

Siltojen kantavuuslaskentaohje



Siltojen kantavuuslaskentaohje

Liikenneviraston ohjeita 36/2015

Kannen kuva: Mikko Vuorsalo

Verkojulkaisu pdf (www.liikennevirasto.fi)

ISSN-L 1798-663X

ISSN 1798-6648

ISBN 978-952-317-196-1

Liikennevirasto

PL 33

00521 HELSINKI

Puhelin 029 534 3000

Tekniikka ja ympäristö -osasto

Vastaanottaja
ELY-keskus / Liikenne- ja infrastruktuuri
Liikennevirasto / Väylänpito
Siltakonsultit

Voimassa
1.2.2016 alkaen toistaiseksi

Korvaa
Siltojen kantavuuden laskentaohje, TIEL 2170005
RSO 9 Rautatiesiltojen kantavuuden laskentaohje

Asiasanat
Ohjeet, sillat, taitorakenteet, laskelmat, rakennelaskelmat, kantavuus

Siltojen kantavuuslaskentaohje

Liikenneviraston ohjeita 36/2015

Tätä ohjetta käytetään olemassa olevien tie- ja rautatiesiltojen kantavuuden selvittämiseksi laskennallisesti. Ohjetta ei käytetä uusien siltojen suunnittelussa. Ohjetta voidaan kuitenkin soveltaa olemassa olevien alusrakenteiden rakenteellisen ja geoteknisen kantavuuden määrittämiseen, kun sillan päällysrakenne uusitaan.

Ohjetta sovelletaan eurokoodijärjestelmässä ja siinä on otettu huomioon ajoneuvoasetukseen 1.10.2013 tehdyt muutokset.

Tämä ohje korvaa aikaisemman 17.12.1992 päivätyn Siltojen kantavuuden laskentaohjeen (TIEL 2170005) ja 21.5.2002 päivätyn RSO 9 Rautatiesiltojen kantavuuden laskentaohjeen (RSO 9).

Ylijohtaja



Mirja Noukka

Tekninen johtaja



Markku Nummelin

LISÄTIETOJA
Heini Raunio
Liikennevirasto
puh. 0295 34 3108

Esipuhe

Tässä ohjeessa esitetään ohjeet ja menetelmät olemassa olevien tie- ja rautatie-siltujen kantavuuden selvittämiseksi laskennallisesti. Ohje on laadittu huomioiden eurokoodit, niiden siltuja koskevat kansalliset liitteet ja soveltamisohjeet ja siinä on otettu huomioon ajoneuvoasetukseen 1.10.2013 tehdyt muutokset.

Ohjeen sisältö on laadittu siten, että sillan todellinen kantavuus saataisiin hyödynnettyä mahdollisimman tarkasti sillan kunto ja jäljellä oleva käyttöikä huomioiden. Ohjetta ei saa käyttää uusien siltujen suunnittelussa.

Tämä ohje on laadittu Liikenneviraston sekä Helsingin, Espoon ja Tampereen kaupunkien tilaamana konsulttityönä Siltanylund Oy:ltä, A-insinöörit Oy:ltä ja VR Track Oy:ltä.

Ohjeen laatimista on ohjannut asiantuntijaryhmä, jonka jäseninä ovat olleet:

- Anssi Laaksonen ja Jari Nousiainen A-Insinöörit Oy:stä
- Vesa Rönty Espoon kaupungilta
- Timo Rytönen ja Eero Sihvonen Helsingin kaupungista
- Heikki Lilja, Jani Meriläinen, Olli Pyykönen, Heini Raunio ja Panu Tolla Liikennevirastosta
- Hannu Hänninen ja Jari Sutela Siltanylund Oy:stä
- Petri Kantola Tampereen kaupungista
- Heikki Komulainen, Ilkka Sinisalo ja Janne Wuorenjuuri VR Track Oy:stä

Ohjeen kirjoitustyöhön ovat osallistuneet seuraavat henkilöt:

- Olli Asp, Anssi Laaksonen ja Joonas Tulonen A-Insinöörit Oy:stä
- Heikki Lilja, Jani Meriläinen, Olli Pyykönen, Heini Raunio ja Panu Tolla Liikennevirastosta
- Hannu Hänninen ja Jari Sutela Siltanylund Oy:stä
- Antti Artukka, Ilkka Sinisalo ja Janne Wuorenjuuri VR Track Oy:stä

Tampereella tammikuussa 2016

Liikennevirasto
Taitorakenneyksikkö

Sisällysluettelo

1	YLEISTÄ	7
1.1	Käsitteet	8
1.2	Ohjeen tarkoitus ja soveltamisala	10
1.3	Raskaat kuljetukset teillä ja kaduilla	11
1.4	Raskaat kuljetukset rautateillä	12
1.5	Kantavuuslaskennan laadunvarmistus	12
1.6	Kantavuuslaskennan luottamuksellisuus	12
2	MATERIAALIT	13
2.1	Yleistä	13
2.2	Betoni	13
2.3	Betoniteräs	14
2.4	Jänneteräs	16
2.5	Rakenneteräs	16
2.6	Puu	18
2.6.1	Sahatavaran lujuusluokat ja mitoitusarvot	20
2.6.2	Liimapuun lujuusluokat ja mitoitusarvot	22
2.7	Kivi	23
3	KUORMAT	24
3.1	Yleistä	24
3.2	Pysyvät kuormat	24
3.3	Luonnonkuormat	25
3.3.1	Lämpötilakuormat	25
3.4	Tie- ja katusiltojen liikennekuormat	25
3.4.1	Ajoneuvoasetuksen mukaiset kuormat	25
3.4.2	Erikoiskuljetuskaaviot	27
3.4.3	Vaakasuuntaiset kuormat	29
3.4.4	Liikenteen aiheuttama maanpaine	30
3.4.5	Väsyttävät kuormat	30
3.5	Rautatiesiltojen liikennekuormat	30
3.5.1	Pystysuorat kuormat	30
3.5.2	Dynaaminen suurennuskerroin	32
3.5.3	Vaakasuuntaiset kuormat	33
3.5.4	Liikenteen aiheuttama maanpaine	33
3.5.5	Väsyttävät kuormat	33
3.6	Laakerikitka	34
4	KUORMIEN YHDISTELY	35
4.1	Yleistä	35
4.2	Murtorajatila (Ultimate Limit State ULS)	35
4.2.1	Pysyvät kuormat	36
4.2.2	Muuttuvat kuormat	37
4.2.3	Tie- ja katusiltojen liikennekuormat	37
4.2.4	Rautatiesiltojen liikennekuormat	38
4.3	Käyttörajatila (SLS)	38
4.4	Kuormien yhdistelykertoimet	39
4.4.1	Yleistä	39
4.4.2	Pysyvien ja muuttuvien kuormien yhdistelykertoimet	39
4.4.3	Tie- ja katusiltojen liikennekuormien yhdistelykertoimet	40

4.4.4	Rautatiesiltöjen liikennekuormien yhdistelykertoimet.....	41
5	RAKENNEANALYYSI	43
5.1	Yleistä	43
5.2	Rakenteen mallintaminen	43
5.2.1	Yleistä.....	43
5.2.2	Pintakuormien jakaantuminen	43
5.3	Betonisillat.....	44
5.3.1	Palkkisillan tukimomentin pyöröstys	45
5.3.2	Laattasillan tukimomentin tasaus.....	45
5.3.3	Momenttien uudelleen jakaminen.....	45
5.3.4	Laattasillan vääntömomentin jakaminen	46
5.4	Muut sillat	46
5.5	Yksittäiset rakenneosat ja liitokset	47
5.6	Puupaalurakenteet	47
5.7	Vaurioitunut rakenne	47
5.7.1	Yleistä.....	47
5.7.2	Betonirakenteet	47
5.7.3	Teräsrakenteet.....	48
5.7.4	Puurakenteet.....	48
5.7.5	Kivirakenteet.....	49
6	MITOITUS MURTORAJATILASSA	50
6.1	Yleistä	50
6.2	Vähimmäisraudoitemäärä.....	50
6.3	Betonirakenteen leikkaus ja lävistys.....	50
6.4	Betonirakenteen vääntö	51
6.5	Väsyminen.....	51
6.6	Teräsniihtien esijännitysvoima.....	52
6.7	Sillan alusrakenteiden geotekninen kantokestävyys.....	53
7	MITOITUS KÄYTTÖRAJATILASSA.....	55
7.1	Yleistä	55
7.2	Betonirakenteen jännitysten ja halkeamaleveyksien rajoittaminen	55
7.3	Taipumat	56
7.4	Alusrakenteiden geotekninen kantokestävyys.....	57
7.5	Laakereiden kantavuus	57
8	LASKELMIEN JA TULOSTEN ESITYS.....	59
8.1	Sillan lähtötiedot	59
8.2	Laskennan lähtötiedot	59
8.3	Rakenneanalyysi.....	60
8.4	Mitoitus.....	60
8.5	Yhteenvedo	60
	VIITELUETTELO	61

LIITTEET

- Liite 1 Teräspalkkibetoniset laattasillat
- Liite 2 Sillan painorajoituksen määrittäminen
- Liite 3 Luotettavuusanalyysin ja tilastollisten menetelmien käyttäminen siltojen kantavuuslaskennassa
- Liite 4 Betonisten rautatiesiltojen jäljellä olevan käyttöiän arviointi
- Liite 5 Kuvaajat eri aikakausien suunnittelukuomien ja vuoden 2013 ajoneuvo-asetuskuorman taivutusmomenttien suhteista
- Liite 6 Kantavuuslaskentaan liittyviä prosessikaavioita

1 Yleistä

1.1 Käsitteet

Dynaaminen suurennuskerroin (=sysäyskerroin)

Dynaamisella suurennuskertoimella huomioidaan dynaaminen suurennusvaikutus ja värähtelyn vaikutukset, mutta ei resonanssivaikutuksia.

Yliraskas erikoiskuljetus

Tiekuljetus, joka ylittää ajoneuvoasetuksen mukaiset painot.

Erikoistarkastus

Silmämääräistä yleistarkastusta täydentävä sillan tai yksittäisten rakenneosien perusteellinen tarkastus erikoistutkimusmenetelmin ja -laittein tehtävine näytteenottoineen.

Jäljellä oleva käyttöikä

Aika, jona rakenteen ominaisuudet säilyvät vaadittavalla tasolla edellyttäen, että rakennetta ylläpidetään asianmukaisesti. Voidaan myös arvioida rakenteen suunnittelukäyttöiän ja todellisen iän välisenä erotuksena.

Jännitysvaihteluväli

Kahden äärimmäisen yksittäisen jännityshistoriasta määritettävän jännitysjakson arvojen välinen erotus.

Kiinteä kallio

Harva- tai vähärakoinen kallio, jonka raot ovat tiiviitä ja kivi on rapautumatonta tai vähän rapautunutta ja jossa rakojen suuntautuneisuus ei heikennä kallion vakavuutta.

Kestävyys

Rakenteen tai rakenneosan suurin mahdollinen rasitus, jolla sallitut rajatilan arvot saavutetaan.

Käyttöaste

Rakenteen tai rakenneosan käyttö- tai murtorajatilan rasituksen suhde kyseisen rakenteen tai rakenneosan kestävyYTEEN.

Käyttöikä

Ajanjakso, jonka ajan rakenteen ominaisuudet säilyvät rakenteelta vaadittavalla tasolla edellyttäen, että rakennetta pidetään asianmukaisesti kunnossa.

Luotettavuustaso

Taso, jossa rakenne tai rakenneosa täyttää sille asetetut vaatimukset. Luotettavuus kattaa rakenteen varmuuden, käyttökelpoisuuden ja säilyvyyden.

Mitoitusarvo

Ominaisarvo, joka on kerrottu (kuormat) tai jaettu (kestävyydet) osavarmuusluvulla.

Ominaisarvo

Perusarvo, jota ei ole kerrottu osavarmuusluvulla.

Peruskorjaus

Kokonaiskorjaus, jossa kaikki vaurioituneet ja kuluneet rakenneosat kunnostetaan tai uusitaan ja sillan rakenteellinen ja toiminnallinen kunto palautetaan alkuperäisen käyttöiän edellyttämälle tasolle.

Rakenneanalyysi

Menettely, jolla määritetään kuormien vaikutukset rakenteen jokaisessa pisteessä.

Suunnittelukäyttöikä

Ajanjakso, jonka ajan rakenteen ominaisuudet säilyvät rakenteelta vaadittavalla tasolla 95 % todennäköisyydellä edellyttäen, että rakennetta pidetään asianmukaisesti kunnossa.

Suunnitteluperuste

Määräys, vaatimus tai tekninen arvo, jota noudatetaan kohteen suunnittelussa.

Väsymisluokka

Yksittäiselle rakenneyksityiskohdalle annettu luokitus sen osoittamiseksi, mikä väsymislujuuden käyrä soveltuu väsymisen arviointiin. Väsymisluokan numero vastaa väsymislujuuden referenssiarvoa $\Delta\sigma_c$.

Väsyttävä ominaisjuna

Kuvaa rautateiden sekaliikenne radan junaliikennettä Suomessa.

1.2 Ohjeen tarkoitus ja soveltamisala

Tätä ohjetta käytetään olemassa olevien tie-, rautatie- ja katusiltöjen kantavuuden laskennallisessa määrittäyksessä tavanomaiselle liikenteelle tai erikoiskuljetuksille.

Ohjeessa esitetään tie-, katu- ja rautatiesillat yleisesti siltana, ellei kyseinen kohta koske erikseen tietyn väylätyyppin siltää.

Ohjetta ei voi käyttää uusien tai uusittavien siltöjen mitoituksessa. Ohjeen tarkastelut ja luotettavuustaso poikkeavat suurelta osin uudissiltöjen suunnittelun mukaisista. Ohjetta voidaan kuitenkin soveltaa olemassa olevien sillan alusrakenteiden rakenteellisen ja geoteknisen kantavuuden määrittämiseen, kun sillan päällysrakenne uusitaan. Tässä ohjeessa pyritään määrittelemään sillan kantavuus huomioimalla materiaalien käyttäytyminen ja kuormitus mahdollisimman tarkasti ja hyväksymällä uudiskohteita alempi varmuustaso.

Ohjeessa määritellään siltöjen kantavuuslaskennan rajatilatarkastelun laajuus, voimasuureiden laskeminen, kuormien yhdistely sekä rajatilatarkastelujen periaatteet. Ohjeessa esitetyt laskentaperiaatteet koskevat pääasiassa siltöjä, joissa ei ole kantavuuteen vaikuttavia vaurioita. Siltöjen vaurioita voi ottaa huomioon kohdan 5.7 mukaisesti.

Jos jotain asiaa ei ole tässä ohjeessa käsitelty, niin noudatetaan muita Liikenneviraston ohjeita ja eurokoodeja. Muiden ohjeiden käytöstä on neuvoteltava tilaajan kanssa.

Tilaaaja määrittää sillan kantavuuslaskennan laajuuden ja käytettävät liikennekuormat kohdekohtaisesti. Laskennan laajuus jaetaan kahteen tarkastelutasoon:

1. Jos sillan oma paino ei ole merkittävästi muuttunut, vertaillaan kantavuuslaskennassa suunnittelun aikaisten ja kantavuuden määrittämisessä käytettävien liikennekuormien päävoimasuureita (momentit ja leikkausvoimat sekä kokonaistukireaktiot) keskenään. Voimasuureiden vertailuissa otetaan huomioon osavarmuusluvut ja kuorman sysäyskerroin tai kuorman dynaaminen suurenuskerroin. Suunnittelun aikaiset kertoimet ovat alkuperäisen mitoituksen mukaisia ja tarkasteltavien liikennekuormien kertoimet tämän ohjeen mukaisia. Väsytystä ei oteta huomioon.
2. Voimasuureet lasketaan tarkalla rakennemallilla (FEM tai vastaava) huomioiden rakenteiden todelliset mitat ja kuormat. Kaikki kriittiset rakenneosat mitoitetaan. Sillasta tehtyjä tutkimuksia ja koekuormituksia hyödynnetään kantavuuslaskennan lähtötietoina.

Tämä ohje käsittelee pääasiassa tarkastelutasoa 2.

Luotettavuusanalyysiä voidaan käyttää vaihtoehtoisena tarkastelumenetelmänä siltöjen kantavuuslaskennassa (liite 4). Siltöjen kantavuuksia voidaan selvittää myös koekuormituksilla.

Liitteessä 8 on esitetty prosessikaaviot silloilla sallittujen akselipainojen määrittämiseksi.

1.3 Raskaat kuljetukset teillä ja kaduilla

Siltojen kantavuuslaskennassa käytettävät kuormakaaviot perustuvat Suomessa yleisesti tie- ja katusilloilla kulkevaan raskaaseen kalustoon. Silloilla voi ilman erikoislupaa ajaa ajoneuvoasetuksen mukaisilla ajoneuvoilla. Siltojen kantavuuslaskennassa käytettävät asetuksen mukaisia ajoneuvoja edustavat kuormakaaviot on esitetty tarkemmin kohdassa 3.4.1. Oikeusministeriön oikeudellisen aineiston internet-sivuilla osoitteessa www.finlex.fi on julkaistu asetus ajoneuvojen käytöstä tiellä 4.12.1992/1257.

Painorajoitus määritetään silloille, jotka eivät kantavuuslaskennan perusteella kestä ajoneuvoasetuksen mukaista kuormaa. Painorajoituksen määrittämisen pääperiaatteet on esitetty liitteessä 3.

Erikoiskuljetuslupaa on haettava, jos kuljetus ylittää ajoneuvoasetuksen mukaiset mitat tai painot. Tällöin kyseessä on ns. ylimitallinen erikoiskuljetus tai ylraskas erikoiskuljetus. Tässä ohjeessa käsitellään ylraskaita erikoiskuljetuksia, joista käytetään vain termiä erikoiskuljetus.

