukkoisten rautatiesiltojen valinta perustetaan eurokoodin standardin SFS-EN 1992-2+AC liitteeseen NN.3, jotta saadaan vertailupiste uusien ja olemassa olevien rautatiesiltojen välille. Standardin taulukoissa NN.2 ja NN.3 on esitetty  $\lambda_1$  arvot 2 m ja 20 m jänteille sekä 1-aukkoisille että jatkuville silloille. Jatkuville silloille arvot ovat esitetty keskikentälle, reunajänteelle ja välituen alueelle. Standardin perusteella tutkittaviksi valitaan ainakin yksi keskijänteeltään 20 metriä pitkä ja yksi reunajänteeltään 20 metriä pitkä silta. Tämän perusteella valitaan tutkittaviksi 3-aukkoisiksi siltarakenteet, joiden jänteet ovat 20+25+20 ja 15+20+15. Pidemmän sillan keskimäisen jänteen pituuden suhde reunajänteen pituuteen on näin ollen 1,25 ja lyhyemmän sillan suhteeksi saadaan 1,33. Nämä suhteet vastaavat hyvin olemassa olevien rautatiesiltojen suhteita. Lisäksi pidempi silta osuu hyvin edellä mainitun keskijännemittävälän, 10–25 metriä, välin ylärajalle. Välin alaraja otetaan huomioon tutkimalla siltarakenne, jonka jännevälit ovat 9+11+9. Lisäksi valitaan tämän ja siltarakenteen 15+20+15 välille siltarakenne, jonka jännemitat ovat 12,5+15+12,5. Siltarakenteiden jännemittojen valintaan on vaikuttanut myös momenttistorian laskentaan käytettävä ohjelma, joka on asettanut rajoituksia laskettavalle tarkastelupisteelle. Nyt valitut siltarakenteet ovat sellaisia, joissa tarkastelupiste voidaan asettaa ainakin keskikentän puoleen väliin, tuelle ja reunakentän pisteeseen, joka jakaa maatuen ja välituen välisen jänteen suhteessa 40/60. 3-aukkoisten siltojen laskentapisteet on esitetty kuvassa 4.2. Valitut tutkittavat siltajänteet on koottu taulukkoon 4.2. Kuvasta poiketen, laskentapisteitä on käytännössä viisi, koska eri suunnista lähestyvät junat aiheuttavat erilaisen väsymisrasituksen tarkastelupisteen suhteen epäsymmetrisillä rakenteilla. Tulokset esitetään kuitenkin vain kolmessa laskentapisteessä.



Kuva 4.2. 3-aukkoisten siltojen laskentapisteiden sijainnit sillalla. Kuvan nuolet osoittavat laskentapisteiden paikat. Lisäksi on huomattava, että tarkasteltavien siltojen symmetrisyyden vuoksi, reunakentän ja välituen laskentapisteitä on kaksi kumpaakin. Symmetristen laskentapisteiden tulokset ovat identtisiä.

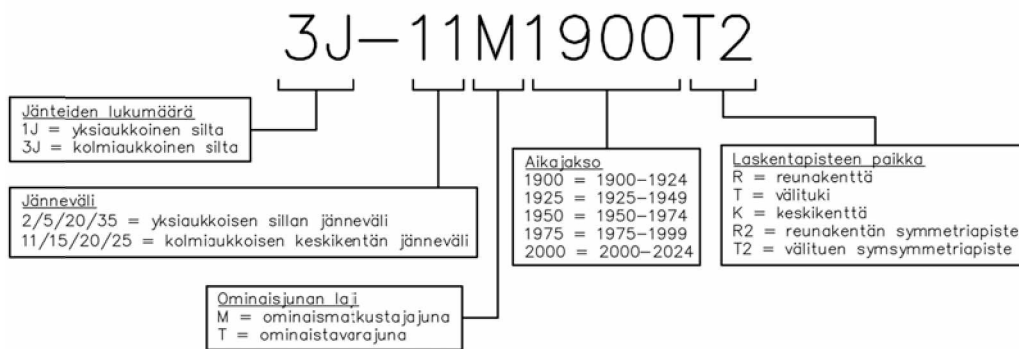
Taulukko 4.2. Laskentaan valitut tarkasteltavat siltajänteet.

1-aukkoiset vapaasti tuetut siltajänteet	Jatkuvat 3-aukkoiset siltajänteet
2,0 m	9,0 m + 11,0 m + 9,0 m (suhde 1,22)
5,0 m	12,5 m + 15,0 m + 12,5 m (suhde 1,20)
20,0 m	15,0 m + 20,0 m + 15,0 m (suhde 1,33)
35,0 m	20,0 m + 25,0 m + 20,0 m (suhde 1,25)

3-aukkoisista rautatiesilloista ei ole tehty kuvan 4.1 kaltaista kuviota, joten näiden luokittelu standardin SFS-EN 15528 luokitetuille kuormakaavioille tulee olemaan työläämpää. Näiden luokittelu väsymistarkastelun puolesta vaatii sillan vaikutusviivojen laskemisen ja momenttivaihteluvälin selvittämisen halutulla standardin EN 15528 kuormakaaviolla.

#### 4.2.3 Käytetyt tunnukset laskentapisteistä

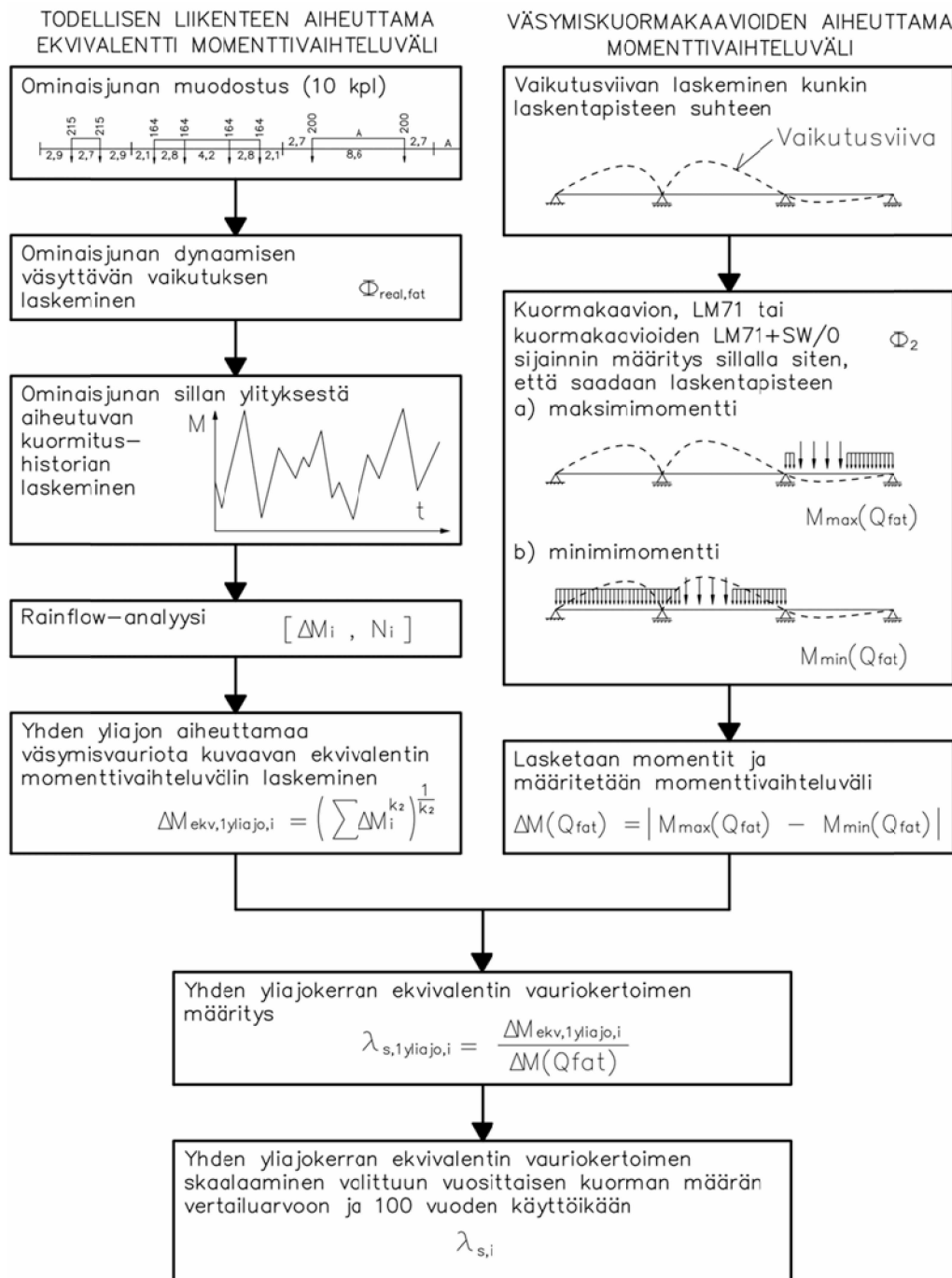
Laskentapisteiden suuren määrän vuoksi kullekin laskentapisteelle on muodostettu tunnus. Tunnuksen muodostaminen tapahtuu kuvan 4.3 mukaan. 3-aukkoisten reunakenttien jänteiden pituuksia ei ole päädytty sisällyttää tunnuksen vähäisen 3-aukkoisten siltojen määrän vuoksi ja siltojen symmetrisyyden vuoksi. 3-aukkoisessa sillassa reunakentän ja välituen laskentapisteistä on symmetriset pisteet sillan keskiaukon puolenvälin suhteen. Näille symmetriapisteille käytetään tunnuksia R2 ja T2. Symmetriapisteet R2 ja T2 sijaitsevat sillalla kasvavien kilometrien puoleisessa päässä. 1-aukkoisilla silloilla laskentapisteen paikkaa kuvaava kirjain tunnus jätetään laittamatta koska 1-aukkoisten siltojen laskentapiste sijaitsee aina jännevälin puolivälissä.



Kuva 4.3. Laskentapisteistä käytetyn tunnuksen muodostaminen.

### 4.3 Laskennan kulku

Väsymislaskentamenetelmästä on tarkoitus luoda sellainen, ettei kantavuuslaskijan tarvitse muodostaa ominaisjunia siltakohdekohtaisesti ja laskea niillä väsymiskertymää, jännityshistorian, rainflow-analyysin ja Palmgren-Minerin kumulatiivisen vauriosäännön kautta. Tarkoituksena on tehdä tämä työ etukäteen, laskien erilaisia siltajännteitä ja muodostaa väsymiskertymäsuhteita ominaisjunien ja valitun kuormakaavion tai kuormakaavioiden välille. Väsymiskertymäsuhteista muodostetaan kantavuuslaskentaan  $\lambda$ -kertoimet. Näin tehden kantavuuslaskija pystyy laskemaan väsymisvauriokertymän valitun kuormakaavion (tai kuormakaavioiden) ja ekvivalentin väsymisvauriokertoimen eli  $\lambda$ -kertoimien avulla. Kuvassa 4.4 on esitetty laskennan kulku vaiheittain  $\lambda$ -kertoimien määrittämiseksi.



Kuva 4.4. Kaaviokuva, jossa on esitetty  $\lambda$ -kertoimen laskeminen vaiheittain.

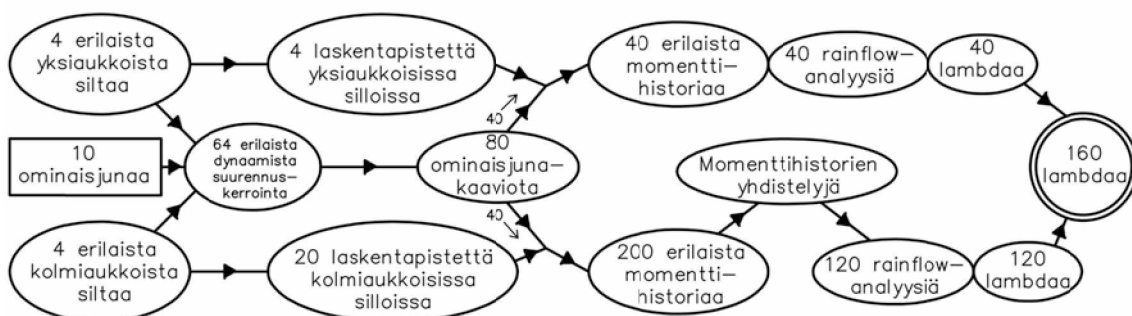
$\lambda$ -kerroin kuvaa todellisen liikenteen aiheuttaman väsymisvaurion suhdetta valitun vertailukuormakaavion tai -kaavioiden avulla laskettuun rasitusvaihteluväliin. Usein laskennassa käytetään jännityksiä, koska S-N-käyrät ovat esitetty jännitysten avulla. Tällöin puhutaan jännitysvaihteluvälistä. Laskennassa on käytetty kuitenkin momenteja. Koska  $\lambda$ -kerroin on kahden jännitysvaihteluvälin suhde ja momentti on suoraan verrannollinen jännityksen kanssa, voidaan laskennassa käyttää momenteja, jännitysten sijaan. Olemassa olevalle sillalle voidaan siis tehdä väsymistarkastelu, tarkastelemalla siltä vertailukuormakaaviolla tai -kuormakaaviolla ja kertoa saatu rasitusvaihteluväli  $\lambda$ -kertoimella, jolloin saadaan laskettua sillan väsymisvaurion suuruus todelliselle liikenteelle. Todellinen liikenne ei ole absoluuttinen todellinen liikenne vaan tällä tarkoitetaan keskimääräistä liikennettä, joka on pyritty mallintamaan eri

aikajaksojen ja erilajisten ominaisjunien avulla.  $\lambda$ -kertoimen avulla tapahtuva laskenta säästää laskentatyötä, koska jokaisen erillisen sillan kohdalla ei tarvitse alkaa mallintamaan todellista liikennettä.

Kaaviokuvassa, kuvassa 4.4, esitetty laskennan kulku kuvaa 3-aukkoisen sillan välituen  $\lambda$ -kertoimen laskentaan. Kaaviokuva on kuitenkin sovellettavissa hyvin myös 3-aukkoisen siltojen muille laskentapisteille ja myös 1-aukkoisille silloille. Kappaleissa 4.4–4.9 käydään tarkemmin läpi laskennan eri vaiheita. Kaaviokuva 4.4 tulee käydä läpi kaikkien ominaisjuna–laskentapiste-yhdistelmien osalta. Kuva 4.5 esittää miten tämän tutkimuksen siltojen, ominaisjunien ja laskentapisteiden määrä vaikuttaa laskentatyön määrään. 1-aukkoisten siltojen ekvivalenttien vauriokertoimien määrittämiseksi kuvassa 4.4 esitetty kaavio käydään läpi 40 kertaa. Tämä määrä muodostuu siitä kun viisi erilaista ominaistavarajunaa ja viisi erilaista ominaismatkustajajunaa ylittää neljän eripituisen sillan ja jokaisella sillalla tarkastellaan yhtä pistettä. 3-aukkoisilla silloilla joudutaan tarkastelemaan kullakin sillalla viittä eri pistettä. Tämän vuoksi kuvan 4.4 kaavion laskentakierroksia tulee 200. Tätä määrää on kuitenkin mahdollista järjestyksessä kaavion loppuvaiheiden osalta, yhdistelemällä momenttihakioita. Joka tapauksessa laskennasta syntyy suuri määrä dataa, jota ei julkaista tässä työssä. Julkaisematon data koostuu:

- 64 dynaamisten suurennuskertoimen laskemisesta
- 80 dynaamisilla suurennuskertoimilla korotettujen ominaisjuna-kaavioista
- 240 momentti–aikahistoriasta laskemisesta
- 180 rainflow-analyysin tuloksesta
- 12 vaikutusviivan laskemisesta
- 56 kuormakaavioiden oikean sijainnin määrittämisestä
- 56 äärimomentin laskemisesta
- 160  $\lambda$ -kertoimen laskemisesta ja skaalaamisesta.

Tässä tutkimuksessa esitetään kuitenkin jokainen välivaihe yksityiskohtaisesti esimerkkien avulla. Laskennan tulokset, skaalatut  $\lambda$ -kertoimet, esitetään kappaleessa 4.10.



Kuva 4.5. Ominaisjunien ja valittujen laskentapisteiden määrän vaikutus laskentatyön määrään.

Keskimääräisiä dynaamisia vaikutuksia huomioivien dynaamisten suurennuskertoimien määrä riippuu erilaisten siltojen määrävien pituuksien määrästä, tässä tutkimuksessa kahdeksan, ja ominaisjunien erilaisten nopeus–radan kunto-yhdistelmien määrästä, tässä tutkimuksessa kahdeksan. Erilaiset määrävät pituudet ovat esitetty



taulukossa 4.4 ja erilaiset nopeus–radan kunto-yhdistelmät ovat esitetty taulukossa 4.5. Dynaamisten suurennuskertoimien vaikutuksesta, ominaisjunien akselipainot kasvavat. Dynaamisten suurennuskertoimien määrän vuoksi laskennassa käytämme 80:tä erilaista ominaisjunakaaviota. Akseliväliltään erilaisia kaavioita on siis yhä kymmenen. Nämä 80 ominaisjunakaaviota jakautuu puoliksi 1- ja 3-aukkoisten siltojen kesken. 1-aukkoisissa silloilla siis jokainen laskentapiste lasketaan eri ominaisjunakaaviolla. Tutkimuksessa on päädytty  $\lambda$ -kertoimen esittämistarkkuuteen, kaksi desimaalia lopullisissa  $\lambda$ -kertoimissa ja kolme desimaalia eri aikajaksojen  $\lambda$ -kertoimissa, joista siis lopullinen  $\lambda$ -kerroin muodostetaan.

## 4.4 Ominaisjunien akselipainojen korotus dynaamisella suurennuskertoimella

Muodostettujen, liitteessä 5 kuvattujen ominaisjunien akselipainot ovat ominaispainoja. Junan liikkeen aiheuttamien dynaamisten vaikutusten huomioimiseksi ominaispainoja korotetaan dynaamisella suurennuskertoimella. Kappaleessa 2.5, Dynaamiset vaikutukset, on käyty läpi erilaisia laskentamenetelmiä dynaamisen lisän laskemiseksi. Valitaan kappaleessa 2.5.3 esitelty laskentamenetelmä, joka perustuu eurokoodin standardin SFS-EN 1991-2 liitteeseen D. Liite on otsikoitu, Rautatierakenteiden väsymistarkastelun perusteet, ja liitteessä D esitetään kaava keskimääräisten dynaamisten vaikutusten huomioimiseksi (tässä työssä kaava 2.19). Lisäksi kaavat huomioivat kaluston nopeuden. Näiden asioiden vuoksi, tämä nähdään parhaimpana vaihtoehtona dynaamisen suurennuskertoimen laskemiseksi väsymismitoituksessa. Laskentamenetelmä ei kuitenkaan huomioi radan kuntoa kolmiportaisella asteikolla vain kaksiportaisella, huolellisesti ja tavallisesti kunnossapidetty. Roosin tutkimuksen mukainen kolmiportainen asteikko radan kunnan huomioimisessa nähdään parempana, koska radan kunto on parantunut huomattavasti 1900-luvun alusta sen loppuun. Lisäksi nähdään tärkeänä asiana huomioida lyhyt ja pitkä kisko raiteiden muuttuminen jatkuvakiskoraiteiksi. Tämän vuoksi täydennetään eurokoodin mukaista laskentamenetelmää Roosin tutkimuksen mukaisella kolmannella kaavalla, joka huomioi radan kunnan 1900–1974. Näin ollen saadaan kolme kaavaa dynaamisen suurennuskertoimen laskemiseksi, jotka ovat esitetty alla, kaavat 4.1–4.3.

$$\Phi_{M.A} = 1 + \varphi = 1 + 0,5 * (\varphi' + 0,5 * \varphi'') \quad (\text{kaava 4.1})$$

$$\Phi_{M.B} = 1 + \varphi = 1 + 0,5 * (\varphi' + \varphi'') \quad (\text{kaava 4.2})$$

$$\Phi_{M.C} = 1 + \varphi = 1 + 0,5 * (\varphi' + 1,5 * \varphi'') \quad (\text{kaava 4.3})$$

Kaavat 4.1–4.3 ovat tarkoitettu momentin laskentaan, vastaavat kaavat voidaan muodostaa leikkausvoimalle samalla menetelmällä. Kaavojen parametrit  $\varphi'$  ja  $\varphi''$  lasketaan kappaleessa 2.5.3 esitetyllä esitetyillä kaavoilla 2.20–2.23. Nämä ottavat huomioon kaluston nopeuden ja sillan määrävän pituuden.

Sillan määrävä pituus lasketaan standardin SFS-EN 1991-2, kohdan 6.4.5.3 Määrävä pituus  $L_{\phi}$ , taulukon 6.2 mukaan. 1-aukkoisten vapaasti tuettujen siltojen määrävä pituus on pääkannattajan jänneväli. Jatkuvilla silloilla määrävä pituus lasketaan kaavoilla 4.4–4.5, jossa  $n$  on jännevälien lukumäärä ja  $k$  määritetään jännevälien lukumäärän perusteella, taulukon 4.3 mukaan..

$$L_m = \frac{1}{n} * (L_1 + L_2 + \dots + L_n) \quad (\text{kaava 4.4})$$

$$L_{\phi} = k * L_m, \quad \text{mutta vähintään } L_i \text{ (} i=1,2,\dots,n \text{)} \quad (\text{kaava 4.5})$$

*Taulukko 4.3. Parametri k arvo, kaavassa 4.5. Parametrin k arvo ei kasva enää viidennen jänteen jälkeen.*

n =	2	3	4	≥5
k =	1,2	1,3	1,4	1,5

Kaavoilla 4.4 ja 4.5 lasketut, tarkasteltaviksi valittujen siltajänteiden ja siltajänneyhdistelmien määrävät pituudet on taulukoitu taulukkoon 4.4.

*Taulukko 4.4. Tarkasteltavien siltojen määrävät pituudet.*

Määrävät pituudet, $L_{\phi}$			
1-aukkoiset vapaasti tuetut siltajänteet	$L_{\phi}$	Jatkuvat 3-aukkoiset siltajänteet	$L_{\phi}$
2,0 m	2,0 m	9,0 m + 11,0 m + 9,0 m	12,5667 m
5,0 m	5,0 m	12,5 m + 15,0 m + 12,5 m	17,3333 m
20,0 m	20,0 m	15,0 m + 20,0 m + 15,0 m	21,6667 m
35,0 m	35,0 m	20,0 m + 25,0 m + 20,0 m	28,1667 m

Todellista liikennettä mallintavien ominaisjunien väsymismitoituksessa käytettäviä keskimääräisiä dynaamisia lisiä kuvaavien dynaamisten suurennuskertoimien laskennassa on huomioitu

- sillan määrävä pituus
- liikenteen nopeus
- radan kunto kolmiportaisella asteikolla ja
- liikenteen laji, tavaraliikenne tai matkustajaliikenne.

Nämä asiat huomioiden eri aikajaksojen ja eri lajien ominaisjunien väsyttävää dynaamista lisää kuvaavat dynaamiset suurennuskertoimet ovat laskettu kaavojen 2.20–2.23 ja 4.1–4.3 mukaan ja nämä ovat taulukoitu taulukoihin 4.5 ja 4.6. Dynaamisten suurennuskertoimien vuoksi kymmenestä erilaisesta ominaisjunasta tulee 80 erilaista ominaisjunaa.

Taulukko 4.5. Tulokset todellisen liikenteen dynaamisille suurennuskertoimille määrävän pituuden, liikenteen erilajien, radan kunnon ja eri nopeuksien mukaan. RL tarkoittaa taulukon 2.17 jaon mukaista kunnossapitotasoa.

Määrävä pituus, m	2,000	5,000	12,567	17,333
v=40 km/h RL C	1,441	1,364	1,124	1,058
v=60 km/h RL C	1,462	1,385	1,145	1,079
v=80 km/h RL C	1,484	1,408	1,167	1,101
v=80 km/h RL B	1,350	1,299	1,138	1,094
v=90 km/h RL A	1,227	1,202	1,121	1,099
v=100 km/h RL C	1,508	1,432	1,192	1,126
v=120 km/h RL B	1,400	1,349	1,189	1,145
v=140 km/h RL A	1,294	1,269	1,189	1,167

Taulukko 4.6. Jatkoa taulukkoon 4.5.

Määrävä pituus, m	20,000	21,667	28,167	35,000
v=40 km/h RL C	1,045	1,040	1,032	1,029
v=60 km/h RL C	1,066	1,060	1,050	1,045
v=80 km/h RL C	1,088	1,081	1,069	1,062
v=80 km/h RL B	1,086	1,080	1,069	1,062
v=90 km/h RL A	1,095	1,090	1,079	1,071
v=100 km/h RL C	1,113	1,105	1,089	1,080
v=120 km/h RL B	1,136	1,128	1,110	1,099
v=140 km/h RL A	1,162	1,154	1,134	1,120

## 4.5 Ominaisjunan ylityksestä aiheutuva momenttihistoria

Momenttihistorialla tarkoitetaan historiaa, joka muodostuu kuormakaavion, tässä tutkimuksessa kappaleessa 4.4 esitetyillä dynaamisilla suurennuskertoimilla korotettujen, liitteessä 5 kuvattujen ominaisjunakaavioiden, ylittäessä silta, edeten askel askeleelta ja tulostaen momentti tietyn laskentapisteen suhteen jokaisella askeleella. Momenttihistoria voidaan piirtää pistekaaviona esimerkiksi ajan suhteen, jolloin puhutaan momentti-aikahistoriasta, myös kuormakaavioon suhteutettua matkaa voidaan käyttää. Tutkimuksen kannalta ei ole merkitystä minkä suhteen momenttihistoria tehdään, koska väsymiseen vaikuttaa ainoastaan kuormituskertojen määrä, momenttivaihteluvälien suuruus ja keskijännitys, ylitykseen käytetyllä ajalla ei ole mitään vaikutusta. Tutkimuksessa on käytetty momentti-aikahistoriaa. Sillan ylityksaikaa vaikuttavat siis sillan kokonaispituus, ominaisjunien pituus ja niiden nopeus.

Tutkimuksen jokainen momenttiaikahistoria on yksilöllinen. Momenttihistorian muotoon vaikuttaa

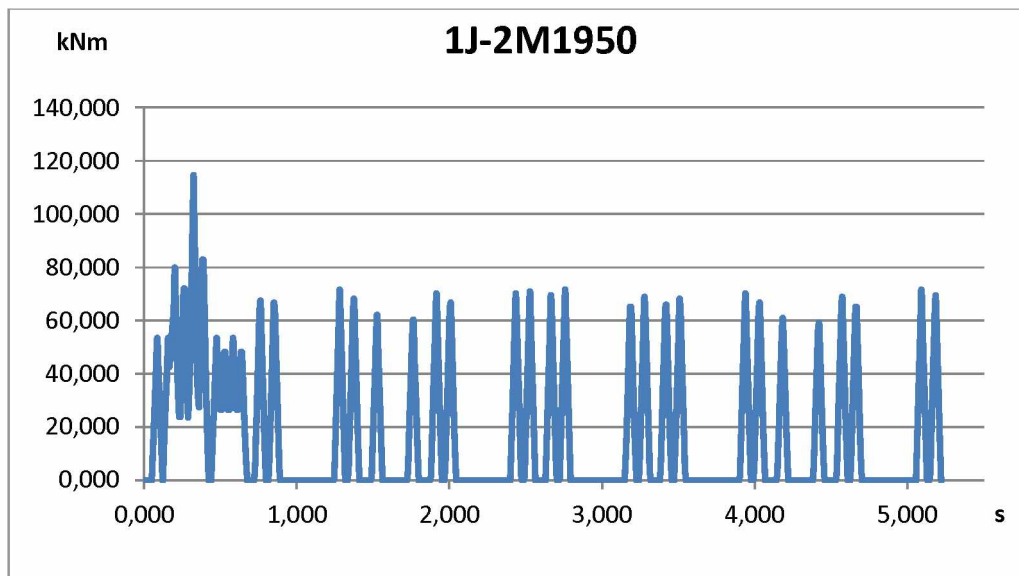
- kuormakaavion akselivälien pituudet
- kuormakaavion akselipainot
- kuormakaavion pituus
- sillan jännevälien määrä
- sillan jännevälien pituus tai pituudet

- sillan jännevälien pituuksien keskinäiset suhteet
- sillan mahdolliset sillan pään ulokkeelliset osat ja näiden pituus.

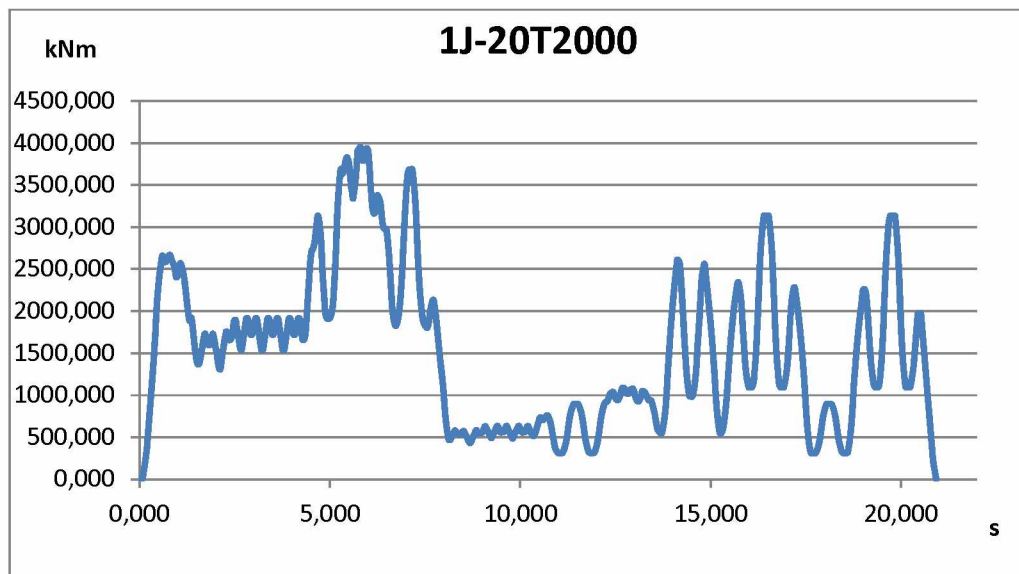
Kappaleessa 2.3 muodostetut ominaisjunat ja kappaleessa 4.4 lasketut dynaamiset suurennuskertoimet sisältävät historiaa Suomen rautatieliikenteestä vuodesta 1900 lähtien. Historia sisältää mm. tietoja tyypillisen rautatieliikenteen akseliväleistä, akselipainoista ja junan kokonaispituuksista. Näillä tiedoilla päästään laskemaan menneinä aikajaksoina tapahtunutta momenttirasitusta ja tämän kautta päästään käsiksi väsymisrasituksen määrään. Kappaleessa 4.2 on pyritty valitsemaan riittävän kattava mutta laskentatyön määrän suhteen järkevä valikoima erilaisia siltarakenteita, jotta voidaan interpoloida muita siltarakenteita tässä laskettujen siltarakenteiden välistä. Tutkimuksen momenttiaikahistorian laskemisessa on käytetty Jani Meriläisen tekemää, elementtimenetelmään perustuvaa, Excel-pohjaa.

#### 4.5.1 1-aukkoiset sillat

Kuvassa 4.6 on esitetty momentti–aikahistoria aikajakson 1950–1974 ominaismatkustajunan ylittäessä 1-aukkoinen, 2,0 metriä jänteeltään oleva, rautatiesilta. Laskentapiste sijaitsee jännevälän puolivälissä. Kuormitettaessa 1-aukkoista siltaa millä tahansa alaspäin suuntautuvalla kuormitustapauksessa, momentti on aina positiivista. Näin ollen myös 1-aukkoisten siltojen koko momentti–aikahistoria on aina positiivista. Tämä on havaittavissa kuvista 4.6 ja 4.7.



Kuva 4.6. Momentti–aikahistoria, joka aiheutuu aikajakson 1950–1974 ominaismatkustajajunan, jänteeltään 2,0 metriä olevan 1-aukkoisen sillan, ylityksestä laskentapisteeseen.

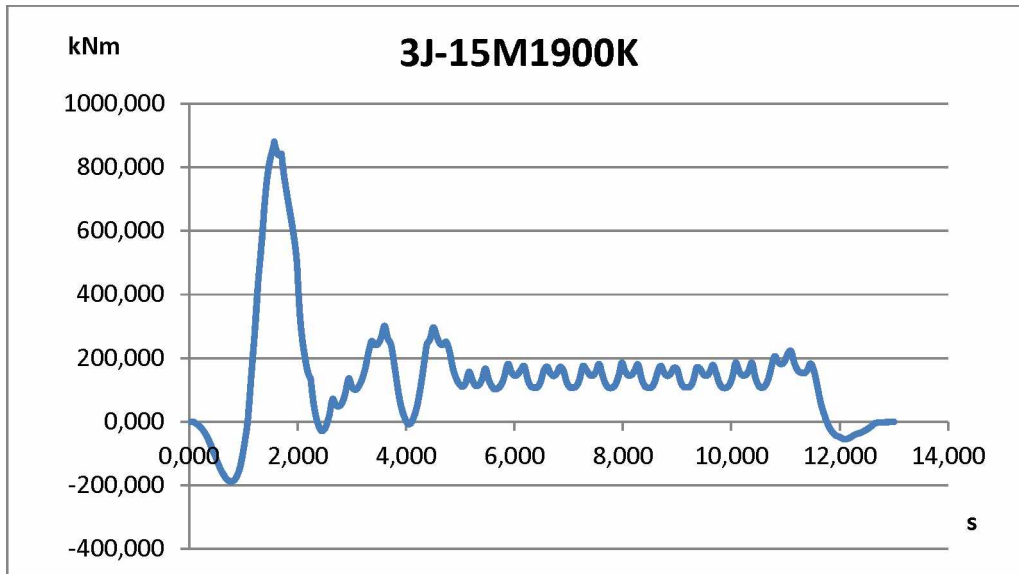


Kuva 4.7. Momentti–aikahistoria, joka aiheutuu aikajakson 2000–2024 ominais-tavarajunan, jänteeltään 20 metriä olevan 1-aukkoisen sillan, ylityksestä laskentapisteeseen.

Kuvien 4.6 ja 4.7 momentti–aikahistorioissa voidaan havaita selviä eroja. Kuvasta 4.6 voidaan huomata tyypillinen matkustajajunan aiheuttama momenttihakio. Historia koostuu veturin akselien aiheuttamasta, vaunuja suuremmasta, momenttipiikistä ja tämän jälkeen tulevista, keskenään lähes samanpainoisista matkustajavaunujen akselien aiheuttamista, pienemmistä momenttipiikeistä. Koska sillan jännemitta on lyhyt, historiasta voi laskea junassa olevien vaunujen akselien lukumäärän. Kuvassa 4.7 taas on tavarajunan aiheuttama momentti–aikahistoria. Kuvasta voidaan huomata tavarajunalle tyypillisen ominaisuuden, vaunujen akselipaino vaihtelee. Tavarajunan vaunujen akselipainot vaihtelevat ja mukana on myös tyhjiä vaunuja. Uudempien aikajaksojen tavarajunien momentti–aikahistorioissa, vaunut aiheuttavat suurimman momentin, kun taas matkustajajunilla veturi aiheuttaa lähes aina suurimman momentin. Kuvassa 4.7, sillan pitkä jänneväli aiheuttaa sen, ettei momentin arvo käy nollassa junan ylittäessä siltaa. Jotta näin kävisi, tulisi kuormakaavion jonkun akselivälin oltava vähintään sillan jännemitan pituinen. Sillan jännevälin, tai useampiaukkoisissa, jänneväliden pituuden kasvaessa momenttinvaihteluvälit siis pienenevät ja väsymisrasitus vähenee.

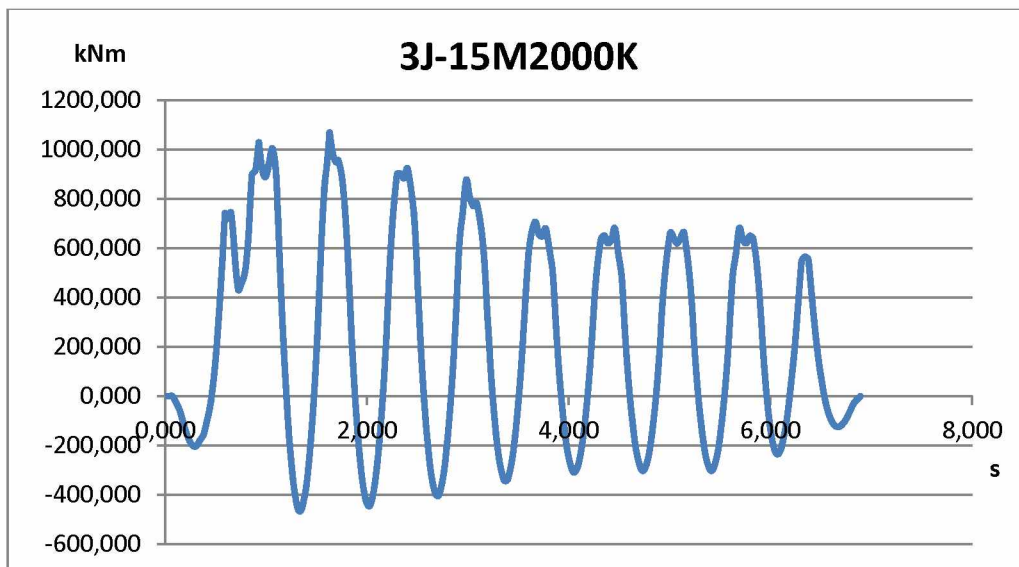
#### 4.5.2 3-aukkoiset sillat

Useampiaukkoisten siltojen vierekkäiset jänteet aiheuttavat sen, että momenttihakio sisältää aina sekä positiivista että negatiivista momenttia. Kun ymmärtää mitkä asiat vaikuttavat väsymisvaurion suuruuteen, on helppo huomata kuvia 4.8 ja 4.9 vertailemalla, että uudempien aikajaksojen ominaisjunat ovat väsyttävämpiä kuin vanhojenaikajaksojen.