Suomessa erikoiskuljetusluvut myöntää Pirkanmaan ELY-keskus Ahvenanmaata lukuun ottamatta. Erikoiskuljetuslupia on kahdentyyppisiä: /38/

- Reittikohtainen lupa myönnetään hakemuksessa ilmoitetun lähtö- ja määräpaikan välille. Reitti kuvataan käyttäen tienumeroita sekä paikkakuntien ja liittymien nimiä.
- Reitistöluvassa on valmiiksi määritelty rajoituksineen tiet ja/tai alueet, joilla kyseisellä luvalla saa liikkua. Reitistöissä on annettu myös korkeusrajoituksia sekä lueteltu siltoja, joita ei saa ylittää.

Pirkanmaan ELY-keskus myöntää erikoiskuljetukselle luvan ylittää silta Liikenneviraston määrittämällä ehdoilla. Liikennevirasto määrittää sillan ylittämisen ehdot sillan kunnon perusteella, olemassa olevien kantavuusarvojen perusteella, kantavuuslaskennan perusteella, vertaamalla erikoiskuljetusta vastaavan tyyppisten siltojen sallittuihin kantavuusarvoihin tai vertaamalla kuljetusta sillan suunnittelukuormaan.

Erikoiskuljetus voidaan suorittaa:

- *kertakuljetuksena*, joka voi ylittää sillan yhden kerran erillisellä luvalla ja sillalla voi olla myös muuta liikennettä samaan aikaan
- *reitistökuljetuksena*, joka voi ylittää sillan useamman kerran luvan voimassaoloaikana ja sillalla voi olla myös muuta liikennettä samaan aikaan
- *valvottuna kuljetuksena*, joka voi ylittää sillan kerran päteväen henkilön valvonnassa ajamalla sillan edullisinta ajolinjaa pitkin eikä sillalla ole muuta liikennettä samaan aikaan.

Siltojen kantavuuslaskennassa erikoiskuljetuksen tyyppikaavioille (erikoiskuljetuskaavio) määritetään suurin sallittu akselipaino kertakuljetuksena, reitistökuljetuksena sekä valvottuna kuljetuksena. Siltojen kantavuuksia lasketaan myös erikseen määritettävälle erikoiskuljetuksille, kun kuljetusta ei voida verrata tyyppikaavioon.

1.4 Raskaat kuljetukset rautateillä

Liikkuvan kaluston suurin sallittu akselipaino määräytyy ratalinjoittain Rautateiden verkkoselostuksen mukaisesti. Vaunu on ylraskas kyseiselle rataosuudelle, jos vaunun akselipaino ylittää rataosuuksille ilmoitetun suurimman akselipainon. Ylraskaat erikoiskuljetukset voivat tulla kysymykseen satunnaisen tarpeen vuoksi. Luvan erikoiskuljetukseen myöntää Liikennevirasto. Tilapäisestä ylraskaasta kuljetuksesta on ilmoitettava radan kunnossapitäjälle ja rataisännöitsijälle päällysrakenteen kunnan tarkkailemiseksi.

Raskaimmat rautateiden erikoiskuljetukset tehdään Suomessa Osg-vaunulla (ks. kohta 3.5.1). Muita erikoiskuljetuksia ovat SECU-konttien kuljetukset ja yhdistetyt kuljetukset. Näissä kuljetuksissa käytetään neliakselisia vaunuja, joiden suurin akselipaino on 250 kN.

Erikoiskuljetukset rautateillä liittyvät enemmän kuljetusten mittoihin ja ulottumaan kuin kuormiin. Erikoiskuljetuksille tehdään aina erillinen ulottumatarkastelu, jotta voidaan varmistua raiteella olevasta riittävästä tilasta. Kuormaulottumalla tarkoitetaan sitä tilaa, jonka sisällä avovaunussa olevan kuorman on pysyttävä vaunun ollessa keskiasennossa suoralla tasaisella raiteella. Ellei kuorma mahdu kuormaulottuman sisälle, puhutaan rautateiden erikoiskuljetuksista.

1.5 Kantavuuslaskennan laadunvarmistus

Liikenneviraston kantavuusasiantuntija hyväksyy kaikki valtion omistamien ja rahoitettujen siltojen kantavuuslaskennat. Laskelmien laadinnassa tulee käyttää huolellista sisäistä laadunvarmistusta, jossa tarkastelun vastaavalla henkilöllä tulee olla Liikenneviraston vaatima tarkasteltavan sillan päärakennetyypin mukainen suunnittelijapätevyys. Laadunvarmistuksesta tulee tehdä Liikenneviraston julkaisun Taitorakenteiden rakennussuunnitelmien tarkastus liitteen 1 mukainen dokumentti /37/. Tarvittaessa tilaaja voi käyttää ulkoista tarkastusta.

1.6 Kantavuuslaskennan luottamuksellisuus

Siltojen kantavuustiedot ovat luottamuksellisia, eikä niitä saa luovuttaa kolmansien osapuolten haltuun. Valtion silloilla kantavuustietoja hallinnoi Liikennevirasto, eivätkä muut toimijat saa pitää kyseisiä kantavuustietoja hallussaan. Kantavuustietoja ei saa luovuttaa myöskään yksityiselle tilaajalle, kuten kuljetusyritykselle.

Salassapidosta on säädetty ”Laissa viranomaisen toiminnan julkisuudesta” 21.5.1999/621, 24 §:n momentissa 10.

2 Materiaalit

2.1 Yleistä

Siltojen kantavuuslaskennoissa käytetään eurokoodien mukaisia materiaalien merkintöjä, ominaisuuksia ja mitoitusarvoja, ellei tässä ohjeessa ole mainittu toisin. Tässä on esitetty merkintöjen vastaavuudet vanhoihin ohjeisiin ja poikkeamat osavarmuuslukuihin.

Loppuun käytettävällä hyväkuntoiseksi todetulla sillalla materiaalien osavarmuuslukuja voidaan pienentää tämän ohjeen mukaisesti. Jos silta alkaa lähestyä käyttökänsä loppua ja peruskorjaus ei ole perusteltu ratkaisu, voidaan silta käyttää loppuun. Luotettavuustason alentaminen edellyttää sillan asianmukaista seuranta vaurioiden hallitsemattoman etenemisen välttämiseksi.

Alus- ja pohjarakenteiden materiaaliominaisuuksia arvioitaessa on otettava huomioon rakentamisolosuhteet ja mahdollinen lujuuden aleneminen ja materiaalissa tapahtuneet muutokset rakentamisen jälkeen.

2.2 Betoni

Betonisiltojen lujuusluokat määritetään alkuperäisessä suunnitelmassa esitettyjen materiaalien tai rakenteesta otettujen koekappaleiden lujuusarvojen perusteella. Suunnitelmassa olevan betonin lujuuden voidaan otaksua vastaavan eurokoodien mukaista kuutiolujuusluokkaa $f_{ck,cube}$ taulukon 2.1 mukaisesti.

Taulukko 2.1. Betonin lujuusluokituksista vastaavia 28 vrk ikäisiä lujuuksia eri koekappaleilla sekä Suomessa eri aikaan käytössä olevien normien betonien lujuusluokat. /15/

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

Ennen vuotta 1985 rakennettujen betonisiltöjen betonin lujittuminen iän myötä voidaan ottaa huomioon ilman tarkempaa tarkastelua korottamalla vaurioitumattomaksi todetun rakenteen betonin kuutiopuristuslujuutta 5 N/mm². Jos sillalle tehdään tarkempia tutkimuksia ja otetaan koekappaleita, voidaan lujuusluokka valita tarkasteltavan rakenneosan koekappaleiden perusteella Betonisiltöjen korjaussuunnitteluohjeen mukaisesti /35/.

Vanhat betonirakenteen toteutukseen viittaavat luokat A, B ja C vastaavat Suomen rakentamismääräyskokoelman (lyhennetty taulukossa RakMk) osan B4 mukaisia rakenneluokkia 1, 2 ja 3, jotka taas vastaavat nykyisiä eurokoodin mukaisia toteutusluokkia 3, 2 ja 1. Kantavuuslaskennassa voidaan kuitenkin olettaa kaikkien siltarakenteiden kuuluvan toteutusluokkaan 3. Esimerkiksi A-betoni $\sigma_{b28} = 350 = AK\ 350 = K35-1 = C28/35-3$.

Muut betonin lujuus- ja muodonmuutosominaisuudet määritetään Liikenneviraston eurokoodin soveltamisohjeen NCCI 2 mukaisten lujuusluokkien tai sillalla tehtyjen tutkimusten perusteella /2/. Poikkeuksina ovat betonin vetolujuus leikkauksessa, väännössä ja lävistyksessä sekä betonin keskimääräinen taivutusvetolujuus halkeamamomentin laskennassa. Kyseisten lujuuksien ominaisarvojen laskentaperiaatteet on esitetty kohdissa 6.3. ja 7.2.

Betonin osavarmuusluvut määritetään taulukon 2.2 mukaisesti.

Hyväkuntoiseksi todetun loppuun käytettävän sillan betonin osavarmuuslukua γ_c voidaan pienentää arvoon 1,25.

Taulukko 2.2. Betonin osavarmuusluvut.

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

2.3 Betoniteräs

Teräsbetonirakenteissa on jännittämättöminä betoniterästankoina käytetty yleensä kuumavalssattua harjaterästankoa tai sileää pyöröterästankoa. Suomessa käytettävien betoniterästankojen lujuuden, sitkeyden, hitsattavuuden ja tartunnan ominaisuudet ovat vaihdelleet ajan kuluessa.

Ennen 1980-lukua Suomessa yleisesti käytössä olleen harjateräksen lujuusluokka vastaa myötölujuudeltaan 400 MPa terästä. Harjateräksen myötölujuus selviää eri aikakausien merkintöjen numero-osasta (40, 400, 500, 600, 700 jne.). Muut merkinnän osat kertovat pääasiassa teräksen valmistustavasta, hitsattavuudesta ja pinnan kuvioinnista. Harjaterästen esitystavat ovat vaihdelleet vuosien saatossa. 1950- ja 1960-luvuilla lujuusluokan 400 harjateräksen käyttö yleistyi sillanrakentamisessa. Tällöin käytettiin pääasiassa V40 harjaterästä. Vuoden 1965 normien ilmestyttyä käytettiin A40H harjaterästä ja vuoden 1977 normien ilmestyttyä A400H harjaterästä. 1980-luvulla siltojen raudoitukset tehtiin A400H ja A400HW harjaterästangoilla. Lisäksi 1980-luvulla tuli sillanrakentamisessa yleiseen käyttöön myötölujuudeltaan 500 MPa teräs. Lujuusluokan 500 harjateräksenä käytettiin pääasiassa A500H ja A500HW teräksiä. 1990-luvun alun jälkeen siltojen raudoitukset on tehty pääasiassa A500HW harjaterästangoilla. Nykyisin sillansuunnittelussa käytetään betonirakenteiden raudoituksena yleensä standardin EN 10080 mukaisia raudoitteita (A500HW, B500B, B500C1). /2/, /16/

Vanhoissa silloissa on ennen harjateräksen käytön yleistymistä käytetty raudoituksena pääasiassa myötörajaltaan 235 MPa sileää pyöröterästankoa. Ennen vuoden 1965 normien tuloa pyörötankoina käytettiin St 37 terästä (myötölujuus 235 MPa). Vuoden 1965 normien ilmestyttyä tankoina käytettiin A22 (myötölujuus 220 MPa) tai A32 (myötölujuus 320 MPa) terästä ja vuoden 1977 normien ilmestyttyä A220 terästä, joka vastaa A22 terästä. 1980-luvulla ja 1990 luvun alussa käytettiin sileänä pyöröterästankona pääasiassa Fe 37B terästä (myötölujuus 235 MPa). Nykyisin sileää pyöröterästankoa ei käytetä silloissa tankojen huonon tartunnan vuoksi. /16/, /24/

Betoniteräksen osavarmuusluvut määritetään taulukon 2.3 mukaisesti.

Hyväkuntoiseksi todetun loppuun käytettävän sillan betoniteräksen osavarmuuslukua γ_s voidaan pienentää arvoon 1,05.

Taulukko 2.3. Betoniteräksen osavarmuusluvut.

Betoniteräksen osavarmuusluku γ_s	Rakenteen mitat perustuvat suunnitelmiin	Rakenteen mitat on mitattu kantavuuden kannalta kriittisissä kohdissa
Betoniteräsmäärät perustuvat suunnitelmiin. Korroosioasteita ei ole selvitetty.	1,15	1,10
Betoniteräsmäärät ja betonipeitteet on mitattu rakenteesta. Erikoistarkastuksessa havaitut vauriot on huomioitu laskennassa.	1,10	1,05

Väsymismitoituksessa tarvittavat osavarmuusluvut määritetään eurokoodin soveltamisohjeen NCCI 2 mukaisesti. /2/

2.4 Jänneteräs

Jännitetyissä siltarakenteissa on yleensä käytetty yksittäisiä jännitetyjä tankoja tai jännepunoksia. Jänneterästen lujuusmerkinnässä ensimmäinen luku on ennen eurokoodeja ollut 0,2-raja (lujuus 0,2 % venymän kohdalla) ja jälkimmäinen luku jänneteräksen murtolujuus. Nykyisin jänneteräksille esitetään 0,1-raja ja murtolujuus. /2/, /12/, /16/

Jänneteräksen osavarmuusluvut määritetään taulukon 2.4 mukaisesti.

Loppuun käytettävän sillan jänneteräksen osavarmuuslukuun ei sallita pienennyksiä.

Taulukko 2.4. Jänneteräksen osavarmuusluvut.

Jänneteräksen osavarmuusluku γ_s	Rakenteen mitat perustuvat suunnitelmiin.	Rakenteen mitat on mitattu kantavuuden kannalta kriittisissä kohdissa
Ennen vuotta 1980 rakennetut sillat. Jänneteräsmäärät ja sijainnit perustuvat suunnitelmiin. Korroosioastetta ei ole selvitetty.	1,25	1,20
Jänneteräsmäärät ja sijainnit perustuvat suunnitelmiin. Korroosioastetta ei ole selvitetty.	1,15	1,10
Jänneteräsmäärät ja niiden sijainnit on selvitetty rakenteesta luotettavasti. Erikoistarkastuksessa havaitut vauriot ¹⁾ on huomioitu laskennassa.	1,10	1,05

1) Jännitetyistä rakenteista on selvitetty jännemateriaalin mahdolliset vauriot, tyhjätilat, vesivuodot ja mahdollinen vetykorroosion riski. Ankkurointialueiden betonin kunto on selvitetty.

2.5 Rakenneteräs

Suomessa on yleisimmin ollut käytössä siltöjen kantavissa rakenteissa seuraavat teräslaadut /16/:

- Fe 430 C ja D
- Fe 510 C, D ja E
- Fe 355 E (SFS 255) / RAEX 385, vuodesta 1977 lähtien
- Cor-Ten B; vuodesta 1975 lähtien
- S420ML / RAEX 420 ML; vuodesta 1992 lähtien
- S420NL, S355 NL ja S355K2G3 2000-luvulla.

Muita yleisimmin käytettyjä teräslaatuja on esitetty taulukossa 2.5.

Taulukko 2.5 Muita yleisimmin käytettyjä teräslaatuja. /16/

Rakenneosa	Teräslaatu
Muoto- ja levyteräkset	St 37, St 44, St 52
Niitit	St 34, St 41, St 44
Pultit	St 38
Ankkuritangot ja -pultit	St 37
Valurautaosat	GG 14
Teräsvaluosat	GS 45 (Stg 45), GS 52 (Stg 52)
Laakerit ja vastaavat rakenneosat	GG 14, St 37, GS 45, GS 52, St 52, C 35

Taulukossa 2.6 on eri standardien nimikkeistöjen vastaavuudet ja rakenneterästen lujuusluokat sekä iskusitkeydet.

Taulukko 2.6. Rakenneterästen lujuusluokat ja iskusitkeydet sekä eri standardien nimikkeistöjen vastaavuudet. /16/

Seostamattomat rakenneteräkset

Myötö- lujuus	Murto- lujuus	Isku- sitkeys		EN	EN	SFS	SS	DIN	BS	NF
R _{mH} MPa	R _m MPa	KV J	t °C	10025-2 2004	10025:1990 +A1:1993	200 1986		17100 1980	4360 1986	A35-501 1981
235	360-510	27	20	-	S235JR	Fe 37 B	14 13 11-00	St 37-2	40 B	E 24-2
235	360-510	27	20	S235JR	S235JRG2		14 13 12-00	RSt 37-2	40 C	E 24-3
235	360-510	27	0	S235J0	S235J0			St 37-3 U	40 D	E 24-4
235	360-510	27	-20	S235J2+N	S235J2G3	Fe 37 D		St 37-3 N		
235	360-510	27	-20	S235J2	S235J2G4					
275	430-580	27	20	S275JR	S275JR	Fe 44 B	14 14 12-00	St 44-2	43 B	E 28-2
275	430-580	27	0	S275J0	S275J0			St 44-3 U	43 C	E 28-3
275	430-580	27	-20	S275J2+N	S275J2G3	Fe 44 D	14 14 14-00	St 44-3 N	43 D	E 28-4
275	430-580	27	-20	S275J2	S275J2G4		14 14 14-01			
355	510-680	27	20	S355JR	S355JR		(14 21 72-00)		50 B	E 36-2
355	510-680	27	0	S355J0	S355J0	Fe 52 C		St 52-3 U	50 C	E 36-3
355	510-680	27	-20	S355J2+N	S355J2G3	Fe 52 D	(14 21 74-01)	St 52-3 N	50 D	
355	510-680	27	-20	S355J2	S355J2G4					
355	510-680	40	-20	S355K2+N	S355K2G3				50 DD	E 36-4
355	510-680	40	-20	S355K2	S355K2G4					
185	290-510	-	-	S185	S185	Fe 33	14 13 00-00	St 33		A 33
295	470-610	-	-	E295	E295	Fe 50	14 15 50-00 14 15 50-01	St 50-2		A 50-2

Normalisoidut ja normalisointivalssatut hitsattavat hienoraakenneteräkset

Myötö- lujuus	Murto- lujuus	Isku- sitkeys		EN	EN	SFS	SS	DIN	BS	NF
R _{mH} MPa	R _m MPa	KV J	t °C	10025-3 2004	10113-2 1993	250			4360	A36-201
275	350-510	40	-20	S275N	S275N	-	-	StE285	-	-
275	350-510	27	-50	S275NL	S275NL	-	-	TStE285	43EE	-
355	450-630	40	-20	S355N	S355N	Fe 355 C	-	-	-	-
355	450-630	27	-50	S355NL	S355NL	Fe 355 D Fe 355 E	14 21 34-01 14 21 35-01	StE355 TStE355	- 50EE	E355 R E355 FP
420	500-680	40	-20	S420N	S420N	Fe 390 C	-	-	-	-
420	500-680	27	-50	S420NL	S420NL	Fe 390 D Fe 390 E	-	StE420 TStE420	-	E420 R E420 FP
460	530-720	40	-20	S460N	S460N	-	-	StE460	-	E460 R
460	530-720	27	-50	S460NL	S460NL	-	-	TStE460	55EE	E460 FP

Termomekaanisesti valssatut hitsattavat hienoraakenneteräkset

Myötö- lujuus	Murto- lujuus	Isku- sitkeys		EN	EN	SFS	SS	DIN	BS	NF
R _{mH} MPa	R _m MPa	KV J	t °C	10025-4 2005	10113-3 1993	250				
275	350-530	40	-20	S275M	S275M	-	-	-	-	-
275	350-530	27	-50	S275ML	S275ML	-	-	-	-	-
355	430-630	40	-20	S355M	S355M	Fe 355 C	-	-	-	-
355	430-630	27	-50	S355ML	S355ML	Fe 355 D Fe 355 E	-	StE355 TM TStE355 TM	-	-
420	460-680	40	-20	S420M	S420M	Fe 390 C	-	-	-	-
420	460-680	27	-50	S420ML	S420ML	Fe 390 D Fe 390 E	-	StE420 TM TStE420 TM	-	-
460	490-720	40	-20	S460M	S460M	-	-	StE460 TM	-	-
460	490-720	27	-50	S460ML	S460ML	-	-	TStE460 TM	-	-

Ilmastokorroosiota kestävät rakenneteräkset

Myötö- lujuus	Murto- lujuus	Isku- sitkeys		EN	EN	SFS	SS	DIN	BS	NF
R_{mH} MPa	R_m MPa	KV J	t °C	10025-5 2005	10155 1993					
235	350-510	27	0	S235J0W	S235J0W	-	-	-	-	E 24 W 3
235	350-510	27	-20	S235J2W	S235J2W	-	-	WTSt 37-3	-	E 24 W 4
355	450-680	27	0	S355J0W	S355J0W	-	-	-	WR50B	E 36 W B 3
355	450-680	27	-20	S355J2W	S355J2G1W	-	-	-	WR50C	-
355	450-680	27	-20	S355J2W	S355J2G2W	-	-	WTSt 52-3	-	-
355	450-680	40	-20	S355K2W	S355K2G1W	-	-	-	-	E 36 W B 4
355	450-680	40	-20	S355K2W	S355K2G2W	-	-	-	-	-

Vanhan myötölujuutta S235 vastaavan teräsniitin vetomurtolujuudeksi f_{ur} valitaan 400 MPa, ellei tutkimuksin toisin osoiteta.

Rakenneteräksen osavarmuuslukuina käytetään eurokoodin soveltamisohjeen NCCI 4 mukaisia arvoja stabiliteetin ja päarakenteiden liitosten laskennassa /3/. Muissa tapauksissa osavarmuusluvut määritetään taulukon 2.7 mukaan. Hyväkuntoiseksi todetun loppuun käytettävän sillan rakenneteräksen osavarmuusluku on 1,0 ja ennen vuotta 1970 valmistetuilla rakenteilla 1,05. Niitin vetolujuuden osavarmuusluku γ_{M2} on 1,4.

Sillan sekundääriosien liitosten kestävyuden osavarmuusluku γ_{M2} voidaan tarvittaessa pienentää arvoon 1,20, kun liitoksissa ei ole havaittu merkittäviä liitoksen kestävyteen vaikuttavia vaurioita.

Taulukko 2.7 Rakenneteräksen osavarmuusluvut (suluissa ennen vuotta 1970 valmistetut rakenteet).

Rakenneteräksen osavarmuusluku γ_{M0}	Rakenteen mitat perustuvat suunnitelmiin	Rakenteen mitat on mitattu kantavuuden kannalta kriittisissä kohdissa
Rakenteiden kuntoa ei ole selvitetty.	1,10 (1,15)	1,05 (1,10)
Rakenteelle on tehty kattavat tutkimukset. Mm. korroosioaste, liitososien kunto ja väsymisvauriot on tutkittu.	1,05 (1,10)	1,00 (1,05)

Käyttörajatilassa rakenneteräksen osavarmuusluku on 1,0.

Väsytyksimitoituksen laadinnassa jäljellä olevan käyttöiän arvioinnissa käytetään eurokoodin SFS-EN 1993-1-9 taulukon 3.1 mukaisia vaurionsietoperiaatteeseen perustuvia materiaalin osavarmuuslukuja. /30/

2.6 Puu

Nykyisin tie ja katusilloissa on käytössä pääasiassa pyöreää puuta, sahatavaraa liimapuuta ja kertopuuta (viilupuuta). Puusilloja ei yleensä ole suurimpien kuljetusten reiteillä, vaan puusillat sijaitsevat alemmalla tieverkolla ja metsäteillä. Puisten tie- ja katusiltöjen kantavat rakenteet on tehty pääasiassa liimapuusta 1970-luvulta lähtien /17/. Sitä ennen käytettiin sahatavaraa ja pyöreää puuta. Paineekyllästämättömät puusillat ovat vaurioituneet nopeasti lahoamisen vuoksi, mutta painekyllästetyissä puusilloissa käyttöikä on pidempi.

Seuraavassa on keskitytty sahatavarasta, pyöreästä puusta tai liimapuusta tehtyjen kantavien puisten pää- ja sekundäärirakenteiden käsittelyyn. Kertopuiden (Kerto-S, Kerto-Q ja Kerto-T) mitoituksessa käytettävät ominaisuudet selvitetään kohdekohtaisesti.

Puurakenteiden väliset liitokset ja liitoksissa käytetyt materiaalit tulee selvittää tapauskohtaisesti. Liitoksien materiaalien mitoitusarvot on esitetty Liikenneviraston muissa ohjeissa.

1970-luvun alussa käytössä olleissa vanhoissa puunormeissa kosteusluokat jakaantuvat kolmeen ryhmään I, II ja III. 1970-luvun puolivälissä siirryttiin puurakenteiden suunnittelussa käyttämään kosteusluokkia 1-4. Suomen rakentamismääräyskokoelman (RakMk) osan B10 mukaiset kosteusluokat jakaantuvat neljään ryhmään 1-4. Eurokoodeissa on käytetty kosteusluokan tilalla termiä käyttöluokka. Standardin SFS-EN 335 mukaiset käyttöluokat jakaantuvat viiteen ryhmään 1-5. Taulukossa 2.8 on normien välisten kosteusluokkien likimääräiset vastaavuudet. /10/, /14/, /18/, /19/, /26/, /27/

Taulukko 2.8. Normien väliset puun kosteusluokkien ja käyttöluokkien likimääräiset vastaavuudet. /10/, /14/, /18/, /19/

Vanhat normit	Suomen RakMk B10	SFS-EN 335
I	1	1
I	2	2
II	3	3
III	4	4
III	4	5

Käyttöluokka 1 vastaa sisätilassa sijaitsevaa puutavaraa. Puiset kansirakenteet voidaan pääasiassa luokitella eurokoodin mukaisiin käyttöluokkiin 2 tai 3. Eurokoodin soveltamisohjeessa NCCI 5 esitetään lisäohjeita käyttöluokkien 2 ja 3 rakenteista. Puupaalut ja pilarit kuuluvat maan tai makean veden vaikutuksen alaisena käyttöluokkaan 4. Meriveden vaikutukselle altistuvat, enimmäkseen pysyvästi märät puurakenteet kuuluvat käyttöluokkaan 5. Kreosoottikyllästetyille puulle voidaan käyttää yhtä pykälää pienempää käyttöluokkaa kuin suolakyllästetyille puulle. /4/, /10/

Taulukossa 2.9 on aikalukien likimääräiset vastaavuudet normien välillä. Liikennekuorman otaksutaan kuuluvan taulukon 2.9 mukaiseen hetkelliseen aikaluokkaan (kantavuuslaskennassa sillalle ei otaksuta muodostuvan ruuhkatilannetta) /4/.

Taulukko 2.9 Kuormien aikalukien likimääräiset vastaavuudet. /4/, /11/, /19/

Suomen RakMk B10	SFS-EN 1995-1-1	Esimerkkejä kuormista
A	Pysyvä (yli 10 vuotta)	oma paino
A	Pitkäaikainen (6 kuukautta – 10 vuotta)	muuttuvan kuorman pitkäaikaisosuus
B	Keskipitkä (1 viikko – 6 kuukautta)	kosteuden muutos, lumi
B tai C	Lyhytaikainen (alle yksi viikko)	lämpötila, tuuli, työn- aikaiset kuormat
C	Hetkellinen	liikenteen kuormat

Puurakenteiden kantavuuslaskenta suoritetaan käyttäen eurokoodin soveltamisohjetta NCCI 5 tässä esitetyin poikkeuksin /4/. Ennen eurokoodien käyttöönottoa suunniteltujen siltöjen yleisimpien puumateriaalien kantavuuslaskennassa käytettävät ominaisarvot ovat taulukoissa 2.11, 2.12 ja 2.14.

Kantavuuslaskennassa käyttöluokkien 4 ja 5 puurakenteen lujuuden muunnoskerroimien voidaan otaksua olevan noin 0,9-kertaisia käyttöluokan 3 kertoimeen verrattuna $k_{mod,KL4/KL5} = 0,9k_{mod,KL3}$. Käyttöluokkien 4 ja 5 puurakenteen virumalukujen voidaan otaksua olevan noin 1,25-kertaisia käyttöluokan 3 kertoimeen verrattuna, eli $k_{def,KL4/KL5} = 1,25k_{def,KL3}$.

Pyöreän ehyen puutavaran lujuusluokkana voidaan käyttää eurokoodin mukaista lujuusluokkaa C30. /25/

Taulukko 2.10 Puurakenteiden kantavuuslaskennassa käytettävät vanhojen normien ja eurokoodien merkintöjen väliset vastaavuudet.

	RakMk B10	NCCI 5
Taivutus	f_{bk}	$f_{m,k}$
Puristus	f_{ck}	$f_{c,0,k}$
	$f_{c\perp k}$	$f_{c,90,k}$
Veto	f_{tk}	$f_{t,0,k}$
	$f_{t\perp k}$	$f_{t,90,k}$
Leikkaus	f_{vk}	$f_{v,k}$
	$f_{v\perp k}$	$f_{v,90,k}$
Kimmokerroin	E_k	$E_{0,05}$
	\bar{E}	E_{mean}
	\bar{E}_{\perp}	$E_{90,mean}$
Liukkerroin	\bar{G}	G_{mean}
	G_k	$G_{0,05}$

2.6.1 Sahatavaran lujuusluokat ja mitoitusarvot

Sahatun puun lujuusluokkien merkintätavat ovat vaihtuneet vuosien saatossa.

Taulukko 2.11 Ennen vuotta 2000 rakennettujen siltöjen sahatavaran materiaaliominaisuudet eurokoodin mukaisessa kantavuuslaskennassa.

Materiaaliominaisuudet Lujuusluokka	Ennen vuotta 2000 rakennettu			
	T40	T30	T24	T18
Lujuuksien ominaisarvot [N/mm ²]				
Taivutus $f_{m,k}$	30	25	20	15
Veto $f_{t,0,k}$	19,5	16,0	13,0	8,0
	$f_{t,90,k}$	0,4	0,4	0,4
Puristus $f_{c,0,k}$	24	21	18	14
	$f_{c,90,k}$	2,6	2,5	2,3
Leikkaus $f_{v,k}$	3,6	3,6	3,6	3,0
	$f_{v,90,k}$	3,4	3,4	3,4

Jäykkyöksien ominaisarvot [N/mm ²]					
Kimmomoduuili	E_{mean}	12000	10500	9500	7500
	$E_{0,05}$	8000	7000	6400	5000
	$E_{90,mean}$	400	350	320	250
Liukumoduuli	G_{mean}	740	650	590	470
	$G_{0,05}$	500	440	400	320
Tiheyksien ominais- ja keskiarvot [kg/m ³]					
Ominaistiheys	ρ_k	400	380	350	320
Keskiarvotiheys	ρ_{mean}	480	460	420	380

1960 ja 1970 luvuilla puurakenteiden normeissa käytettiin sallittuja jännityksiä ja lujuusluokat merkittiin yksiköllä kp/cm² (1 kp/cm² = 0,1 N/mm²). 1970-luvun puolivälistä lähtien lujuusluokat on merkitty yksiköllä N/mm². Eurokoodeissa käytetään sahatavaran lujuusluokan kirjaintunnukselle merkintää C. Eurokoodien mukaiset materiaaliominaisuudet on esitetty eurokoodien soveltamisohjeessa NCCI 5 ja standardissa SFS-EN 338. /4/, /9/, /11/, /14/, /18/, /25/, /26/, /27/.

Taulukko 2.12 Vuonna 2000 tai sen jälkeen rakennettujen siltöjen sahatavaran, jota ei ole suunniteltu eurokoodeilla, materiaaliominaisuudet eurokoodin mukaisessa kantavuuslaskennassa.

Materiaaliominaisuudet Lujuusluokka	Vuonna 2000 tai sen jälkeen rakennettu				
	T40	T30	T24	T18	
Lujuuksien ominaisarvot [N/mm ²]					
Taivutus	$f_{m,k}$	32	27	22	17
Veto	$f_{t,0,k}$	20,5	17,0	13,5	9,5
	$f_{t,90,k}$	0,4	0,4	0,4	0,4
Puristus	$f_{c,0,k}$	25	22	19	15
	$f_{c,90,k}$	2,8	2,7	2,5	2,2
Leikkaus	$f_{v,k}$	3,8	3,8	3,8	3,2
	$f_{v,90,k}$	3,6	3,6	3,6	1,6
Jäykkyöksien ominaisarvot [N/mm ²]					
Kimmomoduuili	E_{mean}	12500	11500	10500	8500
	$E_{0,05}$	8400	7700	7000	5700
	$E_{90,mean}$	420	390	350	290
Liukumoduuli	G_{mean}	780	710	650	530
	$G_{0,05}$	530	480	440	360
Tiheyksien ominais- ja keskiarvot [kg/m ³]					
Ominaistiheys	ρ_k	400	380	350	320
Keskiarvotiheys	ρ_{mean}	480	460	420	380

Sahatavaran osavarmuuslukuina käytetään eurokoodin soveltamisohjeen NCCI 5 mukaisia arvoja liitosten, liittorakenteiden ja väsymisen laskennassa /4/. Muissa tapauksissa osavarmuusluvut määritetään taulukon 2.13 mukaan.

Taulukko 2.13 Sahatavaran osavarmuusluvut.

Sahatavan osavarmuusluku γ_M	Rakenteen mitat perustuvat suunnitelmiin	Rakenteen mitat on mitattu kantavuuden kannalta kriittisissä kohdissa
Rakenteiden kuntoa ei ole selvitetty.	1,40	1,35
Rakenteelle on tehty kattavat tutkimukset. Mm. laho kairauksin, liitososien kunto ja halkeamat on tutkittu.	1,35	1,30

Hyväkuntoiseksi todetun loppuun käytettävän sillan osavarmuusluku on 1,3. Syitä vastaan kohtisuoran puristuslujuuden osalta sekä käyttörajatilassa osavarmuusluku on 1,0.

2.6.2 Liimapuun lujuusluokat ja mitoitusarvot

1970-luvun puolivälin jälkeen liimapuun lujuudet merkittiin tunnuksella L. Eurokoodeissa liimapuun merkintänä on käytetty tunnuksia GL c epähomogeeniselle ja GL h homogeeniselle liimapuulle. Eurokoodien mukaiset materiaaliominaisuudet on esitetty eurokoodien soveltamisohjeessa NCCI 5 ja standardissa SFS-EN 14080. /4/, /11/, /14/, /30/, /27/, /40/

Taulukko 2.14 Silloissa, joita ei ole suunniteltu eurokoodeilla, olevan liimapuun materiaaliominaisuudet eurokoodin mukaisessa kantavuuslaskennassa.