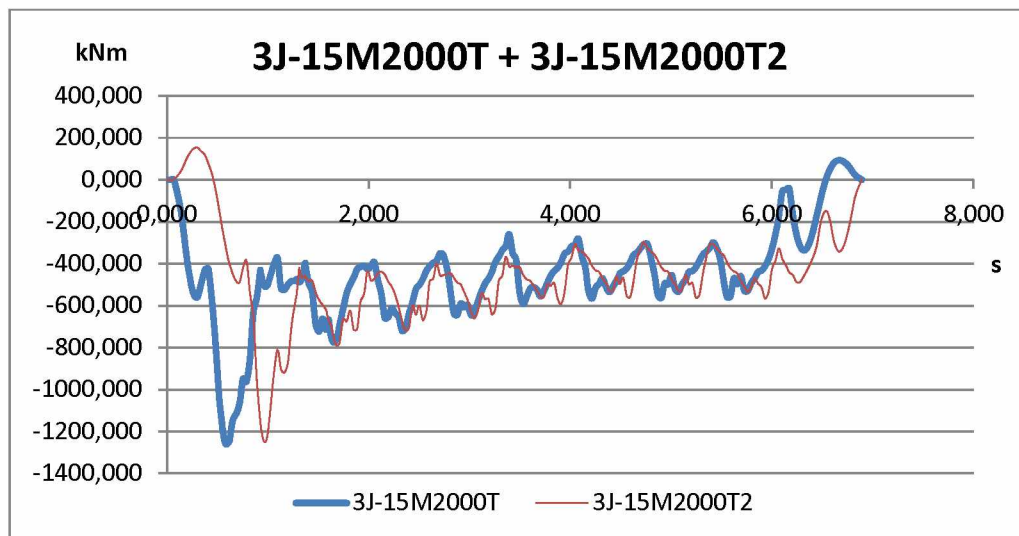
Kuva 4.8. Momentti-aikahistoria 3J-15M1900K.

Laskentapisteen sijainti sillalla vaikuttaa suuresti momenttihakistorian muotoon varsinkin useampiaukkoisilla silloilla, vaikka muuten kaikki muut momenttihakistorian muotoon vaikuttavat asiat pidettäisiin samanlaisina. Kuvissa 4.9, 4.10 ja 4.11 on havainnollistettu laskentapisteen vaikutusta, esittämällä saman ominaisjunan ja sillan, viiden eri laskentapisteen momenttihakistoria. 3-aukkoisen sillan välituen laskentapiste poikkeaa huomattavasti kenttien laskentapisteistä.

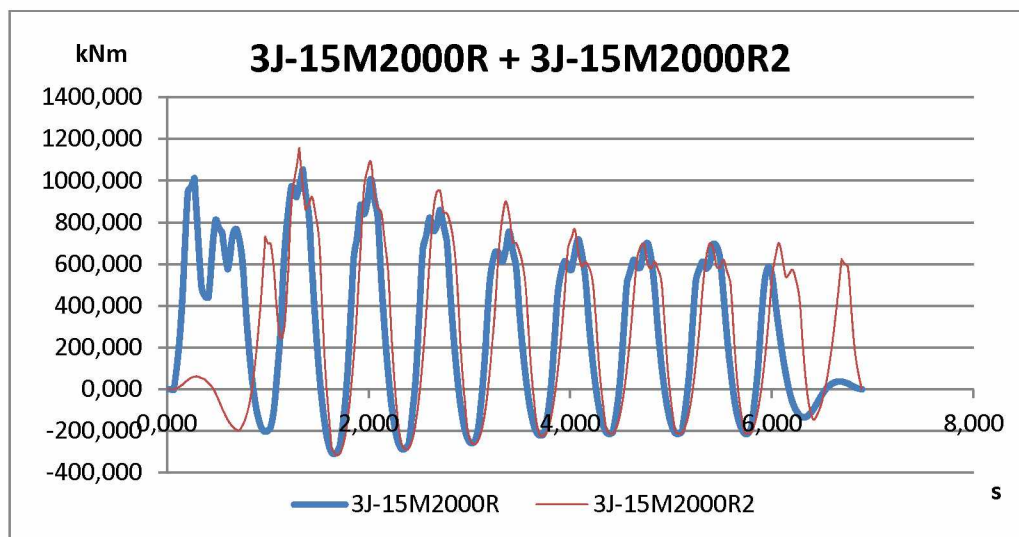


Kuva 4.9. Momentti-aikahistoria 3J-15M2000K.





Kuva 4.10. Momentti-aikahistoria 3J-15M2000T ja 3J-15M2000T2.



Kuva 4.11. Momentti-aikahistoria 3J-15M2000R ja 3J-15M2000R2.

Kuvissa 4.10 ja 4.11 on esitetty momenttihakistoria välituen ja reunakentän osalta, ja myös näiden pisteiden symmetriapististä sillan suhteen. Varsinaisen laskentapisteen, esimerkiksi välituen laskentapisteen ja tämän symmetriapisteen, voi ajatella myös samaksi pisteeksi, jolloin kuvan 4.10 eri käyrät kuvaa siltaa eri suunnista ylittäviä junia. Eri suunnista tapahtuva ylitys tapahtuu aina siten, että veturi tulee ensimmäisenä sillalle. Junan peruuttaminen sillalla on harvinaista. Sitä tapahtuu käytännössä ainoastaan ratapihojen läheisyydessä ja tällöin junan vauhti on hiljainen. Junan peruuttaminen sillalla on vähemmän siltaa väsyttävää kuin junan ylitys suuremmissa vauhdissa junan kulkiessa eteenpäin. Tämän ja peruuttamistilanteiden harvinaisuuden vuoksi momenttihakistoriat, jotka aiheutuisivat junan peruuttamisesta, on jätetty kokonaan huomioimatta tässä tutkimuksessa. Tutkimuksessa on kuitenkin huomioitu junan ylityssuunta, tämän vuoksi 3-aukkoisella sillalla lasketaan momenttihakistoria myös symmetriapististä. Tutkimuksessa on havaittu, että toinen junan sillan ylityssuunta on toista väsyttävämpi ja tällä on vaikutusta ekvivalentteihin vauriokertoimiin. Vaikutus ei ole suuri, mutta se on havaittavissa tutkimuksessa valitun  $\lambda$ -kertoimen tarkkuustasossa, joka on kolme desimaalia.

#### 4.5.2.1 *Momenttihiluokkien yhdistely*

Kuvassa 4.5 mainitulla, momenttihiluokkien yhdistelyllä, tarkoitetaan edellisessä kappaleessa mainittujen, laskentapisteen ja symmetriapisteen momenttihiluokkien yhdistämistä peräkkäin. Tämän toimenpiteen etuna on se, että rainflow-analyysien määrää saadaan pudotettua 80 analyysillä. Lisäksi vielä tärkeämpi etu on laskelmien oikeellisuus. Tutkimuksessa käytetty rainflow-analyysiin soveltuvan laskentataulukon [StoFlo™ Rainflow Cycle Counting in Excel] huomattiin antavan hieman eri tulos kun eri ylityssuuntien momenttihiluokkioille tehtiin rainflow-analyysi ja tämän jälkeen laskettiin  $\lambda$ -kerroin siten, että junien ylityssuunnan jakautuivat tasan verrattuna siihen, että eri suuntien momenttihiluokkiot yhdistetään ennen rainflow-analyysiä eli myös tällöin eri ylityssuunnat jakautuvat tasan. Momenttihiluokkien yhdistämiseen päädyttiin kun sillan keskikentän laskentapisteele tehtiin koelaskuja. Koelaskuissa keskikentän laskentapisteen momenttihiluokkiot jaettiin kahteen osaan, joille molemmille tehtiin rainflow-analyysi ja lopuksi osat yhdistettiin, kuten osat olisivat omia ominaisjunia. Koelaskuissa huomattiin, että momenttihiluokkien katkominen kasvatti näennäisesti väsymisrasituksen määrää, vastaavasti eri ylityssuunnille tekemällä rainflow-analyysi erikseen kasvatti näennäisesti väsymisrasituksen määrään. Rainflow-analyysiin käytettävän laskentataulukon arvellaan laskevan väärin pätkittyjä momenttihiluokkioita. Tämä saattaa aiheutua siitä, että laskentataulukko muokkaa momenttihiluokkien päitä sen verran, että se saa laskettua kaikki vaihteluvälit. Momenttihiluokkioita yhdistelemällä rainflow-analyysiin käytettävään laskentataulukkoon tulee yhtenäisempi pätkä momenttihiluokkia ja näin ollen vähemmän momenttihiluokkien päitä. Näin laskettua tulosta pidetään oikeampana.

#### 4.5.3 *Ominaisjunien vaunujärjestyksen vaikutus momenttihiluokkioon*

Kappaleessa 2.3.2.1, esitellään tutkimuksessa käytettävien ominaisjunien muodostamista. Kappaleessa otetaan huomiota myös vaunujärjestyksen muodostamiseen, ominaisjunat on pyritty muodostamaan keskimääräisen vaunujärjestys. Tutkimuksen ohessa tehtyjen koelaskujen kautta huomattiin tavarajunien vaunujärjestyksen merkittävä vaikutus väsymisrasituksen määrään. Tyhjän ja täyden tavaravaunun järjestys vuoroittain tuotti merkittävästi suuremman väsymisrasituksen kuin järjestys, jossa tyhjät ja täydet vaunut olivat erikseen peräkkäin.

Eurokoodin väsymistarkastelussa käytettävissä junatyypeissä vain yhdessä junatyypissä, junatyyppi 6, on mukana tyhjiä vaunuja ja vaunujärjestys on vuorotteleva, tyhjien ja täysien vaunujen välillä. [Standardi SFS-EN 1991-2, liite D, s. 114–120] Tässä mielessä junatyyppi 6 on tärkeä väsymismitoitustyyppi uusien siltojen väsymismitoituksessa. Sitä ei pidä jättää pois liikenteen koostumuksesta kun suunnitellaan siltaa suomalaiselle rataosuudelle, jossa liikkuu tavaraliikennettä. Kappaleessa 2.3.2.1 todettiin jo, että nykyään tavaraliikenne, jossa esiintyy tyhjien ja täysien vaunujen vuorottelevaa järjestystä, osuus koko liikenteestä on 35–40 %.

## 4.6 Rainflow-analyysi momenttihiluokkioon

Symmetriapisteen yhdistetyille momenttihiluokkioille ja muille laskentapisteeille tehtiin rainflow-analyysi StoFlo™ Excel-laskentataulukolla. [StoFlo™ Rainflow Cycle Counting in Excel] Laskentataulukolla pystyi laskemaan vaihteluvälien lisäksi jokaisen vaihteluvälin keskijännityksen. Keskijännityksiä ei kuitenkaan tässä työssä tarvita. Laskentataulukko soveltui huonosti toistuvaan laskentaan, koska taulukko on suo-



jattu siten, ettei taulukkoa päässyt itse muokkaamaan. Tämän vuoksi jokainen momenttihakistoria jouduttiin käsittelemään erikseen omassa laskentataulukossa. Laskentataulukon toiminta varmistettiin koelaskuin, jotka tarkastettiin käsin laskien. Alla on esitetty esimerkki rainflow-laskentataulukon antamasta tuloksesta kuvan 4.9 mukaisesta momenttihakistoriasta, 3J-15M2000K. Arvojen yksikkö on kNm.

8,285786509	42,63005815	770,4271571	1219,644123
17,67779446	966,3233584	917,6184869	1328,472958
11,47163727	984,2370527	1016,161539	115,5032245
31,0685842	30,18592378	23,1982522	1476,96677
30,46774513	124,478513	311,3352517	1537,121688

Kuvasta 4.9 voi laskea yhdeksän suurempaa piikkiä eli momenttivaihteluväliä. Rainflow-laskentataulukon antamasta tuloksesta voi löytää vastaavat momenttivaihteluvälit, tuloksesta on löydettävissä yhdeksän suurempaa, yli 700 kNm olevaa momenttivaihteluväliä. Loput 11 momenttivaihteluväliä ovat pienempiä. Myös tämän tarkastelun perusteella rainflow-laskentataulukko laskee oikein.

## 4.7 Yhtä yliajoa vastaavan momenttivaihteluvälin laskeminen

Rainflow-analyysissä saadut momenttivaihteluvälit,  $\Delta M_i$  muutetaan vaurioltaan näitä vastaavaksi yhdeksi momenttivaihteluväliksi,  $\Delta M_{1ylijajo,i}$ , kaavalla 4.6.

$$\Delta M_{ekv,1ylijajo,i} = \left( \sum \Delta M_i^{k_2} \right)^{\frac{1}{k_2}} \quad (\text{kaava 4.6})$$

Termi  $k_2$  on S–N-käyrän eksponentti, eurokoodi antaa betoniteräkselle kaksi arvoa, 5 ja 9. Molemmat arvot ovat varmallalla puolella, kuvan 3.6 mukaan, eksponentti 9 on ankarampi erittäin suurille momenttivaihteluväleille, momenttivaihteluväleille, jossa betoniteräksen jännitys kasvaa yli 162,5 MPa. Eksponentti 5 on taas ankarampi pienemmille momenttivaihteluväleille, momenttivaihteluväleille, jossa betoniteräksen jännitys jää alle 162,5 MPa. Suurin osa momenttivaihteluväleistä tapahtuu alueella, jossa betoniteräksen jännitys jää alle 162,5 MPa. Tämän vuoksi päädytään eksponentin arvoon 9.

Kappaleessa 4.6 esitetystä ja kuvan 4.9 mukaisesta momenttihakistorian, 3J-15M2000K, rainflow-analyysin tulos voidaan muuttaa kaavan 4.6 mukaan vaurioltaan samansuuriseksi yhdeksi momenttivaihteluväliksi, jolloin saadaan kaavan 4.7 mukainen tulos.

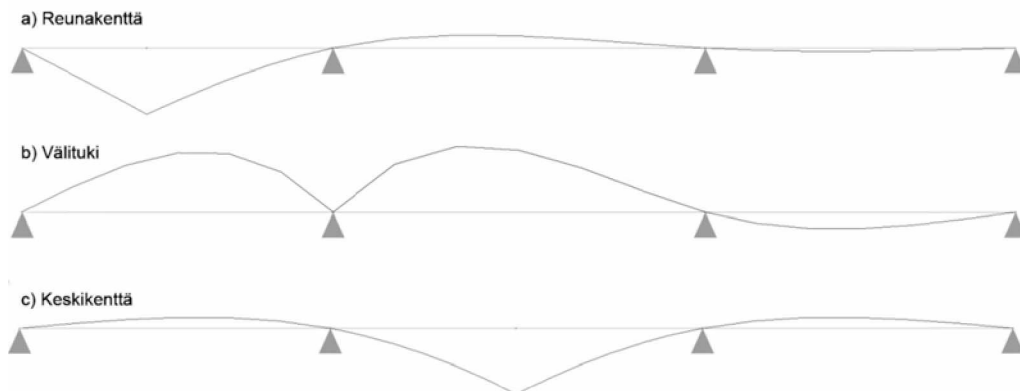
$$\Delta M_{ekv,1ylijajo,3J-15M2000K} = \left( \sum \Delta M_i^9 \right)^{\frac{1}{9}} = 1674,530 \text{ kNm} \quad (\text{kaava 4.7})$$

Tulos on, kuten oletettavissa on, hieman suurempi kuin kappaleessa 4.6 esitetty rainflow-analyysistä saatu suurin yksittäinen momenttivaihteluväli, 1537,122 kNm.

## 4.8 Vertailukuormakaavioiden, LM71 ja SW/0, aiheuttaman momenttivaihteluvälin määrittäminen

Kuten aiemmin todettiin, on ekvivalentti vauriokerroin eli lambda-kerroin ( $\lambda$ -kerroin) suhde väsymisrasituksen määrästä todellisen liikenteen ja valitun kuormakaavion vertailuarvon välillä. Väsymisvaurion määrää kuvataan tässä ekvivalentin momenttivaihteluvälin suuruudella, jonka tulos yhden laskentapisteen osalta esitetään kaavassa 4.7. Jotta  $\lambda$ -kerroin saadaan laskettua, tarvitaan todellisen liikenteen ekvivalentin momenttivaihteluvälin lisäksi vertailuarvo. Kappaleessa 4.1 päädyttiin käyttämään kuormakaavioita LM71–22,5 ja SW/0–22,5 vertailuarvon laskemiseksi. Useampiaukkoisissa silloissa käytetään molempia edellä mainittuja kuormakaavioita, mutta 1-aukkoisissa silloissa vain kuormakaaviota LM71–22,5.

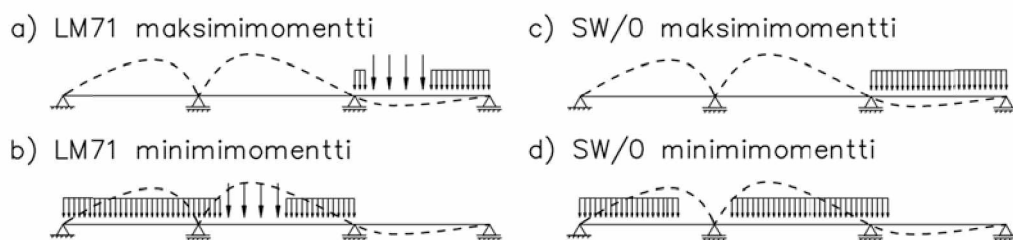
Vertailuarvon laskeminen kuormakaavioiden avulla tapahtuu siten, että kuormakaavio sijoitetaan sillalle kahdella eri tavalla, toisella tavalla haetaan laskettavan laskentapisteen maksimimomenttia ja toisella minimimomenttia. Vertailuarvo on näiden erotuksen itseisarvo. Kuormakaavion LM71 pistekuormien vuoksi ja kuormakaavion SW/0 kahden tasaisen viivakuorman määrätyn pituuden ja näiden välisen määrätyn välimatkan vuoksi, kuormakaavioiden tarkkaa sijaintia äärimomenttien saamiseksi ei pysty päättämään ilman laskuja, paitsi 1-aukkoisten siltojen lyhyemmällä jänneväleillä. Yksi tapa määrittää kuormakaavioiden tarkat sijainnit on laskea kunkin laskentapisteen vaikutusviiva, jonka avulla pystyy laskemaan määrittämään kuormakaavion sijainnin. Vaikutusviiva on rakenteen taipumaviiva, joka voidaan muodostaa aiheuttamalle yksikön suuruinen siirtymä tai kiertymä laskentapisteen kohdalle. Vaikutusviivan muodot ovat esitetty eri laskentapisteiden kohdalta kuvassa 4.12. Vaikutusviivojen avulla kuormakaavion sijainnin momenttien ääriarvojen saamiseksi pystyy jo suurin piirtein päättämään. Kuorman sijoittaminen pisteisiin, joissa vaikutusviiva on tukien tason alapuolella tuottaa laskentapisteeseen positiivista momenttia ja pisteet, joissa vaikutusviiva on yläpuolella tuottaa negatiivista momenttia. Mitä etäämpänä vaikutusviiva on tukien tasosta, sitä suurempi momenttirasitus vaikutus on laskentapisteeseen. Näiden periaatteiden avulla pystyy hakemaan kuormakaavion paikan suurin piirtein sillalle ääriarvojen saamiseksi ja ymmärtämään kuvan 4.13 kuormakaavioiden sijoitukset sillalle.



Kuva 4.12. Vaikutusviivan muoto esitettynä a) reunakentän b) välituen c) keskikentän laskentapisteen kohdalta.

Tutkimuksessa ei riitä kuormakaavioiden sijoittaminen suurin piirtein, vaan kuormakaavioiden sijainti on laskettu. Kuormakaavioiden sijaintia on haettu Exceltaulukkolaskennalla vaikutusviivan avulla. Kuormakaavion tarkan sijainnin haku on tehty, tarkastelemalla kuormakaavion sijaintia sillalla 10 cm etenemällä. Pienemmän etenemän käytöllä tulos ei tarkennu enää valitulla  $\lambda$ -kertoimen esittämistarkkuustasolla. 10 cm:n etenemää on käytetty kaikissa tutkimukseen valituissa siltarakenteissa, tutkimuksen pidempiin siltoihin 10 cm:n etenemä vaikutti jopa tarpeettoman lyhyeltä väliltä.

Kuvassa 4.13 on esitetty siltarakenteen 12,5+15+12,5 välituen laskentapisteen kuormakaavioiden LM71–22,5 ja SW/0–22,5 sijoitus sillalle äärimomenttien saamiseksi. Kuormakaavion LM71–22,5 saa sijoitettua koko vaikutusviivan matkalle, jossa vaikutusviiva on samalla puolella tukien tasoa. Tämä johtuu siitä, että kuormakaavion LM71 tasainen kuorma voidaan sijoittaa rajoittamattomalle matkalle. Kuormakaaviossa SW/0 kahden viivakuorman pituus ja näiden viivakuormien välimatka toisistaan on määrätty. Tämän vuoksi syntyy tilanteita, joissa kuormakaavion SW/0 äärimomentti saadaan siten, että kuormakaavio joudutaan sijoittamaan osittain myös vaikutusviivan alueelle, jossa syntyy väärään merkkistä momenttia laskentapisteeseen, kuten kuvassa 4.13, kohdassa d) on esitetty.



Kuva 4.13. Siltarakenteen 12,5+15+12,5 välituen laskentapisteen äärimomenttien hakeminen kahdella eri kuormakaaviolla. Kuvissa on katkoviivalla merkitty välituen laskentapisteen vaikutusviiva.

Kuormakaavioiden sijaintien löytämisen jälkeen lasketaan näiden aiheuttamat momentit laskentapisteeseen ja molempien kuormakaavioiden tuottama momenttivaihteluväli, joka lasketaan vähentämällä minimimomentti maksimimomentista ja ottamalla itseisarvo tästä. Kaikki useampiaukkoisten siltojen laskentapisteet tarkastellaan molemmilla kuormakaavioilla ja suuremman momenttivaihteluvälin tuottavan kuormakaavion tulos huomioidaan  $\lambda$ -kertoimen muodostamisessa.

Tutkimuksen 3-aukkoisten siltojen kaikista laskentapisteistä kuormakaavio SW/0–22,5 tuotti suuremman momenttivaihteluvälin kuin LM71–22,5 kaikkiin välituen laskentapisteisiin. Muissa laskentapisteissä määräävä momenttivaihteluväli aiheutui kuormakaaviolla LM71–22,5. Esimerkin siltarakenteen 12,5+15+12,5 keskikentän laskentapisteen kuormakaavioiden avulla laskettu momenttivaihteluvälin vertailuarvo on 3 491,383 kNm. Määräävän arvon tuotti siis kuormakaavio LM71–22,5. Kuormakaaviolla SW/0–22,5 laskettu arvo jäi pienemmäksi, 2 813,960 kNm.

## 4.9 $\lambda$ -kertoimien muodostaminen

### 4.9.1 Yhden yliajokerran $\lambda$ -kertoimen muodostaminen

Ekvivalentti vauriokerroin ( $\lambda$ -kerroin) on todellista liikennettä vastaavan väsymisvauriota kuvaavan momenttivaihteluvälin suhde kuormakaavioiden avulla määritettyyn momenttivaihteluväliin. Yhden ylityskerran  $\lambda$ -kerroin voidaan määrittää kaavalla 4.8.

$$\lambda_{s,1ylijajo,i} = \frac{\Delta M_{ekv,1ylijajo,i}}{\text{Maks}(\Delta M_{LM71-22,5,i}; \Delta M_{SW/0-22,5,i})} \quad (\text{kaava 4.8})$$

Edellisissä kappaleissa käytyä esimerkkiä täydentäen, kaavassa 4.9 on laskettu laskentapisteen 3J-15M2000K yhden ylityskerran  $\lambda$ -kerroin.

$$\begin{aligned} \lambda_{s,1ylijajo,3J-15M2000K} &= \frac{\Delta M_{ekv,1ylijajo,3J-15M2000K}}{\text{Maks}(\Delta M_{LM71-22,5,3J-15K}; \Delta M_{SW/0-22,5,3J-15K})} \\ &= \frac{1\,674,530 \text{ kNm}}{3\,491,383 \text{ kNm}} = 0,4796 \quad (\text{kaava 4.9}) \end{aligned}$$

Kappaleen otsikko on osittain harhaan johtava. Reunakentän ja välituen laskentapisteen momenttihakemotit sisältävät kaksi sillan ylitystä ominaisjunalla, yhden molempiin suuntiin, kappaleessa 4.5.2.1 tehtyjen momenttihakemotien yhdistämisen vuoksi. Tästä ei kuitenkaan ole haittaa, koska seuraavassa kappaleessa yhden yliajokerran  $\lambda$ -kertoimet skaalataan samaan vertailuliikennemäärään ja käyttöaikaan. Yhden yliajokerran  $\lambda$ -kertoimet eivät ole vertailukelpoisia keskenään, koska kertoimen sisältämä bruttotonnimäärä riippuu ominaisjunan massasta. Ominaisjunien massa vaihtelee 2 469 kN ja 15 216 kN välillä.

### 4.9.2 $\lambda$ -kertoimen skaalaaminen

Skaalataan edellisessä kappaleessa esitetyt, yhden yliajokerran  $\lambda$ -kertoimet, valittuun vuosittaiseen vertailuliikennemäärään ja sadan vuoden käyttöikään. Tällöin on mahdollista tehdä tulosten vertailua eurokoodissa esitettyihin ja Rynäsen tutkimuksen mukaisiin, uusien siltojen mitoituksessa käytettäviin  $\lambda$ -kertoimiin. Liikennemäärällä tarkoitetaan kokonaisliikenteen massaa, bruttotonneja ja eurokoodissa sen yksikkönä käytetään yksinkertaisesti t/a, tonnia vuodessa. Kuitenkin tämä liikennemäärä muodostetaan ominaisjunista, joiden yksikkönä käytetään taas kilonewtoneita, kN. Muunnosta ei siis tehdä tarkasti, vaan 10 kN on suoraan 1 tonni. Tämä vaikuttaa hyväksytyltä käytännöltä väsymislaskuissa. [Standardi SFS-EN 1991-2, liite D, s. 114–120]

Vuosittainen vertailuliikennemäärä ja käyttöikä ovat taas mahdollista valita vapaasti. Sadan vuoden käyttöikä on kuitenkin vakiintunut  $\lambda$ -kertoimessa, koska tämä on tyyppillinen rautatiesiltojen suunnittelukäyttöikä. Vuosittainen vertailuliikennemäärä on vapaammin valittavissa. RSO 9:sän suunnitteluperusteena on liikennemäärä 1 900 milj. tonnia per 100 vuotta. Tämä tarkoittaa siis  $19 \cdot 10^6$  t/a. Eurokoodissa antaa uusien siltojen liikennemäärän suunnitteluperusteeksi  $25 \cdot 10^6$  t/a. Lisäksi eurokoodin antamat liikenteen koostumukset ovat sovitettu lähelle eurokoodin uusien siltojen suunnitteluperusteen liikennemäärää. [Standardi SFS-EN 1991-2, 6.9 Väsyttävät liikennekuormat, kohta (4), s. 102] [Standardi SFS-EN 1991-2, liite D.3, kohta (3), s. 120]

Ryynäsen tutkimuksessa on päädytty ehdottamaan vielä suurempia arvoja siten, että liikenne on jaettu kolmeen eri luokkaan, kevyen liikenteen verkkoon ( $30,95 \cdot 10^6$  t/a), kaupunkirataan ( $8,03 \cdot 10^6$  t/a) ja raskaan liikenteen verkkoon ( $35,48 \cdot 10^6$  t/a). Nämä luokat perustuvat eurokoodin mukaiseen jaotteluun, ”light, standard, heavy”. Liikennemäärät perustuvat todennäköisesti 2000-luvulla toteutuneisiin suurimpiin liikennemääriin. Tämän työn kappaleessa 2.2 on tutkittu bruttotonnien määrää koko Suomen rataverkolla. Suurin vuosittainen arvo saatiin rataosuudella Kouvola–Luumäki, vuodelle 2003,  $33,6 \cdot 10^6$  t/a. Tämä on hieman vähemmän mitä Ryynänen esittää raskaan liikenteen luokalle omassa tutkimuksessaan mutta tämä tukee oletusta siitä mihin Ryynäsen liikennemäärät perustuvat. Tässä tutkimuksessa lähiliikenne on rajattu pois, joten tämän vuoksi Ryynäsen tutkimuksen kevyen liikenteen liikennemäärää ei voida arvioida. Arvo perustuu todennäköisesti lähiliikenteen tonnimäärään rataosuudella Helsinki–Pasila. Lisäksi arvo on todennäköisesti koko rataosan yhteenlaskettu tonnimäärä, joten yksittäisellä radalla liikenne on pienempi. [Ryynänen, M. et al. 2010. s.23] [Ryynänen, M. 2009. s.8]

Valitaan  $\lambda$ -kertoimen skaalaamisen perusteiksi 100 vuoden käyttöikä ja liikennemäärä  $25 \cdot 10^6$  t/a. Liikennemäärää  $19 \cdot 10^6$  t/a pidetään liian pienenä, koska 1970-luvun alusta löytyy jo rataosia, jolloin tämä liikennemäärä on ylittynyt. Liikennemäärän  $25 \cdot 10^6$  t/a käyttöä tukee myös yhtenäisyys eurokoodin kanssa. Vertailuliikennemäärän valintaa vuosittaiseen maksimiarvoon perustuen voidaan perustella sillä, että saadaan yksi yksinkertaisempi laskentamalli  $\lambda$ -kertoimelle. Tällöin nopeissa tarkasteluissa voidaan käyttää suoraan normissa annettua  $\lambda$ -kerrointa ilman, että täytyy miettiä liikennemäärästä aiheutuvia muutoksia. Todennäköisesti tähän ajatteluun perustuu Ryynäsen ehdotus vertailuliikennemääriin. Tässä tutkimuksessa ei kuitenkaan nähdä tarvetta yli  $25 \cdot 10^6$  t/a vertailuliikennemäärään, koska tutkimus koskee olemassa olevia rautatiesilloja. Tutkimuksen tavoittaa on pyrkiä esittämään laskentamenetelmiä vanhoille, jopa väsymismitoittamattomille rautatiesilloille. Ensimmäiset tällaiset sillat ovat käyttöikänsä loppupäässä olevat sillat, joilla on ikää useita vuosikymmeniä. Näin ollen usean vuosikymmenen liikennemäärän vuosittainen keskiarvo ei tule millään rataosuudella ylittämään  $25 \cdot 10^6$  t/a vertailuliikennemäärää. Näiden asioiden vuoksi valittu vertailuliikennemäärä on hyvä.

Ominaisjunan massan perusteella voidaan laskea kunkin ominaisjunan sillan ylityskerrat, jotta saavutetaan vertailuliikennemäärä. Tämä siis riippuu ominaisjunan massasta, joka vaihtelee jokaisen ominaisjunan kohdalla. Kaavassa 4.10 on laskettu aikakauden 2000–2024 ominaismatkustajajunan ylityskertojen lukumäärä.

$$\text{ylityskertojen lkm}_{M2000} = \frac{250\,000\,000 \text{ kN}}{5052 \text{ kN}} = 49583,50 \quad (\text{kaava 4.10})$$

Taulukkoon 4.7 on koottu muiden ominaisjunien vuosittainen ylityskertojen lukumäärä vertailuliikennemäärällä. Nämä ovat taulukoitu sarakkeeseen, kerroin 1, 3-aukkoisten siltojen keskikentän laskentapisteen ja 1-aukkoisten siltojen kaikkien laskentapisteiden osalta. Sarake, kerroin 2, taas edustaa 3-aukkoisten siltojen reunakentän ja välituen laskentapisteitä. Sarakkeen, kerroin 2, arvot ovat puolet pienempiä kuin sarakkeen, kerroin 1. Kahden erilaisen ylitysmäärän käyttäminen aiheutuu kappaleessa 4.5.2.1 esitetystä momenttistorioiden yhdistelystä. Momenttistorioiden yhdistelyssä yhdistettiin kahden samanlaisen ominaisjunan momentti–aikaistoria. Vertailuliikennemäärään skaalattaessa kahdesta ominaisjunasta muodostuvaa momentti–aikaistoriaa, kertoimen tulee olla puolet pienempi. Kunkin ominaisjunan

ylityskertojen lukumäärä 100 vuoden aikana ja vertailuliikennemäärällä  $25 \cdot 10^6$  t/a, on taulukon 4.7, sarakkeen, kerroin 1, arvo kertaa 100.

Taulukko 4.7. Ylityskertojen vuosittainen lukumäärä vertailuliikennemäärällä,  $25 \cdot 10^6$  t/a.

Aikajakso	Ominaisjunan massa [kN]	Kerroin 1	Kerroin 2
M1900	3 023	82 699,31	41 349,65
M1925	2 469	101 255,57	50 627,78
M1950	3 192	78 320,80	39 160,40
M1975	5 040	49 603,17	24 801,59
M2000	5 042	49 583,50	24 791,75
T1900	3 610	69 252,08	34 626,04
T1925	5 457	45 812,72	22 906,36
T1950	9 458	26 432,65	13 216,32
T1975	15 216	16 430,07	8 215,04
T2000	14 804	16 887,33	8 443,66

Yhden ylityskerran  $\lambda$ -kerrointa voidaan skaalata kaavalla 4.11 vertailuliikennemäärään ja 100 vuoden käyttöikään. Kaavassa 4.11, käytetään kerrointa 2 kun momentti-historia on yhdistetty, muussa tapauksessa käytetään kerrointa 1. Kaavassa 4.12 on skaalattu esimerkin ominaisjunan, esimerkin laskentapisteeseen kohdistuva  $\lambda$ -kerroin. Kaikkien laskentapisteiden tulokset eli skaalatut  $\lambda$ -kerroimet ovat esitetty kappaleessa 4.10.

$$\lambda_{s,1,i} = \left( \frac{100 \cdot [\text{kerroin 1 (tai) kerroin 2}]}{10^6} \right)^{\frac{1}{k_2}} * \lambda_{s,1\text{yliajo},i} \quad (\text{Kaava 4.11})$$

$$\lambda_{s,1,3J-15M2000K} = \left( \frac{100 \cdot 49583,50}{10^6} \right)^{\frac{1}{k_2}} * 0,4796 = 0,5730 \quad (\text{Kaava 4.12})$$

## 4.10 $\lambda$ -kerroimet

Valituista laskentapisteiden ja ominaisjunien määrästä johtuen tutkimuksen tuloksena on 160 eri aikakauden ja erilaskentapisteen  $\lambda$ -kerrointa. 1-aukkoisten siltojen laskentapisteistä syntyy 40  $\lambda$ -kerrointa ja loput syntyvät 3-aukkoisten siltojen laskentapisteistä.  $\lambda$ -kerroimet ovat laskettu käyttämällä edellä esitettyjä periaatteita ja vertailuarvoja.

### 4.10.1 1-aukkoiset sillat

1-aukkoisten siltojen  $\lambda$ -kerroimet ovat esitetty taulukossa 4.8. 1-aukkoisissa silloissa vertailumomenttivaihteluväli on laskettu ainoastaan kuormakaaviolla LM71–22,5, johon päädyttiin kappaleessa 4.1.

Tulosten oikeellisuuden arviointiin käytetään eurokoodin antamia, uusien siltojen mitoituskäyttöä,  $\lambda$ -kerroimia ja Rynnäsen tutkimuksen mukaisia  $\lambda$ -kerroimia, jotka myös pohjautuvat 2000-luvun liikenteeseen. Eurokoodin mukaiset betoniteräksen  $\lambda$ -kerroimen laskentakaavat löytyvät standardista SFS-EN 1992-2+AC liitteestä

NN.3 ja taulukoon 4.9 on laskettu tämän tutkimuksen 1-aukkoisten siltojen laskentapisteitä vastaava  $\lambda$ -kertoimet. Rynäsen tutkimuksessa, 1-aukkoisten siltojen laskentapisteitä on vain kaksi, 2 m ja 20 m jänteisten siltojen jännevälillä puolivälissä. Toinen näistä laskentapisteistä, 20 m jännevälillä sillan laskentapiste, ei ole vertailukelpoinen tämän tutkimuksen vastaavan laskentapisteen kanssa, koska Rynäsen tutkimuksessa myös 1-aukkoisten siltojen vertailumomenttivaihteluvälillä laskennassa on käytetty kuormakaaviota SW/0–22,5 [Rynänen, M. et al. 2010, s.7] [Laaksonen, Anssi, sähköpostikeskustelu 2014]. Mikäli SW/0–22,5 tuottaa määrävän vaikutuksen,  $\lambda$ -kerroin pienenee. Tämän vuoksi Rynäsen 1-aukkoisen sillan, 20 m jänteisen sillan laskentapisteen arvot ovat liian pieniä vertailtavaksi tämän tutkimuksen mukaisiin arvoihin. Koelaskujen perusteella kuormakaaviota SW/0–22,5 käytettäessä 1-aukkoisiin siltoihin, tämä tuottaa määrävän vaikutuksen karkeasti jännemittojen 15 m ja 25 m välillä olevilla silloilla. Tämän perusteella voidaan kuitenkin pitää Rynäsen tutkimuksen 2 m laskentapistettä vertailukelpoisena. Rynäsen tutkimuksen kaupunkiliikenteen tuloksia ei voida vertailla tämän tutkimuksen kanssa, koska tässä tutkimuksessa lähiliikenne on rajattu pois. Rynäsen tulokset, niin 1-aukkoisilla kuin jatkuvilla rakenteilla, on paremmin vertailukelpoisia tämän tutkimuksen ominaistavarajunien tuloksiin, koska Rynäsen tutkimuksen sekä kevyen että raskaan liikenteen koostumuksen kokonaistilanteista suurin osa syntyy tavarajunista.

Taulukko 4.8. Tutkimuksessa lasketut 1-aukkoisten siltojen  $\lambda$ -kertoimien tulokset.

Vertailuarvo 250 milj. kN	Vertailukuormakaavio LM71-22,5				
Artukka	M1900	M1925	M1950	M1975	M2000
L 2,0 m	0,558	0,627	0,706	0,948	0,933
L 5,0 m	0,450	0,512	0,617	0,552	0,550
L 20,0 m	0,418	0,507	0,571	0,448	0,527
L 35,0 m	0,380	0,453	0,530	0,479	0,534
Artukka	T1900	T1925	T1950	T1975	T2000
L 2,0 m	0,528	0,657	0,770	0,981	0,971
L 5,0 m	0,388	0,522	0,587	0,771	0,734
L 20,0 m	0,345	0,442	0,533	0,507	0,603
L 35,0 m	0,327	0,424	0,519	0,517	0,690

Taulukko 4.9. Uusien siltojen, eurokoodin mukaisessa, mitoituksessa käytettävät  $\lambda$ -kertoimet 1-aukkoisille silloille..