Materiaaliominaisuudet	Ennen vuotta 2000 rakennettu		Vuonna 2000 tai sen jälkeen rakennettu		
	L40	L30	L40	L30	
Lujuusluokka					
Lujuuksien ominaisarvot [N/mm ²]					
Taivutus $f_{m,k}$	29	24	31	26	
Veto $f_{t,o,k}$	18	17	19	18	
	$f_{t,90,k}$	0,40	0,40	0,45	0,45
Puristus $f_{c,o,k}$	23,5	22,5	24,0	23,0	
	$f_{c,90,k}$	2,0	2,0	2,5	2,5
Leikkaus $f_{v,k}$	2,5	2,5	3,0	3,0	
Jäykkyyksien ominaisarvot [N/mm ²]					
Kimmomoduuli E_{mean}	12500	11500	13000	12000	
	$E_{0,05}$	10400	9500	10800	10000
	$E_{90,mean}$	280	280	300	300
	$E_{90,05}$	230	230	250	250
Liukumoduuli G_{mean}	620	620	650	650	
	$G_{0,05}$	520	520	540	540
Tiheyksien ominais- ja keskiarvot [kg/m ³]					
Ominaisstiheys ρ_k	400	390	400	390	
Keskiarvotiheys ρ_{mean}	440	420	440	420	

Liimapuun osavarmuuslukuina käytetään eurokoodin soveltamisohjeen NCCI 5 mukaisia arvoja liitosten, liittorakenteiden ja väsymisen laskennassa /4/. Muissa tapauksissa osavarmuusluvut määritetään taulukon 2.15 mukaan.

Taulukko 2.15 Liimapuun osavarmuusluvut.

Liimapuun osavarmuusluku γ_M	Rakenteen mitat perustuvat suunnitelmiin	Rakenteen mitat on mitattu kantavuuden kannalta kriittisissä kohdissa
Rakenteiden kuntoa ei ole selvitetty.	1,20	1,15
Rakenteelle on tehty kattavat tutkimukset. Mm. laho kairauksin, liitososien kunto ja halkeamat on tutkittu.	1,15	1,10

Hyväkuntoiseksi todetun loppuun käytettävän sillan osavarmuusluku on 1,1. Syitä vastaan kohtisuoran puristuslujuuden ja käyttörajatilassa osavarmuusluku on 1,0.

2.7 Kivi

Kivirakenteiden kantavuutta on arvioitava tilaajan kanssa sovittavalla tavalla, jos rakenteessa on heikosta kantavuudesta johtuvia tai kantavuutta alentavia vaurioita.

Taulukko 2.116 Luonnonkivien ominaisarvojen vaihteluvälejä. /16/

Kivilaji	Tiheys (kN/m ³) DIN 52102	Huokoisuus (tilavuus-%) DIN 52102	Vedenimukyky (paino-%) DIN 52103	Pituuden lämpötilakerroin (1/°C 10 ⁻⁶)	Puristuslujuus (MN/m ²) DIN 52105	Taivutusvetolujuus (MN/m ²) DIN 52112	Kimmoduuli (MN/m ²)	Mohsin kovuus Mohs	Kulminen (g/cm ³) DIN 52108
graniitti	25–28	0.4–1.5	0.1–0.5	5–9	150–300	6–25	30–60	6	13–20
dioriitti	28–30	0.5–0.4	0.1–0.4	4–7	170–300	10–23	110–130	5–6	8–27
gabro	28–30	0.1–0.4	0.1–0.4	4–7	170–300	10–23	110–130	5–6	8–27
diabaasi	28–29	0.3–1.1	0.1–0.4	4–7	180–280	15–25	110–130	5–6	
gneissi	26–30	0.4–2.0	0.1–0.6	5–8	160–280	8–22	40–100	5–6	11–25
syeniitti	26–29	0.4–0.5	0.1–0.5	4–8	140–290	6–22	40–60	5–6	11–22
marmori	26–29	0.5–2.0	0.2–0.6	3–5	80–160	6–20	50–80	3–4	
tiivis kalkkikivi	26–28	0.5–2.0	0.2–0.6	2–7	80–180	6–15	40–70	3	11–40
liuskeet	25–28	0.5–1.5	0.1–0.5	2–7	100–200	8–27	10–60	4–6	
hiekkakivi	20–26	0.5–25.0	0.2–9.0	3–10	30–180	3–15	8–20	5–6	17–40
serpentiiniitti	25–29	0.3–2.0	0.1–1.0	5–10	120–300	10–30	40–150	3	20–55

3 Kuormat

3.1 Yleistä

Seuraavassa esitetään tavanomaisten siltöjen kantavuuslaskennassa käytettävät kuormat. Luvussa 4 esitetään kuormien yhdistelyperiaatteet.

Sillan alus- ja päällysrakenteisiin vaikuttavat kuormat otetaan huomioon tämän ohjeen mukaan. Tässä ohjeessa mainitsematta jääneet sillan alusrakenteiden geotekniseen kantokestävyyteen vaikuttavat kuormat ja olosuhteet otetaan huomioon eurokoodien soveltamisohjeiden NCCI 7, Sillan geotekninen suunnittelu -ohjeen ja RATO 3 -ohjeen mukaisesti. /1/, /5/, /6/, /7/.

3.2 Pysyvät kuormat

Rakenteen omaa painoa laskettaessa huomioidaan kantavan rakenteen todelliset mitat sekä pintarakenteiden todelliset paksuudet. Omaan painoon kuuluvat sillan kaiteet ja kaikki varusteet.

Seuraavia pysyviä ja pitkäaikaisia kuormia tarkastellaan erikseen siltatyypistä riippuen.

- jännittäminen (sisältää jännityshäviöt)
- betonin viruma ja kutistuma
- tukipainuma
- rakentamisen aikaiset kuormat
- maanpaine

Alusrakenteiden kantavuuslaskennassa tukipainumaero tukilinjoittain (tukipainuma) otaksutaan olevan 10 mm. Kallionvaraisissa perustuksissa ei otaksuta olevan tukipainumaa. Kansirakenteen ja pilareiden kantavuuslaskennassa tukipainuma huomioidaan, mikäli alusrakenteissa on havaittu painuma. Painuman suuruus on tällöin laskennassa vähintään 10 mm tai todellisten mittaustulosten mukainen. Tukien vaakasuuntaisia siirtymäeroja ei normaaleissa olosuhteissa oteta huomioon. Jos siltapaikalla on kantavuuteen vaikuttavia eroosiovaurioita, siirtymiä, painumia tai muita olosuhteiden muutoksia, otetaan nämä huomioon todellisen tilanteen mukaan (ks. kohta 5.6). Tällöin täytyy tehdä perusteelliset tutkimukset selvityksen lähtötiedoiksi.

Sillan rakentamisjärjestyksen aiheuttamat rasitukset eri rakenneosille tulee ottaa huomioon (esim. liittorakenne-, langerpalkki- ja riippusillat).

3.3 Luonnonkuormat

Sillan rakenteisiin vaikuttavat tuuli-, jää-, virtaus- ja lumikuormat otetaan kantavuuslaskennassa huomioon erikseen sovittaessa sellaisissa tapauksissa, joissa kuormilla osoitetaan olevan merkittävä vaikutus sillan kantavuuteen. Jos tuuli-, jää-, virtaus- ja lumikuormat otetaan huomioon, käytetään kuormina soveltamisohjeen NCCI 1 mukaisia kuormien ominaisarvoja, mittauksiin perustuvia tai tilaajan kanssa erikseen sovittavia arvoja /1/.

3.3.1 Lämpötilakuormat

Lämpötilan muutoksen aiheuttamat sillan pituussuunnan liikkeet otetaan huomioon sillan kantavuuslaskennassa eurokoodien soveltamisohjeiden mukaisesti. Liikuntasaumattoman sillan päädyn maanpainneiden tarkastelussa käytettävä lämpöliike määritetään Sillan geotekninen suunnittelu -ohjeen mukaan. /1/, /2/, /6/

Lämpötilakuormien vaikutukset lasketaan ja esitetään laskelmissa alla esitettyjen suuruksina. Lopullisessa mitoituksessa lämpötilakuorma kerrotaan siltatyyppistä ja rajatilasta riippuvalla yhdistelykertoimella. Myös viruman pienentävä vaikutus on huomioitu kertoimessa.

Betonisillat

Päällysrakenteen vastakkaisten pintojen pystysuuntainen pintalämpötilaero otetaan huomioon kantavuuslaskennassa. Vastakkaisten pintojen lineaarisesti pintalämpötilaeroksi otaksutaan 10 °C kaikissa tapauksissa.

Betoni-teräs -liittorakenteiset sillat

Liittorakenteisissa silloissa ei oteta huomioon pystysuuntaista lineaarista pintalämpötilaeroa. Betonin ja rakenneteräksen välinen hyppäyksellinen lämpötilaero tulee kuitenkin ottaa huomioon. Hyppäykselliseksi lämpötilaeroksi otaksutaan 10 °C.

Muut sillat

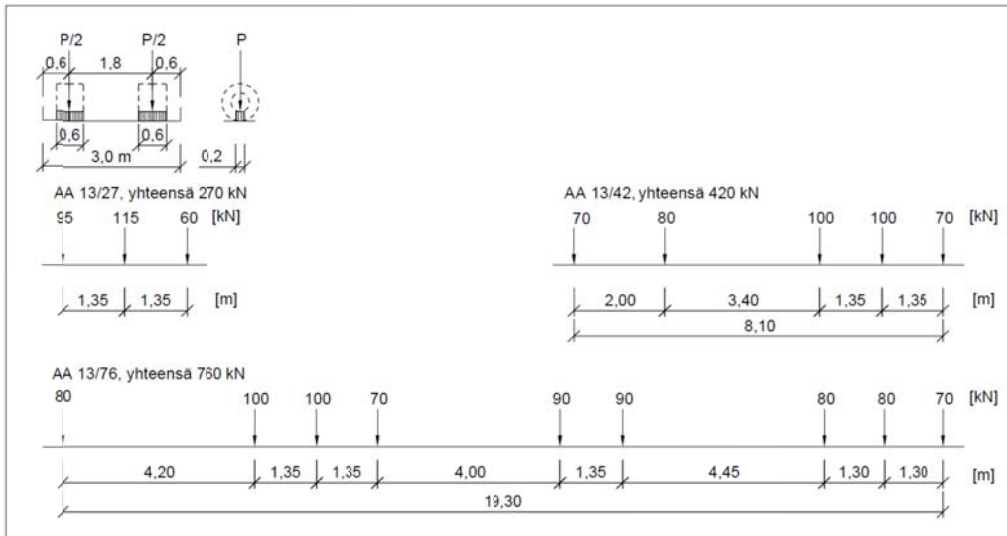
Puusiltöjen päälly- ja alusrakenteiden lämpötilan muutoksia tai pintalämpötilaeroja ei huomioida.

3.4 Tie- ja katusiltöjen liikennekuormat

3.4.1 Ajoneuvoasetuksen mukaiset kuormat

Ajoneuvoasetuksen mukainen kuormakaavio on valittu siten, että sen vaikutus sillan rakenteisiin vastaa vuonna 2013 voimaan tulleen ajoneuvoasetuksen suurimpien sallittujen ajoneuvoyhdistelmien akseli-, teli- ja kokonaispainoja. Asetuksen mukaisia kuormakaavioita käytetään arvioitaessa sillan kantavuutta teitä ja katuja ilman kuljetuslupia käyttäville raskaille kuljetuksille.

Asetuksen mukaisen kuormakaavion kaistan leveys on 3,0 m. Pyörän kosketuspinta on ajoneuvon pituussuunnassa 0,2 m ja poikkisuunnassa 0,6 m. Pyöröien keskikohtien välinen etäisyys on 1,8 m. Kuvassa 3.1 on kuormakaaviot leveys- ja pituussuunnassa.



Kuva 3.1 Ajoneuvoasetuksen 2013 mukaiset kuormakaaviot AA13/27, AA 13/42 sekä AA 13/76.

Asetuksen mukainen kuormakaavio on jaettu kolmeen ajoneuvoa kuvaavaan kaavioon. Asetuksen mukaisen kuormakaavion lisäksi siltaa voi kuormittaa tasainen kuorma $p = 4,5 \text{ kN/m}^2$.

Asetuksen mukaiset kuormat voidaan sijoitella sillalle kolmella eri tavalla kuvan 3.2 mukaan. Vaihtoehtoista valitaan se, joka antaa kyseistä rakenneosaa tarkasteltaessa määrävään vaikutuksen. Ajoneuvoasetuksen mukaiset kuormat voivat sijaita sillan poikkisuunnassa ajoradalla sekä siihen samassa tasossa liittyvällä pientareella. Sillalla esiintyy samanaikaisesti korkeintaan kaksi kuvan 3.1 mukaista kuormakaaviota. Kaaviot voivat sijaita välittömästi rinnakkain tai peräkkäin samalla kuormakaistalla siten, että kaavioiden väli on vähintään 15,0 m. Siltaa voi myös kuormittaa yksi ajoneuvoasetuksen mukainen kuormakaavio ja tasainen pintakuorma. Pintakuorma voi olla osittain jatkuva siten, että se antaa määrävään vaikutuksen. Pintakuorma on päällekkäinen kuormakaavion kanssa pääkannattajien tai kansilaatan pääsuunnan voimasuureita laskettaessa. Mikäli sillan hyödyllinen leveys on alle 5,5 m, voidaan pintakuorman päällekkäinen vaikutus jättää huomioimatta myös pääsuunnassa.

Ajoneuvoasetuskaavio ja pintakuorma täytyy ottaa huomioon myös kevyen liikenteen väylällä, mikäli sille pääsyä ei ole estetty esimerkiksi kaiteella.

Ajoneuvoasetuksen mukaisen kuormakaavion sysäyksen vaikutus otetaan huomioon kertomalla kunkin akselin paino kaavan (3.1) mukaisella sysäyskertoimella

$$\Phi = 1,40 - 0,006 \cdot L \geq 1,10, \quad (3.1)$$

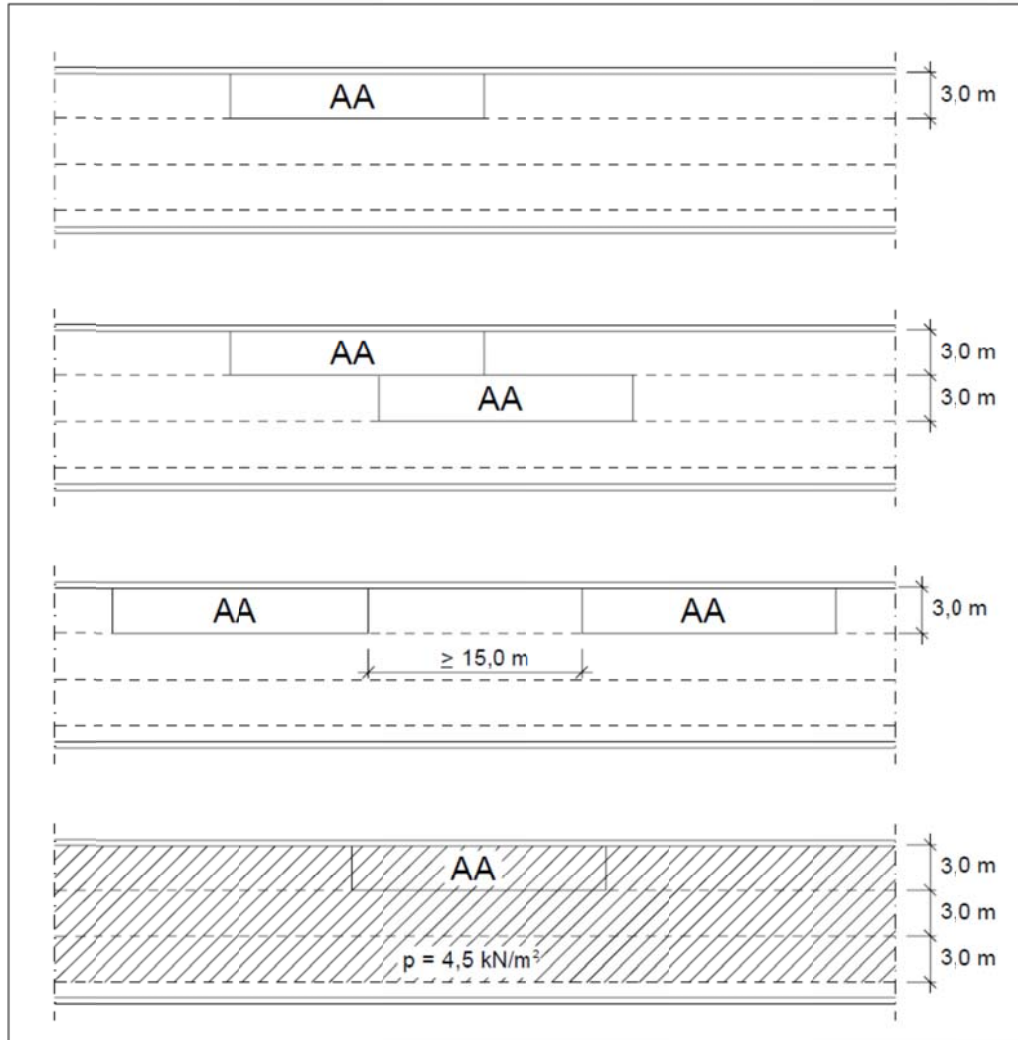
missä

L on tarkasteltavan rakenneosan jännemitta tai ulokkeen pituus.

Sysäyskerrointa ei huomioida alusrakenteiden tai geoteknisen kantavuuden arvioinnissa, kun alusrakenteet ovat massiivisia. Pintakuormaa ei kerrota sysäyslisällä.

Puupalkkisilloilla ja puupaalujen geoteknisen kantavuuden arvioinnissa sysäyskerroin lasketaan kaavalla (3.2).

$$\Phi = 1,20 - 0,003 \cdot L \geq 1,10. \quad (3.2)$$



Kuva 3.2 Ajoneuvoasetuksen mukaisten kuormien sijoittelu sillalla.

Mikäli sillan kantavuus ei ole riittävä ajoneuvoasetuksen mukaisille kuormille, määritellään sillalle painorajoitus liitteen 3 mukaan käyttäen tässä ohjeessa mainittuja laskentaperiaatteita.

3.4.2 Erikoiskuljetuskaaviot

Erikoiskuljetuskaaviolle haetaan suurin sallittu akselipaino, jonka silta kestää. Sillan kantavuutta todelliselle kuljetukselle arvioidaan laskettujen erikoiskuljetuskaavioiden avulla. Siltojen kantavuuksia voidaan laskea myös erikseen todelliselle kuljetukselle, kun kuljetusta ei voida luotettavasti verrata mihinkään vakiokaavioon. Tällaisia ovat esimerkiksi suuret muuntajakuljetukset tai tuulivoimaloiden kuljetukset. Tällöin kuljetuksen todellisten painojen ja mittojen on oltava tiedossa sillan kantavuuslaskentaa tehtäessä.

Kuljetusten akselikuormat jaetaan pyörä- ja pintakuormiin. Pyörien ja pintakuormien kosketuspinnan mitat määräytyvät kuvan 3.3 mukaan. Sysäyskerroin määritellään

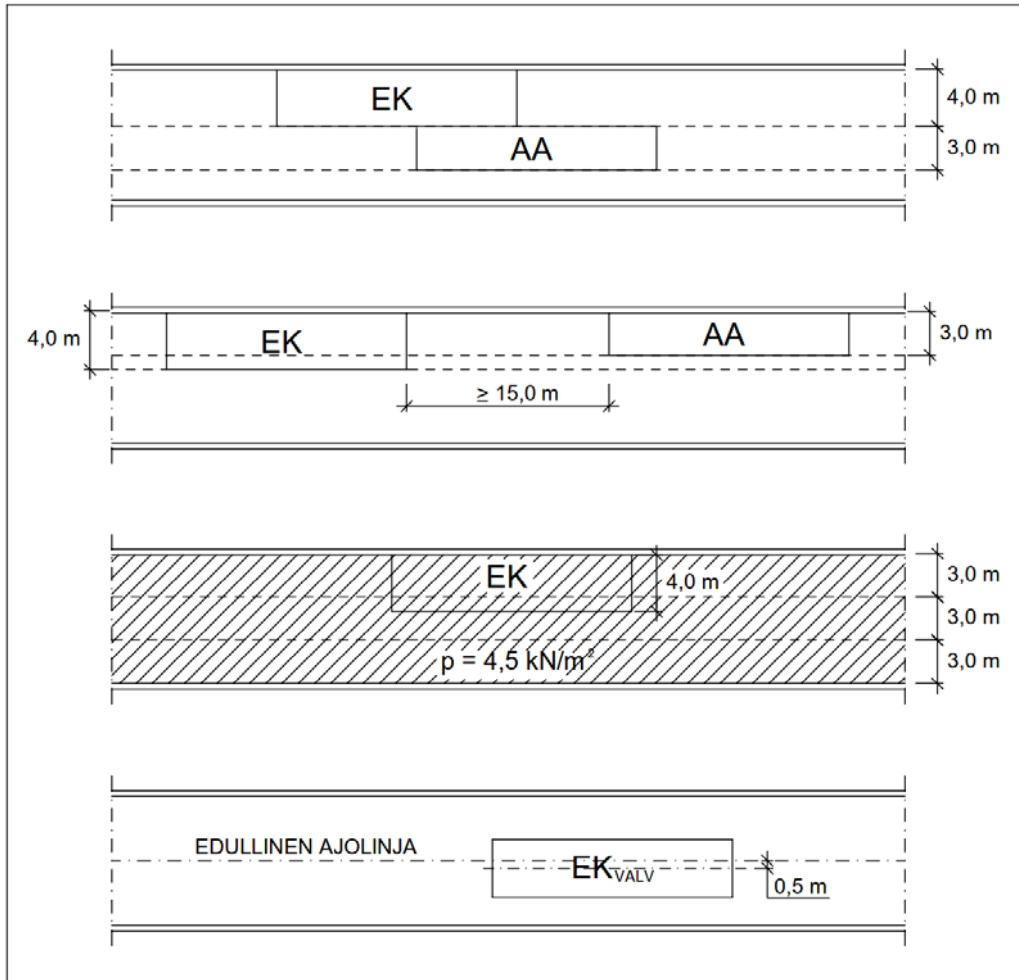
kerta- ja reitistökuljetuksilla kaavan (3.1) tai (3.2) mukaan. Valvotuilla kuljetuksilla sysäyskerroimen arvo on aina $\Phi = 1,10$. Sysäyskerrointa ei huomioida alusrakenteiden tai geoteknisen kantavuuden arvioinnissa. Pintakuormaa ei kerrota sysäyslisällä.

Erikoiskuljetuksen kuormakaavion kaistan leveys on 4,0 m. Pyörien kosketuspinnat ovat 0,2 m ajoneuvojen pituussuunnassa. Kosketuspinnat vaihtelevat poikkisuunnassa. Tarkasteltavia kuormakaavioita on 17 kappaletta. Kuvassa 3.3 lyhenne N kuvaa ajoneuvonostureita, K puoliperävaunuyhdistelmiä, T täysperävaunuyhdistelmiä ja Y yhtenäisiä lavettiyhdistelmiä.

	KAAVIO PITUUSSUUNNASSA	KAAVION PITUUS [m]
N ₁		3,5
N ₂		6,1
N ₃		8,7
N ₄		7,9
N ₅		9,6
N ₆		12,2
K ₂		15,1
K ₃		16,4
K ₄		17,7
K ₆		16,8
T ₄		21,0
T ₅		23,6
T ₇		30,0
T ₈		35,3
Y ₁₀		23,3
Y ₁₃		27,8
Y ₁₆		32,3
PYÖRIEN KOSKETUSPINNAT PITUUS- JA POIKKISUUNNASSA		
N ₁ N ₂ N ₃ N ₄ N ₅ N ₆	K ₂ K ₃ K ₄ K ₆	T ₄ T ₅ T ₇ T ₈ Y ₁₀ Y ₁₃ Y ₁₆

Kuva 3.3 Kantavuuslaskennassa käytettävät erikoiskuljetuskaaviot (EK).

Kuormakaaviot sijoitetaan sillalle ainoana liikennekuormana tai yhdessä yhden ajoneuvoasetuksen mukaisen kuormakaavion tai pintakuorman kanssa kuvan 3.4 mukaan. Määritettäessä valvotulle erikoiskuljetukselle sallittavia akselipainoja, sijoitetaan erikoiskuljetuskaavio kuvan 3.4 mukaisesti ainoana liikennekuormana sillalla siten, että poikkeama edullisimmasta ajonlinjasta on korkeintaan 0,5 m. Erikoiskuljetuskaavioita ei sijoiteta kevyen liikenteen väylälle, jos kuljetusten mitat tai mahdolliset käännökset eivät sitä edellytä.



Kuva 3.4 Erikoiskuljetuskaavioiden sijoittelut sillalla yksittäisenä ja reitistökuljetuksena sekä valvottuna kuljetuksena.

3.4.3 Vaakasuuntaiset kuormat

Kaarevien siltojen keskipakokuormat Q_{tk} otetaan huomioon seuraavalla kaavalla /1/

$$\begin{aligned} Q_{tk} &= 0,2 \cdot Q_v, & \text{kun } R \leq 200 \text{ m} \\ Q_{tk} &= 40 \cdot Q_v/R & \text{kun } 200 \text{ m} < R < 1500 \text{ m} \\ Q_{tk} &= 0, & \text{kun } R \geq 1500 \text{ m,} \end{aligned} \quad (3.3)$$

missä

$$Q_v = 600 \text{ kN}$$

R on sillan kaarevuussäde [m]

Sillalla ei otaksuta olevan keskipakokuormaa samaan aikaan valvotun erikoiskuljetuksen kanssa. Jarrukuorma Q_{lk} [kN] otetaan huomioon seuraavalla kaavalla.

$$Q_{lk} = (144 + 1,58 \cdot L) \leq 250 \quad (3.4)$$

missä

L on kahden vaakakuormia siirtämättömän ylimenolaitteen välinen etäisyys [m]

Jarrukuorman oletetaan vaikuttavan pituussuuntaisesti ajoradan pinnassa tasaisesti koko ajoradan leveydellä. Valvotulla kuljetuksella jarrukuorman suuruuden oletetaan olevan 50 % kaavassa 3.4 esitetystä jarrukuormasta. Ajoneuvosta aiheutuva poikittainen sivusysäys on 25 % pituussuuntaisesta jarrukuormasta. Kyseinen kuorma vaikuttaa samanaikaisesti jarrukuorman Q_{lk} kanssa. Poikittainen sivusysäys voidaan ottaa huomioon rakennemallissa AA-kaavion akseleille tasan jaettuina pistekuormina.

3.4.4 Liikenteen aiheuttama maanpaine

Sillan tulopenkereellä olevan liikenteen aiheuttama maanpaine otetaan tarvittaessa huomioon. Penkereellä olevan liikennekuorman aiheuttama maanpaine lasketaan Sillan geotekninen suunnittelu -ohjeen mukaan /6/.

3.4.5 Väsyttävät kuormat

Väsymistarkastelun periaatteet on esitetty kohdassa 6.5.

Väsymistarkasteluissa käytetyn liikennemäärän ja -kertymän tulee vastata mahdollisimman hyvin todellista liikennettä sillalla. Kantavuustarkasteluissa käytetään ensisijaisesti eurokoodin soveltamisohjeen NCCI 1 mukaista kuormakaaviota FLM4 käyttäen tieliikenteen jakaumaa. /1/

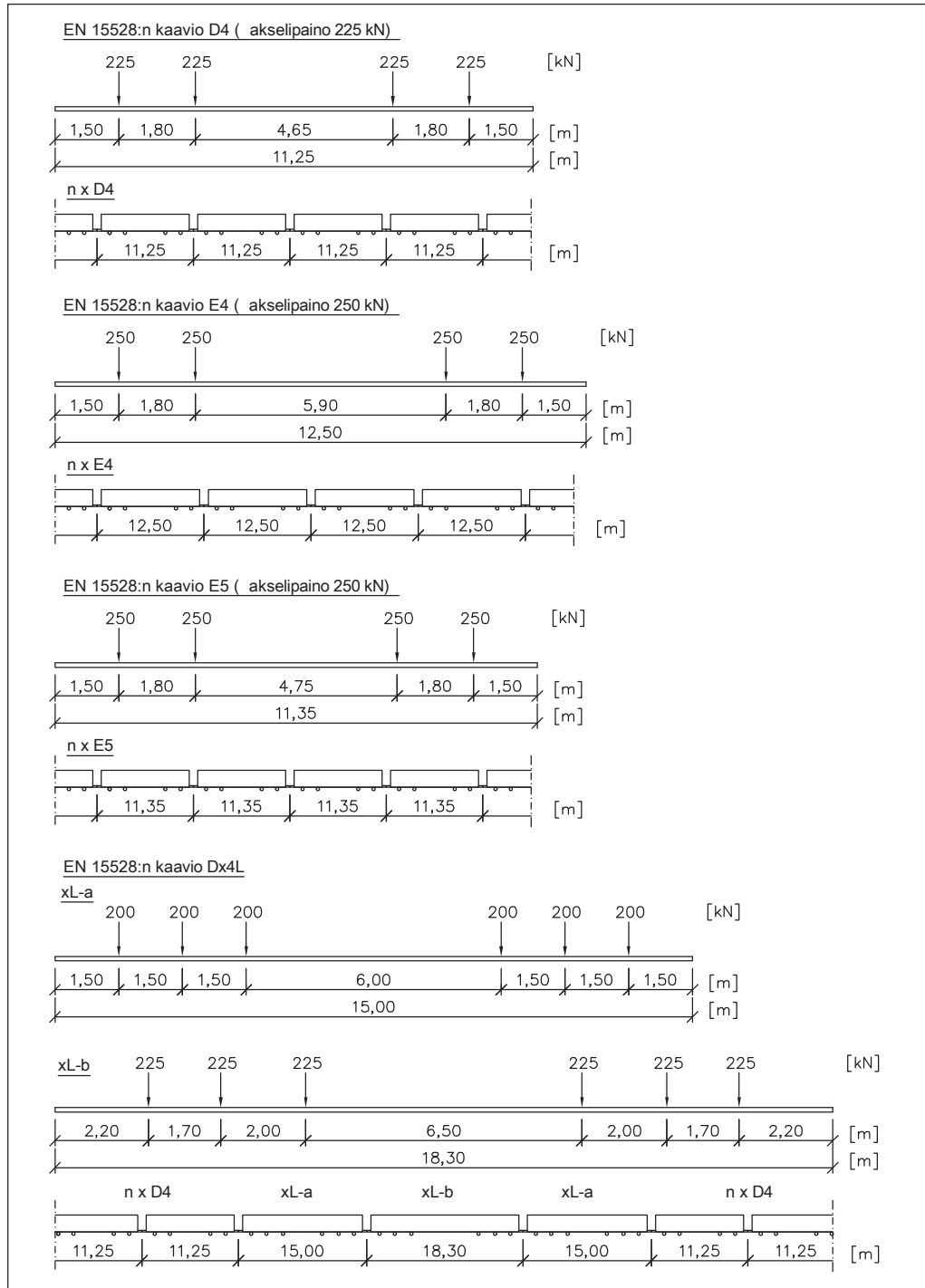
3.5 Rautatiesiltojen liikennekuormat

3.5.1 Pystysuorat kuormat

Tilaaaja määrittää kantavuuslaskennassa käytettävän liikennekuorman.

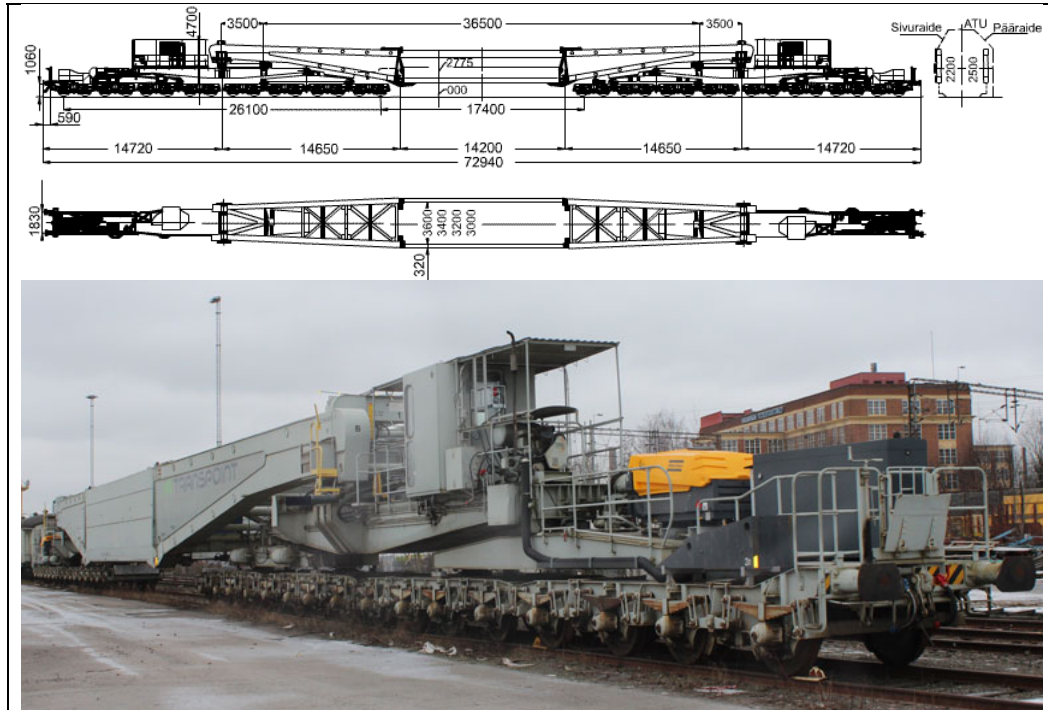
Liikennekuormina käytetään LM71(SW/o), standardin SFS-EN 15528, todellisen junan tai väsyttävän ominaisjunan mukaisia kuormia. Pääsääntöisesti rautatiesiltojen kantavuustarkasteluissa käytetään EN 15528:n mukaisia kaavioita. Junassa voi olla väleissä myös tyhjiä vaunuja. Kuorman sijaintina käytetään raiteiden todellista sijaintia. Sijainnille käytetään epäkeskisyyttä ± 50 mm.

Junakuormalle LM71 (SW/o) käytetään valittua akselikuormaa vastaavaa α -kerrointa.



Kuva 3.5 Standardin EN 15528:n mukaiset kaaviot D4, E4, E5 ja Dx4L /39/.

Suurimmat rautateiden erikoiskuljetukset tehdään Osg-vaunulla (kuva 3.6). Osg-vaunulla siirretään esimerkiksi suurmuuntajia joiden painot ovat hieman alle 300 tonnia.



Kuva 3.6 Rautatiesiltöjen raskaissa kuljetuksissa käytettävä Osg-vaunu.

Osg-vaunun tekniset tiedot ovat seuraavat:

- Vaunun kantavuus/massat
 - Taara 230,0 t
 - Netto 280,0 t
 - Brutto 450,0 t
 - Suurin akselikuorma 14 t
 - Suurin nauhakuorma 8 t
- Vaunun mitat
 - Kokonaispituus 73 m
 - Kuormausalan pituus 14,0 m
 - Kuormausalan leveys (portaittain säädettävissä) 3,0 m; 3,2 m; 3,4 m; 3,6 m
 - Akseleiden lukumäärä 32 kpl

Osg-vaunu voidaan muuttaa syväkuormausvaunuksi irrottamalla siitä sivukannatuspalkit ja varustamalla se syväkuormausalustalla. Vaunu on varustettu sivukannatuspalkeilla ja sen oman hydrauliiikan avulla kuormatilaa voidaan kuljetuksen aikana siirtää leveys- ja korkeussuunnassa, jolloin kuormauksen painopiste pidetään lähellä raiteiston keskilinjaa. Kuormatilaa siirretään tarvittaessa myös esteiden kohdalla (esimerkiksi opasteet ja laiturit).