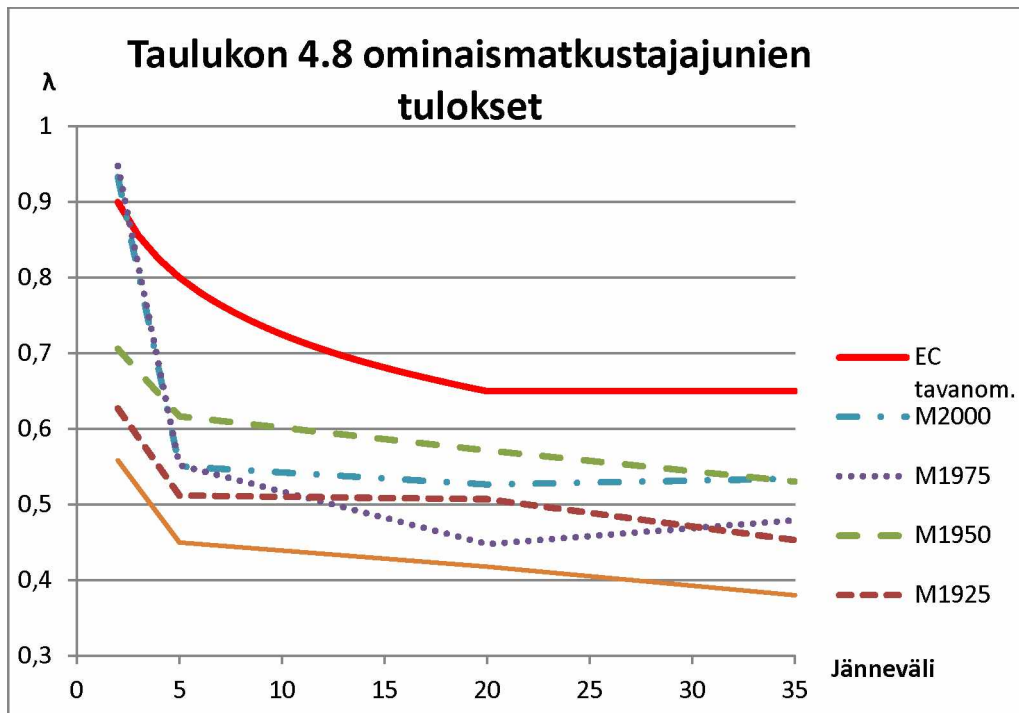
Vertailuarvo	25,30E6 t/a	24,78E6 t/a
EC1992-2	Tavanom.	Raskas
L 2,0 m	0,900	0,950
L 5,0 m	0,800	0,850
L 20,0 m	0,650	0,700
L 35,0 m	0,650	0,700



Taulukko 4.10. Ryynäsen tutkimuksen, Teräsbetonisillan väsymimitoituksen  $\lambda$ -kertoimet Suomen rataverkolle, mukaiset  $\lambda$ -kertoimet.

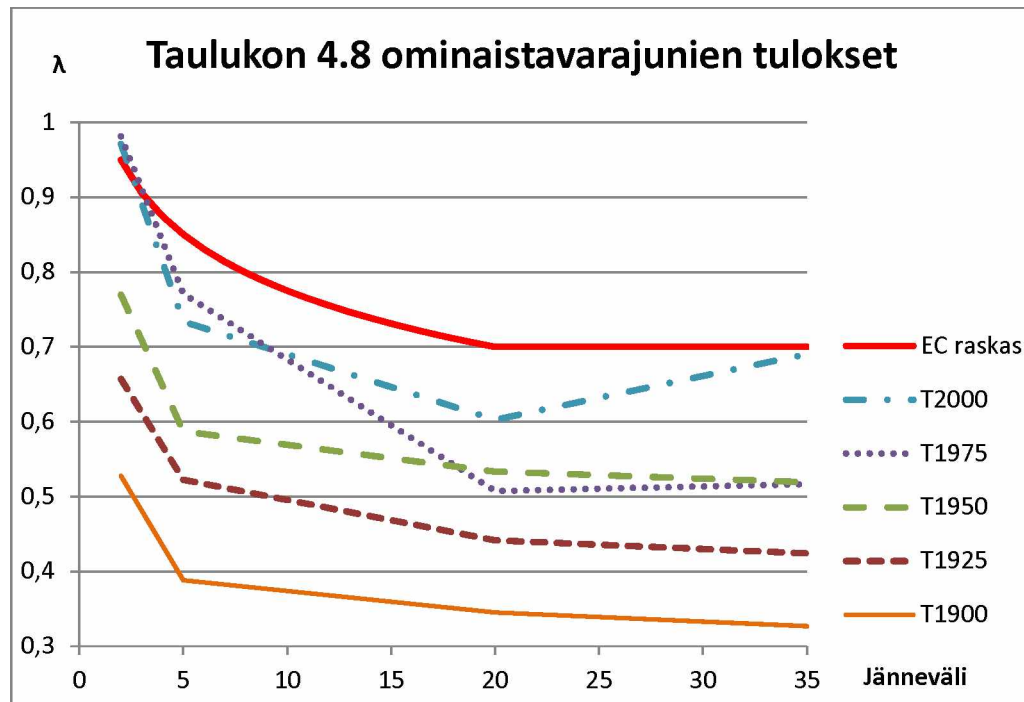
Vertailuarvo	25,00 t/a	25,00 t/a	25,00 t/a
Ryynäsen $\lambda_{s,1}$ *	<b>Kaupunki</b>	<b>Kevyt</b>	<b>Raskas</b>
L 2,0 m	0,662	0,850	0,858
L 20,0 m	0,333	0,546	0,541

Taulukoiden 4.9 ja 4.10 tulokset ovat vertailukelpoisia vain tämän tutkimuksen mukaisiin aikajakson 2000–2024 ominaisjuniin, koska vertailuarvot koskevat uusien siltojen mitoitusta. Lisäksi eurokoodin  $\lambda$ -kertoimien arvot ovat vähintään pyöristetty ylöspäin, elleivät jopa sisällä varmuutta. Jälkimmäinen saattaisi olla mahdollista, koska liikenteen koostumus eri eurokoodeja käyttävissä maissa on hyvin erilainen. Tämän epäilyksen varmistaminen vaatii lisätutkimuksia. Eurokoodin tavanomaisen sekaliikenteen  $\lambda$ -arvot (esitetty taulukossa 4.9, sarakkeessa ”Tavanom.”) ovat paremmin vertailukelpoisia tämän tutkimuksen matkustajaliikenteen  $\lambda$ -arvojen kanssa, koska kumpikaan ei sisällä yli 225 kN akselipainoja. Tämän tutkimuksen tavaraliikenteen  $\lambda$ -arvoja kannattaa taas vertailla eurokoodin raskaan liikenteen koostumuksen kanssa, koska molemmat sisältävät 250 kN akselipainoja. Eurokoodin liikennekoostumus sisältää kuitenkin suuremman osuuden 250 kN painoisia akseleita.



Kuva 4.14. Taulukon 4.8 ominaismatkustajajunien tulokset paremmin havainnollistavana viivakaaviona.





Kuva 4.15. Taulukon 4.8 ominaistavarajunien tulokset paremmin havainnollistavana viivakaaviona.

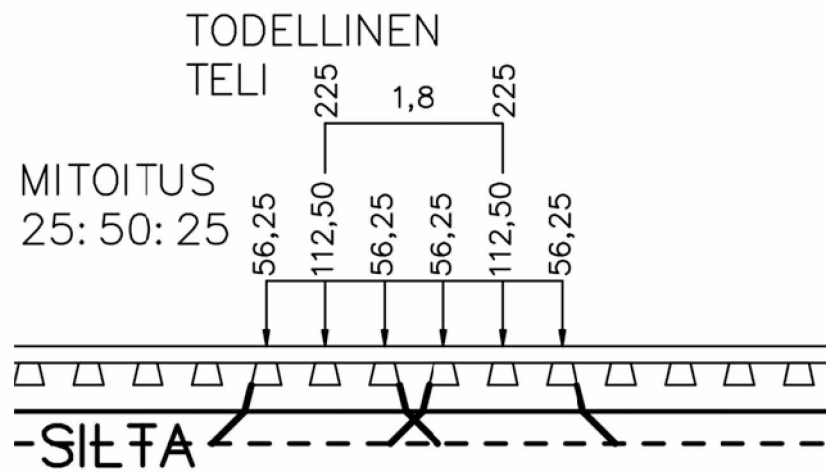
Tutkimuksen tulokset ovat esitetty paremmin havainnollistavina viivakaavioina, kuvissa 4.14 ja 4.15, taulukon 4.8 lisäksi. Tulosten yleislinjaus vaikuttaa hyvältä,  $\lambda$ -kerroin pienenee jännevälin kasvaessa ja kasvaa sitä suuremmaksi mitä uudemmasta aikajaksosta on kyse. Toisin sanoen väsymisrasituksen määrä pienenee kun jännevälin suureneminen vähentää momenttivaihtelusyklarivaihteluyksien määrää ja kasvaa sitä suuremmaksi mitä uudempaa, nopeampaa ja raskaampaa kalustoa on käytössä. Tästä linjasta poikkeavat ainoastaan neljän laskentapisteen arvot, 1J-35M1975, 1J-35M2000, 1J-35T1975 ja 1J-35T2000. Suurin poikkeama, 0,087, vastaavan aikajakson 20 m jänneen arvoon on laskentapisteessä 1J-35T2000. Linjasta poikkeaminen näillä pisteillä arvelaan aiheutuvan suurimmalta osalta ominaistavarajunan vaunujärjestyksestä. Ominaisvarajunissa T1975 ja T2000 vaunujärjestys muodostuu usean täyden ja usean tyhjän vaunun vuorottelusta. Tämä järjestys kasvattaa  $\lambda$ -kerrointa, koska silta on vuorotellen vähän kuormitettu, vuorotellen raskaasti kuormitettu ja tämä vuorottelu osuu hyvin pitkiin jänneväleihin. Ominaisvarajunan T2000, ominaisjunan T1975 verrattuna, suuremmat poikkeamat aiheutuvat ominaisjunan T2000 raskaammista akselipainoista. Näitä laskentapisteitä tarkasteltaessa, voidaan huomata vaunujärjestyksen huomattavan vaikutuksen. Näiden laskentapisteiden kanssa tasaisempiin ja oikeampiin tuloksiin voitaisiin päästä muodostamalla useampia saman aikajakson ominaisjunia, ehkä jopa todellisia junia. Tämä kasvattaisi kuitenkin rajusti laskentatyön määrää. Lisäksi vanhempien aikajaksojen todellisesta kalustosta ja vaunujärjestyksestä ei ole riittävästi tietoa.

Eurokoodi mukaan  $\lambda$ -kerroin pysyy samana kun 1-aukkoisen sillan jänneväli tai useampiaukkoisen vaikutusviivan kriittinen pituus on yli 20 m. Näin on tehty taulukossa 4.9. Tämä tutkimus tukee eurokoodin laskentamenetelmää, jonka mukaan  $\lambda$ -kerroin pysyy samana 20 m jälkeen. Tämän tutkimuksen mukaisissa tuloksissa on havaittavissa jopa pientä  $\lambda$ -kerroimen pientymistä, mentäessä yli 20 m jänneväleihin. Sama havainto voidaan tehdä sekä 1-aukkoisten että jatkuvien siltojen tuloksista.

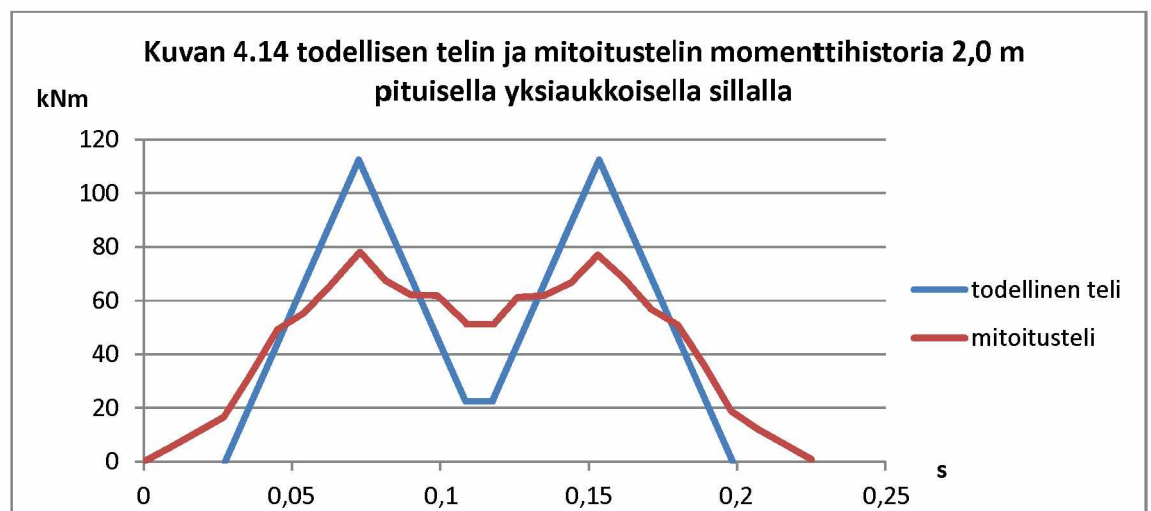
Nopeasti katsottuna hieman yllättäen, ominaismatkustajajunien  $\lambda$ -kertoimet ovat pääsääntöisesti suurempia kuin ominaistavarajunien vastaavat  $\lambda$ -kertoimet aikavälillä 1900–1974. Tähän kuitenkin löytyy ymmärrettävä syy, kun tutkii ko. aikavälin ominaisjunien kokonaismassoja ja momentti–aikahistorioita. Matkustajajunien kokonaismassat ovat pienempiä kuin vastaavan aikajakson tavarajunien. Momentti–aikahistorioista taas löytyy yhtenevänä piirteenä se, että veturin aiheuttama momenttivaihteluväli on usein yli puolet suurempi mitä vaunujen akselin tai telin muodostama on. Näin ollen merkittävä osuus väsymisrasituksesta aiheutuu juuri veturin yliajoista. Nämä kaksi asiaa yhdessä aiheuttavat sen, että ominaismatkustajajunien  $\lambda$ -kertoimet ovat pääsääntöisesti suurempia aikavälillä 1900–1974 kuin ominaistavarajunien.  $\lambda$ -kertoimet ovat skaalattu samaan liikennemäärään massan perusteella. Koska ominaismatkustajajuna on saman aikajakson tavarajunaa kevyempi, syntyy matkustajajunalle enemmän ylityskertoja. Tämän voi helposti havaita taulukosta 4.7. Koska ominaismatkustajajunan  $\lambda$ -kerroin sisältää enemmän ylityskertoja, se sisältää myös enemmän väsymiselle merkittäviä veturin ylityskertoja.

Ryynäsen tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, voidaanko Suomessa käyttää eurokoodissa esitettyjä  $\lambda$ -kertoimia. Betoniteräksen  $\lambda$ -arvojen tarkasteluissa vain yhden laskentapisteen, lyhyen päätyulokkeen kohdalta Ryynäsen laskelmat tuottivat suuremman  $\lambda$ -kertoimen mitä eurokoodi vaati käyttämään. Tutkimuksessa päädyttiin siihen, että Suomessa voidaan käyttää eurokoodin  $\lambda$ -kertoimia. Taulukon 4.8 tuloksista kuitenkin neljän laskentapisteen, 1J-2M1975, 1J-2M2000, 1J-2T1975 ja 1J-2T2000 osalta, ylitetään eurokoodin  $\lambda$ -arvo. Näille laskentapisteille on yhteistä, jänneväli, joka on kaikilla kaksi metriä. Näissä laskentapisteissä korostuu virhe, joka aiheutuu kuorman jakautuminen huomioimatta jättämisestä. Tämän tutkimuksen laskennoissa ei ole huomioitu akselipainon jakautumista raiteessa, tukikerroksessa tai sillassa mitenkään, momenttistorian laskennassa käytettävän ohjelmarajoitteen vuoksi. Jakautumista ei ole huomioitu ominaisjunissa eikä kuormakaavioissa, joilla vertailumomenttivaihteluväli lasketaan. Ryynäsen tutkimuksessa on akselikuorma jaettu kolmeksi pistekuormaksi, kuvan 4.16 mukaisesti, huomioimatta kuitenkaan jakautumista tukikerroksessa tai sillassa. Pistekuormien välinä on käytetty raidepölkkyjen väliä, 610 mm. Todellisten junakuormakaavioiden lisäksi myös suunnittelukuormakaaviot ovat käsitelty samoin. [Ryynänen, M. & Hyyrynen, M. Teräsbetonisillan väsymismitoituksen  $\lambda$ -kertoimet Suomen rataverkolle. 2010. s.7] Ryynäsen käyttämän menetelmän tuloksia voisi vielä hieman tarkentaa, ottamalla huomioon kuorman jakautumisen tukikerroksessa ja sillan päällysrakenteessa kuvan 4.16 mukaisesti.

Ryynäsen käyttämä menetelmä kuorman jakautumisesta johtaa lähemmäksi oikeita tuloksia kuin se, ettei kuorman jakautumista huomioida lainkaan. Jakautumisen huomioiminen pienentää todellisten junakuormakaavioiden ekvivalenttia momenttivaihteluväliä, mutta se pienentää myös kuormakaavioiden kautta laskettua vertailumomenttivaihteluväliä. Tämän vuoksi eri menetelmien ero tasoittuu tältä kannalta katsottuna. Lyhyillä jänneväleillä eroa syntyy kuitenkin eri syystä. Kun kuorman jakautuminen huomioidaan, pienenee kuormituskertojen lukumäärä ja intensiteetti. Tämä on helppo ymmärtää kuvan 4.17 avulla. Kuvassa on laskettu kuvan 4.16 todellisen telin, jossa siis kuorman jakautumista ei ole huomioitu, ja mitoitustelin, jossa jakautuminen on huomioitu, momenttistoria niiden ylittäessä jänneväliä 2 m pituinen silta. Sen lisäksi, että suurin momenttivaihteluväli pienenee yli 30 %, pienenee myös kaksi seuraavaksi suurinta momenttivaihteluväliä jopa 70 %. Virhe aiheutuu 2 m siltajänneväliä kaikissa teleissa, mutta se pienenee telin akselivälin kasvaessa.



Kuva 4.16. Yleisesti hyväksytty menetelmä jakaa akselikuorma raiteessa. Akselikuormasta puolet kohdistetaan akselikuormaa lähinnä olevalle ratapölkylle ja loput jaetaan tasan viereisille pölkylle. Ratapölkkyjen välinä käytetään yleisesti mitta 610 mm. Kuorman jakautuminen jatkuu tukikerroksessa ja siltakannessa.



Kuva 4.17. Kuvassa 4.16 esitettyjen todellisen telin ja mitoitustelin momenttihuistoria 2,0 m pituisella 1-aukkoisella sillalla. Dynaamisia vaikutuksia ei ole huomioitu. Mitoitustelin momenttihuistoriassa on huomioitu ainoastaan telin, kahden akselin muuttaminen kuudeksi pisteukuormaksi, joten tässä ei ole huomioitu kuorman jakautumista tukikerroksessa ja sillan päällysrakenteessa.

Kuorman jakautumisessa käytettyjen menetelmien välinen ero korostuu siis pienten jänneväliden ylittävien lähekkäisten akselien kohdalla. Näin ollen höyryvetureiden ja telien ylitykset 2 m siltajänteellä aiheuttavat virhettä. Tämän vuoksi virhe näkyy erityisesti uusimpien aikajaksojen laskentapisteissä, joissa telien määrä on runsaampaa. Höyryvetureiden vuoksi käytetystä menetelmästä aiheutuu virhettä kaikkiin 2 m siltajänteiden laskentapisteisiin. Ryynäsen tulosten perusteella käytetty menetelmä aiheuttaa todennäköisesti noin 0,1 yksikköä liian suuren  $\lambda$ -arvon uudempien aikajaksojen 2 m siltajänteiden laskentapisteisiin. Virhe on melko suuri, minkä vuoksi 2 m siltajänteiden laskentapisteiden tulokset olisi syytä laskea uudestaan. Virhe on kuitenkin varmalla puolella, koska suurempi  $\lambda$ -kerroin tarkoittaa suurempaa väsymisrasitusta. Muihin siltajännepituuksiin kuorman jakautumisen huomioimisella on paljon vähäisempi vaikutus.

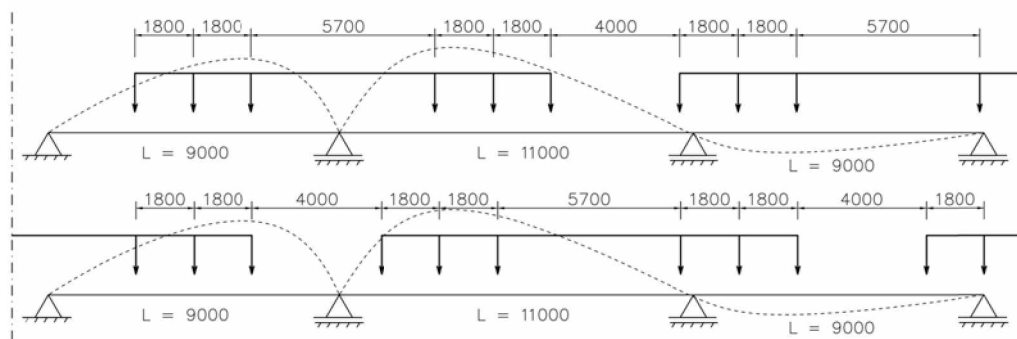
#### 4.10.2 3-aukkoiset sillat

3-aukkoisten tulokset ja vertailuarvot ovat esitetty liitteessä 10. Lisäksi tuloksista on tehty viivakaaviot, jotka ovat esitetty liitteessä 11. 3-aukkoisissa silloissa vertailu-momenttivaihteluväli on laskettu kuormakaavioilla LM71–22,5 ja SW/0-22,5, johon päädyttiin kappaleessa 4.1.

Vastaavasti kuin 1-aukkoisten siltojen kohdalla tulosten oikeellisuutta arvioidaan eurokoodin ja Rynäsen tulosten avulla. Nämä vertailuarvot ovat esitetty tulosten yhteydessä, liitteessä 10. Rynäsen laskemia tuloksia esitetään vain niiltä osin kuin laskentapisteet ovat riittävän lähellä tämän tutkimuksen laskentapisteitä. Yksikään Rynäsen tutkimukseen valittu useampiaukkoisen siltarakenne ei ole täsmälleen samanlainen kuin tässä tutkimuksessa, myös jännevälit ja sillan kriittiset pituudet eivät kaikki osu tämän tutkimuksen kanssa yhteen. Lisäksi yksi Rynäsen tutkimuksen siltarakenne sisältää päätyulokkeet, silta  $(2)+11+15,5+11+(2)$ . Ulokkeet vaikuttavat kaikkien laskentapisteiden tuloksiin. Näiden asioiden vuoksi tulosten vertailu Rynäsen tutkimuksen tuloksiin on hankalaa. Vaikka useampiaukkoisiin siltoihin pätee sama yleissääntö kuin 1-aukkoisiin siltoihin,  $\lambda$ -kerroin pienenee jännevälien kasvaessa, nyt myös ominaisjunan akselivälit ja vaunujärjestys vaikuttavat huomattavasti  $\lambda$ -kertoimien suuruuteen, kuten myöhemmin kuvan 4.18 kanssa osoitetaan. Tämän vuoksi tulosten vertailu Rynäsen tuloksiin interpoloimalla tuloksia jännevälin tai kriittisen pituuden avulla, on hankalaa. Rynäsen laskemia tuloksista tarkastellaan ainoastaan vertailuliikennemäärälle  $25 \cdot 10^6$  t/a laskettuja tuloksia.

Tulosten yleislinjan oikeellisuutta voidaan taas tarkastella vertailemalla tuloksia eurokoodin uusien siltojen mitoituksessa käytettäviin  $\lambda$ -kertoimiin. 3-aukkoisissa silloissa, aikajakson T2000 ominaisjunien  $\lambda$ -kertoimien suuruusjärjestys on yhtenevä eurokoodiin verrattuna eli suuruusjärjestys suurimmasta pienempään on tuki - reuna-aukko – keskiaukko. Tästä tekee poikkeuksen kuitenkin yksi valittu siltarakenne, jonka jännevälit ovat  $9+11+9$ . T2000 ominaisjunan laskentapisteet ovat ainoat, joita voidaan vertailla eurokoodin tulosten kanssa, koska eurokoodin  $\lambda$ -kertoimien takana olevissa liikenteen koostumuksissa, sekä tavanomaisessa sekaliikenteessä että raskaassa sekaliikenteessä, suurin osa on tavarajunia. Tavarajunien osuus tavanomaisen sekaliikenteen liikennekoostumuksen tonneista on noin 68 % ja raskaan sekaliikenteen liikennekoostumuksen tonneista 100 %. Muiden ominaisjunien laskentapisteissä  $\lambda$ -kertoimien suuruusjärjestys ei ole yhtenevä eurokoodin kanssa. Tähän löytyy järkeviä syitä. Esimerkiksi mikään ominaismatkustajajunan saman sillan laskentapisteiden suuruusjärjestys ei ole yhtenevä eurokoodin kanssa. Tämä aiheutuu siitä, että kaikissa ominaismatkustajajunissa on vain yksi veturi ja se aiheuttaa vaunuja suurimman momenttivaihteluvälin. Kun katsotaan kuvan 4.12 b), välituen vaikutusviivaa, huomataan, että välituen minimimomentti saadaan kuormittamalla raskaasti välituen molempia viereisiä kenttiä yhtä aikaa. Tätä yhtäaikaista ja raskailla akseleilla tapahtuvaa kuormitusta ei voi syntyä ominaismatkustajajunalla, koska raskaita akseleita on vain veturissa. Tavarajunilla raskaita akseleita on myös vaunuissa. Tämän vuoksi syntyy useita tilanteita tavarajunan ylittäessä siltaa, joissa välituen viereiset kentät ovat kuormitettu samanaikaisesti raskailla akseleilla. Tämä kasvattaa välituen laskentapisteen  $\lambda$ -arvoa niin paljon, että ominaismatkustajajunalla M2000 välituen  $\lambda$ -arvo on saman sillan laskentapisteisiin verrattuna pienin ja ominaistavarajunan T2000 suurin. Ominaisjunien  $\lambda$ -kertoimien arvojen suuruusjärjestys saman sillan eri laskentapisteissä aikavälillä 1900–1974, vaihtelee paljon ja on ominaisjunakohtainen. Järjestykseen vaikuttaa veturin akselipainojen suuruus verrattuna vaunun akselipainoihin ja vaunujärjestys.

Syy ominaistavarajunan T2000  $\lambda$ -arvojen eurokoodista poikkeavaan suuruusjärjestykseen sillalla 9+11+9 m lienee siinä, että sillan jännevälit ovat lähellä ominaistavarajunan T2000 useimpien vaunujen sisintä akseliväliä. Tämän tutkimuksen mukaisesti ominaistavarajunassa T2000 on kaksi täyttä neliakselista vaunua, vaunutyyppi F, joiden sisin akseliväli on 5,7 m. Eurokoodin liikenteen koostumuksesta löytyy juna-kuormakaavioita, joissa vaunujen sisin akseliväli on 5,5 m tai 5,7 m ja näiden suhteellinen määrä liikenteen koostumuksen tonneista on suurempi. Lisäksi eurokoodin mukaisessa liikenteen koostumuksessa on mukana tavarajuna, junatyyppi 5, joka koostuu kokonaan kuusi akselisista tavaravaunuista ja joiden sisin akseliväli on 5,7 m. Eurokoodin mukaiset, väsymislaskennassa käytetyt junatyypit ovat esitetty tämän työn liitteessä 13. Tutkimuksen yhteydessä ei ole havaittu Suomessa olevan kuusi akselillisiä tavaravaunuja, joten tämän kaltainen junatyyppi ei ole ollenkaan tavallinen Suomessa. [Standardi SFS-EN 1991-2, liite D, s. 114–120]



Kuva 4.18. Eurokoodin  $\lambda$ -kertoimien määrittämisessä käytetyn, junatyyppin 5 vaunujen akselien osuminen toistuvasti välituen laskentapisteeseen vaikutusviivan tehokkaisiin kohtiin sillalla, jonka jännevälit ovat 9+11+9.

Junatyyppi 5 vaikuttaa kuitenkin tehokkaalta, väsymisrasitusta kasvattavana junatyyppinä juuri useampiaukkoisilla silloilla, joilla jännevälit ovat lähellä kymmentä metriä. Varsinkin välituen laskentapisteessä, junatyyppin 5 vaunut osuvat tehokkaasti vaikutusviivan ääriarvokohtiin, kuten kuvassa 4.18 on osoitettu. Koska Suomessa tämän kaltainen vaunutyyppi on hyvin harvinainen, tässä olisi esimerkki tilanteesta, jossa kansallisesti määritetyistä junatyypeistä ja liikenteen koostumuksesta saataisiin etua.

Verrattaessa tuloksia Rynänen tutkimuksen tuloksiin huomataan, että tulokset ovat sitä lähempänä toisiaan mitä pidemmät jännevälit ovat. Varsinkin siltarakenteiden 15+20+15 ja 20+25+20 tulokset ovat jo hyvin lähellä toisiaan. Pidemmällä jännevälillä ominaisjunakaavioiden yksityiskohdilla on pienempi merkitys ja tämä johtaa siihen että erot pienenevät. Tämän tutkimuksen tulokset tukevat Rynänen tekemiä päätelmiä. Rynänen toteaa, että jatkuvien siltojen kohdalla voitaisiin sallia pienempiä  $\lambda$ -arvoja sekä reunakentässä että välituella [Rynänen, M. et al. 2010, s.14–15]. Vastaava päätelmä voidaan tehdä tarkastelemalla liitteen 11, aikajakson 2000–2024 ominaisjunien tuottamien tulosten ja eurokoodissa esitettyjen arvojen välisiä eroja.

Päätelmissään Rynänen ehdottaa lisälaskentapisteitä kaikille sillan kolmelle tarkastelupisteelle [Rynänen, M. et al. 2010, s.14–15]. Tämän tutkimuksen myötä lisälaskentapisteitä on laskettu laajemmasta jännevälialueesta. Nämä laskentapisteet perustuvat kuitenkin tämän työn mukaisiin ominaisjuniin, eikä täysin oikeista junista

muodostettuihin liikenteen koostumuksiin. Todellisten suomalaisten siltarakenteiden perusteella lisälaskentapisteitä ei tarvita keski- tai reunakentän tarkastelupisteiden osalta yhtään enempää, koska luvussa 1 tarkasteltujen olemassa olevien siltarakenteiden perusteella keskijänneeltään alle 10 m pituisia siltoja on Suomessa noin 20. Jatkuville ja alle 10 m:n jännevälejä sisältävien siltojen yleistymiselle tulevaisuudessa ei nähdä myöskään syytä. Välituen tarkastelupisteen kohdalla lisälaskentapisteet ovat myös tämän tutkimuksen jälkeen tarpeellisia. Tämä johtuu nykyään yleisestä käytännöstä suunnitella siltoja päätyulokkein. Ryyänen ehdottaa lisälaskentapisteitä pienille jänneväleille mutta välituen tarkastelupisteen kohdalla myös yli 20 m kriittiselle pituudelle, koska hänen tutkimuksen perusteella  $\lambda$ -kerroin vaikuttaa kasvavan kriittisen pituuden kasvaessa 17 metristä 20 metriin [Ryyänen, M. et al. 2010, s.14–15]. Tämän tutkimuksen perusteella ominaisjunan T2000  $\lambda$ -kertoimen suunta on päinvastainen eli se pienenee. Kuitenkin myöhempien aikajaksojen ominaistavarajunissa T1900, T1925 ja T1950 on havaittavissa vastaava  $\lambda$ -kertoimen kasvu mitä Ryyänen havaitsi. Tämän tutkimuksen perusteella  $\lambda$ -kertoimen kasvu näiden ominaisjunien kohdalla on paljon maltillisempaa Ryyäsen tutkimukseen verrattuna ja ainoastaan havaittavissa ominaistavarajunien kohdalla. Ominaismatkustajajunien kohdalla, kaikkien aikajaksojen ominaisjunien  $\lambda$ -kertoimet pienenevät selkeästi kriittisen pituuden kasvaessa. Asia voitaisiin varmistaa laskemalla lisälaskentapisteitä kriittisen pituuden väliltä 25–35 m.

## 4.11 Tulosten käyttö olemassa olevien siltojen väsymisvaurion ja jäljellä olevan käyttöiän laskennassa

Saatujen tulosten pohjalta muodostetaan mitoitusmenetelmä, jolla voidaan selvittää betonisillan väsymisrasituksen aste ja laskea jäljellä oleva käyttöikä.

### 4.11.1 Mitoituksessa käytettävien $\lambda$ -taulukoiden laadinta

Tutkimuksen laskennallisen osuuden, liitteessä 10 esitettyihin, tuloksiin perustuen muodostetaan jäljellä olevan käyttöiän laskentamenetelmä. Pistemäisten tulosten vuoksi tuloksista muodostetaan trendikäyrät, jolloin saadaan kaikki jännevälit kattava mitoitusmenetelmä luotua. Trendikäyrät voidaan esittää taulukoina ja kaavoina. Ehdotusmitoitusmenetelmän mukaiset, tutkimuksen tuloksiin perustuvat, taulukot ja kaavat ovat esitetty liitteessä 12.

Viivakaavioiden avulla, kuvissa 4.14 ja 4.15 esitettyjen 1-aukkoisten siltojen tuloksista voidaan tehdä päätelmä, että eurokoodin mukaista logaritmista käyrää vastaa paremmin ominaistavarajunien tulokset. Tämä ei ole toisaalta yllättävää, koska eurokoodin käyrän liikenteen koostumus sisältää suurimman osan liikenteen määrästä tavarajunia. Ominaismatkustajajunissa ei havaita samanlaista logaritmista korrelaatiota vaan tulokset ovat hyvin lineaarisia jännemittojen 5 m ja 35 m välillä. Ainoastaan jännevälin 2 m arvot poikkeavat tästä. Osittain poikkeamat johtuvat kappaleessa 4.10.1, havaitusta, akselikuorman jakautumisen huomioinnista syntyneestä virheestä. On hyvin hankalaa arvioida kuinka suuri tästä aiheutava virhe on. Tämän vuoksi on käytetty maltillista arviota virheen suuruudesta aikajaksoille 1900–1974. Aikajaksojen 1975–2024 1-aukkoisen siltarakenteen, jännevälin 2 m arvio perustuu Ryyäsen tulokseen. Päädytään käyttämään eurokoodin mukaista logaritmista trendikäyrää

ominaistavarajunien kohdalla. Tämä vaikuttaa hyvältä menetelmältä myös jatkuvien siltarakenteiden tulosten kanssa. Eurokoodin mukaisesti, esitetään arvot jänneväliille (vaikutusviivan kriittiselle pituudelle) 2 m ja 20 m ja pituuden vaihdellessa näiden välillä käytetään samaa eurokoodissa esitettyä kaavaa, kaavaa 4.13. Ominaismatkustajajunien kohdalla käytetään lineaarista trendiviivaa taitepisteillä 2 m, 5 m, 20 m ja 35 m. Trendikäyrät sovitetaan mahdollisimman lähelle laskettuja tuloksia.

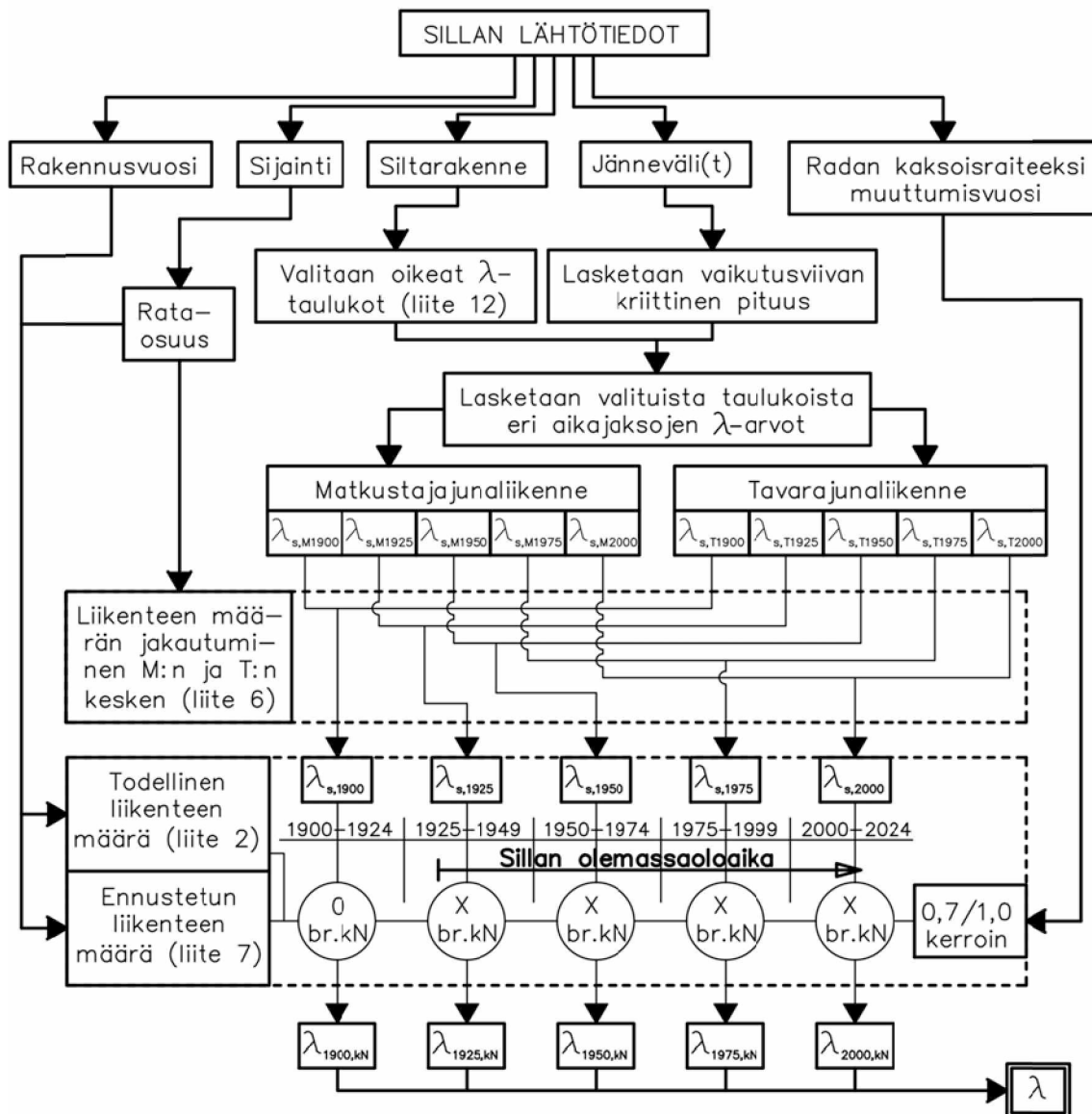
$$\lambda_{s,1}(L) = \lambda_{s,1}(2 \text{ m}) + [\lambda_{s,1}(20 \text{ m}) - \lambda_{s,1}(2 \text{ m})] * (\log L - 0,3) \quad (\text{kaava 4.13})$$

Jatkuvilla siltarakenteilla, trendiviivojen vaikutusviivan kriittisen pituuden kattavuus on saatu aikaan lyhyiden, alle 9 m ja todella pitkien, yli 25 m, luotettavuuden kustannuksella. Jatkuvien siltarakenteiden laskentapisteet ovat kaikki vaikutusviivan kriittisen pituuden 9 m ja 25 m välillä. Tulosten perusteella  $\lambda$ -kerroin vaikuttaa pienenevän hitaasti pituuden 20 m jälkeen. Tämän takia voidaan melko luotettavasti ekstrapoloida jatkuvien siltojen tulokset yli 20 m pituuksille yksinkertaisesti käyttämällä samaa tulosta yli 20 m pituuksille kuin pituudelle 20 m. Jatkuvien siltarakenteiden lyhyistä pituuksista, jolla, todellisia rakenteita silmällä pitäen oli merkitystä, on välituen laskentapiste. Trendikäyrän arvot välituen laskentapisteelle on jouduttu arvioimaan. Nämä käyrät olisi syytä varmistaa lisälaskentapistein.

Liitteessä 12 esitetään myös arviot aikajaksolle 2025–2049. Arvot esitetään, koska näitä tarvitaan jäljellä olevan käyttöiän arvioinnissa. Aikajakson 2025–2049 kalustoa ei voida täydellisesti arvioida, jotta voitaisiin ominaisjunia tehdä. Kaluston muuttuminen 25 vuodessa on kuitenkin hidasta. Tämän vuoksi, aikajakson 2025–2049, liitteen 12 tulokset perustuvat aikaisempien aikajaksojen ja eurokoodissa esitettyjen  $\lambda$ -kertoimien perusteella tehtyihin arvioihin. Arvioissa on oletettu, etteivät  $\lambda$ -kertoimet kasva eurokoodin arvoja suuremmaksi.

#### 4.11.2 Siltakohtaisen $\lambda$ -kertoimen laskemisen kulku

Kuvassa 4.19 on kuvattu siltakohtaisen  $\lambda$ -kertoimen laskennan kulkua. Lähtötietoina tarvitaan vähintään sillan rakennusvuosi, sijainti, siltarakenne ja jänneväli(t). Lisäksi jos kyse on kaksoisraiteesta, tarvitaan kaksoisraiteen rakentamisvuosi. Tällöin voidaan hyödyntää liikennemäärän pienennyskerroin.



Kuva 4.19. Siltakohtaisen  $\lambda$ -kertoimen laskemisen kulkukaavio.

Siltarakenteen ja jännevälien perusteella, valitaan oikeat taulukot liitteestä 12. 1-aukkoisella sillalla tarvitaan kaksi taulukkoa ja useampiaukkoisilla silloilla kuusi taulukkoa. Taulukoiden avulla lasketaan eri aikajaksojen  $\lambda_{s,M_i}$  ja  $\lambda_{s,T_i}$ -kertoimet perustuen vaikutusviivan kriittiseen pituuteen. Näin saadaan siis kymmenen  $\lambda$ -arvoa jokaiselle sillan tarkastelupisteelle. Sillan sijainnin perusteella, huomioidaan kokonaisliikennemäärän, eli bruttotonnien, jakautuminen matkustaja- ja tavaraliikenteen kesken. Tämä tapahtuu liitteen 6 ja kaavan 4.14 avulla.

$$\lambda_{s,i} = \sqrt[9]{[M_i] * \lambda_{s,M_i}^9 + [T_i] * \lambda_{s,T_i}^9}, \quad (\text{kaava 4.14})$$

missä  $[M_i]$  on liitteen 6 matkustajaliikenteen osuus ja  $[T_i]$  tavaraliikenteen osuus. Näiden summa on aina 1,0. Näin saadaan siltarakenne- ja rataosakohtaiset  $\lambda$ -kertoimet eri aikajaksoille, jotka sisältävät kukin 2500 milj. br. tonnia eli 100 vuoden aikana vuosittaisen 25 milj. br. tonnin kertymän.



Matkustaja- ja tavaraliikenteen  $\lambda$ -kertoimien yhdistelyn jälkeen huomioidaan kunkin aikajakson kohdalla toteutunut todellinen liikennemäärä. Jokainen  $\lambda_{s,i}$  skaalataan vuosittaisen keskimääräisen liikennemäärän ja aikajakson vuosien määrällä, jolloin saadaan parametrit  $\lambda_{s,i,kN}$ . Skaalaus tapahtuu kaavan 4.15 avulla

$$\lambda_{s,i,kN} = \lambda_{s,i} * \sqrt[9]{\frac{\left(\frac{Vol_i [milj.kN]}{N_{years,i} [a]}\right)}{250 [milj.kN]}} * \sqrt[9]{\frac{N_{years,i} [a]}{100 [v]}} , \quad (\text{kaava 4.15})$$

missä  $Vol_i$  on aikajakson  $i$  yhteenlaskettu liikennemäärä, jonka yksikkönä käytetään milj. kN. Tässä liikennemäärässä huomioidaan mahdollinen kaksoisraiteen aiheuttama vähennys niiltä vuosilta, jolloin kaksoisraide on ollut olemassa. Vähennyksen suuruus on 30 % kunkin vuoden liikennemäärästä. Vähennyksen suuruus ei voi olla suurempi, vaikka sillalla on raiteita useampia kuin kaksi. Parametri  $N_{years,i}$  huomioi aikajakson  $i$  sillan olemassaolo vuodet. Kunkin aikajakson maksimiarvo on siten 25 v.

$$\lambda_s = \sqrt[9]{\sum \lambda_{s,i,kN}^9} \quad (\text{kaava 4.16})$$

Siltakohtainen ekvivalentti vauriokerroin saadaan lopuksi laskettua kaavan 4.16 avulla. Eurokoodissa esitettyä  $\lambda_{s,4}$ -kerrointa ei käytetä. Tutkimuksessa on käytetty oletta-  
maa, ettei raide kuormita viereisiä raiteita siinä määrin, että sillä olisi merkitystä väsymiselle. Tämä olettan vuoksi, tutkimuksen ulkopuolelle jää rautatiesillat, joissa paksun tukikerroksen vuoksi raide kuormittaa aina myös viereistä raidetta. Tällöin suurimmat rasitusvaihteluvälit syntyvät tilanteissa, joissa kaksoisraiteen molemmat raiteet ovat samanaikaisesti kuormitettu. Nähtävästi eurokoodi  $\lambda_{s,4}$ -kerroin huomioi yhtäaikaista sekä kaksoisraiteen aiheuttaman liikennemäärän pienenemisen, jolla on lambdaa pienentävä vaikutus, että kaksoisraiteen aiheuttaman rasitusvaihteluvälin kasvamisen, jolla on taas lambdaa suurentava vaikutus. Näissä tilanteissa tarvitaan suunnittelijan tekemää kohdekohtaista arviointia.

Siltakohtaisen  $\lambda$ -arvon laskeminen suunnittelijalle ei ole kovin työlästä tai vaikeaa. Tämän vuoksi ei nähdä suurta tarvetta tätä mitoitusmenetelmää heikommille tarkkuustasoille. Tulosten vertailukelpoisuus säilyy parempana kun tarkkuustasoja on mahdollisimman vähän. Esitettyä mitoitusmenetelmää tarkemmalle menetelmälle on kuitenkin jätettävä tilaa. Tietyissä tilanteissa  $\lambda$ -arvoja on mahdollista laskea tarkemmin. Tällaisia paikkoja on ainakin rataosuuden, joilla on nykyisin 200 kN akselipainorajoitus. Lisäksi on aina mahdollista tehdä mitoitus tarkemmilla ominaisjunilla mutta tämä kasvattaa työmäärää runsaasti, uusien rasitushistorialaskujen ja rainflow-analyyysien takia.

Mikäli halutaan esitettyä mitoitusmenetelmää heikompi tarkkuustasoinen menetelmä, yksi vaihtoehto on käyttää suoraan liitteen 12  $\lambda$ -arvoja tekemättä mitään vähennyksiä. Tällöin siltarakenteen ja jännemittojen avulla lasketaan sekä matkustaja- että tavaraliikenteen  $\lambda$ -kerroin ja käytetään näistä suurempaa  $\lambda$ -kerrointa.

#### 4.11.3 Tulosten vertailu nykyään käytössä olevaan menetelmään

Nykyään käytössä oleva, olemassa olevien rautatiesiltojen väsymisrasituksen laskentamenetelmä esitellään suunnitteluohjeessa RSO 9. Laskentamenetelmää on esitelty myös tämän työn kappaleessa 3.2. Taulukossa 4.11 on vertailtu tässä työssä ehdotettua laskentamenetelmää RSO 9 liitteen 1 eri mallien laskentamenetelmiin. Taulukon eri laskentamenetelmät ovat,

Artukka A (todellinen): Tässä työssä ehdotettu tarkka laskentamenetelmä. Laskennassa on käytetty liitteen 2 mukaista liikennemäärä ja liitteen 6 mukaisia suhteita liikennemäärän jakautumisesta matkustaja- ja tavaraliikenteen kesken.

Artukka B (25 000 milj. kN): Edellisessä kappaleessa ehdotettu heikomman tarkkuustason laskentamenetelmä. Laskentamenetelmässä lasketaan liitteen 12 avulla  $\lambda_{s,Mi}$ - ja  $\lambda_{s,Ti}$ -kertoimet, joista suurempi arvo valitaan mitoitukseen. Menetelmä sisältää liikennemäärän 25 000 milj. kN.

RSO malli 1 (25 000 milj. kN): RSO 9 mallin 1 mukainen menetelmä, jossa liikennemäärä on skaalattu liikennemäärään 25 000 milj. kN. Skaalaus on tehty vertailukelpoiseksi saamisen vuoksi.

RSO malli 2 (todellinen): RSO 9 mallin 2 mukainen menetelmä, jossa liikennemäärä perustuu RSO:ssa esitettyyn taulukkoon.

RSO malli 3 (todellinen): RSO 9 mallin 3 mukainen menetelmä, jossa liikennemäärä perustuu RSO:ssa esitettyyn taulukkoon.

RSO malli 3 (25 000 milj. kN): RSO 9 mallin 3 mukainen menetelmä, jossa liikennemäärä on skaalattu liikennemäärään 25 000 milj. kN. Skaalaus on tehty vertailukelpoiseksi saamisen vuoksi.

Taulukossa 4.11 laskentamallien vertailua on tehty kahdelle eri rataosuuden sillalle, toisella rataosuudella rata on ollut kaksoisraiteinen vuodesta 1910 lähtien ja toinen on pääasiassa ollut yksiraiteinen. RSO:n laskentamallien tulosten laskennassa on käytetty samaa menetelmää kaksoisraidevähennyksestä kuin tämän työn ehdotetussa laskentamenetelmässä. Näin ollen tästä ei synny eroa.

Taulukko 4.11. Eri laskentamallien vertailua 1-aukkoisilla silloilla.

Rataosuus/sillan jänne- mitta/aikaväli		Artukka A (todellinen)	Artukka B (25000 milj.kN)	RSO malli 1 (25000 milj.kN)	RSO malli 2 (todellinen)	RSO malli 3 (todellinen)	RSO malli 3 (25000 milj.kN)
<b>Hyvinkää – Riihimäki, kaksoisraide vuodesta 1910 lähtien</b>							
2,0 m	1900–1999	0,711	0,900	1,008	0,852	0,802	0,899
	1925–2024	0,751	0,900		0,933	1,013	1,022
5,0 m	1900–1999	0,588	0,752	0,798	0,675	0,636	0,712
	1925–2024	0,627	0,800		0,738	0,802	0,809
10,0 m	1900–1999	0,521	0,641	0,640	0,541	0,513	0,577
	1925–2024	0,564	0,725		0,592	0,643	0,651
20,0 m	1900–1999	0,467	0,530	0,482	0,407	0,404	0,464
	1925–2024	0,501	0,650		0,445	0,488	0,502
30,0 m	1900–1999	0,454	0,530	0,482	0,407	0,404	0,464
	1925–2024	0,504	0,650		0,445	0,488	0,502
<b>Seinäjoki – Kokkola, yksiraiteinen</b>							
2,0 m	1900–1999	0,676	0,900	1,008	0,829	0,797	0,899
	1925–2024	0,731	0,900		0,868	0,918	1,022
5,0 m	1900–1999	0,566	0,752	0,798	0,656	0,631	0,712
	1925–2024	0,623	0,800		0,687	0,727	0,809
10,0 m	1900–1999	0,493	0,641	0,640	0,526	0,508	0,577
	1925–2024	0,558	0,725		0,551	0,583	0,651
20,0 m	1900–1999	0,430	0,530	0,482	0,396	0,396	0,464
	1925–2024	0,499	0,650		0,415	0,444	0,502
30,0 m	1900–1999	0,423	0,530	0,482	0,396	0,396	0,464
	1925–2024	0,497	0,650		0,415	0,444	0,502

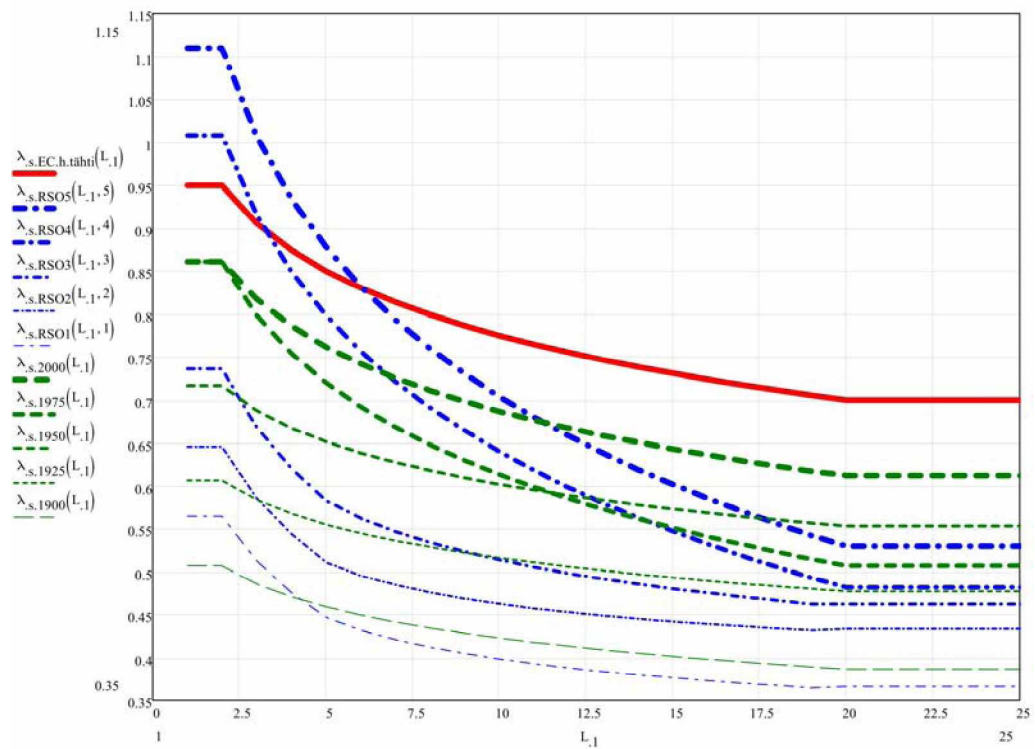
Taulukossa 4.11 tulokset ovat laskettu sekä aikavälille 1900–1999 että 1925–2024. Aikavälin 1900–1999 tulokset ovat paremmin vertailukelpoisia, koska RSO:n aikajakson 2000–2024 kaluston huomioiva kerroin  $k(i)$  perustuu arvioon. Tuloksista voidaan huomata, että tämän tutkimuksen ehdotuksen mukainen mitoitusmenetelmä tuottaa pienempiä  $\lambda_s$ -kertoimia lyhyillä jänneväleillä, noin kymmenen metrin kohdalla tulokset ovat lähellä toisiaan ja yli kymmenen metrin jänneväleillä  $\lambda_s$ -kerroin kasvaa verrattuna RSO:n mallin 3 mukaiseen menetelmään, jossa on huomioitu todellinen liikennemäärä. Syyn tähän voi helposti havaita kuvasta 4.20, jossa vertaillaan mitoitusmenetelmien takana olevia ominaisjunan vaikutusta jännevälin funktiona. Tarkasteltaessa laskentamallien, Artukka A ja RSO malli 3 (todellinen), eroja, havaitaan, että tässä työssä ehdotetulla laskentamallilla päästään pienillä jänneväleillä jopa yli 25 % pienempiin  $\lambda$ -kertoimiin. Toisaalta yli kymmenen metrin 1-aukkoisten siltojen kohdalla ehdotettu laskentamenetelmä tuottaa hieman suurempia  $\lambda$ -kertoimia. Taulukon 4.11 perusteella suurimmillaan noin 15 % suurempia.

Taulukosta 4.11 havaitaan myös yksi RSO:n menetelmän vanhaksi käymisestä aiheutuva vika. RSO:n eri mallien tarkoitus on, että tarkkuus paranee mallin numeron suurentuessa, jolloin tarkimmilla malleilla on mahdollista laskea aina edelliseen malliin verrattuna pienempi  $\lambda$ -kerroin. Näin ei kuitenkaan näytä tapahtuvan vertailtaessa, aikavälin 1925–2024, RSO:n mallien 1 ja 3 tuloksia. Tämän tutkimuksen mukaiseen

heikomman tarkkuustason menetelmään (taulukossa 4.11 menetelmä, Artukka B) tämä on korjattu. Heikomman tarkkuustason laskentamenetelmän tulos ei ole siis vakio jännemitan funktiona vaan se on sidottu myös laskettavaan aikaväliin. Näin ollen heikomman tarkkuustason tulos ei jää koskaan pienemmäksi tarkempaan menetelmään verrattuna kun liikennemäärä ei ylitä 25 000 milj. kN.

Taulukon 4.11 vertailusilloiksi on valittu vain 1-aukkoisia siltoja. RSO ei mainitse koskeeko väsymismurtorajatilan tai jäljellä olevan käyttöiän laskennan mitoitustmenetelmät 1-aukkoisia, jatkuvia tai rakenteeltaan molemman tyyppisiä siltoja. 1-aukkoisten siltojen yleisyyden vuoksi, voidaan olettaa RSO:n menetelmän koskevan varmasti 1-aukkoisia siltoja. Roosin tutkimuksessa oli mukana 2-, 3- ja 4-aukkoisia siltoja [Roos, V. Sähköpostikeskustelu 2014]. RSO:n jäljellä olevan käyttöiän laskenta perustuu Roosin tutkimukseen, joten tämän perusteella voidaan olettaa, että RSO:n jäljellä olevan käyttöiän laskentamenetelmä koskee myös jatkuvia siltoja. Kuvassa 4.20 on esitetty sinisillä pistekatkoviivoilla, 25 000 milj. kN:iin skaalatut, RSO:n eri aikajaksojen ominaisjuniien vaikutukset jännemitan funktiona. Näitä käyriä verrattaessa tämän tutkimuksen jatkuvien rakenteiden tuloksiin, liitteeseen 11, voidaan todeta, että tämä tutkimus tukee olettamaa että RSO:n menetelmä on tarkoitettu myös jatkuville silloille.

Kuvassa 4.20 on esitetty RSO:n käyrien lisäksi tämän tutkimuksen mukaiset, yksinkertaisesti yhdistetyt matkustaja- ja tavaraliikenteen käyrät. Yksinkertaisesti yhdistäminen tarkoittaa sitä, että sekä matkustaja- että tavaraliikenteen tuloksista on muodostettu logaritminen trendikäyrä, jolloin yhdistäminen on ollut helppoa. Tässä työssä ehdotetun mitoitustmenetelmän tarkkoja käyriä ei edes olisi voitu esittää tarkasti, koska käyrät ovat rataosuuskohtaisia, johtuen matkustaja- ja tavaraliikenteen määrän keskinäisestä suhteesta. Kuvasta 4.20 voidaan heti päätellä, että Roosin tutkimuksessa ei ole myöskään huomioitu akselipainon jakautumista tukikerroksessa tai sillarakenteessa. Tätä ei voida kuitenkaan pitää virheenä, koska RSO:n mitoitustmenetelmä on tarkoitettu myös terässilloille, joissa tukikerrosta ei ole. Kuvasta voidaan siis tehdä johtopäätös, että betoni- ja terässiltojen väsymisrasituksen tai jäljellä olevan käyttöiän määrän laskennoille tulee laatia erilaiset väsymisrasituksen määrää kuvaavat käyrät.



Kuva 4.20. Tämän tutkimuksen ja RSO:n eri aikajaksojen ominaisjunien vaikutus sillan jännemitan funktiona. RSO:n käyrät ovat skaalattu 25 000 milj. kN:iin, jolloin kaikki käyrät ovat vertailukelpoisia keskenään. Paksuin sininen pistekatkoviiva kuvaa RSO:n aikajakson 2000–2024 ominaisjunan vaikutuksia, ohuemman viivat kuvaavat aikaisempien aikajaksojen ominaisjunien vaikutuksia, mitä ohuempiviiva, sitä aikaisempi aikajakso. Vihreät katkoviivat kuvaavat tämän tutkimuksen mukaisien ominaisjunien vaikutuksia. Lisäksi kuvassa esitetään eurokoodin mukainen, raskaan sekaliikenteen, uusien teräsbetoni siltojen mitoituksen käytettävä käyrä.

Edellä tehtiin johtopäätös, että RSO:n laskentamenetelmä on tarkoitettu myös jatkuville rakenteille. Tämän vuoksi taulukossa 4.12 on vertailtu kahden 3-aukkoisen sillan  $\lambda$ -kertoimia eri laskentamalleilla laskettuna. Tarkasteltaessa laskentamallien, Artukka A ja RSO malli 3 (todellinen), eroja, havaitaan, että tässä työssä ehdotettu laskentamalli tuottaa jokaisessa vertailuun valitussa laskentapisteessä pienemmän  $\lambda$ -kertoimen. Kertoimet ovat 8,0–18,6 % pienempiä kuin RSO mallilla 3 lasketut arvot taulukossa 4.12 valittujen siltarakenteiden kohdalla. Suurimmat erot syntyvät välituen laskentapisteiden kohdalla. Erot ovat sen verran merkittäviä, että on täysin perusteltua käyttää mitoituksessa jatkuville siltarakenteille omia mitoituskäyriä väsymisrasituksen määrästä. Näin ollen ehdotuksen mukainen laskentamalli korjaa nykyisin käytössä olevan ohjeen konservatiivista arviota jatkuvien siltojen kohdalla.

Taulukko 4.12. Eri laskentamallien vertailua 3-aukkoisilla silloilla.

Jännemitat	Jatkuvan sillan laskentapiste/aikaväli		Artukka A (todellinen)	Artukka B (25000 mijj.kN)	RSO malli 1 (25000 mijj.kN)	RSO malli 2 (todellinen)	RSO malli 3 (todellinen)	RSO malli 3 (25000 mijj.kN)
<b>Seinäjäoki – Kokkola, yksiraiteinen</b>								
Silta 15+17+15	Reuna- kenttä	1900–1999	0,397	0,499	0,547	0,449	0,440	0,505
		1925–2024	0,436	0,533		0,471	0,500	0,561
	Välituki	1900–1999	0,379	0,496	0,532	0,437	0,429	0,495
		1925–2024	0,436	0,570		0,458	0,487	0,547
	Keski- kenttä	1900–1999	0,381	0,473	0,518	0,426	0,420	0,485
		1925–2024	0,437	0,538		0,446	0,475	0,534
Silta 8+10+8	Reuna- kenttä	1900–1999	0,472	0,631	0,691	0,568	0,547	0,620
		1925–2024	0,529	0,672		0,594	0,629	0,701
	Välituki	1900–1999	0,429	0,539	0,664	0,546	0,527	0,597
		1925–2024	0,497	0,647		0,571	0,605	0,675
	Keski- kenttä	1900–1999	0,460	0,616	0,640	0,526	0,508	0,577
		1925–2024	0,526	0,665		0,551	0,583	0,651

#### 4.11.4 Siltojen luokittelu

Tutkimuksen 1-aukkoisten siltojen valitsemista ei olisi tarvinnut tehdä kuvan 4.1 taitekohtien mukaan; tästä ei saatu mitään konkreettista hyötyä. Valintaa voidaan kuitenkin pitää hyvänä saatujen tulosten perusteella. Tutkimukseen valittujen 1-aukkoisten siltojen jännemitat olivat 2 m, 5 m, 20 m ja 35 m. Jännteeltään lyhyiden siltojen  $\lambda$ -kertoimen muutokset ovat suurempia kuin jännteeltään pitkien siltojen. Tämän voi havaita kuvasta 4.20. Tämän vuoksi tiheämpi jännevälilotos lyhyemmiltä jänneväleiltä on ollut tarkoituksen mukaista.

1-aukkoisten siltojen luokittelu voidaan tehdä kuvan 4.1 mukaisilla viivakaavioilla. Näiden avulla voidaan muuttaa kuormakaaviolla LM71–22,5 saadut rasitukset standardin SFS-EN 15528 halutun luokan rasituksiksi. Esimerkiksi väsymisestä johtuvan jäljellä olevan käyttöiän selvittämiseen tarvittava, kuormakaaviolla LM71–22,5 laskettu momenttivaihteluväli voidaan muuttaa kuvan 4.1 avulla tietyn SFS-EN 15528 luokan aiheuttamaa väsymisrasitusta vastaavaksi momenttivaihteluväliksi. Näin ollen silta pystytään luokittelemaan väsymisrasituksen puolesta tässä työssä ehdotetulla menetelmällä. Taulukossa 4.13 on kuvan 4.1 vastaava sisältö esitetty numeroarvoin taulukkona. Taulukon arvot eivät ole täysin tarkkoja vaan ovat kuvan 4.1 mallin mukaisia lineaarisointeja. Tämän vuoksi, tietyillä jännemitan pituuksilla voidaan tarkemmilla, kuvan 4.1 mukaisilla, arvoilla saada laskettua raskaampi luokka, mikäli halutun raskaamman luokan laskennallinen kestävyys osoittaminen on lähellä. Taulukon etuna on automatisoida siltojen luokituslaskut siten, ettei yksittäisten siltojen luokittamiseen tarvittavaa arvoa tarvitse katsoa kuvasta 4.1. Tälle on tarvetta koska käytännössä ainoastaan eurokoodin mukaan suunnitellut uudet sillat voidaan jättää pois luokitustarkasteluista, muilla silloilla sillan luokka on varmistettava laskelmien avulla.

Jatkuvien siltojen luokittelu on haastavampaa, koska kuvan 4.1 mukaisia viivakaavioita ei ole todennäköisesti olemassa jatkuville silloille. Tällaisten kaavioiden tekeminen on myös työlästä, johtuen runsaasta määrästä yhdistelmiä aukkojen määriä ja eri jännepituuksista. Myös 1-aukkoisilla silloilla luokitteluun liittyy haasteita. Standardi SFS-EN 15528 edellyttää, että suurin sallittu nopeus sidotaan määritettyyn luokkaan. Tällöin on mahdollista määrittää useampia luokkia, eri suurimman sallitun nopeuden arvoilla, samalle radalle. Kuvassa 4.1 luokat ovat laskettu ainoastaan joko 100 km/h tai 120 km/h maksiminopeudelle. Näin ollen myös 1-aukkoisille silloille syntyy todennäköisesti tarve laskea lisää kuvan 4.1 mukaisia kaavioita. Jatkuvat siltarakenteet ja 1-aukkoisten siltojen luokitus eri nopeuksille luo selvän jatkotutkimustarpeen.

*Taulukko 4.13. 1-aukkoisten siltojen kertoimet standardin EN 15528+A1 mukaisten kuormakaavioiden luokitteluun, kun rasitukset ovat laskettu kuormakaaviolla LM71-22,5.*

Luokka	Nopeus [km/h]	$L \leq 2$	$2 < L < 5$	$5 \leq L \leq 20$	$> 20$
<b>A</b>	120	0,59	$0,6434-0,0267*L$	0,51	$0,51+0,0024*(L-20)$
<b>B1</b>	120	0,67	$0,7366-0,0333*L$	0,57	$0,57+0,0030*(L-20)$
<b>B2</b>	120	0,67	$0,7366-0,0333*L$	0,57	$0,57+0,0077*(L-20)$
<b>C2</b>	120	0,74	$0,8066-0,0333*L$	0,64	$0,64+0,0037*(L-20)$
<b>C3</b>	120	0,74	$0,8066-0,0333*L$	0,64	$0,64+0,0120*(L-20)$
<b>D2</b>	120	0,83	$0,9034-0,0367*L$	0,72	$0,72+0,0017*(L-20)$
<b>D3</b>	120	0,83	$0,9034-0,0367*L$	0,72	$0,72+0,0040*(L-20)$
<b>D4</b>	120	0,83	$0,9034-0,0367*L$	0,72	$0,72+0,0093*(L-20)$
<b>E4</b>	100	0,90	$0,98-0,04*L$	0,78	$0,78+0,0040*(L-20)$
<b>E5</b>	100	0,90	$0,98-0,04*L$	0,78	$0,78+0,0092*(L-20)$
Luokka	Nopeus [km/h]	$L \leq 2$	$2 < L < 5$	$5 \leq L \leq 12$	$> 12$
<b>C4</b>	120	0,74	$0,8066-0,0333*L$	0,64	$0,64+0,0080*(L-12)$
Luokka	Nopeus [km/h]	$0 < L < 6,2$	$6,2 \leq L < 8,6$	$8,6 \leq L \leq 24$	$> 24$
<b>D4xL</b>	120	0,85	$0,85-0,025*(L-6,2)$	0,79	$0,79+0,0069*(L-24)$

#### 4.11.5 Jäljellä olevan käyttöiän laskenta

Jäljellä olevan käyttöiän laskenta perustuu tässä työssä ehdotettuun laskentamalliin, jolla selvitetään iteroiden jäljellä olevat käyttövuodet laskentahetkestä tulevaisuuteen. Tätä iterointia varten on arvioitu liitteeseen 12 aikajaksolle 2025–2049 arvot väsymisen määrästä jännemitan funktiona. Lisäksi liitteessä 7 on arvioitu liikenteen määrä vuoteen 2050 saakka.

Jäljellä olevan käyttöiän sitomista siltojen luokitteluun tulisi miettiä. Mahdollista olisi määrittää rataosuudelle pienempi luokka, jolla saataisiin käyttöikävuosia enemmän. Tämä voisi vähentää radan omistajan siltoihin kohdistuvaa korvausinvestointipainetta ainakin tilanteissa, joissa investoinnin pääasiallinen syy on epävarmuus väsymiskestävyydestä. Kyseessä oleva menettely vaatisi kuitenkin mitoitustietojen kehittämistä edelleen, jossa liitteen 12 mukaisia väsymiskertymääroja tulisi laatia standardin SFS-EN 15528 eri luokille.

## 5 Johtopäätökset

### 5.1 Yhteenvedo ja päätelmät

Työn tavoitteena oli tarkentaa nykyisin käytössä olevaa, rautatiesiltojen väsymisrasituksen kertymäasteen tarkimpia laskentamenetelmiä ja näin ollen myös jäljellä olevan käyttöiän laskentamenetelmää. Tutkimus toteutettiin kirjallisuusselvityksenä, jonka tueksi tehtiin kattavat väsymiskertymälaskelmat uuden laskentamenetelmän luomiseksi.

Kirjallisuusselvityksenä selvitettiin rautatieliikenteen määrää Suomessa 1900-luvun alusta vuoden 2012 loppuun saakka. Tuloksena saatiin kattava, lähes koko Suomen rataverkkoa koskeva liikennemäärätaulukko, joka on huomattavasti laajempi verrattuna nykyisen normin antamaan liikennemäärätietoon. Vaikka työ on rajattu kosemaan betonirakenteisia siltoja, voidaan liikennemäärätaulukkoa hyödyntää myös tämän työn rajauksen ulkopuolisten siltojen väsymislaskennassa, kuten terässilloissa. Työn ansiosta myös liikennemääräennusteet sekä päivitettiin että laajennettiin koskemaan lähes koko Suomen rataverkkoa. Ennusteet laadittiin vuoteen 2050 asti, joka on riittävä jäljellä olevan käyttöiän arvioimisen kannalta. Ennusteet laadittiin hyväksi käyttäen Liikenneviraston liikenteen kasvuennusteita. Aikavälin 2035–2050 liikennemääräennusteille käytettiin suurempaa kulmakerrointa lisävarmuuden saamiseksi. Liikennemäärien päivitys ja ennusteiden tarkentaminen olisi hyvä tehdä noin 15 vuoden päästä. Liikennemäärätietojen laajentaminen lähes koko Suomen rataverkolle on merkittävä parannus, koska tämä poistaa liikennemäärään liittyvää epävarmuutta ja parantaa eri suunnittelijoiden tekemien väsymistarkastelulaskelmien tulosten vertailukelpoisuutta.

Väsymiskertymälaskelmat tehtiin 25 vuoden aikajaksoissa, ominaisjunien avulla. Ominaisjunalla pyrittiin kuvaamaan kunkin 25-vuotisen aikajakson keskimääräisiä väsyttäviä vaikutuksia. Matkustaja- ja tavarajunaliikenteen eroista johtuen, käytettiin kunakin aikajaksona sekä ominaismatkustaja- että ominaistavarajunaa. Työssä hyödynnettiin Roosin tutkimuksen mukaisia ominaisjunia, joille tehtiin pieniä muutoksia. Lisäksi aikajakson 2000–2024 ominaisjunat muodostettiin kokonaan uudestaan.

Työssä havaittiin, että vaunujärjestyksellä on havaittava merkitys tuloksiin. Tarkempiin tuloksiin olisi päästy ominaisjunien määrää lisäämällä jokaisella aikajaksolla. Tällöin mahdolliset virheet, jotka syntyvät tavasta yrittää huomioida useita ominaisuuksia yhdessä ominaisjunassa, tasoittuisi. Näin tapahtuisi varsinkin vaunujärjestyksen kohdalla. Ominaisjunien määrän lisääminen antaisi mahdollisuuden muodostaa erilaisia vaunujärjestyksiä, jolloin tietyillä jännevälin laskentapisteillä tulos ei olisi virheellisesti liian suuri. Ominaisjunien määrän lisääminen lisäisi kuitenkin laskentatyön määrää runsaasti.

Rakenteiden väsymisilmiöön liittyy aina useita vaikuttavia tekijöitä, joiden vuoksi väsymisen tarkka mallintaminen on hankalaa. Tämän lisäksi useita epätarkkuustekijöitä muodostuu ehdotettuun laskentamalliin siitä, että laskentamalli laaditaan koko Suomen rataverkon kattavaksi. Ominaisjunien vähäisen määrän vuoksi kaikkia Suomen rataverkon ominaisuuksia ei ole voitu huomioida. Tällaisia ovat esimerkiksi akselipainorajaltaan alle 225 kN sallitut radat. Näissä väsymiskertymä jää luonnollisesti vähäisemmäksi mitä tässä ehdotetulla laskentamenetelmällä saadaan. Muita huomi-



oimattomia asioita ovat erilaiset nopeusrajoitukset eri silloilla, junien pituuden vaihtelut vilkkaasti liikennöityjen ja hiljaisten ratojen välillä. Näiden syiden vuoksi esitettyä laskentamallia on syytä pitää yleisenä väsymiskertymän laskentamallina, jota voidaan edelleen tarkentaa huomioimalla siltakohtaisia ominaisuuksia yhä tarkemmin. Uusimpien aikajaksojen väsymiskertymät ovat suhteessa merkittävimpiä, joten näiden aikakausien ominaisuuksien tarkentamisesta kannattaa aloittaa.

Väsymiskertymälaskelmissa käytetty menetelmä, jossa akselikuorman jakautumista ei huomioida edes tukikerroksen paksuudella, on huono ratkaisu, koska tämä kasvattaa virheellisesti lyhyiden jännevälien väsymiskertymää. Työssä laadittuun ehdotuksen mukaiseen laskentamenetelmään virheen suuruutta on arvioitu Ryynäsen tulosten pohjalta ja pyritty korjaamaan aiheutunutta virhettä. Tämä olisi kuitenkin syytä vielä tarkastaa lisälaskelmin. Johtuen virheellisestä menettelystä akselikuorman jakautumisen suhteen, on tutkimuksen tuloksia hyväksi käyttäen mahdollista muokata pienellä vaivalla laskentamalli tukikerroksettomille betonisilloille.

Tutkimuksen tuloksena syntyi tarkennettu laskentamalli betonisen rautatiesillan väsymiskertymän määrälle ja tästä johtuvalle jäljellä olevan käyttöiän määrän arviointiin. Muodostettua mallia vertailtiin nykyisin käytössä oleviin laskentamalleihin ja todettiin, että liikennemäärä päivityksen lisäksi uudessa laskentamallissa on useita positiivisia parannuksia. Näistä suurimpia ovat ehdottomasti jänteeltään lyhyiden, alle 10 metrin pituisten, 1-aukkoisten betonisten siltojen ja jatkuvien siltarakenteiden, nykyisten mitoitusmallien konservatiivisen arvion tarkentaminen. Nykyisin käytössä oleva normi ei huomioi akselikuorman jakautumista tukikerroksen paksuudella. Tästä aiheutuu jänteeltään lyhyiden 1-aukkoisten siltojen kohdalla hyvin konservatiivinen arvio väsymiskertymän määrälle, jota on mahdollista tarkentaa. Jatkuvien siltojen kohdalla tutkimuksessa havaittiin, että erottamalla jatkuvat siltarakenteet erilleen, on mahdollista huomioida jatkuvien siltarakenteiden pienemmät väsymiskertymämäärät ja näin tarkentaa nykyisen normin arviota. Muita positiivisia parannuksia ovat matkustaja- ja tavaraliikenteen keskinäisen liikennemääräsuhteen huomioiminen rataosuuskohtaisesti ja säännön laatiminen liikennemäärän jakautumisesta kaksiraiteisella radalla. Suomessa matkustaja- ja tavaraliikenteen suhde vaihtelee hyvin voimakkaasti rataosuuskohtaisesti, on ratoja, jotka ovat lähes täysin matkustajaliikenteen tai tavaraliikenteen käytössä. Tämän huomiointi kannattaa, koska näissä liikennelajeissa on eroavia piirteitä kuten tavarajunan suurempi pituus ja akselipainojen suuruus. Lisäksi tavarajunan ominaisuuksiin kuuluu tyhjien ja täysien vaunujen mahdollinen vuorotteleva järjestys. Nykyinen normi ei ohjeista miten rataosuuden liikennemäärä jaetaan kaksiraiteisella sillalla. Tämän tutkimuksen johdosta tälle muodostettiin varmalla puolella oleva sääntö, jonka mukaan liikennemäärää voidaan pienentää 30 % ilman tarkempaa tarkastelua. Muodostetun tarkan laskentamallin rinnalle luotiin nopeampi heikomman tarkkuustason laskentamalli.

Pääradat on luokiteltava vuonna 2016 ja muut radat vuonna 2018 standardissa SFS-EN 15528 esitettyihin luokkiin. Ratojen luokituksen liittymistä tutkimuksen siltojen väsymiseen selvitettiin. Lisäksi luokitus huomioitiin ehdotetussa laskentamallissa, mutta kattavaa yksinkertaista siltojen luokitusjärjestelmää ei tällä tutkimuksella saavutettu. Tämä johtuu siitä että kuvan 4.1 mukaisia viivakaavioita ei ole laadittu riittävän kattavasti, varsinkin jatkuvat siltarakenteet puuttuvat täysin. 1-aukkoisten siltojen luokittelu onnistuu tämän tutkimuksen mukaan mutta näidenkin kohdalla, suurimman sallitun nopeuden vuoksi, edellä mainitun mukaisia viivakaavioita tulisi laatia lisää luokituksen nopeuttamiseksi.