3.5.2 Dynaaminen suurennuskerroin

Kantavuuslaskennassa raiteen oletetaan olevan huolellisesti kunnossa pidetty, ellei toisin sovita.

Rautatiesiltöjen liikennekuorma LM71 (SW/o) kerrotaan eurokoodin SFS-EN 1991-2 mukaisella dynaamisella suurennuskertoimella Φ_2 . Nopeudella v [m/s] kulkevan EN 15528 mukaisen kuormakaavion tai todellisen junan dynaaminen suurennuskerroin lasketaan eurokoodin SFS-EN 1991-2 Liitteen C mukaan. Tukikerroksen paksuus otetaan huomioon dynaamisessa suurennuskertoimessa kaavan (3.5) mukaan.

$$1+\varphi_{red} = (1+\varphi)*[1+(0,07-0,0005*L_{\phi})*(0,55-h)/0,3], \quad (3.5)$$

missä

h on tukikerroksen paksuus, $0,25 \text{ m} < h < 0,75 \text{ m}$ ja

L_{ϕ} on eurokoodin mukainen määräävä pituus [m].

Dynaamista suurennuskerrointa ei huomioida massiivisten alusrakenteiden tai geoteknisen kantavuuden arvioinnissa.

3.5.3 Vaakasuuntaiset kuormat

Rautatiesilloilla keskipakokuoma lasketaan eurokoodin soveltamisohjeen NCCI1 mukaisesti LM71 (SW/0), standardin EN 15528 tai todellinen junan mukaisia liikennekuormia ja rataosalla sallittuja nopeuksia.

Sivusysäyskuorma otetaan huomioon eurokoodin soveltamisohjeen NCCI1 mukaisesti käyttäen valitun liikenteen akselikuormaa vastaavaa α -kerrointa.

Vedosta ja jarrutuksesta aiheutuvat kuormat otetaan huomioon kantavuuslaskennassa eurokoodin soveltamisohjeen NCCI 1 mukaisesti. Veto- ja jarrukuormina voidaan käyttää 25 % niiden akselikuormien summasta, jotka vaikuttavat tarkasteltavan rakenneosan kyseisen voimasuureen vaikutuspinnan mukaisella pituudella. Veto-kuorman enimmäisarvon nimellisarvo on 1 000 kN ja jarrukuorman enimmäisarvon nimellisarvo on 6 000 kN. Enimmäisarvojen nimellisarvot kerrotaan valitun liikenteen akselikuormaa vastaavalla α -kertoimella.

3.5.4 Liikenteen aiheuttama maanpaine

Sillan tulopenkereellä olevan liikenteen aiheuttama maanpaine otetaan tarvittaessa huomioon. Penkereellä olevan liikennekuorman aiheuttama maanpaine lasketaan RATO 3:n mukaisesti. /7/

3.5.5 Väsyttävät kuormat

Väsymistarkastelun pääperiaatteet on esitetty kohdassa 6.5 ja liitteessä 5.

Rautatiesillan väsyttävänä kuormana käytetään joko junakuormaa LM71 (SW/0) tai väsyttävää ominaiskuormaa. Kuormien luokittelukerroin $\alpha=1$.

Väsyttävän junakuorman LM71 (SW/0) dynaamisena suurennuskertoimena käytetään eurokoodin SFS-EN 1991-2 mukaista kerrointa Φ_2 .

Väsyttävän ominaisjunan dynaaminen suurennuskerroin lasketaan SFS-EN 1991-2 Liitteen D mukaan. Tukikerroksen paksuus otetaan huomioon dynaamisessa suurennuskertoimessa kaavan (3.5) mukaan.

3.6 Laakerikitka

Liikkuvan, rasvatun ja ehyen teräksisen rullalaakerin kitkavoimana voidaan käyttää 3 % pysyvän ja pitkäaikaisen kuorman tukireaktiosta. Jos teräksisten rullalaakereiden vierintäpinnat ovat erittäin huonossa kunnossa ja rasvaamattomat tai laakeri on muuten huonossa kunnossa, käytetään tarvittaessa suurempaa kitkavoimaa. Yli 6 % kitkavoimaa ei kuitenkaan käytetä, ellei tämä ole erikseen perusteltua. Liukulaakereissa voidaan kitkan otaksua olevan enintään 6 % pysyvän kuorman tukireaktiosta, ellei tarkempia selvityksiä ole käytettävissä.

4 Kuormien yhdistely

4.1 Yleistä

Siltojen kantavuuslaskennassa käytettävät kuormien yhdistelykaavat, yhdistelykertoimet ja osavarmuusluvut poikkeavat monessa tapauksessa uusille silloille tarkoitetuista arvoista. Seuraavassa esitetään tavanomaisten siltojen kantavuuslaskennassa käytettävät kuormien yhdistelykaavat, yhdistelykertoimet ja osavarmuusluvut. Rajatilojen kuormien yhdistelystä on esitetty taulukot liitteessä 1.

Tässä ohjeessa mainitsematta jääneet sillan alusrakenteiden geotekniseen kantokestävyyteen vaikuttavien kuormien osavarmuusluvut ja yhdistelykertoimet otetaan huomioon Liikenneviraston muiden ohjeiden mukaan. Kuormien mitoitusarvojen laskenta tehdään tämän ohjeen mukaisilla kaavoilla. Jos Liikenneviraston ohjeissa ei ole esitetty kuorman yhdistelykerrointa, sille käytetään arvoa 1,0.

Kuormitusyhdistelyissä sillan päätypalkin taakse muodostuvan täyden tai osittaisen passiivipaineen osalta käytetään aiheuttavan kuorman mukaisia yhdistelykertoimia.

4.2 Murtorajatila (Ultimate Limit State ULS)

Sekundäärirakenteissa, joissa vaurioituminen on paikallista ja se ei johda päärakenteen vaurioitumiseen tai liikenneturvallisuuden vaarantumiseen, voidaan rakenteen kestävyttä arvioitaessa käyttää alennettuja kuormien osavarmuuslukuja (osavarmuuslukujen yhteydessä esitetyt suluissa olevat arvot). Alennettujen osavarmuuslukujen käyttäminen päärakenteiden kestävyden laskennassa edellyttää, että kyseessä on loppuun käytettävä silta, jossa ei ole kantavuuteen vaikuttavia vaurioita. Rakenteen murtumistavan tulee tällöin kuitenkin olla sitkeä (merkkejä murtumisesta voidaan havaita hyvissä ajoin ennen lopullista murtumaa). Jotta mahdolliset viitteet rakenteen vaurioitumisesta havaitaan, on silta otettava tehostettuun tarkkailuun alennettuja osavarmuuslukuja käytettäessä.

Kuormien yhdistelykertoimina käytetään kohdan 4.4 mukaisia arvoja. Murtorajatilan kuormien mitoitusarvot on esitetty taulukossa 4.1.

Taulukko 4.1 Siltöjen murtorajatilan kuormien mitoitusarvot (STR/GEO rakenneosien kestävyys ja geotekninen kantavuus sekä EQU staattinen tasapaino).

Kuorma		Tunnus	Murtorajatilan mitoitusarvo	
Kaikki sillat	Esijännitys ($E_{d,P}$)	P	$\gamma_P \cdot \psi_{0,ULS,P} \cdot P$	
	Pysyvät kuormat ($E_{d,G}$)	Oma paino	G	$\gamma_G \cdot \psi_{0,ULS,G} \cdot G$
		Maan lepopaine	MLEP	$\gamma_G \cdot \psi_{0,ULS,MLEP} \cdot MLEP$
		Kutistuma	KUT	$\gamma_G \cdot \psi_{0,ULS,KUT} \cdot KUT$
		Tukipainuma	S	$\gamma_G \cdot \psi_{0,ULS,S} \cdot S$
	Muuttuvat kuormat ($E_{d,Qk}$)	Pintalämpötilaero	T_{dk}	$\gamma_{Tdk} \cdot \psi_{0,ULS,Tdk} \cdot T_{dk}$
		Lämpötilan muutos	T_{ck}	$\gamma_{Tck} \cdot \psi_{0,ULS,Tck} \cdot T_{ck}$
Laakerikitka		BF	$\gamma_{BF} \cdot \psi_{0,ULS,BF} \cdot BF$	
Tie- ja katusillat	Liikennekuorma-kaaviot ($E_{d,Lk}$)	AA, EK, EK _{valv} , p	$Q_{k,i}$	$\gamma_{Qk,i} \cdot \psi_{0,ULS,Qk,i} \cdot Q_{k,i}$
		Keskikipakokuorma	Q_{tk}	$\gamma_{Qtk} \cdot \psi_{0,ULS,Qtk} \cdot Q_{tk}$
		Jarrukuorma / sivusysäys	Q_{lk}	$\gamma_{Qlk} \cdot \psi_{0,ULS,Qlk} \cdot Q_{lk}$
		Liikenteen maanpaine	TLEP	$\gamma_{TLEP} \cdot \psi_{0,ULS,TLEP} \cdot TLEP$
Rautatie-sillat	Liikennekuormien yksittäiset komponentit ($E_{d,Lk}$)	LM71(SW/o), Kuormittamaton juna, EN15528:n kaavio, Todellinen juna, Ominaisjuna	$Q_{k,i}$	$\gamma_{Qk,i} \cdot \psi_{0,ULS,Qk,i} \cdot Q_{k,i}$
		Keskikipakokuorma	Q_{tk}	$\gamma_{Qtk} \cdot \psi_{0,ULS,Qtk} \cdot Q_{tk}$
		Veto- ja jarrukuormat	Q_{br}	$\gamma_{Qbr} \cdot \psi_{0,ULS,Qbr} \cdot Q_{br}$
		Sivusysäyskuormat	Q_{lk}	$\gamma_{Qlk} \cdot \psi_{0,ULS,Qlk} \cdot Q_{lk}$
		Liikenteen maanpaine	TLEP	$\gamma_{TLEP} \cdot \psi_{0,ULS,TLEP} \cdot TLEP$

Siltöjen kantavuuslaskennan murtorajatilan mitoituskaava on seuraava.

$$E_d = E_{d,P} + E_{d,G} + E_{d,Qk} + E_{d,Lk} \quad (4.1)$$

missä

$$E_{d,P} = \gamma_P \cdot \psi_{0,ULS,P} \cdot P \quad (4.2)$$

$$E_{d,G} = \gamma_G \cdot \psi_{0,ULS,G} \cdot G + \gamma_G \cdot \psi_{0,ULS,MLEP} \cdot MLEP + \gamma_G \cdot \psi_{0,ULS,KUT} \cdot KUT + \gamma_G \cdot \psi_{0,ULS,S} \cdot S \quad (4.3)$$

$$E_{d,Qk} = \gamma_{Tdk} \cdot \psi_{0,ULS,Tdk} \cdot T_{dk} + \gamma_{Tck} \cdot \psi_{0,ULS,Tck} \cdot T_{ck} + \gamma_{BF} \cdot \psi_{0,ULS,BF} \cdot BF \quad (4.4)$$

$$E_{d,Lk} = \sum [\gamma_{Qk,i} \cdot \psi_{0,ULS,Qk,i} \cdot Q_{k,i}] + \gamma_{Qtk} \cdot \psi_{0,ULS,Qtk} \cdot Q_{tk} + \gamma_{Qbr} \cdot \psi_{0,ULS,Qbr} \cdot Q_{br} + \gamma_{Qlk} \cdot \psi_{0,ULS,Qlk} \cdot Q_{lk} + \gamma_{TLEP} \cdot \psi_{0,ULS,TLEP} \cdot TLEP \quad (4.5)$$

Mitoituskuormien osavarmuusluvut γ_i on esitetty seuraavissa kohdissa.

4.2.1 Pysyvät kuormat

Siltöjen esijännityksen ja pysyvien kuormien osavarmuusluvut ovat seuraavat:

- esijännitys $E_{d,P}$ $\gamma_P = 1,1$ tai $0,9$
- pysyvät kuormat $E_{d,G}$ (STR/GEO) $\gamma_G = 1,2$ (1,1) tai $0,9$
- oma paino G (EQU) $\gamma_G = 1,15$ tai $0,9$

Esijännityksen osavarmuusluku $\gamma_P = 1,30$, kun tarkistetaan ulkoisen jännevoiman yhteydessä esiintyvää stabiilisuusrajaa (EQU) ja jännevoiman kasvu voi olla epäedullinen. Esijännityksen osavarmuusluku $\gamma_P = 1,20$, kun tarkistetaan jännitysvoiman paikallisia vaikutuksia (STR/GEO) (esim. ankkurointialue). /1/

4.2.2 Muuttuvat kuormat

Tässä ohjeessa käsiteltyjen muuttuvien kuormien $E_{d,Qk}$ osavarmuusluvut ovat seuraavat. Suluissa olevia kertoimia voi käyttää sekundäärirakenteissa, joissa vaurioituminen on paikallista eikä johda päärakenteen vaurioitumiseen tai liikenneturvallisuuden vaarantumiseen, ja päärakenteissa loppuun käytettävillä silloilla, joissa ei ole kantavuuteen vaikuttavia vaurioita.

- pintalämpötilaero $\gamma_{Tdk} = 1,5 (1,0)$
- lämpötilan muutos $\gamma_{Tck} = 1,5 (1,0)$
- laakerikitka $\gamma_{BF} = 1,5 (1,0)$

Muiden muuttuvien kuormien murtorajatilan osavarmuuslukuina käytetään eurokoodin soveltamisohjeen NCCI 1 mukaisia arvoja, ellei tässä ohjeessa ole toisin mainittu tai tilaajan kanssa toisin sovita. /1/

4.2.3 Tie- ja katusiltojen liikennekuormat

Liikenteen kuormien $E_{d,Lk}$ osavarmuusluvut ovat kaikille siltatyypeille seuraavat.

- liikennekuormat, painorajoitustarkastelu
 - yksi AA-kaavio: AA $\gamma_{Qk,AA} = 1,45 (1,25)$
 - kaksi AA-kaaviota: 2xAA $\gamma_{Qk,2AA} = 1,30 (1,10)$
 - 1 AA-kaavio + pintakuorma: AA $\gamma_{Qk,AAp} = 1,30 (1,10)$
p $\gamma_{Qk,p} = 1,60 (1,35)$
- liikennekuormat, sillan kantavuus erikoiskuljetuksille
 - valvottu kuljetus (V): EK_{valv}: $\gamma_{Qk,EKv} = 1,30 (1,15)$
 - kertakuljetus (K):
 - yksi EK-kaavio: EK: $\gamma_{Qk,EK,k} = 1,30 (1,15)$
 - EK-kaavio + AA EK: $\gamma_{Qk,EK2,k} = 1,20 (1,05)$
AA: $\gamma_{Qk,AA2,k} = 1,30 (1,15)$
 - EK + pintakuorma: EK: $\gamma_{Qk,EKp,k} = 1,20 (1,05)$
p: $\gamma_{Qk,p,k} = 1,30 (1,15)$
 - reitistökuljetus (R):
 - yksi EK-kaavio: EK: $\gamma_{Qk,EK,R} = 1,40 (1,25)$
 - EK-kaavio + AA EK: $\gamma_{Qk,EK2,R} = 1,30 (1,15)$
AA: $\gamma_{Qk,AA2,R} = 1,30 (1,15)$
 - EK + pintakuorma: EK: $\gamma_{Qk,EKp,R} = 1,30 (1,15)$
p: $\gamma_{Qk,p,R} = 1,30 (1,15)$
- muut liikenteen kuormat
 - keskipakokuorma $\gamma_{Qtk} = 1,20 (1,10)$
 - jarrukuorma ja sivusysäys $\gamma_{Qlk} = 1,20 (1,0)$
 - liikenteen maanpaine $\gamma_{TLEP} = 1,50 (1,0)$

4.2.4 Rautatiesiltöjen liikennekuormat

Suluissa olevia kertoimia voi käyttää sekundäärirakenteissa, joissa vaurioituminen on paikallista eikä johda päarakenteen vaurioitumiseen tai liikenneturvallisuuden vaarantumiseen, ja päarakenteissa loppuun käytettävillä silloilla, joissa ei ole kantavuuteen vaikuttavia vaurioita.

- LM71: $\gamma_{Qk,LM} = 1,40 (1,30)$.
- SW/o: $\gamma_{Qk,SW} = 1,40 (1,30)$.
- Kuormittamaton juna: $\gamma_{Qk,K} = 1,40 (1,30)$.
- EN 15528:n kaavio: $\gamma_{Qk,EN} = 1,30 (1,15)$.
- Todellinen juna: $\gamma_{Qk,T} = 1,30 (1,15)$.
- Sivusysäyskuormat $\gamma_{QIk} = 1,20 (1,10)$.
- Liikenteen aiheuttama maanpaine $\gamma_{TLEP} = 1,50 (1,0)$.

4.3 Käyttörajatila (SLS)

Käyttörajatilassa siltöjen liikennekuormien mitoitusarvot muodostetaan kuormien ominaisarvoista yhdistelykertoimilla kerrottuna. Kuormien yhdistelykertoimina käytetään kohdan 4.4 mukaisia arvoja. Käyttörajatilan kuormien mitoitusarvot on esitetty taulukossa 4.2.

Taulukko 4.2 Siltöjen käyttörajatilan kuormien mitoitusarvot (STR/GEO ja EQU).