Roosin tutkimusta, johon nykyisin käytössä olevien mitoitusmenetelmä perustuu, ei onnistuttu löytämään yhtenäisenä, vain osia siitä. Tämän vuoksi yksi tärkeä tutkimuksen tavoite oli myös tallentaa tutkimuksen tieto, jotta jälkeenpäin on helpompaa selvittää mihin asiat perustuvat. Lisäksi aihealueen jatkotutkimus on helpompi suunnitella ja aloittaa tämän tutkimuksen myötä.

## 5.2 Jatkotutkimustarpeet

Työssä laaditun laskennan tarkkuutta voisi parantaa kehittämällä ominaisjunia. Edellä mainittu ominaisjunien määrän lisääminen kunakin aikajaksona, olisi yksi mahdollinen keino. Näin eri rataosuuksien tyypillistä junaliikennettä voisi huomioida entistä paremmin. Tämä mahdollistaisi jopa rataosuuskohtaisten liikennekoostumusten tekemisen. Haasteena tässä on vanhojen aikajaksojen, 1900–1999, kalustohistoriatiedon löytäminen. Toinen mahdollisuus parantaa työssä laadittujen aikajakson 2000–2024 ominaisjunien tarkkuutta olisi punnita todellisia junia ja tuoda tämä tieto ominaisjuniin. Tällä menettelyllä olisi helppo ottaa kantaa nyt käytetyn menettelyn oikeellisuuteen siitä, että ominaistavaravaunut ovat joko täysiä tai tyhjiä. Punnitsemalla tavarajunia, saataisiin myös lisätietoa tavarajunien tyhjien ja täysien vaunujen järjestykseen.

Väsymistarkasteluissa tarkastetaan usein myös betonin väsymiskestävyys. Tässä työssä on tarkasteltu ainoastaan teräsbetonirakenteen betoniterästen väsymistä. Kirjallisuuden perusteella betonin väsymismurtuma on erittäin harvinaista. Kuitenkin betonin väsymiskestävyydelle olisi syytä kehittää mitoitusmenetelmä tässä esitetyn mitoitusmenetelmän rinnalle.

1-aukkoisten siltojen 2 m jännevälin laskentapisteen tulokset on syytä laskea uudelleen. Tämän avulla jänteeltään lyhyiden siltojen ekvivalenttien vauriokertoimien arvoja saadaan todennäköisesti vielä vähän pienennettyä ja tulosta oikeaan suuntaan. Virhe aiheutui väärästä tavasta huomioida akselikuorman jakautuminen tukikerroksessa. Tapahtuneen virheen vuoksi tämän työn tuloksia voi hyödyntää laatimalla mitoitusmallin tukikerroksettomalle sillalle. Jatkotutkimuksena voisi tutkia myös sitä miten akselikuorman jakautuminen tukikerroksen ja sillan kannen puolikkaan paksuudelta vaikuttaisi tuloksiin.

Jatkuvien siltarakenteiden laskentapisteeet valittiin tarkastelemalla suomalaisia olemassa olevia jatkuvia siltoja. Tämän vuoksi laskentapisteeet kattavat hyvin tarvittavan jännemitta-alueen. Lisälaskentapisteeille olisi kuitenkin ollut tarvetta jatkuvien siltarakenteiden välituen tarkastelupisteellä. Näille olisi tarvetta, johtuen viime vuosikymmeninä yleistyneestä tavasta suunnitella sillan päät ulokkeellisena. Tämä koskee myös 1-aukkoisia siltoja.

Siltojen luokitusmenetelmän laatiminen kattavammaksi vaatii jatkotutkimusta. Tässä tutkimuksessa päädyttiin laskennassa hyödyntämään kuormakaaviota LM71-22,5, koska tällöin välttyään useiden kuormakaavioiden käytöltä. Luokitus ajateltiin ensin onnistuvan yksinkertaisesti kuormakaavion LM71-22,5 ja kuvan 4.1 avulla, mutta tässä tutkimuksessa havaittiin asioita, jotka monimutkaistavat luokitusta. Kattava mitoitusmalli, jolla sillat onnistutaan luokittelemaan, vaatii vielä työtä. Tätä työtä ei välttämättä kannata tehdä erikseen väsymistarkastelua varten vaan työssä kannattaa samalla ottaa huomioon kaikki rajatilat.

## Lähteet

Ariduru S. Fatigue life calculation by rainflow cycle counting method. 2004. A thesis submitted to the graduate school of natural and applied sciences of middle east technical university. The degree of master of science in mechanical engineering. 93 s. + liit. 36 s.

CR TSI Structures Working Group. Calculations – Simply supported spans. 20th June 2007. 30 s.

eKalre-järjestelmä (VR-Yhtymä Oy). Ei julkinen. Tiedot luettu aika välillä 12.8–15.8.2013.

Eonsuu, Honkanen, Kilpinen, Pöhlö. Suomen veturit, Osa 1. Valtion rautateiden höyryveturit. Reproofset AB, Malmö 1975. ISBN 91-7266-021-X.

Eonsuu, Honkanen, Pöhlö. Suomen veturit, Osa 2. Moottorikalusto. Gummerus Kirjapaino Oy 1995. ISBN 952-5060-02-0.

Fryba L. (report), Ch. Bousquet (Annexe A), Brühwiler E.(Annexe A). Fatigue in concrete railway bridges, Final report. ERRI D 216/RP 3. January 2002. 40 s.

Heiniö, Sulo. Tekniikan käsikirja, viides muutettu ja laajennettu painos. K. J. Gummerus Oy, Jyväskylä 1942. 1627 s.

Heiniö, Sulo. Teknillinen käsikirja, kolmas muutettu ja laajennettu painos, 1929. K. J. Gummerus Oy, Jyväskylä. 1208 s.

Heiniö, Sulo. Teknillinen käsikirja, toinen muutettu ja laajennettu painos, K. J. Gummerus Oy 1920, Jyväskylä. 878 s.

Helin, Ristomatti. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 23/2011. Teräsbetonisten rautatiesiltojen väsymiskestävyyden määrittäminen. Helsinki 2011. 116 s. + liitt. 155 s.

Herranen, Leila. Amanuenssi. Suomen Rautatiemuseo, Hyvinkää. Haastattelu 2.5.2013.

Herwig, A. Reinforced concrete bridges under increased railway traffic loads – Fatigue behaviour and safety measures. Lausanne. École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2008. Väitöskirja. 142 s. Thèse EPFL, no4010. Saatavissa: <http://library.epfl.ch/theses/?nr=4010>

Hitsatut profiilit EN-1993 –käsikirja. Rautaruukki Oyj. Otavan Kirjapaino Oy, Keuruu 2010. Uudistettu 3. painos. ISBN 978-952-5010-02-2. 608 s.

Hsu T. T. C. Fatigue of Plain Concrete. (1981). ACI Journal, Journal Proceedings Vol 78, No. 4. pp. 292-304.

Iikkanen Pekka, Mukula Mikko. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 37/2010. Rataverkon tavaraliikenne-ennuste 2030. Helsinki 2010. Liikennevirasto. ISBN 978-952-255-576-2.

Junaturvallisuussääntöön liittyvät tekniset määräykset ja ohjeet (Jtt) Muutoslehti 4, Rautatievirasto, 2007-09.

Kerokoski, O., Köliö, A., Leppälä, A., Tulonen, J., Wuorenjuuri J. Tutkimusohjelma elinkaaritehokas rata (TERA) osa 5 – Sillat, loppuraportti. Tampereen teknillinen yliopisto, Maa- ja pohjarakenteiden yksikkö. Tampere 2013. 192 s.

Laaksonen, Anssi, tekniikan tohtori. Sähköpostikeskustelu 24.1.2014.

Liikenneviraston internetsivut, ohjeluetelo, sillat ja muut taitorakenteet, rautatiesillat. Lainattu 17.4.2013.

[http://portal.liikennevirasto.fi/sivu/www/f/urakoitsijat\\_suunnittelijat/vaylanpidon\\_ohjeet/sillat/ratasillat](http://portal.liikennevirasto.fi/sivu/www/f/urakoitsijat_suunnittelijat/vaylanpidon_ohjeet/sillat/ratasillat)

Liikenneviraston ohjeita 20/2011. Eurokoodin soveltamisohje – Siltojen kuormat ja suunnitteluperusteet NCCI 1 (22.12.2010). Helsinki, Liikennevirasto.

Liikenneviraston ohjeita 3/2010. Ratatekniset ohjeet (RATO) osa 2, Radan geometria. Helsinki 2010. ISBN 978-952-255-505-2.

Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 32/2011. Liikenneolosuhteet 2035, rautateiden henkilöliikenteen ennustetarkasteluita. Helsinki 2011. Liikennevirasto. ISBN 978-952-255-689-9.

Liikenneviraston väylätietoja 4/2012. Rataverkon kuvaus 1.1.2013. Helsinki 2012. Liikennevirasto. ISBN 978-952-255-213-6.

Mähönen, Nina. Dipl. Ins. Strateginen suunnittelu. VR Transpoint. Sähköpostikeskustelu 15-16.10.2013.

Mälkiä, Juha. Dipl. Ins. Vaunustoasiantuntija VR Transpoint. Sähköpostikeskustelu 4.6.2013.

Milne, I. & Ritchie, R. O. & Karihaloo, B. Comprehensive Structural Integrity, Volumes 1-10. 2003. Elsevier. ISBN 978-0-08-043749-1. 5052 s.  
Outinen, Salmi, Vulli. Lujuusopin perusteet. Pressus Oy 2007. Klingendahl Paino Oy. ISBN 978-952-9835-65-2. 464 s.

Plos M., Lundgren K., Rempling R., Gylltoft K., Cervenka J., Thelandersson S., Elfgren L., Herwig A., Brühwiler E., Rosell E., Gillesén C. Linear Analysis and Remaining Fatigue Life of Reinforced Concrete Bridges. Sustainable Bridges. Background document D4.5. European Commission, 6th Framework Programme. 2007.

Ratatekniset ohjeet (RATO) osa 3, Radan rakenne. Helsinki 2008. Ratahallintokeskus.

Rataverkon suurimmat sallitut akselipainot, Liikennevirasto 2011, viitattu 19.6.2013  
[http://portal.liikennevirasto.fi/sivu/www/f/aineistopalvelut/tilastot/rautatietilastot/rataverkko\\_keskeiset\\_ominaisuudet](http://portal.liikennevirasto.fi/sivu/www/f/aineistopalvelut/tilastot/rautatietilastot/rataverkko_keskeiset_ominaisuudet)

Rautatiesiltojen suunnitteluohje (RSO), Ratahallintokeskus 21.2.1997, 218/731/97.

Rautatietilasto 1994, VR-Yhtymä Oy, Laskentayksikkö. ISSN 0787-8524. 51 s.

Rautatietilastot vuosilta 1936, 1937, 1938, 1945, 1948, 1956, 1957, 1958, 1959 ja 1985. Suomen virallinen tilasto.

RIL 144 – 1982, Rakenteiden kuormitusohjeet, Suomen rakennusinsinöörien liitto ry, Vammalan kirjapaino Oy, Vammala 1982. 171 s.

RIL 144 – 1997, Rakenteiden kuormitusohjeet, Suomen rakennusinsinöörien liitto ry, Pikapaino Paatelainen Oy, Helsinki 1997. ISBN 951-758-375-3. 182 s.

Roger Rabb. Todennäköisyysteoriaan pohjautuva väsymisanalyysi. Rakenteiden mekaniikka vol. 45, nro 3, 2012. s. 162–187.

Roos, Vilho, muistiinpanot tutkimukseen, Rautatiesillan väsymiskestävyyden laskeminen, liittyen. Irtopapereita.

Roos, Vilho. Dipl. Ins. Kauniainen. Haastattelu 2.5.2013.

Roos, Vilho. Dipl. Ins. Kauniainen. Sähköpostikeskustelu 12–13.3.2014.

Roos, Vilho. Rautatiesillan väsymiskestävyyden laskeminen. Rakennustekniikka-lehti, 1988. Vol. 44:1. s. 47–60. ISSN 0033-913X.

Ryynänen, Markus, Hyyrynen, Mikko, Laaksonen, Anssi. Teräsbetonisillan väsymismitoituksen  $\lambda$ -kertoimet Suomen rataverkolle. [Raportti]. Julkaisematon. A-Insinöörit, 2010.

Ryynänen, Markus. Fatigue analysis. Vt6 Ahvenlampi–Mansikkala Pellisenrannan AKS S216 Eurokoodiverailu. [Raportti]. Julkaisematon. A-Insinöörit, 21.11.2009.

Saraoja, Emil & Valkola, Väinö. Teknillinen käsikirja, ensimmäinen painos, K. J. Gummerus Oy, Jyväskylä 1914. 791 s.

Sinisalo, Ilkka. Dipl. Ins. Suunnittelupäällikkö VR Track Oy. Helsinki. Haastattelu 29.11.2013.

Standardi SFS 3099, Metallien väsytykskokeiden yleiset periaatteet, 1974-08-15 13 s.

Standardi SFS-EN 15528+A1. Railway applications. Line categories for managing the interface between load limits of vehicles and infrastructure. Vahvistettu 11.2.2013. s. 17 + liitt. 34 s.

Standardi SFS-EN 1991-2 Eurokoodi 1. Rakenteiden kuormat. Osa 2: Siltojen liikennekuormat. Vahvistettu 29.3.2004. s. 103 + liitt. 40 s.

Standardin SFS-EN 1992-2+AC Eurokoodi 2. Betonirakenteiden suunnittelu. Betonisillat. Mitoittaminen ja yksityiskohtien suunnittelu. Vahvistettu 16.3.2006. s. 41 + liitt. 45 s.

StoFlo™ Rainflow Cycle Counting in Excel. [Viitattu 12.10.2013]. Rainflowmenetelmään perustuva Excel-taulukko. Saatavissa: <http://www.stotera.com/stoflo/>.

Suomen höyryveturit, internet sivu, viitattu 19.6.2013  
<http://koti.mbnet.fi/kasii/hoyryveturit/index.htm>

Suomen rautatietilasto. Helsinki 2012. Liikenneviraston tilastoja 4/2012. ISBN 978-952-255-134-4.

Sustainable bridges, Dynamic Railway Traffic Effects on Bridge Elements Background document D4.3.3. 30.11.2007 [Taustadokumentti liittyen EU:n rahoittamaan projektiin: Sustainable bridges – Assessment of Future Traffic Demands and Longer Lives]. Saatavissa: <http://www.sustainablebridges.net>

Thun, H. Assessment of fatigue resistance and strength in existing concrete structures. Luleå. Luleå university of technology. 2006. Doctoral thesis. s. 148 + liitt. 28 s. ISBN 978-91-85685-03-5.

Tielaitos. Siltojen kantavuuden laskentaohje. 1992. 24 s. ISBN 951-47-6859-0.

Toikkanen, Simo. Ylitarkastaja, Infra ja ympäristö-osasto. Liikennevirasto. Helsinki. Yliraskaiden rautatiekuljetusten lupapyyntöistä tehty kooste, sähköpostikeskustelu 12 – 23.9.2013.

Tulonen, Joonas. Suokannan rautatiesilta: Vanhan teräspalkkibetonisen laattasillan koekuormitus. Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto. Tampere 2012. 179 s. + liitt. 69 s.

Tuominen, Arttu. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 21/2010. Rataverkon luokittelun vertailu kantavuuden mukaan. Helsinki 2010. 53 s. + liitt. 11 s.

UIC CODE 776-1 R, Loads to be considered in the design of railway bridges, 3<sup>rd</sup> edition, 1-7-79. International union of railways.

Valtionrautateiden koneteknillisen toimisto, tekniset tiedot-lehtinen sarjamerkin Sr1 sähköveturista.

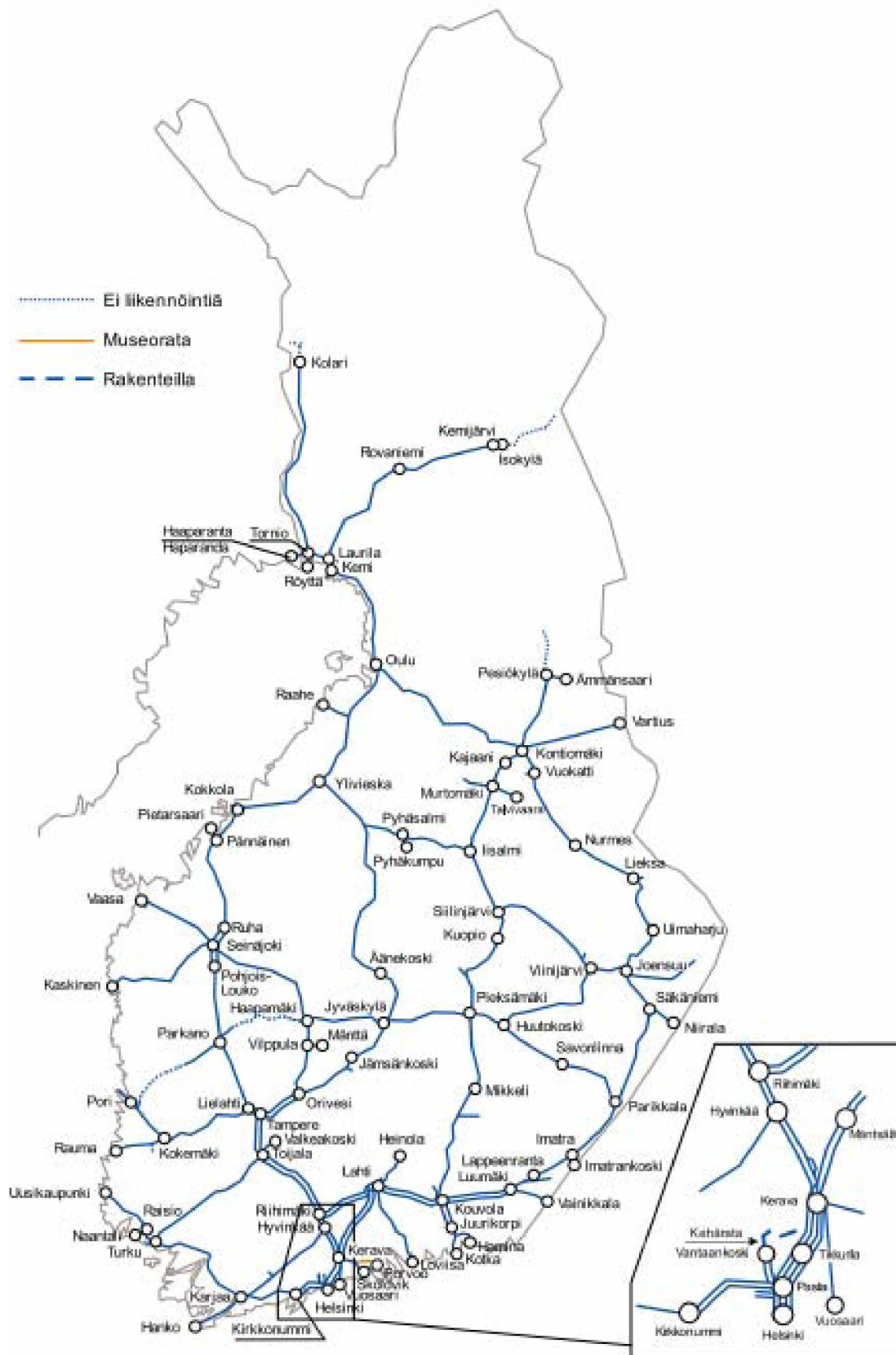
Vesa, Juuti. Controller. VR-Yhtymä Oy. Helsinki. Sähköpostikeskustelu 26.4.2013.

Wuorenjuuri, Janne. Rautatiesiltojen hallintaraportit vuosilta 2000–2011. VR Track Oy.

Wuorenjuuri, Janne. Rautatiesiltojen hallintaraportti. 2012. VR Track Oy. 48 s. + liitt. 83 s.

Zetterberg, Seppo. Yhteisellä matkalla VR 150 vuotta. WSOY 2011. ISBN 978-951-0-34742-3.

## KARTTA SUOMEN RATAVERKOSTA



1999	0,7	3,4	7,8	4,4	1,1	0,1	5,5	9,9	9,6	5,7	12,6	9,7	1,8	9,7	1,4	1,2	10,9	11,0	21,6	9,7	4,5	3,0	6,0	0,3	0,3			
1998	0,8	3,3	8,0	5,9	1,3	0,1	5,9	9,6	9,4	5,2	12,7	9,5	1,7	9,5	1,4	1,2	10,7	11,0	21,2	9,4	4,2	3,1	6,1	0,4	0,4			
1997	0,8	2,3	6,5	5,2	1,3	0,2	5,2	7,8	7,5	3,6	11,0	7,7	2,0	7,7	0,9	1,5	9,2	9,5	24,8	9,0	4,0	2,5	5,9	0,4	0,4			
1996	0,6	2,2	6,9	4,5	1,0	0,2	5,1	7,7	7,3	3,4	10,8	7,1	1,3	7,1	1,1	0,9	9,0	9,7	22,7	8,0	4,1	2,5	4,7	0,4	0,4			
1995	0,5	2,3	7,7	4,2	1,2	0,2	5,7	8,5	8,1	4,1	11,4	7,2	1,7	7,2	1,2	1,2	9,5	9,8	20,7	7,6	3,5	2,0	4,4	0,5	0,5			
1994	0,5	2,5	7,5	4,1	1,2	0,2	5,7	8,3	8,1	4,0	11,2	7,3	1,6	7,3	1,3	1,2	9,6	9,9	20,4	7,5	3,5	2,0	4,3	0,5	0,5			
1993	0,6	2,6	7,4	4,0	1,2	0,2	5,7	8,2	8,0	3,9	10,9	7,4	1,6	7,4	1,3	1,1	9,6	9,9	20,1	7,5	3,6	1,9	4,2	0,4	0,4			
1992	0,7	3,0	7,1	3,8	1,1	0,2	5,7	7,8	7,9	3,8	10,4	7,5	1,4	7,5	1,4	1,0	9,8	10,0	19,6	7,3	3,6	1,8	4,0	0,5	0,5			
1991	0,7	3,3	6,7	3,6	1,1	0,2	5,7	7,5	7,8	3,6	9,9	7,7	1,3	7,7	1,5	0,9	9,9	10,1	19,0	7,2	3,7	1,7	3,7	0,5	0,5			
1990	0,8	3,4	6,6	3,5	1,1	0,2	5,7	7,3	7,8	3,5	9,7	7,7	1,2	7,7	1,6	0,9	9,9	10,2	18,7	7,1	3,7	1,7	3,6	0,5	0,5			
1989	0,8	3,6	6,4	3,4	1,1	0,2	5,6	7,1	7,7	3,4	9,4	7,8	1,1	7,8	1,6	0,8	10,0	10,2	18,4	7,0	3,7	1,6	3,5	0,5	0,5			
1988	2,0	5,0	7,8	3,2	1,2	0,3	6,7	8,5	8,5	5,5	9,2	8,8	0,8	8,8	1,7	0,7	10,8	11,5	19,8	6,9	3,8	1,8	3,2	0,4	0,4			
1987	2,1	0,0	7,3	2,9	1,1	0,3	6,7	8,0	8,1	6,8	9,0	8,5	1,0	8,5	1,8	0,5	10,3	11,2	18,7	6,2	3,5	1,5	2,8	0,5	0,5			
1986	2,1	4,9	6,9	2,3	1,0	0,2	6,1	7,4	7,4	6,8	8,8	7,8	0,7	7,6	1,6	0,4	9,0	9,8	17,0	6,0	3,1	1,4	2,8	0,3	0,3			
1985	2,0	4,2	7,1	2,8	1,2	0,3	6,4	8,1	8,5	7,8	9,0	8,6	0,7	8,6	1,8	0,6	10,1	10,9	18,8	6,4	3,8	1,9	2,8	0,4	0,4			
1984	2,1	4,0	7,0	3,0	1,2	0,3	6,3	8,3	8,7	7,3	9,4	8,5	0,9	8,5	1,8	0,6	10,1	10,5	18,3	6,4	4,1	2,3	2,8	0,4	0,4			
1983	2,3	4,0	7,7	3,4	1,3	0,3	7,1	8,1	10,0	7,3	10,3	8,9	0,9	8,9	1,6	0,7	10,3	10,4	18,0	6,5	4,0	2,2	4,2	0,3	0,3			
1982	2,1	3,6	7,1	3,2	1,3	0,3	6,5	8,3	7,7	7,7	10,7	8,9	1,3	8,9	1,7	0,7	10,1	10,5	18,6	6,2	3,7	1,7	2,9	0,3	0,3			
1981	2,3	3,7	7,1	3,1	1,3	0,5	6,7	8,1	10,0	7,3	10,6	9,3	1,9	9,3	1,8	0,9	10,0	10,5	18,4	6,3	3,5	2,0	3,1	0,2	0,2			
1980	2,0	3,7	6,8	3,0	1,4	0,4	6,4	8,3	10,6	7,5	10,4	9,3	1,4	9,1	1,6	0,7	9,8	9,9	18,0	6,1	3,4	1,7	2,7	0,3	0,3			
1979	1,9	3,6	6,6	2,8	1,2	0,4	5,7	7,6	9,7	6,6	9,7	8,4	0,9	8,4	1,6	0,9	8,8	8,9	17,0	5,8	3,3	1,6	2,5	2,9	0,2	0,2		
1978	1,8	2,7	5,3	2,6	1,2	0,3	5,3	7,3	9,3	6,4	8,4	7,5	0,9	7,5	1,5	0,6	7,4	7,7	14,4	4,9	2,7	1,4	1,9	2,7	0,2	0,2		
1977	1,7	2,7	5,5	2,6	1,1	0,2	5,2	7,2	9,5	6,3	8,3	7,4	0,8	7,4	1,5	0,2	7,4	7,2	13,2	4,9	2,8	1,5	2,2	2,6	0,2	0,2		
1976	1,5	2,3	5,1	2,5	0,9	0,2	5,0	7,5	9,5	5,7	9,6	8,0	1,0	8,0	1,5	0,2	7,8	7,5	13,5	4,9	2,8	1,6	2,3	2,9	0,5	0,2		
1975	1,4	2,0	4,9	2,8	1,2	0,2	4,8	8,0	8,0	4,6	9,3	7,7	0,7	7,7	1,5	0,2	7,9	7,4	13,6	4,9	2,8	1,6	1,9	2,8	0,5	0,3		
2000	0,8	3,6	8,0	4,4	1,1	0,1	6,2	10,3	10,2	5,9	13,1	10,3	2,1	10,3	1,4	1,1	11,2	11,3	22,0	10,1	4,3	2,7	6,4	7,9	0,2	0,2		
2001	0,8	3,5	8,0	4,4	1,1	0,1	6,2	10,3	10,2	5,9	13,1	10,3	2,1	10,3	1,4	1,1	11,2	11,3	22,0	10,1	4,3	2,7	6,4	7,9	0,2	0,2		
2002	0,9	3,4	8,4	4,5	1,1	0,1	6,0	9,3	10,0	5,4	12,6	10,5	1,8	10,5	1,5	1,1	11,5	11,6	22,1	9,9	4,1	2,8	6,5	6,7	0,1	0,1		
2003	0,9	3,7	8,4	4,6	1,2	0,1	6,2	9,7	10,2	5,4	12,9	10,7	1,9	10,7	1,7	1,1	11,8	11,9	22,3	9,9	4,2	2,8	6,5	6,9	0,2	0,3		
2004	1,0	3,8	8,3	4,5	1,1	0,1	7,0	10,7	11,6	5,2	13,9	11,3	1,9	11,3	1,7	1,6	12,7	12,8	23,8	10,6	4,1	2,8	7,2	7,7	0,2	0,3		
2005	0,8	3,4	7,5	4,1	1,0	0,1	7,1	12,1	12,5	4,9	14,2	11,1	1,5	11,1	1,7	1,5	12,5	12,7	22,7	9,7	4,0	2,5	6,2	8,7	0,2	0,3		
2006	0,9	2,1	6,5	4,4	1,0	0,1	7,2	15,1	15,6	5,0	17,6	12,1	2,3	12,1	1,7	1,7	13,5	13,7	24,9	10,6	4,0	2,7	7,4	11,2	0,4	0,4		
2007	1,0	1,9	6,3	4,4	1,0	0,1	7,0	12,4	13,9	3,2	15,6	11,3	2,2	11,3	1,8	1,7	12,7	13,0	24,0	10,6	3,6	2,2	7,7	7,8	0,4	0,4		
2008	1,1	1,9	6,9	5,0	1,6	0,1	6,8	13,2	15,1	2,8	17,6	11,3	2,7	11,3	1,8	1,6	12,5	13,0	23,0	9,6	3,9	2,5	6,7	8,2	0,4	0,4		
2009	1,1	1,5	6,1	4,6	1,3	0,1	6,0	13,0	14,2	2,1	15,7	10,1	2,1	10,1	1,7	0,9	11,6	11,9	19,8	7,6	3,2	1,9	5,2	7,5	0,5	0,5		
2010	1,1	1,5	6,0	4,6	1,3	0,1	6,0	13,0	14,2	2,1	15,7	10,1	2,1	10,1	1,7	0,9	11,6	11,9	19,7	7,6	3,2	1,9	5,2	7,5	0,5	0,5		
2011	1,0	1,5	6,7	5,2	1,7	0,0	6,2	13,2	14,9	2,4	20,2	9,6	1,8	9,6	1,7	0,6	11,0	11,5	19,7	8,2	3,4	1,8	5,5	8,8	0,5	0,5		
2012	1,0	1,3	6,5	5,2	1,7	0,0	6,1	13,2	14,9	2,4	20,2	9,7	1,8	9,7	1,9	0,6	11,0	11,5	19,3	7,6	3,3	1,8	5,1	8,1	0,5	0,4		
Tornio-Kolari	12,4	33,1	93,2	59,9	16,2	1,1	83,4	154,7	186,1	53,7	201,5	138,3	26,2	138,3	21,7	15,3	154,9	158,1	285,1	121,9	49,7	31,3	81,8	104,7	103,7	4,4	4,6	
Laurila-Tornio																												
Kemi-Laurila																												
Laurila-Rovaniemi																												
Rovaniemi-Kemijärvi																												
Kemijärvi-Kellosekä																												
Oulu-Kemi																												
Tuomioja-Oulu																												
Ylivieska-Tuomioja																												
Tuomioja-Raaha																												
Kokkola-Ylivieska																												
Pännäinen-Kokkola																												
Pännäinen-Pietarsaari																												
Seinäjoki-Pännäinen																												
Seinäjoki-Vaasa																												
Seinäjoki-Kaskinen																												
Parkano-Seinäjoki																												
Lielähti-Parkano																												
Tampere-Lielähti																												
Lielähti-Kokemäki																												
Kokemäki-Pori																												
Pori-Mäntyluoto																												
Kokemäki-Rauma																												
Oulu-Vaala																												
Vaala-Kontiomäki																												
Kontiomäki-Pesikylä																												
Pesikylä-Ammänsaari																												
1999	34,8	78,3	170,8	86,8	29,4	6,4	146,3	200,0	216,8	137,5	292,3	203,8	30,6	203,8	37,7	19,8	238,1	245,2	464,5	169,7								





1999	17,4	27,8	3,6	2,7	4,2	3,3	3,4	17,7	17,7	6,4	23,8	18,5	0,8	0,8	20,4	3,9	15,8	7,6	7,6	31,3	19,7	11,3	5,6	6,0	
1998	17,4	28,9	1,6	3,0	4,0	3,3	3,4	17,7	17,7	7,3	24,8	19,5	0,9	0,8	21,3	4,0	17,2	12,1	11,1	31,5	20,5	10,7	10,8	5,4	
1997	14,0	25,5	4,4	3,8	3,2	3,0	3,0	14,8	14,8	4,5	19,4	15,6	1,0	0,8	17,5	4,0	15,7	9,1	6,9	25,4	14,9	10,4	5,0	5,9	
1996	12,8	24,5	4,0	3,4	3,0	2,5	2,6	15,9	15,9	2,6	16,9	13,2	0,8	0,8	15,2	3,5	15,6	9,8	6,3	24,0	13,0	10,8	5,4	5,9	
1995	12,8	22,9	4,8	3,3	2,5	2,5	2,5	16,1	16,1	0,9	16,0	11,8	0,8	0,8	13,7	4,6	13,4	7,5	5,9	22,9	13,0	10,3	4,9	6,0	
1994	12,8	23,1	4,5	3,2	2,5	2,5	3,0	17,1	17,1	1,0	16,6	12,0	0,8	0,8	13,7	4,5	13,8	7,6	7,7	22,9	13,2	10,2	4,8	5,8	
1993	12,8	23,4	4,2	3,2	2,4	2,5	3,6	18,1	18,1	1,1	17,3	12,3	0,8	0,9	13,6	4,5	14,2	7,7	9,5	22,8	13,4	10,0	4,8	5,7	
1992	12,8	23,8	3,6	3,0	2,4	2,6	4,6	20,0	20,0	1,2	18,5	12,8	0,8	0,9	13,6	4,4	15,1	7,9	13,1	22,8	13,8	9,8	4,6	5,4	
1991	12,8	24,3	3,0	2,9	2,3	2,6	5,7	22,0	22,0	1,4	19,6	13,2	0,8	1,0	13,5	4,2	15,9	8,0	16,6	22,7	14,2	9,5	4,5	5,0	
1990	12,8	24,5	2,7	2,8	2,2	2,6	6,2	22,9	22,9	1,4	20,4	13,5	0,8	1,0	13,4	4,2	16,3	8,1	18,4	22,6	14,4	9,3	4,4	4,9	
1989	12,8	24,7	2,4	2,7	2,2	2,6	6,7	23,9	23,9	1,5	21,0	13,7	0,8	1,0	13,4	4,1	16,7	8,2	20,2	22,6	14,6	9,2	4,4	4,7	
1988	12,9	26,8	2,3	2,8	2,0	2,5	7,7	26,7	26,7	1,8	22,8	14,4	0,9	1,1	14,5	3,8	20,2	8,4	19,2	22,6	15,0	9,3	7,9	4,5	
1987	11,6	25,0	2,5	2,8	1,8	2,4	7,4	26,3	26,3	1,5	21,4	14,2	0,7	1,0	14,3	3,7	20,3	7,8	20,3	22,8	15,0	8,5	4,1	4,6	
1986	11,1	21,1	1,9	2,3	1,8	1,9	6,4	22,9	22,9	1,3	18,2	12,6	0,8	0,9	13,1	3,6	17,8	6,5	11,2	21,0	14,1	7,5	7,4	3,7	
1985	13,1	23,4	2,2	2,5	2,0	2,3	7,1	26,3	26,3	1,0	20,1	14,0	0,5	0,9	14,2	4,1	12,1	9,7	22,8	21,9	14,1	8,6	8,4	4,2	
1984	13,7	23,3	2,2	2,2	2,0	2,3	7,1	25,8	25,8	1,0	20,3	13,5	0,5	1,1	13,8	3,7	14,9	9,7	13,0	21,3	13,6	8,4	8,1	4,1	
1983	13,9	23,0	2,2	2,3	2,0	2,2	7,0	25,8	25,8	0,8	19,6	14,4	0,5	1,1	14,5	3,6	13,9	6,6	7,6	30,3	12,3	8,1	7,7	3,9	
1982	14,2	23,1	2,4	2,3	1,9	1,9	6,8	26,2	26,2	0,8	19,6	14,8	0,7	1,0	15,4	2,8	14,2	6,8	7,7	19,8	12,6	8,2	7,8	4,7	
1981	13,6	23,5	2,4	2,3	1,9	2,2	6,9	25,4	25,4	0,8	20,1	14,2	0,5	0,9	14,2	2,8	14,2	6,8	7,2	20,1	13,2	8,6	8,3	5,4	
1980	13,8	23,4	2,5	2,2	1,8	2,0	7,0	16,1	16,1	1,0	19,9	14,2	0,9	1,1	15,0	4,6	13,6	6,0	7,5	20,1	11,9	8,5	8,3	5,6	
1979	13,5	22,0	2,5	2,0	1,8	1,8	6,8	24,2	24,2	0,8	18,6	12,5	0,7	1,1	13,5	2,9	12,5	5,2	7,2	17,6	9,7	8,2	7,6	5,1	
1978	12,9	20,4	2,2	1,5	1,8	1,8	6,6	22,9	22,9	0,6	17,5	11,8	0,5	1,0	12,7	2,9	10,6	4,4	7,1	15,9	8,6	7,6	7,1	3,6	
1977	13,6	20,7	2,4	1,7	1,9	1,8	6,6	23,1	23,1	0,8	17,8	13,0	0,7	1,0	14,0	2,4	9,2	3,1	6,0	16,1	9,2	7,2	6,5	4,4	
1976	13,7	21,2	2,2	1,4	2,0	1,8	6,8	23,8	23,8	0,9	18,2	13,6	0,7	1,0	14,0	2,6	9,3	2,6	5,2	17,8	10,7	7,6	7,0	3,5	
1975	14,1	22,4	2,4	1,3	2,4	1,8	6,8	25,0	25,0	0,8	19,2	13,4	0,6	1,0	14,1	2,4	8,3	2,6	5,2	13,8	10,4	13,8	6,7	4,3	
2000	18,1	27,0	3,1	2,9	3,8	3,5	3,6	18,5	18,5	5,9	23,6	18,2	0,8	0,8	20,0	3,7	14,7	7,8	7,9	29,5	18,1	11,2	11,7	5,9	
2001	18,1	25,0	2,7	2,9	3,8	3,8	3,8	17,9	17,9	4,7	22,1	16,5	0,7	0,6	17,9	3,6	16,7	7,5	9,1	30,3	19,4	11,1	11,3	5,7	
2002	19,1	25,8	2,8	3,0	4,0	4,2	4,2	18,2	18,2	5,1	22,8	17,7	0,8	0,7	19,1	3,7	16,7	7,5	8,9	30,7	19,4	11,1	11,3	5,7	
2003	20,2	28,0	2,7	2,8	3,8	4,4	4,4	18,6	18,6	6,9	26,0	17,7	0,8	0,7	19,1	3,7	16,7	7,5	9,1	30,3	19,4	11,1	11,3	5,7	
2004	20,8	25,6	3,0	2,9	4,3	4,3	4,3	18,7	18,7	4,3	22,5	17,7	0,6	0,6	18,7	3,9	15,7	7,9	7,5	29,7	17,8	11,5	12,0	6,0	
2005	20,1	24,8	2,9	2,2	4,5	4,2	4,2	18,8	18,8	3,3	21,8	16,1	0,7	0,6	17,0	3,8	14,6	7,1	7,2	27,6	16,9	10,4	11,4	5,7	
2006	21,3	25,3	3,5	2,9	4,6	4,3	4,3	20,2	20,2	4,3	21,3	15,2	0,7	0,7	18,9	3,7	14,5	6,7	7,0	27,9	16,3	11,3	12,3	6,2	
2007	21,3	18,3	3,6	2,9	4,9	4,2	4,2	20,5	20,5	4,0	21,3	16,1	0,7	0,7	18,9	3,7	14,5	6,7	7,0	27,9	16,3	11,3	12,3	6,2	
2008	21,3	17,4	3,4	2,9	4,9	4,1	4,1	19,5	19,5	4,8	21,8	16,1	0,7	0,6	17,0	3,8	14,6	7,1	7,2	27,6	16,9	10,4	11,4	5,7	
2009	19,2	16,2	2,4	2,1	4,3	4,0	4,0	17,1	17,1	4,9	13,7	10,4	0,5	0,6	18,2	3,4	16,3	5,4	9,2	31,9	18,7	13,0	12,4	7,5	
2010	19,1	16,0	2,4	1,8	4,3	4,0	4,0	20,0	20,0	4,9	13,7	9,3	0,6	0,7	20,6	3,4	16,3	5,4	9,2	31,9	18,7	13,0	12,4	7,5	
2011	18,0	15,3	2,9	2,3	4,3	4,1	4,1	20,0	16,7	3,3	12,0	7,1	0,4	0,4	17,2	2,7	16,0	5,0	9,2	26,1	14,3	12,3	11,0	4,6	
2012	17,9	15,0	2,9	2,3	4,7	4,4	4,4	20,6	17,1	3,3	12,0	7,0	0,4	0,4	16,7	2,4	14,3	5,5	7,1	24,6	12,6	12,4	11,0	4,7	
Riihimäki-Toijala																									
Hyvinkää-Riihimäki																									
Hyvinkää-Karjaa																									
Karjaa-Hanko																									
Karjaa-Turku																									
Kirkkonummi-Karjaa																									
Helsinki-Kirkkonummi																									
Helsinki-Pasila																									
Pasila-Kerava																									
Kerava-Sköldvik																									
Kerava-Vuosaari																									
Kerava-Hyvinkää																									
Kerava-Lahti																									
Riihimäki-Lahti																									
Lahti-Lovisa																									
Lahti-Heinola																									
Lahti-Kouvola																									
Kouvola-Kuusankoski																									
Kouvola-Juurikorpi																									
Juurikorpi-Hamina																									
Juurikorpi-Kotka																									
Kouvola-Luumäki																									
Luumäki-Vainikkala																									
Luumäki-Lappeenranta																									
Lappeenranta-Imatra																									
Imatra-Imatrankoski																									
Imatra-Parikkala																									
254,5	279,7	38,3	33,9	56,3	53,5	53,7	248,6	241,8	59,7	6,3	238,8	168,0	8,1	8,1	243,9	41,1	198,8	85,6	103,8	370,9	219,7	149,6	147,8	70,6	87,3
338,9	582,7	71,1	64,2	57,9	58,5	141,5	546,7	546,7	43,3	0,0	487,8	0,0	18,3	23,8	387,1	92,3	358,9	179,7	270,6	554,0	335,1	231,6	214,4	107,2	127,9











1974	14,1	25,1	3,1	1,5	2,7	2,0	6,0	24,5	24,5	1,0	19,2	14,2	0,9	1,7	13,2	3,6	11,3	3,7	7,2	19,3	10,5	19,8	8,4	8,4	2,9	5,4
1973	12,7	21,0	2,7	1,2	2,6	1,8	5,8	23,1	23,1	0,7	17,7	12,7	0,8	1,3	13,4	3,5	12,0	3,9	7,7	14,7	8,0	14,7	8,4	8,4	2,5	5,5
1972	12,3	19,8	2,7	1,2	2,4	1,8	5,4	21,2	21,2	0,7	16,5	12,5	0,8	1,0	13,1	2,6	12,0	4,1	8,2	14,0	6,8	14,0	8,4	8,4	2,5	5,5
1971	10,9	16,7	2,4	1,1	2,2	1,6	5,2	17,9	17,9	0,4	14,0	11,3	0,7	1,0	11,7	2,7	11,7	3,6	7,9	12,6	6,9	12,6	7,3	2,1	4,8	
1970	11,6	17,5	2,5	1,3	2,0	1,6	5,2	16,4	16,4	0,4	13,6	10,8	0,7	1,0	12,2	2,9	13,0	4,3	8,5	13,0	6,8	13,0	7,5	1,9	4,9	
1969	11,4	17,8	2,3	1,2	2,1	1,8	4,2	16,8	16,8	0,5	14,2	11,1	0,6	1,0	11,5	2,6	13,8	4,6	8,6	13,0	7,3	13,0	7,6	1,8	4,8	
1968	11,0	16,0	2,1	1,0	1,9	1,6	3,2	16,6	16,6	0,5	13,2	11,2	0,7	0,9	11,5	2,9	13,8	5,1	8,7	13,0	7,9	13,0	7,1	1,0	4,3	
1967	11,6	16,6	2,3	0,9	2,1	1,6	3,1	15,8	15,8	0,5	14,0	11,2	0,6	0,8	11,8	1,8	13,1	4,9	8,7	12,0	7,7	12,0	7,2	1,1	3,4	
1966	11,4	17,8	2,7	1,3	2,3	1,7	3,1	17,1	17,1	0,5	14,5	11,5	0,6	1,0	11,6	2,1	13,4	4,2	8,9	10,9	6,4	10,9	6,7	1,1	2,5	
1965	10,3	17,4	2,4	1,0	2,3	1,7	3,1	16,4	16,4	0,5	13,6	10,8	0,7	0,9	11,0	2,3	13,0	4,0	9,3	9,8	6,6	9,8	6,8	1,3	2,2	
1964	9,7	16,9	2,3	0,9	2,2	1,5	3,0	16,7	16,7	0,4	13,4	10,8	0,7	1,1	11,0	1,7	12,7	4,1	8,9	9,2	5,0	9,2	5,9	1,1	1,9	
1963	9,9	15,7	2,3	1,3	2,1	1,8	3,2	16,1	16,1	0,5	13,4	10,8	0,5	1,0	10,5	1,9	12,2	4,3	8,2	8,6	5,7	8,6	5,6	0,8	1,9	
1962	10,3	17,5	2,5	1,5	2,4	1,8	3,3	17,2	17,2	0,5	14,9	11,2	0,5	1,1	10,7	1,7	13,2	4,5	8,2	8,3	4,5	8,3	4,5	0,8	1,8	
1961	10,1	17,0	2,3	1,1	2,5	2,0	3,1	16,5	16,5	0,6	14,6	10,4	0,5	1,0	10,0	1,3	13,2	5,0	8,9	7,7	3,8	7,7	1,0	2,1		
1960	10,4	18,1	2,7	1,4	2,3	1,6	2,9	17,5	17,5	0,6	14,8	10,6	0,3	0,9	10,7	1,4	13,3	3,9	8,4	7,4	3,8	7,4	1,0	1,9		
1959	10,2	17,5	2,4	1,0	2,3	1,3	2,6	16,4	16,4	0,5	14,5	10,3	0,8	0,8	10,1	1,5	12,4	3,6	7,3	7,1	4,0	7,1	1,3	1,7		
1958	9,6	15,0	2,3	1,2	2,3	1,3	2,8	16,6	16,6	0,5	13,9	9,9	0,8	0,8	9,5	1,5	10,9	3,2	6,7	6,7	4,7	6,7	0,8	1,7		
1957	8,9	13,9	2,2	1,1	2,1	1,2	2,6	15,4	15,4	0,5	12,9	9,2	0,8	0,8	8,8	1,4	10,1	3,0	6,2	6,2	4,3	6,2	0,8	1,6		
1956	8,8	13,8	2,1	1,1	2,1	1,2	2,6	15,3	15,3	0,5	12,8	9,1	0,8	0,8	8,7	1,3	10,0	3,0	6,2	6,1	4,3	6,1	0,8	1,6		
1955	9,0	14,1	2,2	1,1	2,1	1,3	2,6	15,5	15,5	0,5	13,0	9,3	0,8	0,8	8,9	1,4	10,2	3,0	6,3	6,2	4,4	6,2	0,8	1,6		
1954	8,8	13,8	2,1	1,1	2,1	1,2	2,6	15,2	15,2	0,5	12,8	9,1	0,8	0,8	8,7	1,3	10,0	2,9	6,2	6,1	4,3	6,1	0,8	1,6		
1953	8,0	12,5	1,9	1,0	1,9	1,1	2,3	13,8	13,8	0,4	11,6	8,3	0,7	0,7	7,9	1,2	9,1	2,7	5,6	5,5	3,9	5,5	0,7	1,4		
1952	8,3	13,0	2,0	1,0	2,0	1,2	2,4	14,4	14,4	0,4	12,1	8,6	0,7	0,7	8,2	1,3	9,4	2,8	5,8	5,8	4,0	5,8	0,7	1,5		
1951	8,8	13,9	2,2	1,1	2,1	1,2	2,6	15,3	15,3	0,5	12,9	9,2	0,8	0,8	8,8	1,3	10,1	3,0	6,2	6,1	4,3	6,1	0,8	1,6		
1950	8,2	12,8	2,0	1,0	1,9	1,1	2,4	14,1	14,1	0,5	11,9	8,4	0,7	0,7	8,1	1,2	9,3	2,7	5,7	5,7	4,0	5,7	0,7	1,5		
1949	8,2	12,8	2,0	1,0	1,9	1,1	2,4	14,1	14,1	0,4	11,9	8,4	0,7	0,7	8,1	1,2	9,3	2,7	5,7	5,7	4,0	5,7	0,7	1,5		
1948	8,0	12,4	2,0	1,0	2,0	1,2	2,5	13,8	13,9	0,6	11,5	8,1	0,7	0,7	7,8	1,4	8,9	2,7	5,6	5,5	4,0	5,5	0,9	1,5		
1947	7,8	11,9	2,1	1,1	2,0	1,2	2,7	13,4	13,7	0,6	11,1	7,9	0,7	0,7	7,6	1,5	8,5	2,6	5,5	5,3	4,1	5,4	1,1	1,5		
1946	7,7	11,5	2,1	1,1	2,1	1,3	2,8	13,1	13,4	0,7	10,7	7,6	0,7	0,7	7,3	1,6	8,1	2,5	5,4	5,2	4,2	5,2	1,3	1,5		
1945	7,5	11,1	2,2	1,2	2,2	1,4	3,0	12,7	13,2	0,7	10,3	7,3	0,7	0,7	7,1	1,7	7,8	2,4	5,3	5,0	4,3	5,1	1,5	1,5		
1944	7,4	10,6	2,2	1,2	2,2	1,4	3,1	12,4	13,0	0,8	9,9	7,0	0,8	0,8	6,8	1,8	7,4	2,4	5,2	4,8	4,4	4,9	1,7	1,5		
1943	7,2	10,2	2,3	1,3	2,3	1,5	3,2	12,0	12,7	0,9	9,5	6,7	0,8	0,8	6,5	1,9	7,0	2,3	5,1	4,6	4,5	4,8	1,9	1,5		
1942	7,1	9,8	2,3	1,3	2,3	1,5	3,4	11,7	12,5	1,0	9,2	6,4	0,8	0,8	6,3	2,0	6,6	2,2	5,0	4,5	4,5	4,5	1,9	1,5		
1941	6,9	9,3	2,4	1,4	2,4	1,6	3,5	11,3	12,3	1,1	8,8	6,1	0,8	0,8	6,0	2,1	6,3	2,1	4,9	4,3	4,6	4,3	2,3	1,5		
1940	6,7	8,9	2,4	1,4	2,4	1,6	3,7	10,9	12,0	1,1	8,4	5,8	0,8	0,8	5,8	2,2	5,9	2,1	4,9	4,1	4,7	4,3	2,5	1,5		
1939	6,6	8,5	2,5	1,5	2,5	1,7	3,8	10,6	11,8	1,2	8,0	5,5	0,8	0,8	5,5	2,3	5,5	2,0	4,8	4,0	4,8	4,2	2,9	1,5		
1938	6,4	8,1	2,6	1,5	2,5	1,7	4,0	10,2	11,6	1,2	7,6	5,2	0,8	0,8	5,3	2,4	5,1	1,9	4,7	3,8	4,9	4,1	2,9	1,5		
1937	6,3	7,6	2,6	1,6	2,6	1,8	4,1	9,9	11,3	1,4	7,2	4,9	0,8	0,8	5,0	2,6	4,7	1,8	4,6	3,6	5,0	3,9	3,1	1,9		
1936	6,1	7,2	2,7	1,6	2,7	1,8	4,3	9,5	11,1	1,5	6,9	4,6	0,8	0,8	4,8	2,7	4,4	1,7	4,5	3,5	5,0	3,8	3,1	1,9		
1935	6,2	7,5	2,6	1,6	2,6	1,7	4,1	9,7	11,1	1,4	7,1	4,8	0,8	0,8	4,9	2,5	4,7	1,8	4,5	3,6	4,9	3,8	3,1	1,9		
1934	6,0	7,3	2,5	1,5	2,5	1,7	3,9	9,4	10,8	1,3	6,9	4,7	0,8	0,8	4,8	2,4	4,5	1,7	4,4	3,5	4,7	3,0	3,0	1,9		
1933	5,5	6,6	2,3	1,4	2,3	1,5	3,6	8,6	9,8	1,2	6,3	4,3	0,7	0,7	4,4	2,2	4,1	1,6	4,0	3,2	4,3	2,7	2,7	1,9		
1932	5,2	6,3	2,1	1,3	2,1	1,5	3,4	8,1	9,3	1,1	5,9	4,0	0,7	0,7	4,1	2,1	3,9	1,5	3,8	3,0	4,1	2,5	2,5	1,9		
1931	5,1	6,1	2,1	1,3	2,1	1,4	3,3	8,0	9,1	1,1	5,8	4,0	0,7	0,7	4,0	2,1	3,8	1,5	3,7	2,9	4,0	4,0	2,7	2,5		
1930	5,4	6,6	2,2	1,4	2,2	1,5	3,5	8,5	9,7	1,2	6,2	4,2	0,7	0,7	4,3	2,2	4,1	1,6	3,9	3,1	4,3	4,6	2,7	2,9		
1929	5,8	7,0	2,4	1,4	2,4	1,6	3,8	9,1	10,4	1,3	6,7	4,5	0,7	0,7	4,6	2,4	4,4	1,7	4,2	3,3	4,6	4,5	2,9	2,9		
1928	5,8	7,0	2,4	1,4	2,4	1,6	3,8	9,1	10,4	1,3	6,6	4,5	0,7	0,7	4,6	2,4	4,3	1,7	4,2	3,3	4,5	4,5	2,9	2,9		
1927	6,0	7,3	2,5	1,5	2,5	1,7	3,9	9,4	10,8	1,3	6,9	4,7	0,7	0,7	4,8	2,4	4,5	1,7	4,4	3,5	4,7	4,7	3,0	3,0		
1926	5,7	6,9	2,4	1,4	2,4	1,6	3,7	9,0	10,3	1,2	6,6	4,5	0,7	0,7	4,6	2,3	4,3	1,7	4,1	3,3	4,5	4,5	2,8	2,8		
1925	5,4	6,5	2,2	1,3	2,2	1,5	3,5	8,4	9,7	1,2	6,2	4,2	0,7	0,7	4,3	2,2	4,1	1,6	3,9	3,1	4,2	4,2	2,7	2,7		
1924	5,4	6,5	2,2	1,3	2,2	1,5	3,5	8,4	9,7	1,2	6,2	4,2	0,7	0,7	4,3	2,2	4,1	1,6	3,9	3,1	4,2	4,2	2,7	2,7		
1923	5,4	6,5	2,2	1,3	2,2	1,5	3,5	8,4	9,7	1,2	6,2	4,2	0,7	0,7	4,3	2,2	4,1	1,6	3,9	3,1	4,2	4,2	2,7	2,7		
1922	5,4	6,5	2,2	1,3	2,2	1,5	3,5	8,4	9,7	1,2	6,2	4,2	0,7	0,7	4,3	2,2	4,1	1,6	3,9	3,1	4,2	4,2	2,7	2,7		
1921	5,4	6,5	2,2	1,3	2,2	1,5	3,5	8,4	9,7	1,2	6,2	4,2	0,7	0,7	4,3	2,2	4,1	1,6	3,9	3,1	4,2	4,2	2,7	2,7		
1920	5,4	6,5	2,2	1,3	2,2	1,5	3,5	8,4	9,7	1,2	6,2	4,2	0,7	0,7	4,3	2,2	4,1	1,6	3,9	3,1	4,2	4,2	2,7	2,7		
1919	5,4	6,5	2,2	1,3	2,2	1,5	3,5	8,4	9,7	1,2	6,2	4,2	0,7	0,7	4,3	2,2	4,1	1,6	3,9	3,1	4,2	4,2	2,7	2,7		
1918	5,4	6,5	2,2	1,3	2,2	1,5	3,5	8,4	9,7	1,2	6,2	4,2	0,7	0,7	4,3	2,2	4,1	1,6	3,9	3,1	4,2	4,2	2,7	2,7		
1917	5,4	6,5	2,2	1,3	2,2	1,5	3,5	8,4	9,7	1,2	6,2	4,2	0,7	0,7	4,3											

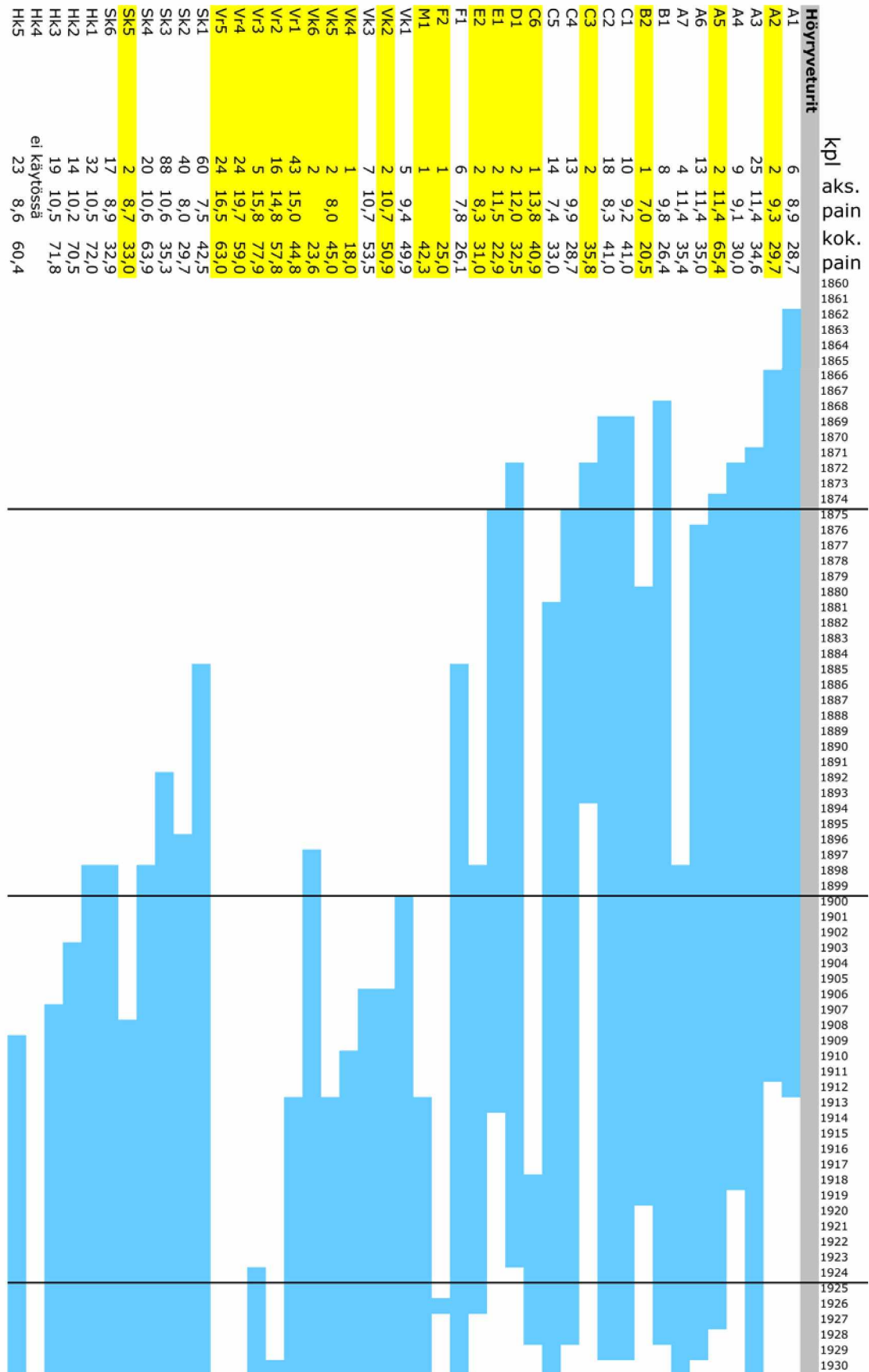


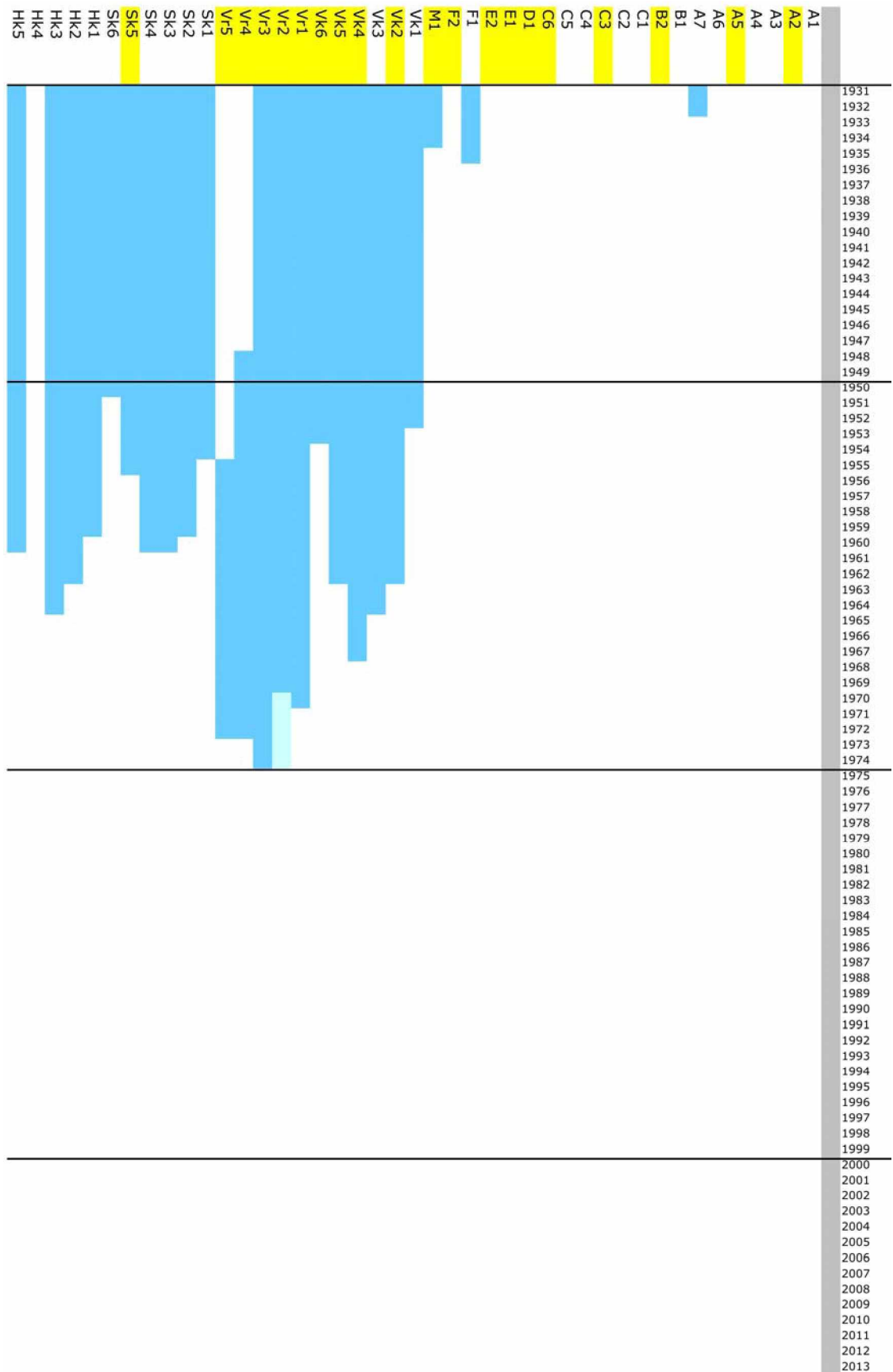
1924	0,5	Tornio-Kolari	1,0
1923	0,5	Laurila-Tornio	12,6
1922	0,8	Kemi-Laurila	21,5
1921	0,7	Laurila-Rovaniemi	10,5
1920	0,7	Rovaniemi-Kemijärvi	0,0
1919	0,6	Kemijärvi-Kellosele	0,0
1918	0,6	Oulu-Kemi	23,2
1917	0,9	Tuomioja-Oulu	23,7
1916	1,0	Ylivieska-Tuomioja	19,1
1915	0,9	Tuomioja-Raah	13,6
1914	0,7	Kokkola-Ylivieska	29,3
1913	0,6	Pännäinen-Kokkola	20,9
1912	0,6	Pännäinen-Pietarsaari	15,3
1911	0,6	Seinäjoki-Pännäinen	29,8
1910	0,4	Seinäjoki-Vaasa	18,5
1909	0,4	Seinäjoki-Kaskinen	12,3
1908	0,4	Parkano-Seinäjoki	0,0
1907	0,3	Lielahi-Parkano	0,0
1906	0,3	Tampere-Lielahi	41,9
1905	0,3	Lielahi-Kokemäki	42,5
1904	0,3	Kokemäki-Pori	21,6
1903	0,5	Pori-Mäntyluoto	17,1
1902	0,4	Kokemäki-Rauma	16,9
1901	0,4	Oulu-Vaala	0,0
1900	1,0	Vaala-Kontiomäki	0,0
		Kontiomäki-Pesiökylä	0,0
		Pesiökylä-Ämmänsaari	0,0
1900-2012	69	174	414
		234	74
		13	392
		556	575
		273	695
		545	110
		567	162
		94	418
		427	1014
		530	273
		178	267
		303	299
		29	14



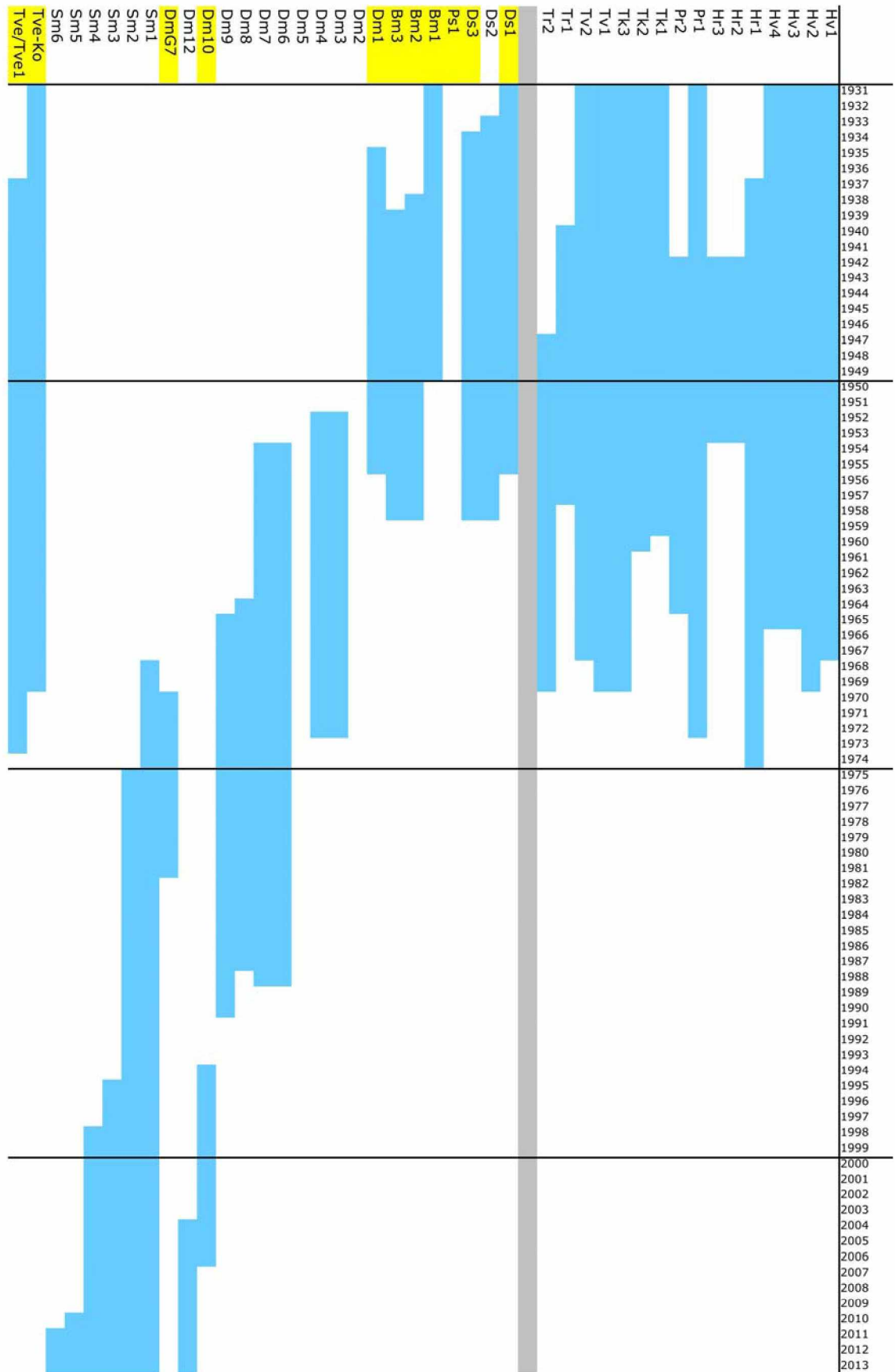


## Eri veturimallien käyttövuodet





	kpl	aks. paino	kok. paino
Hv1	42	12,4	88,5
Hv2	33	12,7	90,3
Hv3	24	12,8	101,0
Hv4	28	10,9	73,6
Hr1	22	17,2	155,0
Hr2	7	14,4	56,1
Hr3	13	14,4	59,0
Hr4	16	15,2	88,2
Pr1	4	17,0	114,0
Pr2	20	8,3	37,5
TK1	34	8,3	60,6
TK2	161	10,7	78,2
TK3	142	13,1	97,5
Tv1	20	13,0	111,0
Tv2	67	17,0	157,0
Tt1	20	17,5	166,0
Tt2			
<b>Moottoriveturit/vaunut</b>			
Ds1	3	11,4	37,4
Ds2	6	13,1	51,5
Ds3	2	13,1	51,4
Ps1	1		46,6
Bm1	2	13,6	23,8
Bm2	1	3,3	14,1
Bm3	2	4,2	15,9
Dm1	1	11,5	40,5
Dm2	6	12,9	43,7
Dm3	10	14,4	44,6
Dm4	14	14,7	52,2
Dm5	ei käytössä		
Dm6	15	5,4	20,2
Dm7	197	6,2	24,5
Dm8	12	14,7	54,6
Dm9	12	15,1	55,2
Dm10	1	15,3	53,0
Dm12	16	13,6	54,5
DmG7	3	6,0	22,6
Sm1	50	18,8	65,4
Sm2	50	15,9	46,5
Sm3 pendolino	18	13,3	54,0
Sm4 R-juna	30	19,5	50,0
Sm5 Flirt	27		132,0
Sm6 Allegro	4		432,0
Tve-Ko(Vk11)	2	6,0	12,0
Tve/Tvei(Vk12)	2	6,4	12,8
1860			
1861			
1862			
1863			
1864			
1865			
1866			
1867			
1868			
1869			
1870			
1871			
1872			
1873			
1874			
1875			
1876			
1877			
1878			
1879			
1880			
1881			
1882			
1883			
1884			
1885			
1886			
1887			
1888			
1889			
1890			
1891			
1892			
1893			
1894			
1895			
1896			
1897			
1898			
1899			
1900			
1901			
1902			
1903			
1904			
1905			
1906			
1907			
1908			
1909			
1910			
1911			
1912			
1913			
1914			
1915			
1916			
1917			
1918			
1919			
1920			
1921			
1922			
1923			
1924			
1925			
1926			
1927			
1928			
1929			
1930			

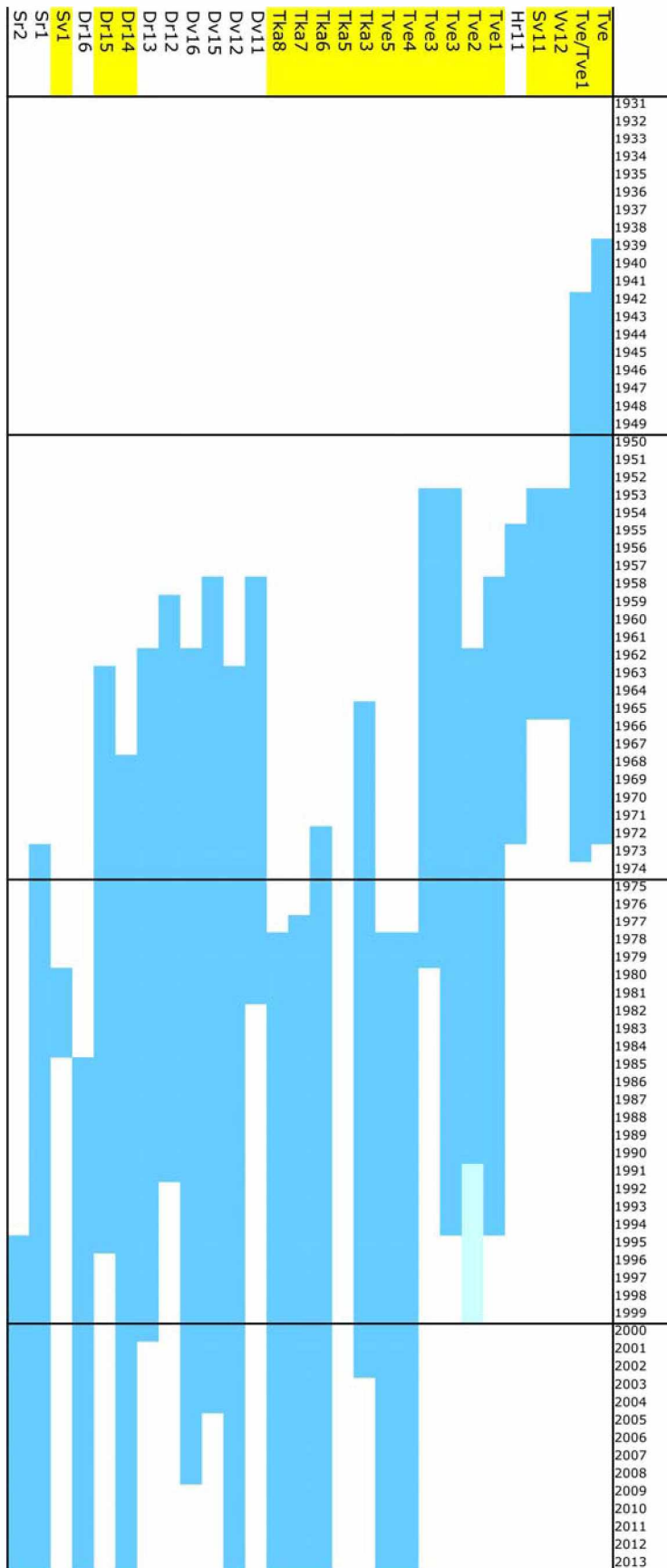


	kpl	aks. paino	kok. paino	
Tve(VK13)	2	8,3	16,5	1860
Tve/Tve1(Vv11)	2	12,5	25,0	1861
Vv12	3	14,0	56,0	1862
Sv11	1	12,0	48,0	1863
Hr11	5	17,0	66,5	1864
Tve1	30	9,6	18,4	1865
Tve2	8	13,3	26,6	1866
Tve3(Vv13)	37	13,3	40,0	1867
Tve3(Vv14)	5	13,3	40,0	1868
Tve4	40	17,0	34,0	1869
Tve5	10	8,1	16,0	1870
Tka3	45	7,5	15,0	1871
Tka5		8,5	12,5	1872
Tka6	29	10,5	22,0	1873
Tka7	80	18,5	36,0	1874
Tka8	25	17,0	34,0	1875
Dv11	16	14,5	56,0	1876
Dv12	192	16,4	65,6	1877
Dv15	58	15,0	60,0	1878
Dv16	28	15,0	60,0	1879
Dr12	42	20,3	121,8	1880
Dr13	54	16,4	98,1	1881
Dr14	24	21,5	86,0	1882
Dr15	1	20,7	120,0	1883
Dr16	23	20,5	82,0	1884
Sv1	1	16,0	63,0	1885
Sr1	109	21,5	84,0	1886
Sr2	46	21,1	82,0	1887
				1888
				1889
				1890
				1891
				1892
				1893
				1894
				1895
				1896
				1897
				1898
				1899
				1900
				1901
				1902
				1903
				1904
				1905
				1906
				1907
				1908
				1909
				1910
				1911
				1912
				1913
				1914
				1915
				1916
				1917
				1918
				1919
				1920
				1921
				1922
				1923
				1924
				1925
				1926
				1927
				1928
				1929
				1930

Keltaisella pohjalla on raskaita vaihtovetureita, työkoneita ja harvinaisia yhden tai kahden tai kolmen veturin sarjoja

Vaalean sininen tarkoittaa ettei tarkkaa hylkäysvuotta ole tiedossa

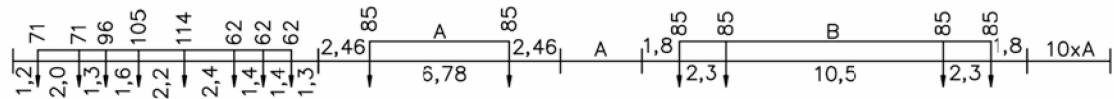
Matkustajamootorivaunujen painot lastattuna