Kuorma		Tunnus	Käyttörajatilan mitoitusarvo	
Kaikki sillat	Esijännitys ($E_{k,P}$)	P	$\Psi_{0,SLS,P} \cdot P$	
	Pysyvät kuormat ($E_{k,G}$)	Oma paino	G	$\Psi_{0,SLS,G} \cdot G$
		Maan lepopaine	MLEP	$\Psi_{0,SLS,MLEP} \cdot MLEP$
		Kutistuma	KUT	$\Psi_{0,SLS,KUT} \cdot KUT$
		Tukipainuma	S	$\Psi_{0,SLS,S} \cdot S$
	Muuttuvat kuormat ($E_{k,Qk}$)	Pintalämpötilaero	T_{dk}	$\Psi_{0,SLS,Tdk} \cdot T_{dk}$
		Lämpötilan muutos	T_{ck}	$\Psi_{0,SLS,Tck} \cdot T_{ck}$
Laakerikitka		BF	$\Psi_{0,SLS,BF} \cdot BF$	
Tie- ja katusillat	Liikennekuorma-kaaviot ($E_{k,Lk}$)	AA, EK, EK _{valv} , p	$Q_{k,i}$	$\Psi_{0,SLS,Qk,i} \cdot Q_{k,i}$
		Keskipakokuorma	Q_{tk}	$\Psi_{0,SLS,Qtk} \cdot Q_{tk}$
		Jarrukuorma / sivusysäys	Q_{Ik}	$\Psi_{0,SLS,QIk} \cdot Q_{Ik}$
		Liikenteen maanpaine	TLEP	$\Psi_{0,SLS,TLEP} \cdot TLEP$
Rautatiesillat	Liikennekuormien yksittäiset komponentit ($E_{k,Lk}$)	LM71(SW/o), kuormittamaton juna, EN15528, todellinen juna, ominaisjuna	$Q_{k,i}$	$\Psi_{0,SLS,Qk,i} \cdot Q_{k,i}$
		Keskipakokuorma	Q_{tk}	$\Psi_{0,SLS,Qtk} \cdot Q_{tk}$
		Veto- ja jarrukuormat	Q_{br}	$\Psi_{0,SLS,Qbr} \cdot Q_{br}$
		Sivusysäyskuormat	Q_{Ik}	$\Psi_{0,SLS,QIk} \cdot Q_{Ik}$
		Liikenteen maanpaine	TLEP	$\Psi_{0,SLS,TLEP} \cdot TLEP$

Siltojen kantavuuslaskennan käyttörajatilan mitoituskaava on seuraava.

$$E_k = E_{k,P} + E_{k,G} + E_{k,Qk} + E_{k,Lk} \quad (4.6)$$

missä

$$E_{k,P} = \psi_{0,SLS,P} \cdot P \quad (4.7)$$

$$E_{k,G} = \psi_{0,SLS,G} \cdot G + \psi_{0,SLS,MLEP} \cdot MLEP + \psi_{0,SLS,KUT} \cdot KUT + \psi_{0,SLS,S} \cdot S \quad (4.8)$$

$$E_{k,Qk} = \psi_{0,SLS,Tdk} \cdot Tdk + \psi_{0,SLS,Tck} \cdot Tck + \psi_{0,SLS,BF} \cdot BF \quad (4.9)$$

$$E_{k,Lk} = \sum[\psi_{0,SLS,Qk,i} \cdot Q_{k,i}] + \psi_{0,SLS,Qtk} \cdot Q_{tk} + \psi_{0,SLS,Qbr} \cdot Q_{br} + \psi_{0,SLS,Qlk} \cdot Q_{lk} + \psi_{0,SLS,TLEP} \cdot TLEP \quad (4.10)$$

Muiden muuttuvien kuormien käyttörajatilan mitoitusarvoina käytetään eurokoodin soveltamisohjeen NCCI 1 ominaisyhdistelmän arvoja, ellei ohjeessa toisin mainita tai tilaajan kanssa toisin sovita. /1/

4.4 Kuormien yhdistelykertoimet

4.4.1 Yleistä

Tässä ohjeessa käsittelemättömien kuormien yhdistelykertoimet otetaan huomioon eurokoodin soveltamisohjeen NCCI 1 mukaan tai tilaajan kanssa sovittavalla tavalla /1/. Yhdistelykertoimia voidaan tapauskohtaisesti muokata tilaajan kanssa.

4.4.2 Pysyvien ja muuttuvien kuormien yhdistelykertoimet

Tavanomaisten siltojen kantavuuslaskennassa käytettävät pysyvien ja muuttuvien kuormien yhdistelykertoimet murtorajatilassa (ULS) on esitetty taulukossa 4.3.

Taulukko 4.3 Pysyvien ja muuttuvien kuormien yhdistelykertoimet murtorajatilassa.

Kuorma		Tunnus	Yhdistelykerroin $\psi_{0,ULS,i}$			
			Betonisillat		Terässillat ja betoni-teräsliittorakenteiset sillat	Puu-sillat
			TB	JB		
Esijännitys ($E_{d,P}$)		P	-	1,0	1,0	1,0
Pysyvät kuormat ($E_{d,G}$)	Oma paino	G	1,0	1,0	1,0	1,0
	Maan lepopaine ¹⁾	MLEP	1,0	1,0	1,0	1,0
	Kutistuma	KUT	0	1,0	0,5	-
	Tukipainuma	S	0	0,25	0	0
Muuttuvat kuormat ($E_{d,Qk}$)	Pintalämpötilaero ²⁾	T_{dk}	0	0,5	0,25	-
	Lämpötilan muutos	T_{ck}	0	0,5	0,5	-
	Laakerikitka ³⁾	BF	0,6	0,6	0,6	0,6

Tavanomaisten siltojen kantavuuslaskennassa käytettävät kuormien yhdistelykertoimet käyttörajatilassa (SLS) on esitetty taulukossa 4.4.

Taulukko 4.4 Pysyvien ja muuttuvien kuormien yhdistelykertoimet käyttöraja-tilassa.

Kuorma		Tunnus	Yhdistelykerroin $\psi_{0,SLS,i}$			
			Betonisillat		Terässillat sekä betoni-teräsliittorakenteiset sillat	Puu-sillat
			TB	JB		
Esijännitys ($E_{k,P}$)		P	-	1,0	1,0	1,0
Pysyvät kuormat ($E_{k,G}$)	Oma paino	G	1,0	1,0	1,0	1,0
	Maan lepopaine ¹⁾	MLEP	1,0	1,0	1,0	1,0
	Kutistuma	KUT	0	1,0	0,5	-
	Tukipainuma	S	0,25	0,4	0,25	0,25
Muuttuvat kuormat ($E_{k,Qk}$)	Pintalämpötilaero ²⁾	T_{dk}	0,25	1,0	0,25	-
	Lämpötilan muutos	T_{ck}	0,25	0,75	0,5	-
	Laakerikitka ³⁾	BF	0,6	0,6	0,6	0,6

- 1) Maan lepopaineen vaikutuksia laskettaessa tehdään lisäksi tarkistus 0,7-kertaiselle lepopaineelle.
- 2) Betoni-teräs -liittorakenteisissa silloissa otetaan huomioon ainoastaan hyppäyksellinen lämpötilaero.
- 3) Laakerikitka otetaan huomioon ainoastaan alusrakenteiden kuormana.

Pintalämpötilaeron (liittorakenteisissa silloissa hyppäyksellisen lämpötilaeron) sekä lämpötilan muutoksen epäedullisten vaikutusten oletetaan vaikuttavan samaan aikaan.

4.4.3 Tie- ja katusiltojen liikennekuormien yhdistelykertoimet

Tavanomaisten tie- ja katusiltojen kantavuuslaskennassa käytettävät liikennekuormien yhdistelykertoimet murtorajatilassa (ULS) on esitetty taulukossa 4.5.

Taulukko 4.5. Tie- ja katusiltojen liikennekuormien ($E_{d,Lk}$) yhdistelykertoimet murtorajatilassa.

Kuorma	Tunnus	Yhdistelykerroin $\psi_{0,ULS,i}$			
		Betonisillat		Terässillat ja betoni-teräsliittorakenteiset sillat	Puu-sillat
		TB	JB		
Kuormakaaviot AA, EK, EK _{valv} , p	$Q_{k,i}$	1,0	1,0	1,0	1,0
Liikenteen keskipakokuorma	Q_{tk}	1,0	1,0	1,0	1,0
Jarrukuorma / sivusysäys	Q_{lk}	1,0	1,0	1,0	1,0
Liikenteen maanpaine	TLEP	0,75	0,75	0,75	0,75

Tavanomaisten tie- ja katusiltojen kantavuuslaskennassa käytettävät kuormien yhdistelykertoimet käyttöraja-tilassa (SLS) on esitetty taulukossa 4.6.

Taulukko 4.6 Tie- ja katusiltöjen liikennekuormien ($E_{k,Lk}$) yhdistelykertoimet käyttö-
rajatilassa.

Kuorma	Tunnus	Yhdistelykerroin $\psi_{0,SLS,i}$			
		Betonisillat		Terässillat ja betoni-teräs- liittorakenteiset sillat	Puu- sillat
		TB	JB		
Kuormakaaviot AA, EK, EK _{valv} , p	$Q_{k,i}$	1,0	1,0	1,0	1,0
Liikenteen keski- pakokuorma	Q_{tk}	1,0	1,0	1,0	1,0
Jarrukuorma / sivusysäys	Q_{lk}	1,0	1,0	1,0	1,0
Liikenteen maan- paine	TLEP	0,75	0,75	0,75	0,75

Liikennekuormakaavio ja pintakuorma ($Q_{k,i}$) oletetaan aina määrääväksi muuttuvaksi kuormaksi. Liikenteen maanpaineen kanssa samaan aikaan siltakannella olevana kuormana voidaan otaksua olevan pintakuorma p kaikilla kuormakaistoilla tai yksi AA-kaavio millä tahansa muulla kuormakaistalla tai samalla kuormakaistalla vähintään 15 m päässä tarkasteltavasta kaaviosta (ks. kuva 3.2).

4.4.4 Rautatiesiltöjen liikennekuormien yhdistelykertoimet

Tavanomaisten rautatiesiltöjen kantavuuslaskennassa käytettävät liikennekuormien yhdistelykertoimet murtorajatilassa (ULS) on esitetty taulukossa 4.7.

Taulukko 4.7 Rautatiesiltöjen liikennekuormien ($E_{k,Lk}$) yhdistelykertoimet murtoraja-
tilassa.

Kuorma	Tunnus	Yhdistelykerroin $\psi_{0,ULS,i}$		
		Betonisillat		Terässillat ja betoni-teräs- liittorakenteiset sillat
		TB	JB	
LM 71	$Q_{k,i}$	1,0	1,0	1,0
SW/o		1,0	1,0	1,0
Kuormittamaton juna		1,0	1,0	1,0
EN15528:n kaavio		1,0	1,0	1,0
Todelliset junat		1,0	1,0	1,0
Keskipakokuorma	Q_{tk}	1,0	1,0	1,0
Veto- ja jarru- kuormat	Q_{br}	1,0	1,0	1,0
Sivusysäyskuormat	Q_{lk}	1,0	1,0	1,0
Liikenteen maanpaine	TLEP	0,80	0,80	0,80

Tavanomaisten rautatiesiltöjen kantavuuslaskennassa käytettävät kuormien yhdistelykertoimet käyttörajatilassa (SLS) on esitetty taulukossa 4.8.

Taulukko 4.8. Rautatiesiltöjen liikennekuormien ($E_{k,Lk}$) yhdistelykertoimet käyttörajatilassa.

Kuorma	Tunnus	Yhdistelykerroin $\psi_{0,SLS,i}$		
		Betonisillat		Terässillat ja betoni-teräs- liittorakenteiset sillat
		TB	JB	
LM 71	$Q_{k,i}$	1,0	1,0	1,0
SW/0		1,0	1,0	1,0
Kuormittamaton juna		1,0	1,0	1,0
EN15528:n kaavio		1,0	1,0	1,0
Todelliset junat		1,0	1,0	1,0
Keskipakokuorma	Q_{tk}	1,0	1,0	1,0
Veto- ja jarru- kuormat	Q_{br}	1,0	1,0	1,0
Sivusysäyskuormat	Q_{lk}	1,0	1,0	1,0
Liikenteen maanpaine	TLEP	0,80	0,80	0,80

5 Rakenneanalyysi

5.1 Yleistä

Tässä ohjeessa esitetyt laskentaperiaatteet koskevat pääasiassa siltoja, joissa ei ole kantavuuteen vaikuttavia vaurioita. Sillan vauriot, siirtymät, painumat ja siltapaikan mahdolliset olosuhteiden muutokset otetaan huomioon kohdan 5.7 mukaisesti tai tilaajan kanssa sovittavilla tavoilla.

Rakenteita tarkastellaan pääsääntöisesti lineaarisen kimmoteorian mukaan. Eurokoodeista, Liikenneviraston ohjeista sekä tästä ohjeesta poikkeavia laskentamenetelmiä voidaan käyttää erikseen sovittaessa. Väsymisrajatilojen tarkastelujen tulee perustua lineaariseen kimmoteoriaan kaikissa tapauksissa.

Tässä ohjeessa käsitellään liittorakenteisina siltoina betoni-teräs-liittorakenteita. Muiden materiaalien välisten liittorakenteisten siltojen rakenneanalyysi tulee tehdä materiaalikohtaisten ohjeiden mukaan.

Sillan alusrakenteiden geoteknisen kantokestävyyden arvioinnissa tulee käyttää eurokoodin soveltamisohjetta NCCI 7, Sillan geotekninen suunnittelu -ohjetta ja RATO 3 -ohjetta /5/, /6/, /7/.

5.2 Rakenteen mallintaminen

5.2.1 Yleistä

Tarkastelutasolla 1 (ks. kohta 1.2) voidaan rakennemalli tehdä esimerkiksi yksinkertaisena palkkimallina. Tarkastelutasolla 1 ei yleensä mallinneta alusrakenteita.

Tarkastelutasolla 2 rakennemalli tehdään elementtimenetelmällä (FEM) tai vastaavan tarkkuustason omaavalla menetelmällä. Mallintaminen tehdään lähtötietojen ja yleisten mallintamissääntöjen perusteella mahdollisimman tarkasti ottaen huomioon päälly- ja alusrakenteiden toiminta ja todelliset mitat.

5.2.2 Pintakuormien jakaantuminen

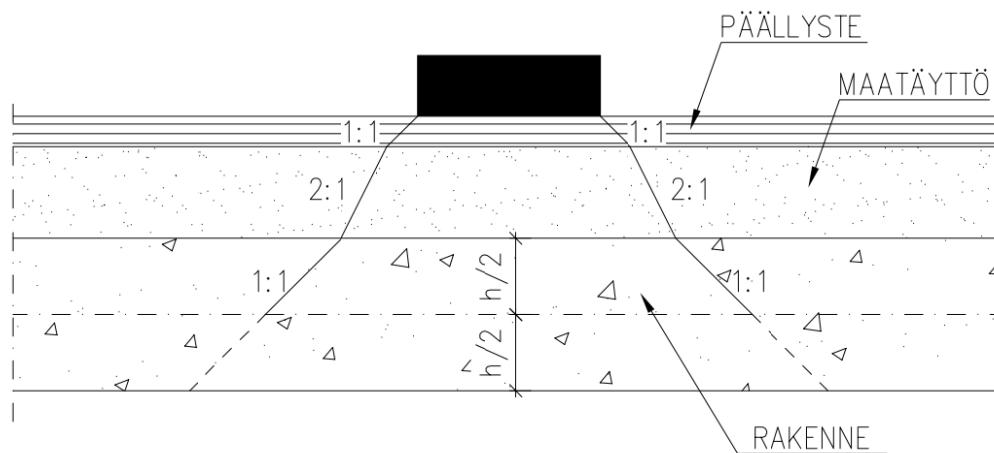
Ajoneuvojen ja junien akselikuormien jakaantuminen pintarakenteissa ja tarkasteltavassa rakenneosassa otetaan huomioon taulukon 5.1 mukaisesti. Tie- ja katusilloilla liikenteen pintakuormien jakaantumisleveys tien poikkisuuntaan ei saa kuitenkaan olla suurempi kuin kuormakaistan leveys.

Kun tarkasteltavana rakenneosana on laattarakenne, kuorman oletetaan jakaantuvan laattarakenteen puoleen väliin. Kun tarkasteltavan rakenteen päällä on sekundäärirakenteita (esimerkiksi laattapalkkirakenne), jakaantuu akselikuorma päärakennetta mitoitettaessa sekundäärirakenteen alapintaan (kuvassa 5.1 esitetty katkoviivalla). Paikallisia vaikutuksia tarkasteltaessa akselikuorman jakaantuminen otetaan huomioon ainoastaan tarkasteltavan rakenteen yläpuolisissa osissa.

Taulukko 5.1 Kuormien jakaantuminen eri materiaaleissa.

Materiaali	Jakaantumissuhde
Asfalttibetoni (AB)	1:1
Muut päällysteet (AA, KBVA)	1,5:1
Suojabetoni	1:1
Maatäyttö, tukikerros	2:1 paikalliset vaikutukset 4:1
Betoni	1:1
Teräs	1:1
Puu	1:1

Kuorma jakautuu ratapölkyille eurokoodin soveltamisohjeen NCCI1 kohdan B.6.3.6 mukaisesti /1/.



Kuva 5.1 Rakennemalliin syötettävän akseli- ja rengaskuorman jakaantuminen.

5.3 Betonisillat

Betonisilloissa voidaan otaksua olevan riittävästi muodonmuutoskestävyyttä, minkä vuoksi pakkovoimille ja rasituksille voidaan tehdä helpotuksia murtorajatilassa. Lisäksi pitkäaikaisten kuormien vaikuttaessa betoni viruu ja mahdollisesti halkeilee, mikä myös vaikuttaa käyttörajatilan rasitukseen.