# Roosin tutkimuksen mukaiset ominaisjunat 1900–1999

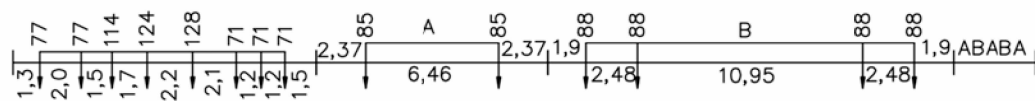
## MATKUSTAJAOMIN AISJUNA 1900–1924

$Q=3023$  kN  $v=60$  km/h  $L=173,9$  m  $q=17,38$  kN/m



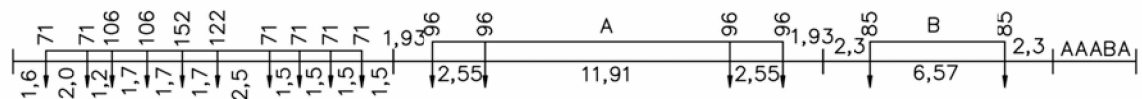
## MATKUSTAJAOMIN AISJUNA 1925–1949

$Q=2469$  kN  $v=80$  km/h  $L=118,6$  m  $q=20,81$  kN/m



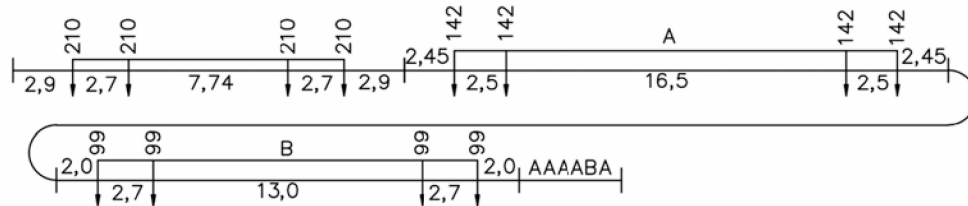
## MATKUSTAJAOMIN AISJUNA 1950–1974

$Q=3192$  kN  $v=100$  km/h  $L=145,0$  m  $q=22,02$  kN/m



## MATKUSTAJAOMIN AISJUNA 1975–1999

$Q=5040$  kN  $v=120$  km/h  $L=222,1$  m  $q=22,69$  kN/m



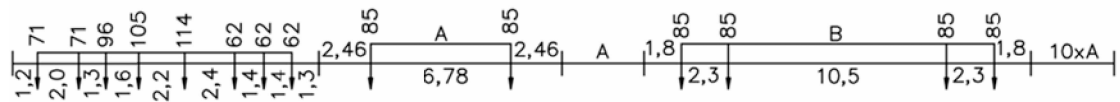




# Tämän tutkimuksen mukaiset ominaisjunat 1900–2024

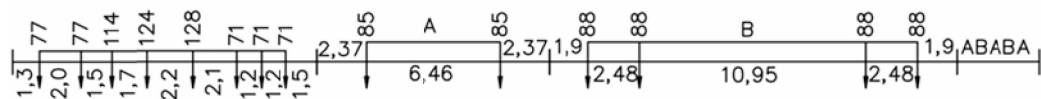
## MATKUSTAJAOMIN AISJUNA 1900–1924

$Q=3023$  kN  $v=60$  km/h  $L=173,9$  m  $q=17,38$  kN/m



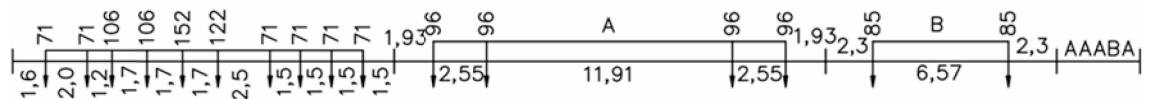
## MATKUSTAJAOMIN AISJUNA 1925–1949

$Q=2469$  kN  $v=80$  km/h  $L=118,6$  m  $q=20,81$  kN/m



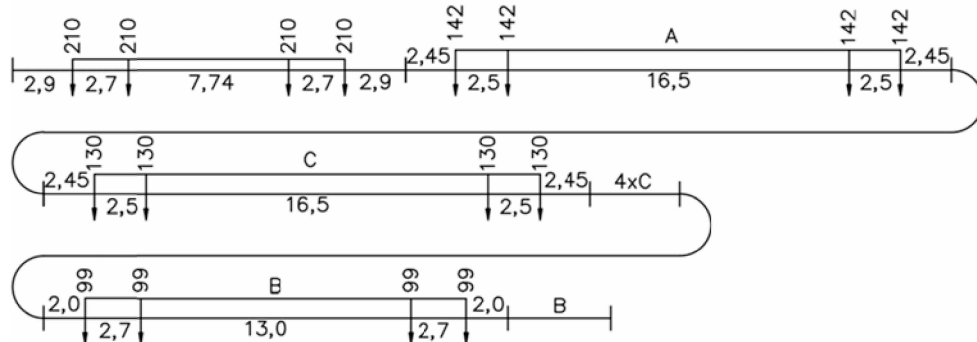
## MATKUSTAJAOMIN AISJUNA 1950–1974

$Q=3192$  kN  $v=100$  km/h  $L=145,0$  m  $q=22,02$  kN/m



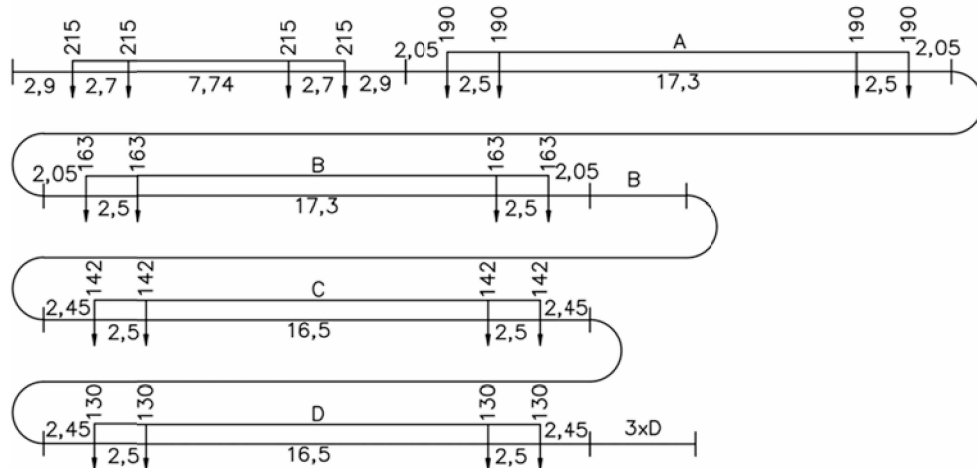
## MATKUSTAJAOMIN AISJUNA 1975–1999

$Q=5040$  kN  $v=120$  km/h  $L=222,1$  m  $q=22,69$  kN/m



## MATKUSTAJAOMIN AISJUNA 2000–2024

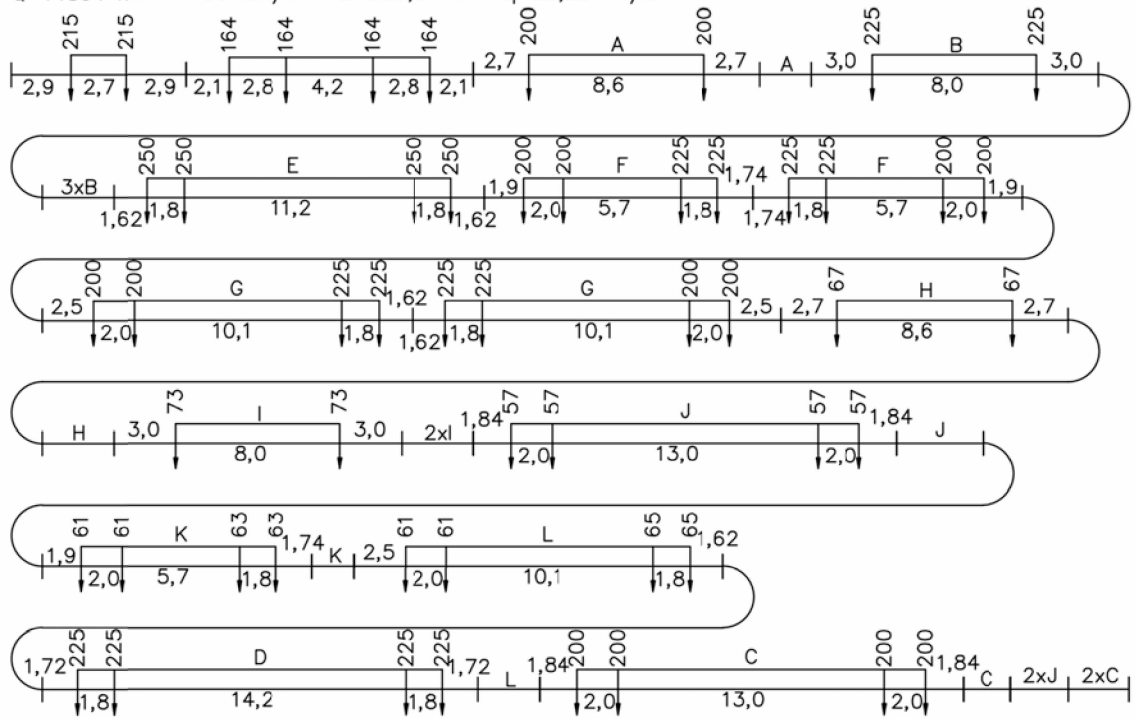
$Q=5052$  kN  $v=140$  km/h  $L=230,14$  m  $q=21,95$  kN/m





# TAVARAOMINAIJSUNA 2000–2024

Q=14804 kN v=90 km/h L=505,86 m q=29,26 kN/m



## Matkustaja- ja tavarajunien keskinäinen suhde bruttotonnein esitettynä, kunakin aikajaksena

Rataosuus	1900-1949		1950-1974		1975-1999		2000-2024	
	M	T	M	T	M	T	M	T
Tomio-Kolari	0,70	0,30	0,25	0,75	0,00	1,00	0,40	0,60
Laurila-Tornio	0,43	0,57	0,34	0,66	0,00	1,00	0,30	0,70
Kemi-Laurila	0,35	0,65	0,28	0,72	0,15	0,85	0,47	0,53
Laurila-Rovaniemi	0,41	0,59	0,29	0,71	0,39	0,61	0,51	0,49
Rovaniemi-Kemijärvi	1,00	0,00	0,09	0,91	0,24	0,76	0,23	0,77
Kemijärvi-Kellosekä	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00
Oulu-Kemi	0,37	0,63	0,25	0,75	0,17	0,83	0,50	0,50
Tuomioja-Oulu	0,32	0,68	0,28	0,72	0,23	0,77	0,35	0,65
Ylivieska-Tuomioja	0,30	0,70	0,28	0,72	0,22	0,78	0,32	0,68
Tuomioja-Raahe	0,27	0,73	0,19	0,81	0,00	1,00	0,00	1,00
Kokkola-Ylivieska	0,43	0,57	0,22	0,78	0,20	0,80	0,23	0,77
Pännäinen-Kokkola	0,46	0,54	0,27	0,73	0,24	0,76	0,49	0,51
Pännäinen-Pietarsaari	0,41	0,59	0,11	0,89	0,00	1,00	0,00	1,00
Seinäjoki-Pännäinen	0,45	0,55	0,27	0,73	0,24	0,76	0,49	0,51
Seinäjoki-Vaasa	0,55	0,45	0,45	0,55	0,75	0,25	0,96	0,04
Seinäjoki-Kaskinen	0,51	0,49	0,12	0,88	0,00	1,00	0,00	1,00
Parkano-Seinäjoki			0,27	0,73	0,27	0,73	0,52	0,48
Lielähti-Parkano			0,25	0,75	0,25	0,75	0,50	0,50
Tampere-Lielähti	0,24	0,76	0,22	0,78	0,19	0,81	0,36	0,64
Lielähti-Kokemäki	0,25	0,75	0,22	0,78	0,15	0,85	0,17	0,83
Kokemäki-Pori	0,31	0,69	0,31	0,69	0,23	0,77	0,40	0,60
Pori-Mäntyluoto	0,13	0,87	0,02	0,98	0,00	1,00	0,00	1,00
Kokemäki-Rauma	0,13	0,87	0,15	0,85	0,00	1,00	0,00	1,00
Oulu-Vaala	0,36	0,64	0,04	0,96	0,13	0,87	0,14	0,86
Vaala-Kontiomäki	0,35	0,65	0,04	0,96	0,13	0,87	0,15	0,85
Kontiomäki-Pesiökylä	0,26	0,74	0,26	0,74	0,00	1,00	0,00	1,00
Pesiökylä-Ämmänsaari			0,41	0,59	0,00	1,00	0,00	1,00
Kontiomäki-Vartius					0,00	1,00	0,00	1,00
Iisalmi-Kontiomäki	0,32	0,68	0,23	0,77	0,20	0,80	0,49	0,51
Iisalmi-Pyhäsalmi	0,36	0,64	0,11	0,89	0,11	0,89	0,02	0,98
Pyhäsalmi-Haapajärvi	0,36	0,64	0,11	0,89	0,11	0,89	0,02	0,98
Pyhäsalmi-Pyhäkumpu	0,36	0,64	0,11	0,89	0,11	0,89	0,00	1,00
Haapajärvi-Ylivieska	0,47	0,53	0,08	0,92	0,11	0,89	0,02	0,98
Siilinjärvi-Iisalmi	0,35	0,65	0,22	0,78	0,14	0,86	0,20	0,80
Kuopio-Siilinjärvi	0,37	0,63	0,22	0,78	0,17	0,83	0,30	0,70
Pieksämäki-Kuopio	0,27	0,73	0,25	0,75	0,18	0,82	0,34	0,66

Mikkeli-Pieksämäki	0,23	0,77	0,20	0,80	0,18	0,82	0,33	0,67
Kouvola-Mikkeli	0,18	0,82	0,20	0,80	0,18	0,82	0,34	0,66
Saarijärvi-Haapajärvi			0,15	0,85	0,00	1,00	0,00	1,00
Jyväskylä-Saarijärvi	0,20	0,80	0,15	0,85	0,00	1,00	0,00	1,00
Jyväskylä-Pieksämäki	0,52	0,48	0,22	0,78	0,22	0,78	0,32	0,68
Haapamäki-Jyväskylä	0,25	0,75	0,19	0,81	0,32	0,68	0,81	0,19
Haapamäki-Seinäjoki	0,35	0,65	0,33	0,67	0,49	0,51	0,66	0,35
Orivesi-Vilppula	0,32	0,68	0,39	0,61	0,22	0,78	0,19	0,81
Vilppula-Haapamäki	0,26	0,74	0,39	0,61	0,22	0,78	0,19	0,81
Vilppula-Mänttä	1,00	0,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00
Jämsänkoski-Jyväskylä					0,23	0,77	0,41	0,59
Orivesi-Jämsänkoski			0,22	0,78	0,23	0,77	0,29	0,71
Tampere-Orivesi	0,35	0,65	0,36	0,64	0,28	0,72	0,27	0,73
Toijala-Tampere	0,37	0,63	0,40	0,60	0,27	0,73	0,50	0,50
Toijala-Valkeakoski	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00
Toijala-Turku	0,31	0,69	0,37	0,63	0,28	0,72	0,52	0,49
Turku-Raisio	0,65	0,35	0,49	0,51	0,24	0,76	0,00	1,00
Raisio-Uusikaupunki	0,49	0,51	0,74	0,26	0,52	0,48	0,00	1,00
Riihimäki-Toijala	0,25	0,75	0,38	0,62	0,42	0,58	0,51	0,49
Hyvinkää-Riihimäki	0,34	0,66	0,50	0,50	0,56	0,44	0,66	0,34
Hyvinkää-Karjaa	0,32	0,68	0,09	0,91	0,00	1,00	0,00	1,00
Karjaa-Hanko	0,39	0,61	0,39	0,61	0,43	0,57	0,15	0,85
Karjaa-Turku	0,64	0,36	0,44	0,56	0,66	0,34	0,98	0,02
Kirkkonummi-Karjaa	0,69	0,31	0,62	0,38	0,76	0,24	1,00	0,00
Helsinki-Kirkkonummi	0,87	0,13	0,76	0,24	0,94	0,06	1,00	0,00
Helsinki-Pasila	0,75	0,25	0,67	0,33	0,76	0,24	1,00	0,00
Pasila-Kerava	0,64	0,36	0,67	0,33	0,76	0,24	0,97	0,03
Kerava-Sköldvik	0,65	0,35	0,52	0,48	0,00	1,00	0,00	1,00
Kerava-Vuosaari							0,00	1,00
Kerava-Hyvinkää	0,45	0,55	0,59	0,41	0,65	0,35	0,84	0,17
Kerava-Lahti							0,68	0,32
Riihimäki-Lahti	0,27	0,73	0,32	0,68	0,32	0,68	0,00	1,00
Lahti-Loviisa			0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00
Lahti-Heinola	0,70	0,30	0,36	0,64	0,00	1,00	0,00	1,00
Lahti-Kouvola	0,28	0,72	0,32	0,68	0,28	0,72	0,38	0,62
Kouvola-Kuusankoski	1,00	0,00	0,02	0,98	0,00	1,00	0,00	1,00
Kouvola-Juurikorpi	0,19	0,81	0,11	0,89	0,03	0,97	0,00	1,00
Juurikorpi-Hamina	0,58	0,42	0,02	0,98	0,00	1,00	0,00	1,00
Juurikorpi-Kotka	0,19	0,81	0,13	0,87	0,02	0,98	0,00	1,00
Kouvola-Luumäki	0,31	0,69	0,18	0,82	0,12	0,88	0,16	0,84
Luumäki-Vainikkala	0,42	0,58	0,18	0,82	0,05	0,95	0,12	0,88
Luumäki-Lappeenranta			0,18	0,82	0,22	0,78	0,19	0,81



Lappeenranta-Imatra	0,59	0,41	0,18	0,82	0,22	0,78	0,20	0,80
Imatra-Imatrankoski	0,47	0,53	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00
Imatra-Parikkala	0,24	0,76	0,24	0,76	0,21	0,79	0,29	0,71
Parikkala-Säkäniemi			0,14	0,86	0,24	0,76	0,32	0,68
Säkäniemi-Joensuu	0,23	0,77	0,14	0,86	0,12	0,88	0,24	0,76
Niirala-Säkäniemi	0,22	0,78	0,14	0,86	0,00	1,00	0,00	1,00
Parikkala-Savonlinna	0,47	0,53	0,30	0,70	0,41	0,59	0,83	0,17
Savonlinna-Huutokoski	0,46	0,54	0,20	0,80	0,01	0,99	0,11	0,89
Pieksämäki-Huutokoski	0,30	0,70	0,13	0,87	0,08	0,92	0,27	0,73
Huutokoski-Varkaus	0,21	0,79	0,11	0,89	0,08	0,92	0,28	0,72
Varkaus-Viinijärvi	0,11	0,89	0,11	0,89	0,14	0,86	0,47	0,53
Viinijärvi-Joensuu	0,31	0,69	0,11	0,89	0,13	0,87	0,26	0,74
Siilinjärvi-Viinijärvi	0,45	0,55	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00
Joensuu-Ilomantsi			0,05	0,95	0,00	1,00	0,00	1,00
Joensuu-Uimaharju	0,30	0,70	0,20	0,80	0,00	1,00	0,06	0,94
Uimaharju-Lieksa	0,25	0,75	0,20	0,80	0,00	1,00	0,11	0,89
Lieksa-Nurmes	0,28	0,72	0,20	0,80	0,00	1,00	0,14	0,87
Nurmes-Vuokatti	0,10	0,90	0,06	0,94	0,00	1,00	0,00	1,00
Vuokatti-Kontiomäki	0,10	0,90	0,06	0,94	0,00	1,00	0,00	1,00
Tornio-Röyttä	0,43	0,57	0,20	0,80	0,00	1,00	0,00	1,00
Raisio-Naantali	1,00	0,00	0,55	0,45	0,00	1,00	0,00	1,00
Kokkola-Ykspihlaja	0,43	0,57	0,20	0,80	0,00	1,00	0,00	1,00
Haapamäki-Parkano	0,11	0,89	0,11	0,89	0,00	1,00	0,00	1,00
Parkano-Pori	0,95	0,05	0,11	0,89	0,00	1,00	0,00	1,00
Pesiökylä-Taivalkoski			0,26	0,74	0,00	1,00	0,00	1,00

Punainen solun taustaväri = Rataosuutta ei ole ollut olemassa.

Vaaleansininen solun taustaväri = Arvo ei perustu tilastoihin, tilasto puutteellinen. Arvo on arvio, joka perustuu viereisten aikajaksojen osuuksiin.

## Liikennemääräennusteet bruttotonnein esitettyinä

2050	Tornio-Kolari	1,9	7,0	18,9	17,4	11,3	4,2	16,9	24,2	25,9	4,9	29,0	22,6	3,8	30,8	3,0	0,8	26,4	27,4	36,9	9,2	3,6	2,4	5,4	8,7	8,3	0,8	0,7
2049	Laurila-Tornio	1,8	6,7	18,4	16,9	10,8	4,0	16,4	23,7	25,3	4,8	28,5	22,1	3,7	29,8	2,9	0,7	25,7	26,7	36,1	9,2	3,5	2,3	5,3	8,7	8,3	0,7	0,6
2048	Kemi-Laurila	1,8	6,5	17,8	16,4	10,4	3,9	15,9	23,2	24,8	4,7	28,1	21,5	3,6	28,9	2,9	0,7	25,1	26,0	35,4	9,1	3,5	2,3	5,3	8,7	8,2	0,7	0,6
2047	Laurila-Rovaniemi	1,8	6,3	17,3	15,8	10,0	3,7	15,5	22,6	24,3	4,7	27,7	21,0	3,6	28,0	2,8	0,7	24,4	25,3	34,6	9,0	3,5	2,3	5,3	8,6	8,2	0,7	0,6
2046	Rovaniemi-Kemijärvi	1,7	6,0	16,8	15,3	9,6	3,5	15,0	22,1	23,7	4,6	27,3	20,4	3,5	27,2	2,8	0,7	23,8	24,7	33,9	9,0	3,5	2,2	5,3	8,6	8,2	0,7	0,6
2045	Kemijärvi-Kellosele	1,7	5,8	16,3	14,9	9,2	3,3	14,6	21,7	23,2	4,5	26,9	19,9	3,4	26,3	2,8	0,7	23,2	24,0	33,2	8,9	3,5	2,2	5,3	8,6	8,2	0,7	0,6
2044	Oulu-Kemi	1,7	5,6	15,8	14,4	8,9	3,2	14,2	21,2	22,7	4,4	26,5	19,4	3,3	25,5	2,7	0,7	22,5	23,4	32,5	8,8	3,5	2,2	5,3	8,6	8,1	0,7	0,6
2043	Tuomioja-Oulu	1,6	5,4	15,3	13,9	8,5	3,0	13,8	20,7	22,2	4,4	26,2	18,9	3,3	24,7	2,7	0,7	22,0	22,8	31,8	8,8	3,5	2,2	5,3	8,5	8,1	0,7	0,6
2042	Ylivieska-Tuomioja	1,6	5,1	14,9	13,4	8,1	2,9	13,4	20,2	21,7	4,3	25,8	18,4	3,2	23,9	2,6	0,7	21,4	22,2	31,2	8,7	3,5	2,2	5,3	8,5	8,1	0,7	0,6
2041	Tuomioja-Raahe	1,6	4,9	14,4	13,0	7,8	2,7	13,0	19,8	21,3	4,2	25,4	18,0	3,1	23,1	2,6	0,7	20,8	21,6	30,5	8,6	3,5	2,2	5,3	8,5	8,1	0,7	0,6
2040	Kokkola-Ylivieska	1,5	4,7	14,0	12,6	7,5	2,5	12,6	19,4	20,8	4,2	25,1	17,5	3,1	22,4	2,6	0,7	20,3	21,0	29,9	8,6	3,5	2,1	5,3	8,5	8,0	0,7	0,6
2039	Pännäinen-Kokkola	1,5	4,5	13,5	12,1	7,1	2,4	12,2	19,0	20,4	4,1	24,8	17,1	3,0	21,7	2,5	0,6	19,7	20,5	29,3	8,5	3,4	2,1	5,2	8,4	8,0	0,6	0,5
2038	Pännäinen-Pietarsaari	1,5	4,3	13,1	11,7	6,8	2,3	11,9	18,5	20,0	4,1	24,4	16,6	3,0	21,0	2,5	0,6	19,2	19,9	28,7	8,5	3,4	2,1	5,2	8,4	8,0	0,6	0,5
2037	Seinäjäoki-Pännäinen	1,4	4,2	12,7	11,3	6,5	2,1	11,5	18,1	19,5	4,0	24,1	16,2	2,9	20,3	2,4	0,6	18,7	19,4	28,1	8,4	3,4	2,1	5,2	8,4	8,0	0,6	0,5
2036	Seinäjäoki-Vaasa	1,4	4,0	12,3	11,0	6,2	2,0	11,2	17,8	19,1	3,9	23,8	15,8	2,8	19,6	2,4	0,6	18,2	18,9	27,6	8,4	3,4	2,1	5,2	8,4	8,0	0,6	0,5
2035	Seinäjäoki-Kaskinen	1,4	3,8	12,0	10,6	5,9	1,9	10,8	17,4	18,7	3,9	23,5	15,4	2,8	19,0	2,4	0,6	17,8	18,4	27,0	8,3	3,4	2,0	5,2	8,4	8,0	0,6	0,5
2034	Parkano-Seinäjäoki	1,4	3,7	11,7	10,3	5,7	1,8	10,6	17,1	18,5	3,9	23,3	15,1	2,7	18,6	2,4	0,6	17,5	18,1	26,7	8,3	3,4	2,0	5,2	8,4	7,9	0,6	0,5
2033	Lielähti-Parkano	1,4	3,6	11,5	10,1	5,5	1,7	10,4	16,9	18,2	3,8	23,1	14,9	2,7	18,2	2,3	0,6	17,2	17,8	26,4	8,3	3,4	2,0	5,2	8,3	7,9	0,6	0,5
2032	Tampere-Lielähti	1,3	3,5	11,2	9,9	5,4	1,6	10,2	16,7	18,0	3,8	22,9	14,7	2,7	17,8	2,3	0,6	16,9	17,5	26,0	8,2	3,4	2,0	5,2	8,3	7,9	0,6	0,5
2031	Lielähti-Kokemäki	1,3	3,4	11,0	9,6	5,2	1,5	10,0	16,4	17,8	3,8	22,8	14,4	2,6	17,0	2,3	0,6	16,6	17,2	25,7	8,2	3,4	2,0	5,2	8,3	7,9	0,6	0,5
2030	Kokemäki-Pori	1,3	3,3	10,8	9,4	5,0	1,5	9,8	16,2	17,5	3,7	22,6	14,2	2,6	17,0	2,3	0,6	16,3	16,9	25,4	8,2	3,4	2,0	5,2	8,3	7,9	0,6	0,5
2029	Pori-Mäntyluoto	1,3	3,2	10,5	9,2	4,8	1,4	9,6	16,0	17,3	3,7	22,4	13,9	2,5	16,6	2,3	0,6	16,0	16,6	25,0	8,1	3,4	2,0	5,2	8,3	7,9	0,6	0,5
2028	Kokemäki-Rauma	1,3	3,0	10,3	8,9	4,6	1,3	9,4	15,7	17,0	3,6	22,2	13,7	2,5	16,1	2,2	0,6	15,7	16,3	24,7	8,1	3,4	2,0	5,2	8,3	7,9	0,6	0,5
2027	Oulu-Vaala	1,3	2,9	10,1	8,7	4,4	1,2	9,2	15,5	16,8	3,6	22,0	13,4	2,5	15,7	2,2	0,6	15,4	16,0	24,3	8,1	3,4	2,0	5,2	8,3	7,9	0,6	0,5
2026	Vaala-Kontiomäki	1,2	2,8	9,8	8,5	4,3	1,1	9,0	15,3	16,5	3,6	21,8	13,2	2,5	15,3	2,2	0,6	15,1	15,7	24,0	8,0	3,4	1,9	5,2	8,3	7,9	0,6	0,5
2025	Kontiomäki-Pesiökylä	1,2	2,7	9,6	8,2	4,1	1,1	8,8	15,0	16,3	3,5	21,6	12,9	2,4	14,9	2,2	0,6	14,8	15,4	23,7	8,0	3,4	1,9	5,2	8,3	7,8	0,6	0,5
2024	Pesiökylä-Ammänsaari	1,2	2,6	9,3	8,0	3,9	1,0	8,6	14,8	16,0	3,5	21,4	12,7	2,4	14,5	2,1	0,6	14,5	15,1	23,3	8,0	3,4	1,9	5,2	8,2	7,8	0,6	0,5
2023		1,2	2,5	9,1	7,8	3,7	0,9	8,4	14,6	15,8	3,5	21,3	12,4	2,4	14,1	2,1	0,6	14,2	14,8	23,0	7,9	3,4	1,9	5,2	8,2	7,8	0,6	0,5
2022		1,2	2,4	8,9	7,5	3,5	0,8	8,2	14,3	15,6	3,4	21,1	12,2	2,3	13,7	2,1	0,6	13,9	14,5	22,7	7,9	3,4	1,9	5,2	8,2	7,8	0,6	0,5
2021		1,2	2,3	8,6	7,3	3,3	0,7	8,0	14,1	15,3	3,4	20,9	11,9	2,3	13,3	2,1	0,5	13,7	14,2	22,3	7,9	3,3	1,9	5,1	8,2	7,8	0,5	0,4
2020		1,1	2,2	8,4	7,1	3,2	0,6	7,8	13,9	15,1	3,4	20,7	11,7	2,3	12,9	2,1	0,5	13,4	13,8	22,0	7,9	3,3	1,9	5,1	8,2	7,8	0,5	0,4
2019		1,1	2,1	8,2	6,8	3,0	0,5	7,5	13,6	14,8	3,3	20,5	11,4	2,2	12,5	2,0	0,5	13,1	13,5	21,7	7,8	3,3	1,9	5,1	8,2	7,8	0,5	0,4
2018		1,1	2,0	7,9	6,6	2,8	0,5	7,3	13,4	14,6	3,3	20,3	11,2	2,2	12,1	2,0	0,5	12,8	13,2	21,3	7,8	3,3	1,9	5,1	8,2	7,8	0,5	0,4
2017		1,1	1,8	7,7	6,4	2,6	0,4	7,1	13,2	14,3	3,3	20,1	10,9	2,2	11,7	2,0	0,5	12,5	12,9	21,0	7,8	3,3	1,9	5,1	8,2	7,8	0,5	0,4
2016		1,1	1,7	7,4	6,1	2,4	0,3	6,9	12,9	14,1	3,2	19,9	10,7	2,1	11,3	2,0	0,5	12,2	12,6	20,6	7,7	3,3	1,8	5,1	8,1	7,7	0,5	0,4
2015		1,1	1,6	7,2	5,9	2,2	0,2	6,7	12,7	13,8	3,2	19,8	10,4	2,1	10,9	2,0	0,5	11,9	12,3	20,3	7,7	3,3	1,8	5,1	8,1	7,7	0,5	0,4
2014		1,0	1,5	7,0	5,7	2,1	0,2	6,5	12,5	13,6	3,2	19,6	10,2	2,1	10,5	1,9	0,5	11,6	12,0	20,0	7,7	3,3	1,8	5,1	8,1	7,7	0,5	0,4
2013		1,0	1,4	6,7	5,4	1,9	0,1	6,3	12,2	13,3	3,1	19,4	9,9	2,0	10,1	1,9	0,5	11,3	11,7	19,6	7,6	3,3	1,8	5,1	8,1	7,7	0,5	0,4









# Standardin SFS-EN 15528+A1 mukaiset kuormakaaviot

## Reference wagons and load models representing the line categories

Table A.1 — Reference wagons

Reference wagon	Axle load P (t)	Mass per unit length p (t/m)	Geometrical characteristics
A	16,0	5,0	
B1	18,0	5,0	
B2	18,0	6,4	
C2	20,0	6,4	
C3	20,0	7,2	
C4	20,0	8,0	

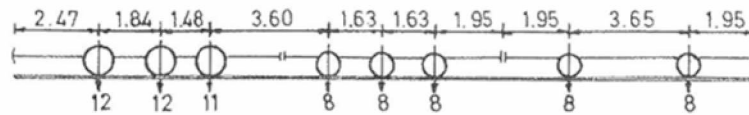
Table A.1 (concluded)

Reference wagon	Axle load P (t)	Mass per unit length p (t/m)	Geometrical characteristics
D2	22,5	6,4	<p>Diagram of wagon D2 showing four 22.5 t axles. Spacing: 1.50 m, 1.80 m, 7.45 m, 1.80 m, 1.50 m. Total length 14.05 m.</p>
D3	22,5	7,2	<p>Diagram of wagon D3 showing four 22.5 t axles. Spacing: 1.50 m, 1.80 m, 5.90 m, 1.80 m, 1.50 m. Total length 12.50 m.</p>
D4	22,5	8,0	<p>Diagram of wagon D4 showing four 22.5 t axles. Spacing: 1.50 m, 1.80 m, 4.65 m, 1.80 m, 1.50 m. Total length 11.25 m.</p>
xL-a	20,0	8,0	<p>Diagram of wagon xL-a showing six 20.0 t axles. Spacing: 1.50 m, 1.50 m, 1.50 m, 6.00 m, 1.50 m, 1.50 m, 1.50 m. Total length 15.00 m.</p>
xL-b	22,5	7,4	<p>Diagram of wagon xL-b showing six 22.5 t axles. Spacing: 2.20 m, 1.70 m, 2.00 m, 6.50 m, 2.00 m, 1.70 m, 2.20 m. Total length 18.30 m.</p>
E4	25,0	8,0	<p>Diagram of wagon E4 showing four 25.0 t axles. Spacing: 1.50 m, 1.80 m, 5.90 m, 1.80 m, 1.50 m. Total length 12.50 m.</p>
E5	25,0	8,8	<p>Diagram of wagon E5 showing four 25.0 t axles. Spacing: 1.50 m, 1.80 m, 4.75 m, 1.80 m, 1.50 m. Total length 11.35 m.</p>

## Vanhat, siltojen mitoituksessa käytetyt kuormakaaviot

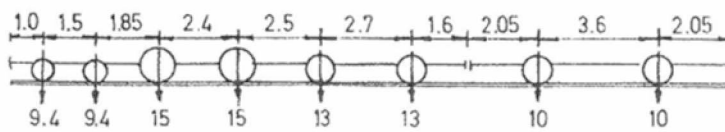
### V. 1899 kuormakaavio:

Radat mm. Vaasaan, Ouluun, Pietariin, Kajaaniin



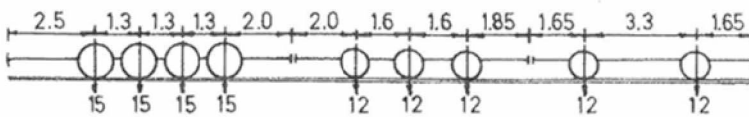
Veturi ja tenderi yhteensä 59 t eli 4.1 t/m

### Oulu - Tornio radan kuormakaavio v.1902:



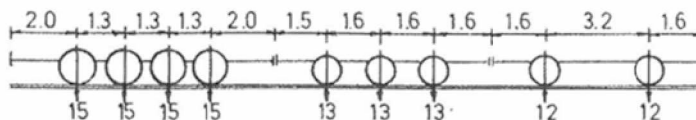
Veturi ja tenderi yhteensä 75 t eli 5.5 t/m

### V. 1903 kuormakaavio: Par - Sl, Kem - Roi, Jns - Lks



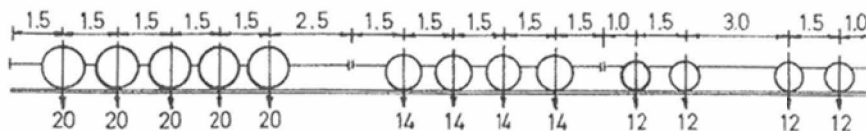
Veturi ja tenderi yhteensä 96 t eli 6.2 t/m

### V. 1910 kuormakaavio: Lks - Nrm, Sk - Ksk, Pm - Var - Sl



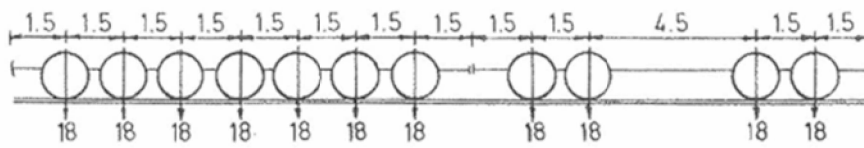
Veturi ja tenderi yhteensä 99 t eli 7.0 t/m

### V. 1914 kuormakaavio:

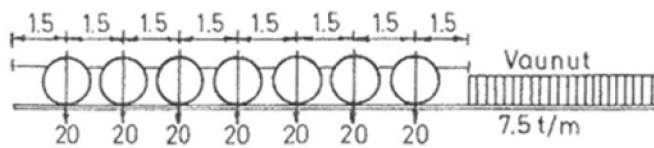
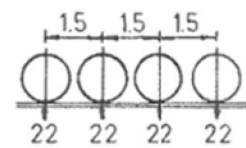


Veturi ja tenderi yhteensä 156 t eli 8.9 t/m

Kuormituksenä käytettiin y.o. kaavioiden kahta tai kolmea veturia (tendereineen) sekä vaunuja, sijoitettuna epäedullisimmalla tavalla. Lisäksi lyhyet siltaosat laskettiin joskus kolmelle 17 t akselipainolle, k/k 1.3 m, tai yhdelle 20 t akselipainolle.

V. 1926 kuormakaavio:

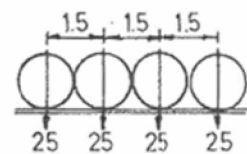
Akseliryhmä 126 t eli 10.5 t/m

V. 1948 kuormakaavio:Vaihtoehtoisesti:

Akseliryhmä 140 t eli 11.7 t/m

V. 1974 kuormakaavio:

Kuten v. 1948, mutta vaihtoehtoisesti:



Kuormituksenä käytetään y.o. kaavioiden akseliryhmää kaksinkertaisena tai osiin pilkottuna, sijoitettuna epäedullisimmalla tavalla.

# Tämän tutkimuksen mukaiset lambda-kerroin tulokset ja vertailuarvot eurokoodista ja Ryynäsen tutkimuksesta

## **1-aukkoiset sillat, k2=9, LM71-22,5**

Vertailuarvo 250 milj. kN

Vertailukuormakaavio LM71-22,5

Artukka	<b>M1900</b>	<b>M1925</b>	<b>M1950</b>	<b>M1975</b>	<b>M2000</b>
L 2,0 m	0,558	0,627	0,706	0,948	0,933
L 5,0 m	0,450	0,512	0,617	0,552	0,550
L 20,0 m	0,418	0,507	0,571	0,448	0,527
L 35,0 m	0,380	0,453	0,530	0,479	0,534
Artukka	<b>T1900</b>	<b>T1925</b>	<b>T1950</b>	<b>T1975</b>	<b>T2000</b>
L 2,0 m	0,528	0,657	0,770	0,981	0,971
L 5,0 m	0,388	0,522	0,587	0,771	0,734
L 20,0 m	0,345	0,442	0,533	0,507	0,603
L 35,0 m	0,327	0,424	0,519	0,517	0,690

## **1-aukkoiset sillat**

Vertailuarvo	25,30E6 t/a	24,78E6 t/a
EC1992-2	<b>Tavanom.</b>	<b>Raskas</b>
L 2,0 m	0,900	0,950
L 5,0 m	0,800	0,850
L 20,0 m	0,650	0,700
L 35,0 m	0,650	0,700

Vertailuarvo	25,00 t/a	25,00 t/a	25,00 t/a
Ryynäsen $\lambda_{s,1}^*$	<b>Kaupunki</b>	<b>Kevyt</b>	<b>Raskas</b>
L 2,0 m	0,662	0,850	0,858
L 20,0 m	0,333	0,546	0,541



**3-aukkoiset sillat, k2=9, LM71-22,5 + SW/0-22,5****Silta L 9+11+9**

Vertailuarvo 250 milj. kN Vertailukuormakaavio LM71-22,5 + SW/0-22,5

Artukka	<b>M1900</b>	<b>M1925</b>	<b>M1950</b>	<b>M1975</b>	<b>M2000</b>
Reuna-aukko	0,370	0,448	0,488	0,455	0,527
Tuki	0,332	0,461	0,481	0,512	0,539
Keskiaukko	0,379	0,432	0,503	0,467	0,569
Artukka	<b>T1900</b>	<b>T1925</b>	<b>T1950</b>	<b>T1975</b>	<b>T2000</b>
Reuna-aukko	0,314	0,409	0,481	0,603	0,645
Tuki	0,334	0,420	0,525	0,505	0,589
Keskiaukko	0,255	0,386	0,411	0,597	0,648

**Silta L 9+11+9**

Vertailuarvo	25,30E6 t/a	24,78E6 t/a
<b>EC1992-2</b>	<b>Tavanom.</b>	<b>Raskas</b>
Reuna-aukko	0,736	0,771
Tuki	0,745	0,780
Keskiaukko	0,616	0,679

**3-aukkoiset sillat, k2=9, LM71-22,5 + SW/0-22,5****Silta L 12,5+15+12,5**

Vertailuarvo 250 milj. kN

Vertailukuormakaavio LM71-22,5 + SW/0-22,5

Artukka	<b>M1900</b>	<b>M1925</b>	<b>M1950</b>	<b>M1975</b>	<b>M2000</b>
Reuna-aukko	0,369	0,450	0,502	0,451	0,550
Tuki	0,309	0,387	0,467	0,449	0,485
Keskiaukko	0,387	0,445	0,498	0,454	0,573
Artukka	<b>T1900</b>	<b>T1925</b>	<b>T1950</b>	<b>T1975</b>	<b>T2000</b>
Reuna-aukko	0,312	0,399	0,481	0,538	0,542
Tuki	0,293	0,379	0,481	0,510	0,597
Keskiaukko	0,299	0,379	0,445	0,504	0,477

**Silta L 12,5+15+12,5**

Vertailuarvo	25,30E6 t/a	24,78E6 t/a
EC1992-2	<b>Tavanom.</b>	<b>Raskas</b>
Reuna-aukko	0,701	0,721
Tuki	0,724	0,766
Keskiaukko	0,556	0,612

**Reuna-aukko**

kriittinen pituus = 14

Vertailuarvo	25,00 t/a	25,00 t/a	25,00 t/a
Ryynänen $\lambda_{s,1}$ *	<b>Kaupunki</b>	<b>Kevyt</b>	<b>Raskas</b>
L18+20+14	0,312	0,468	0,479

**Tuki**

kriittinen pituus = 13,25

Vertailuarvo	25,00 t/a	25,00 t/a	25,00 t/a
Ryynänen $\lambda_{s,1}$ *	<b>Kaupunki</b>	<b>Kevyt</b>	<b>Raskas</b>
L(2)+11+15,5+11+(2)	0,353	0,485	0,487

**Keskiaukko**

kriittinen pituus = 15,5

Vertailuarvo	25,00 t/a	25,00 t/a	25,00 t/a
Ryynänen $\lambda_{s,1}$ *	<b>Kaupunki</b>	<b>Kevyt</b>	<b>Raskas</b>
L(2)+11+15,5+11+(2)	0,325	0,584	0,582

**3-aukkoiset sillat, k2=9, LM71-22,5 + SW/0-22,5****Silta L 15+20+15**

Vertailuarvo 250 milj. kN

Vertailukuormakaavio LM71-22,5 + SW/0-22,5

Artukka	<b>M1900</b>	<b>M1925</b>	<b>M1950</b>	<b>M1975</b>	<b>M2000</b>
Reuna-aukko	0,370	0,457	0,508	0,423	0,507
Tuki	0,281	0,360	0,383	0,361	0,406
Keskiaukko	0,388	0,450	0,521	0,430	0,514
Artukka	<b>T1900</b>	<b>T1925</b>	<b>T1950</b>	<b>T1975</b>	<b>T2000</b>
Reuna-aukko	0,313	0,394	0,479	0,427	0,464
Tuki	0,265	0,343	0,401	0,467	0,540
Keskiaukko	0,301	0,384	0,465	0,373	0,427

**Silta L 15+20+15**

Vertailuarvo	25,30E6 t/a	24,78E6 t/a
<b>EC1992-2</b>	<b>Tavanom.</b>	<b>Raskas</b>
Reuna-aukko	0,681	0,693
Tuki	0,709	0,756
Keskiaukko	0,500	0,550

**Reuna-aukko**

kriittinen pituus =

14

Vertailuarvo	25,00 t/a	25,00 t/a	25,00 t/a
Ryynänen $\lambda_{s,1}^*$	<b>Kaupunki</b>	<b>Kevyt</b>	<b>Raskas</b>
L18+20+14	0,312	0,468	0,479

**Tuki**

kriittinen pituus =

17

Vertailuarvo	25,00 t/a	25,00 t/a	25,00 t/a
Ryynänen $\lambda_{s,1}^*$	<b>Kaupunki</b>	<b>Kevyt</b>	<b>Raskas</b>
L18+20+14	0,268	0,433	0,434

**Keskiaukko**

kriittinen pituus =

20

Vertailuarvo	25,00 t/a	25,00 t/a	25,00 t/a
Ryynänen $\lambda_{s,1}^*$	<b>Kaupunki</b>	<b>Kevyt</b>	<b>Raskas</b>
L18+20+14	0,286	0,440	0,451

**3-aukkoiset sillat, k2=9, LM71-22,5 + SW/0-22,5****Silta L 20+25+20**

Vertailuarvo 250 milj. kN

Vertailukuormakaavio LM71-22,5 + SW/0-22,5

Artukka	<b>M1900</b>	<b>M1925</b>	<b>M1950</b>	<b>M1975</b>	<b>M2000</b>
Reuna-aukko	0,373	0,456	0,506	0,399	0,447
Tuki	0,280	0,351	0,357	0,324	0,382
Keskiaukko	0,368	0,432	0,505	0,417	0,452
Artukka	<b>T1900</b>	<b>T1925</b>	<b>T1950</b>	<b>T1975</b>	<b>T2000</b>
Reuna-aukko	0,305	0,397	0,476	0,429	0,463
Tuki	0,282	0,353	0,409	0,467	0,503
Keskiaukko	0,287	0,368	0,450	0,366	0,437

**Silta L 20+25+20**

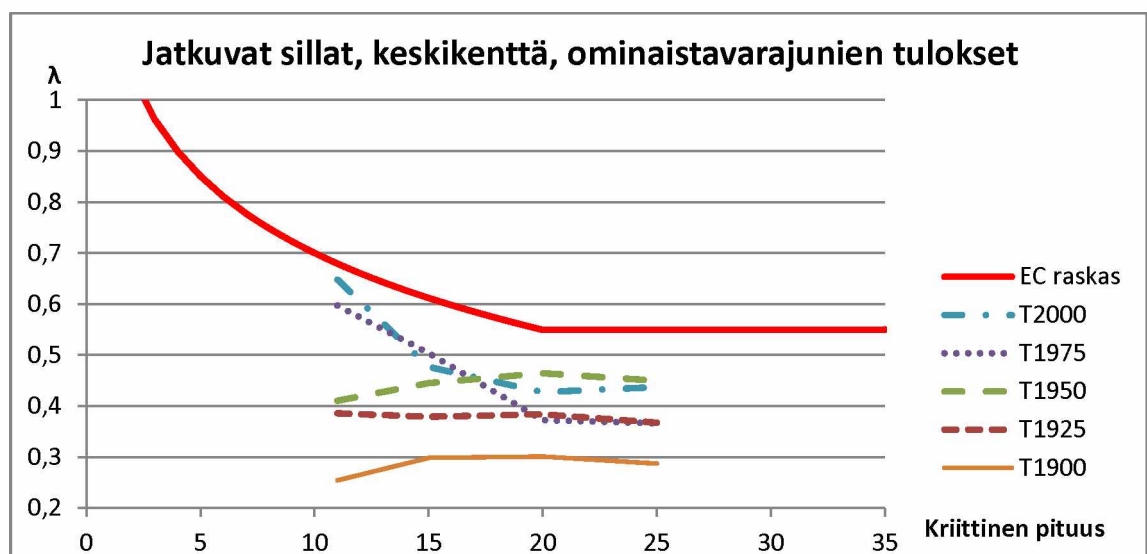
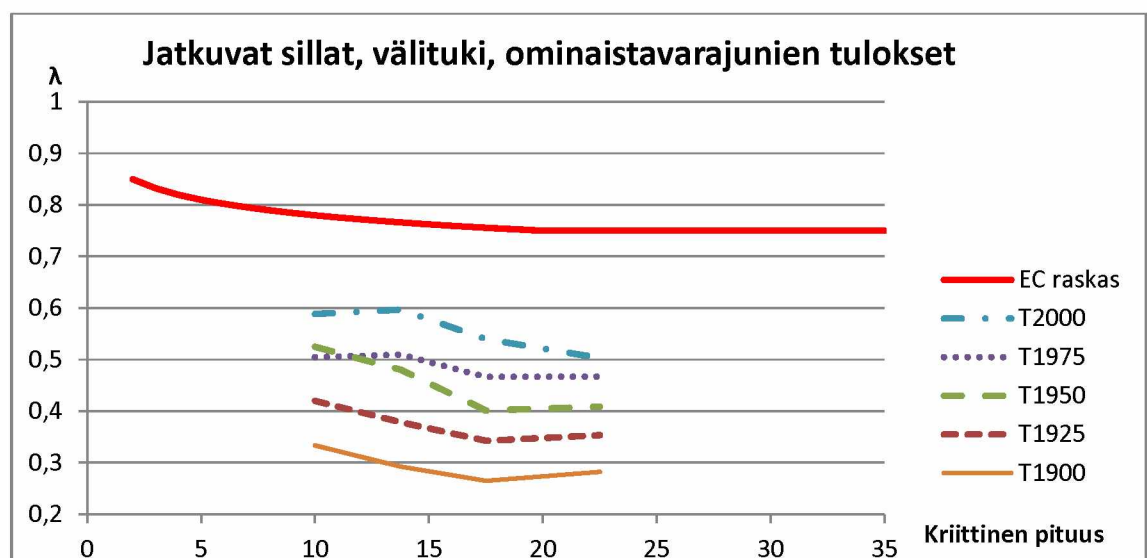
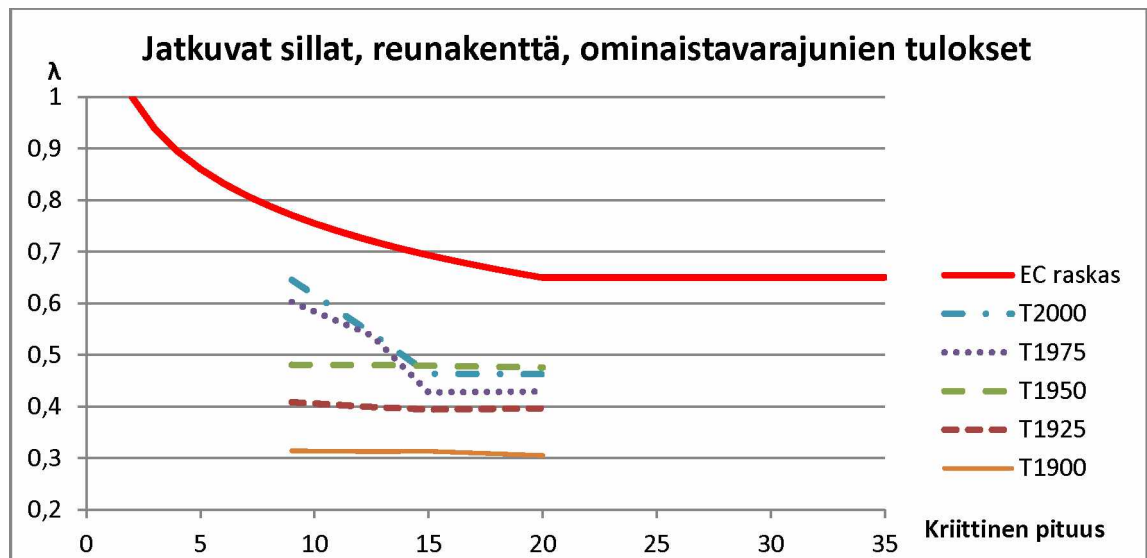
Vertailuarvo	25,30E6 t/a	24,78E6 t/a
EC1992-2	<b>Tavanom.</b>	<b>Raskas</b>
Reuna-aukko	0,650	0,650
Tuki	0,700	0,750
Keskiaukko	0,500	0,550

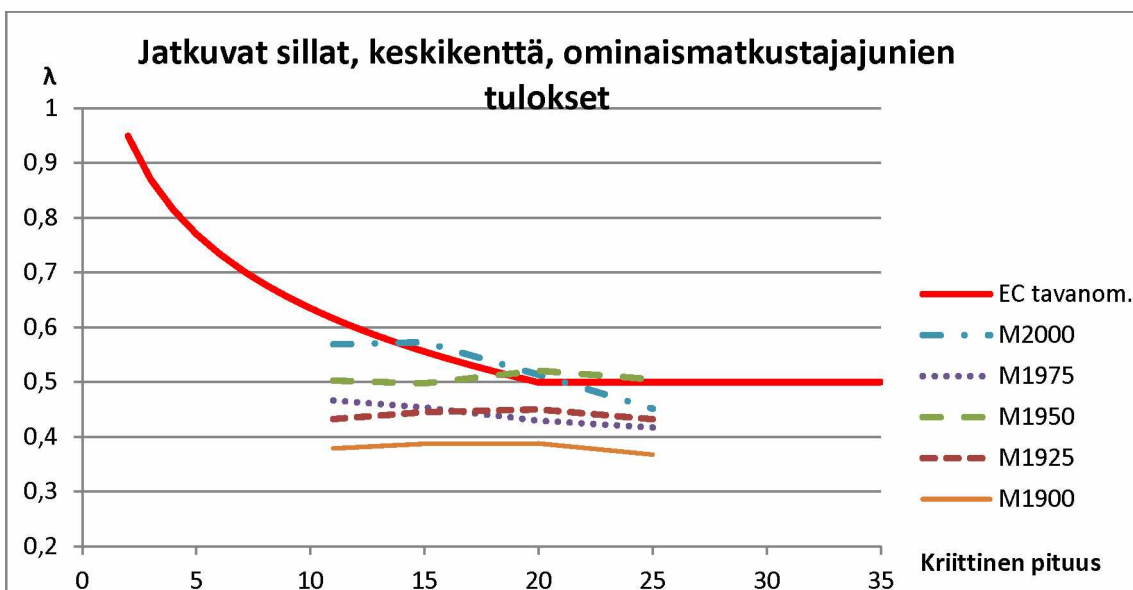
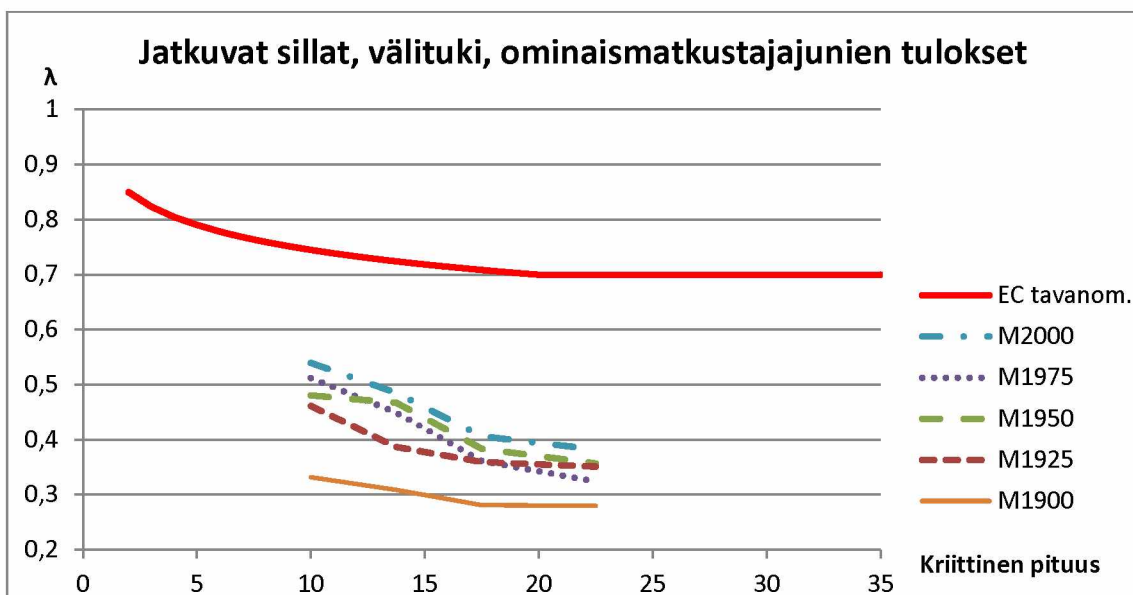
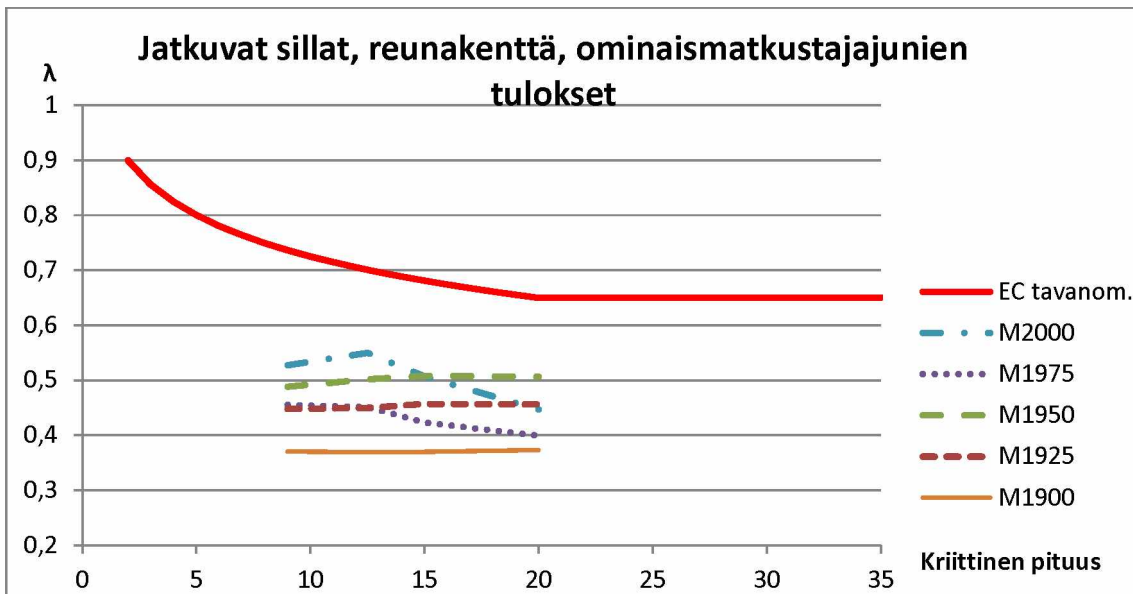
**Reuna-aukko**

kriittinen pituus = 18

Vertailuarvo	25,00 t/a	25,00 t/a	25,00 t/a
Ryynänen $\lambda_{s,1}$ *	<b>Kaupunki</b>	<b>Kevyt</b>	<b>Raskas</b>
L18+20+14	0,312	0,475	0,480

Jatkuvien rakenteiden lambda-kerroin tulokset esitettynä viivakaavioiden avulla.







# Ehdotusmitoitusmenetelmän lambda-kerrointaulukot

## Yksiaukkoiset sillat: tavarajunaliikenne

L [m]	1900–1924	1925–1949	1950–1974	1975–1999	2000–2024	2025–2049
≤ 2,0 m	0,47	0,62	0,73	0,90	0,90	0,95
≥ 20,0 m	0,34	0,44	0,53	0,53	0,65	0,70

## Jatkuvat palkit, reunajänne: tavarajunaliikenne

L [m]	1900–1924	1925–1949	1950–1974	1975–1999	2000–2024	2025–2049
≤ 2,0 m	0,41	0,50	0,58	0,92	0,98	1,00
≥ 20,0 m	0,31	0,40	0,48	0,44	0,47	0,55

## Jatkuvat palkit, välituen alue: tavarajunaliikenne

L [m]	1900–1924	1925–1949	1950–1974	1975–1999	2000–2024	2025–2049
≤ 2,0 m	0,44	0,57	0,78	0,65	0,85	0,85
≥ 20,0 m	0,29	0,36	0,42	0,48	0,54	0,60

## Jatkuvat palkit, keskikenttä: tavarajunaliikenne

L [m]	1900–1924	1925–1949	1950–1974	1975–1999	2000–2024	2025–2049
≤ 2,0 m	0,40	0,48	0,56	1,05	1,05	1,05
≥ 20,0 m	0,30	0,38	0,46	0,43	0,50	0,55

Tavarajunaliikenteen  $\lambda_{s,1}$  arvot vaikutusviivan kriittisen pituuden vaihdellessa 2 m ja 20 m välillä, saadaan seuraavasta yhtäöstä:

$$\lambda_{s,1} (L) = \lambda_{s,1}(2 \text{ m}) + [\lambda_{s,1}(20 \text{ m}) - \lambda_{s,1}(2 \text{ m})] * (\log L - 0,3)$$

## Yksiaukkoiset sillat: matkustajajunaliikenne

Aikajakso	$L \leq 2$	$2 < L < 5$	5,00	$5 < L < 20$	20,00	$20 < L < 35$	$L \geq 35$
1900–1924	0,53	0,5832-0,0266*L	0,45	0,4534-0,0017*L	0,42	0,4224-0,0012*L	0,38
1925–1949	0,59	0,6432-0,0266*L	0,51	0,51	0,51	0,5124-0,0012*L	0,47
1950–1974	0,68	0,72-0,02*L	0,62	0,6244-0,0022*L	0,58	0,5830-0,0015*L	0,53
1975–1999	0,80	0,96-0,08*L	0,56	0,5688-0,0044*L	0,48	0,48	0,48
2000–2024	0,80	0,96-0,08*L	0,56	0,5612-0,0011*L	0,54	0,54	0,54
2025–2049	0,85	0,9832-0,0666*L	0,65	0,6556-0,0028*L	0,60	0,60	0,60

**Jatkuvat palkit, reunajänne: matkustajajunaliikenne**

Aikajakso	L ≤ 2	2 < L < 5	5,00	5 < L < 20	≥ 20
1900–1924	0,48	0,5466-0,0333*L	0,38	0,38	0,38
1925–1949	0,56	0,6266-0,0333*L	0,46	0,46	0,46
1950–1974	0,61	0,6766-0,0333*L	0,51	0,51	0,51
1975–1999	0,70	0,8266-0,0633*L	0,51	0,5222-0,0061*L	0,40
2000–2024	0,75	0,8166-0,0333*L	0,65	0,6722-0,0111*L	0,45
2025–2049	0,80	0,8666-0,0333*L	0,70	0,7166-0,0083*L	0,55

**Jatkuvat palkit, välituen alue: matkustajajunaliikenne**

Aikajakso	L ≤ 2	2 < L < 5	5,00	5 < L < 20	≥ 20
1900–1924	0,46	0,5266-0,0333*L	0,36	0,3688-0,0044*L	0,28
1925–1949	0,65	0,7166-0,0333*L	0,55	0,5712-0,0106*L	0,36
1950–1974	0,70	0,7666-0,0333*L	0,60	0,6266-0,0133*L	0,36
1975–1999	0,70	0,7666-0,0333*L	0,60	0,6288-0,0144*L	0,34
2000–2024	0,75	0,8366-0,0433*L	0,62	0,6444-0,0122*L	0,40
2025–2049	0,80	0,9-0,05*L	0,65	0,6666-0,0083*L	0,50

**Jatkuvat palkit, keskikenttä: matkustajajunaliikenne**

Aikajakso	L ≤ 2	2 < L < 5	5,00	5 < L < 20	≥ 20
1900–1924	0,49	0,5566-0,0333*L	0,39	0,39	0,39
1925–1949	0,55	0,6166-0,0333*L	0,45	0,45	0,45
1950–1974	0,60	0,6666-0,0333*L	0,50	0,50	0,50
1975–1999	0,75	0,8834-0,0667*L	0,55	0,5634-0,0067*L	0,43
2000–2024	0,80	0,8666-0,0333*L	0,70	0,7222-0,0111*L	0,50
2025–2049	0,85	0,9166-0,0333*L	0,75	0,7778-0,0139*L	0,50

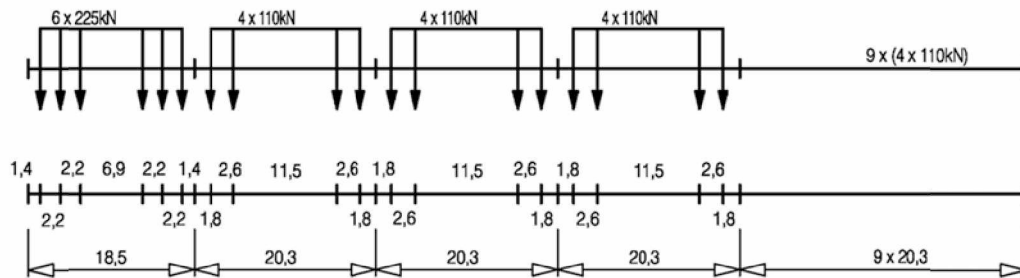
Vaaleansininen solun taustaväri = Arvo on arvio



# Eurokoodin lambda-arvojen laskennassa käytetyt mitoitusjunat

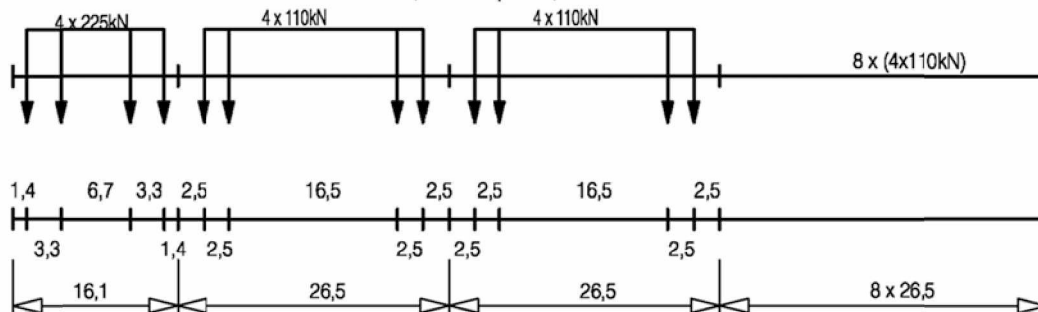
## Tyyppi 1 Veturin vetämä henkilöliikenteen juna

$$\Sigma Q = 6\,630 \text{ kN} \quad V = 200 \text{ km/h} \quad L = 262,10 \text{ m} \quad q = 25,3 \text{ kN/m}$$



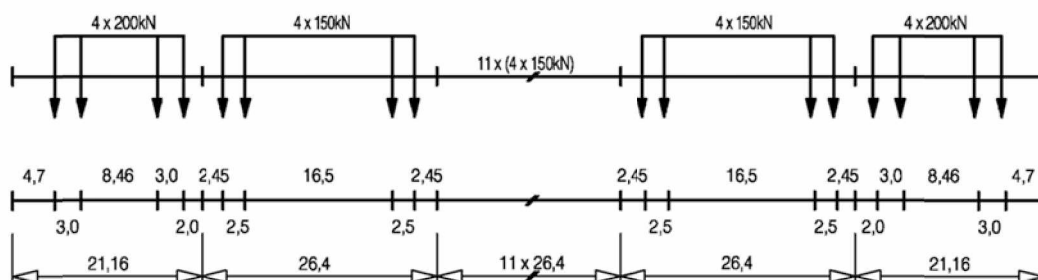
## Tyyppi 2 Veturin vetämä henkilöliikenteen juna

$$\Sigma Q = 5\,300 \text{ kN} \quad V = 160 \text{ km/h} \quad L = 281,10 \text{ m} \quad q = 18,9 \text{ kN/m}$$



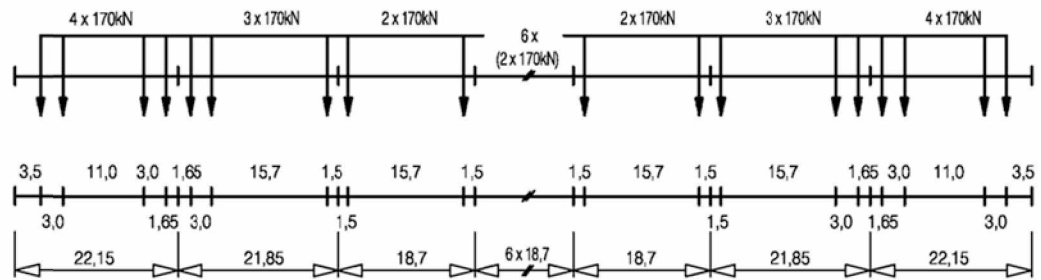
## Tyyppi 3 Nopea henkilöliikenteen juna (suurnopeusjuna)

$$\Sigma Q = 9\,400 \text{ kN} \quad V = 250 \text{ km/h} \quad L = 385,52 \text{ m} \quad q = 24,4 \text{ kN/m}$$



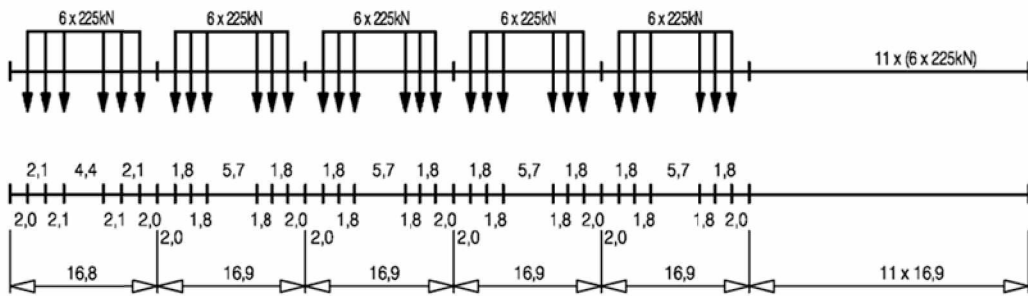
**Tyyppi 4** Nopea henkilöliikenteen juna (suurnopeusjuna)

$\Sigma Q = 5\,100\text{ kN}$   $V = 250\text{ km/h}$   $L = 237,60\text{ m}$   $q = 21,5\text{ kN/m}$



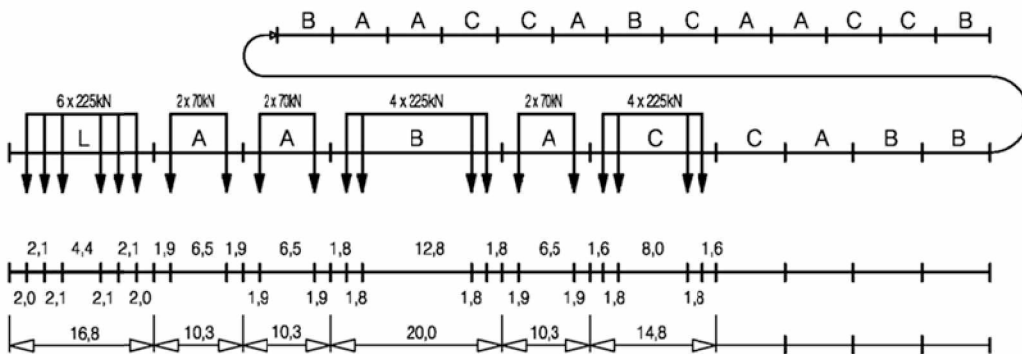
**Tyyppi 5** Veturin vetämä tavarajuna

$\Sigma Q = 21\,600\text{ kN}$   $V = 80\text{ km/h}$   $L = 270,30\text{ m}$   $q = 80,0\text{ kN/m}$



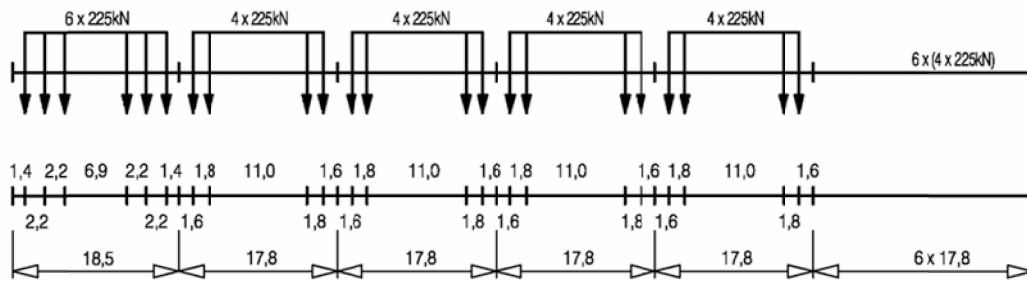
**Tyyppi 6** Veturin vetämä tavarajuna

$\Sigma Q = 14\,310\text{ kN}$   $V = 100\text{ km/h}$   $L = 333,10\text{ m}$   $q = 43,0\text{ kN/m}$



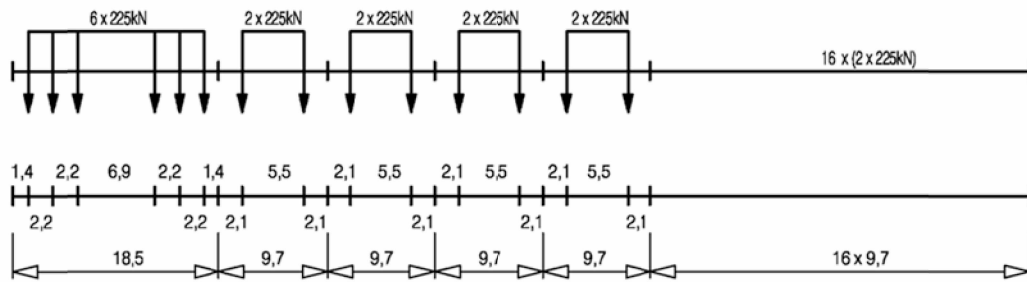
**Tyyppi 7** Veturin vetämä tavarajuna

$\Sigma Q = 10\,350\text{ kN}$   $V = 120\text{ km/h}$   $L = 196,50\text{ m}$   $q = 52,7\text{ kN/m}$



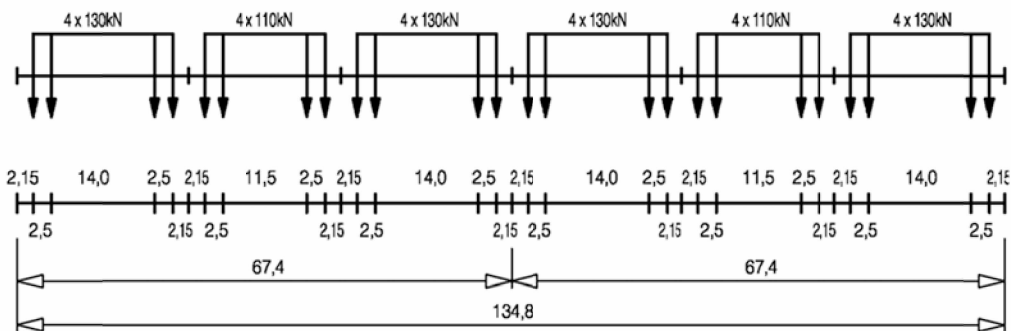
**Tyyppi 8** Veturin vetämä tavarajuna

$\Sigma Q = 10\,350\text{ kN}$   $V = 100\text{ km/h}$   $L = 212,50\text{ m}$   $q = 48,7\text{ kN/m}$



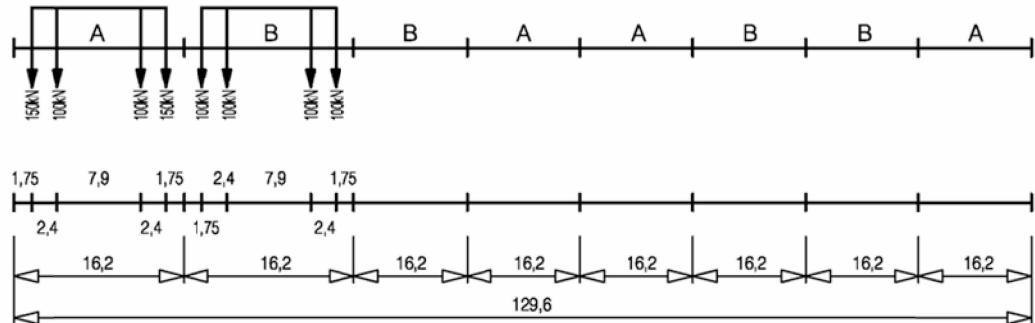
**Tyyppi 9** Useasta yksiköstä koostuva lähijuna.

$\Sigma Q = 2\,960\text{ kN}$   $V = 120\text{ km/h}$   $L = 134,80\text{ m}$   $q = 22,0\text{ kN/m}$



**Tyyppi 10** Metrojuna

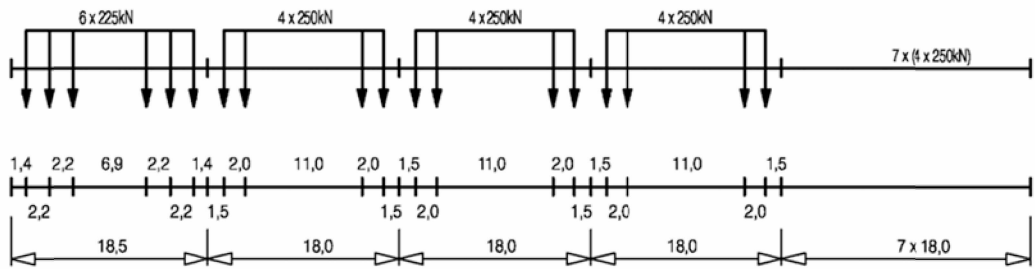
$$\Sigma Q = 3\,600 \text{ kN} \quad V = 120 \text{ km/h} \quad L = 129,60 \text{ m} \quad q = 27,8 \text{ kN/m}$$



(2) Raskas liikenne 250 kN akselein

**Tyyppi 11** Veturin vetämä tavarajuna

$$\Sigma Q = 11\,350 \text{ kN} \quad V = 120 \text{ km/h} \quad L = 198,50 \text{ m} \quad q = 57,2 \text{ kN/m}$$

**Tyyppi 12** Veturin vetämä tavarajuna

$$\Sigma Q = 11\,350 \text{ kN} \quad V = 100 \text{ km/h} \quad L = 212,50 \text{ m} \quad q = 53,4 \text{ kN/m}$$