Palkkisillalle tehdään sekä tukimomentin pyöritys (kohta 5.3.1) että momenttien uudelleen jakaminen (kohta 5.3.3).

Laattasillalle tehdään sekä tukimomentin taseus (kohta 5.3.2) että momenttien uudelleen jakaminen (kohta 5.3.3). Kannen ortotropia otetaan huomioon laskennassa. Halkeilleella betonilla voidaan käyttää Poissonin lukuna 0.

Siltöjen reunapalkkien jäykistävät vaikutukset voidaan ottaa huomioon, jos reunapalkin raudoitus ja ankkurointi voidaan varmuudella todentaa toimivan rakenteellisesti.

5.3.1 Palkkisillan tukimomentin pyöristys

Laskennassa voidaan betonisilla jännitetyillä ja jännittämättömillä palkkisilloilla pyöristää tukimomenttia. Kun palkki on jatkuva tuella, jonka voidaan katsoa toimivan nivelenä, voidaan tukimomentin arvoa pyöristää seuraavalla kaavalla. /8/

$$\Delta M_{Ed} = \frac{F_{Ed,sup} \cdot t}{8} \quad (5.1)$$

missä

$F_{Ed,sup}$ on tukireaktion mitoitusarvo ja
 t on tukipinnan leveys rasiituksen suunnassa.

Jos tukipinta on pyöreä, tukimomentin pyöristyksen suuruus on

$$\Delta M_{Ed} = \frac{F_{Ed,sup} \cdot D}{3 \cdot \pi} \quad (5.2)$$

missä

$F_{Ed,sup}$ on tukireaktion mitoitusarvo ja
 D on tukipinnan halkaisija.

5.3.2 Laattasillan tukimomentin tasaus

Laattasillan tukimomenttia voidaan tasata keskimääräiseksi leveydelle b kaavalla (5.4) /2/.

$$b = D + d \cdot 2,0 \quad (5.3)$$

missä

D on pyöreän pilarin tai laakerin halkaisija. Suorakaiteen muotoisen pilarin tai laakerin tapauksessa voidaan käyttää tarkasteltavan suunnan sivumittaa.
 d on kansilaatan tehollinen korkeus tarkasteltavassa suunnassa

Vinoissa laattasilloissa lopullisen mitoitusmomentin arvo (taivutus + vääntö) tasataan keskimääräiseksi leveydelle $0,6 m + 2d$.

5.3.3 Momenttien uudelleen jakaminen

Pääsuuntien momentit voidaan jakaa rajallisesti uudelleen. Momentin uudelleen jakaminen on sallittu jännittämättömillä betonisilloilla murto- ja käyttörajatilassa sekä jännitetyillä betonisilloilla murtorajatilassa.

Suurin sallittu poikkeama murtorajatilassa kimmoteorian mukaisista taivutusmomentteista on /2/

$$\left(0,56 - 1,25 \cdot \frac{x}{d}\right) \cdot 100\% \leq 15\%, \quad \text{kun } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa}$$

$$\left(0,46 - \left(0,75 + \frac{0,00175}{\varepsilon_{cu2}}\right) \cdot \frac{x}{d}\right) \cdot 100\% \leq 15\%, \quad \text{kun } f_{ck} > 50 \text{ MPa}$$
(5.4)

missä

x on betonin puristuspuinnan korkeus

d on tehollinen korkeus

ε_{cu2} on betonin murtopuristuman yläraja-arvo, kun $f_{ck} > 50 \text{ MPa}$

Käyttörajan tilan momentin siirto edellyttää, että halkeamamomentti ylitetään (ks. luku 7). Käyttörajan tilassa voidaan momenttia siirtää jännittämättömillä betonisilloilla 5 %. Jännitetyn betonisillan tukimomentin siirtoa ei sallita käyttörajan tilassa, mutta betonin vetolujuutta $f_{ctm,fl}$ voidaan hyödyntää.

Momentin uudelleen jakamista ei sallita väsymismitoituksessa.

5.3.4 Laattasillan vääntömomentin jakaminen

Väännöstä aiheutuvia toisiaan vastaan kohtisuoria betonin puristusjännityksiä ja betoniraudoituksen vetojännityksiä voidaan jakaa sillan taivutusrasitusten pää- ja poikkisuunnissa väännönjakokerroimen k avulla, joka on esitetty kaavassa (5.5) /8/.

$$\begin{cases} m_{d,1} = m_1 + k \cdot m_{xy} \\ m_{d,2} = m_2 + \frac{1}{k} \cdot m_{xy} \end{cases} \quad (5.5)$$

missä

$m_{d,1}$ ja $m_{d,2}$ ovat taivutuksen ja väännön sisältäviä mitoitusmomenteja,

m_1 on taivutusmomentti suunnassa, jossa käyttöaste on pienempi,

m_2 on taivutusmomentti suunnassa, jossa käyttöaste on suurempi,

k on väännönjakokerroin ja

m_{xy} on vääntömomentin itseisarvo.

Käyttörajan tilan haitallisen halkeilun välttämiseksi ja murtorajan tilan muodonmuutoskyvyn takaamiseksi väännönjakokerroimen on oltava välillä $0,4 \leq k \leq 2,5$.

5.4 Muut sillat

Teräsiltojen kantavuuslaskennassa ei teräsrakenteiden tukimomenteja saa pyöristää. Betoni-teräs-liittorakenteisissa silloissa momentin uudelleen jakaantuminen otetaan huomioon betonilaatan halkeilun ja viruman kautta pienentämällä tukialueen jäykkyyttä rakennemallissa.

Teräsrakenteiden laskennassa voidaan plastisuusteorian käyttö sallia vastaavalla tavalla kuin eurokoodin soveltamisohjeessa NCCI 4. /3/

5.5 Yksittäiset rakenneosat ja liitokset

Mikäli määräävien kohtien läheisyydessä on alueita tai rakenneosia, joissa laskennallinen kantavuus on olennaisesti pienempi kuin määräävissä kohdissa, arvioidaan niiden vaikutukset tapauskohtaisesti. Määräävä kohta ei aina ole suurimpien voimasuureiden kohdalla. Sillan liitokset on tarkasteltava, jos ne rajoittavat sillan kantavuutta.

5.6 Puupaalurakenteet

Puupaaluperustusten mitoittaminen tehdään ohjeen RIL 254-2011 mukaan ottaen huomioon paaluja ympäröivä maa /34/. Paalun puun lujuus voidaan arvioida kohdan 2.5.2 mukaisesti, mutta mahdollinen puun alhaisempi lujuus tai lujuuden aleneminen rakentamisen jälkeen otetaan huomioon. Puupaalujen jatkoksia ei oleteta jäykiksi.

Suurten paaluryhmien (paaluja ≥ 20 kpl) paalulaattojen kantokestävyys voidaan laskea kuten maanvaraisen perustuksen kantokestävyys. Maanvaraisen perustuksen kantokestävyuden tehollinen pohjapaine jaetaan tasan kyseisen pohjapaineen vaikutusalueella olevien paalujen kesken paalukuormiksi ottaen huomioon paalujen mahdolliset kaltevuudet.

5.7 Vaurioitunut rakenne

5.7.1 Yleistä

Siltöjen kantavuuslaskennassa otetaan huomioon rakenteiden vauriot, jos niillä on heikentävä vaikutus rakenteen kantavuuteen. Vaurioiden vaikutukset otetaan huomioon kestävyudessa ja rakennemallin jäykkyyksissä. Vaurioiden vaikutusten huomioon ottaminen tulee perustua tutkimuksiin, joiden perusteella vaurioiden laajuudet arvioidaan mahdollisimman tarkasti.

Jos vaurioiden etenemistä ei estetä tai vaurioita ei korjata, tulee sillan jäljellä oleva käyttöikä arvioida.

Siltöjen rakenteiden yleisimpiä vauriotyyppejä on esitetty Liikenneviraston julkaisuissa Taitorakenteiden tarkastusohje, Sillantarkastuskäsikirja ja SILKO-ohjeet. /16/, /32/, /33/

Sillan vaurioiden ja tukien siirtymien tai olosuhteiden muutokset geoteknisen kestävyuden laskennassa otetaan huomioon tapauskohtaisesti.

5.7.2 Betonirakenteet

Kantavuuslaskennassa vaurioituneen betonin puristuslujuutena käytetään rakenteesta porattujen lieriöiden puristuskokeiden perusteella saatua lujuutta kohdan 2.2 mukaisesti. Kimmovasarakoe tai vetokoe ei anna luotettavaa tulosta betonin puristuslujuudesta.

Jos puristetussa pinnassa betoni on rapautunut (vetolujuus alle 0,5 MPa) tai irronnut laajalta alueelta yli 15 mm syvyydeltä, on vastaava vähennys tehtävä poikkileikkausarvoihin. Jos betoniterästanko on irronnut betonista tai tankoa ympäröivän betonin vetolujuus on alle 0,5 MPa, ei kyseistä betoniterästankoa oteta huomioon poikkileikkauksen kestävydessä.

Betonissa kiinni olevan betoniterästangon korroosio otetaan huomioon pienentämällä tangon poikkileikkauksalaa syöpmää vastaava määrä tangon pahimman syöpymän kohdalla.

Jos jänneterästen langoissa tai tangoissa on ruosteen aiheuttamia syöpyviä, ei kyseisiä lankoja tai tankoja oteta huomioon poikkileikkauksen kestävydessä. Jänneterästen kunnan tutkiminen tehdään yleensä hyvin rajatulta alueelta sillalla, joten muissa kohdissa olevien jänneterästen mahdolliset syöpymät tulee arvioida vertaamalla tutkitun kohdan ja tarkastelukohdan vaurioita ja sijaintia.

Betonirakenteen halkeamien syyt ja vaikutukset rakenteen kantavuuteen on aina pyrittävä selvittämään. Halkeamatyyppejä ja niiden syitä on esitetty kattavasti SILKO-ohjeessa 1.233 /16/. Kantavuuslaskennan ja sillalla tehtävien tutkimusten avulla voidaan halkeamien syitä arvioida. Jos ylisuuret halkeamat johtuvat rakenteen kantavuusvajeesta, tulee sillalla sallittavan liikenteen painoa rajoittaa.

Teräsbetonirakenteiden vaurioiden vaikutusten arvioinnissa voidaan käyttää apuna Liikenneviraston julkaisua Betonisiltöjen korjaussuunnitteluohje /35/.

5.7.3 Teräsrakenteet

Teräksen korroosiovauriot, säröt ja halkeamat otetaan huomioon poikkileikkauksen pienentymisenä. Lisäksi jos teräsrakenteessa on korroosion aiheuttamaa syöpmää, tulee kyseisen rakenteen väsytyluokkaa alentaa.

Yksittäisten liitososien vauriot otetaan huomioon liitoksen kestävydessä. Jos liitososien vaurioita on samassa liitoksessa useita, otetaan tämä huomioon rakennemallisissa liitoksen jäykkyydessä tilaajan kanssa sovittavalla tavalla. Selkeästi väsymislujouden ylittymisestä aiheutuneiden vaurioiden käsittely tehdään tilaajan kanssa sovittavalla tavalla.

Rakenneosiin mahdollisesti muodostuneet ylimääräiset jännitykset otetaan huomioon kestävyden vähennyksinä.

5.7.4 Puurakenteet

Puurakenteiden lahovauriot ja kuluminen otetaan huomioon vähentämällä lahoa ja kulumista vastaava alue poikkileikkauksesta.

Puurakenteen halkeilu ei yleensä alenna rakenteen kestävyttä merkittävästi. Yli 2 m pitkien puupalkkien ja -pilareiden yli 0,5 m pitkät halkeamat otetaan huomioon kestävydessä ja rakenneosan jäykkyydessä, jos halkeama ulottuu koko rakenteen läpi. Lyhyemmissä rakenneosissa huomioidaan rakenteen läpi menevät halkeamat, jos niillä on huomattava merkitys kantavuuteen.

5.7.5 Kivirakenteet

Kivirakenteen halkeilu ei yleensä heikennä rakenteen kestävyyttä merkittävästi. Halkeilua aiheuttava vetojännitys syntyy yleensä rakenteeseen muodostuvien pakkovoimien vuoksi (esim. tukien epätasaiset painumat). Kivirakenteen haljetessa nämä pakkovoimat vapautuvat. Kivirakenteen kantavuudessa ei siis yleensä ole ongelmia, jos rakenteen siirtymät tai muodonmuutokset eivät ole liian suuria tai kasva ajan myötä.

6 Mitoitus murtorajatilassa

6.1 Yleistä

Kantavuuslaskennassa siltoja ei mitoiteta onnettomuuskuormille. Tässä on esitetty vain Liikenneviraston muista ohjeista poikkeavat käytännöt.

6.2 Vähimmäisraudoitemäärä

Kantavuuslaskennassa betonirakenteilta vaadittavien uusien siltöjen vähimmäisraudoitemäärien ei tarvitse täytyä.

6.3 Betonirakenteen leikkaus ja lävistys

Leikkausvoiman mitoittavana arvona pidetään tuen reunalla d:n päässä sijaitsevaa leikkausvoimaa.

Leikkausvoiman aiheuttama lisävetovoima otetaan huomioon momenttipinnan siirrola. Lisävetovoimaa ei tarvitse lisätä maksimimomentin vaatimaan teräsmäärään.

Betonirakenteen leikkauksessa ja lävistyksessä käytettävä betonin vetolujuus otetaan huomioon seuraavalla kaavalla.

$$f_{ctk,0,05} = f_{ctk} = 0,2 \cdot f_{ck,cube}^{(2/3)} \quad (6.1)$$

missä

$f_{ck,cube}$ on betonin kuutiolujuus

Yksittäisten ylöstaivutettujen betoniterästankojen kestävyys leikkauksessa otetaan huomioon seuraavalla kaavalla.

$$V_{Rd,s} = f_{yd} \cdot A_s \cdot \sin(\alpha), \quad (6.2)$$

missä

A_s on ylöstaivutetun betoniterästangon poikkileikkauksen pinta-ala.

f_{yd} on betoniteräksen myötölujuuden mitoitusarvo murtorajatilassa

α on betoniterästangon ja vaakasuunnan välinen kulma

Betonisillan kaikki kyseissä tarkastelukohdassa toimivat teräkset otetaan huomioon.

Betonilaatan lävistyskestävyys lasketaan eurokoodin soveltamisohjeen NCCI 2 mukaan huomioiden kaavojen (6.3) ja (6.4) mukaiset poikkeamat. Lisäksi betoniraudoituksen mitoituslujuus f_{yd} on korkeintaan 400 MPa.

$$\beta = \frac{0,5}{1 + \frac{1,2e}{\sqrt{A_u}}} \quad (6.3)$$

$$V_u = \text{Max}(V_c ; 0,25 \cdot V_c + V_s) \leq 2 \cdot V_c \quad (6.4)$$

6.4 Betonirakenteen vääntö

Jännittämättömän rakenteen betonin vääntökestävyys lasketaan seuraavalla kaavalla /2/, /21/.

$$T_c = 0,12 \cdot f_{ctd} \cdot W_{tr} \quad (6.4)$$

missä

f_{ctd} on betonin vetolujuuden mitoitusarvo
 W_{tr} on poikkileikkauksen kimmoinen vääntövastus, jota laskettaessa laipan leveydeksi voidaan otaksua enintään kolminkertainen laipan paksuus

Jännitetyillä betonirakenteilla puristava voima lisää vääntökestävyyttä. Jännitetyn betonin vääntökestävyys lasketaan seuraavalla kaavalla /21/.

$$T_c = (\sqrt{1 - 10 \cdot \sigma_x / f_{cd}} - 0,6) \cdot f_{ctd} \cdot W_{tr} \quad (6.5)$$

missä

$\sigma_x = -\frac{P}{A}$ on lopputilan jännevoimasta aiheutuva tasainen puristusjännitys

f_{cd} on betonin mitoituslujuus
 P on lopputilan jännevoima (merkki positiivinen)
 A on tarkasteltavan rakenteen poikkipinta-ala

6.5 Väsyminen

Sillan väsymistarkastelun tarpeellisuus harkitaan yhdessä tilaajan kanssa. Väsymistarkastelu tehdään liikenteellisesti merkittävillä kohteilla, joissa on arvioitu olevan detaljeiltaan, materiaaleiltaan, ympäristöolosuhteiltaan, kuormitustasoltaan tai kuormituskertymältään väsymisen kannalta kriittisiä rakenteita. Väsymistarkasteluja tehdään lähinnä vain päällysrakenteen teräsrakenteille. Päällysrakenteen betoniraudoitteiden väsymistarkastelu tehdään yleensä vain rautatiesilloille. Alusrakenteita ei tarvitse tarkastella väsytykselle.

Väsymismitoituksen laadinnassa käytetään eurokoodien soveltamisohjeissa NCCI 1, NCCI 2 ja NCCI 4 esitettyjä menetelmiä. /1/, /2/, /3/

Liikenteen kuormittaman sillan tai rakenneosan jännitysvaihteluvälejä laskettaessa perustilanteena (perusyhdistelmä/tyhjä silta) pidetään seuraavan kaavan mukaista tilannetta

$$E_d = 1,0 \cdot E_{k,max}(\text{tai } E_{k,min}) + 1,0 \cdot KUT \pm \psi_{0,SLS,Tdk} \cdot T_{dk} \pm \psi_{0,SLS,Tck} \cdot T_{ck} \quad (6.6)$$

missä

$E_{k,max}$	on pysyvien kuormien suurin ominaisarvo
$E_{k,min}$	on pysyvien kuormien pienin ominaisarvo
KUT	on betonin kutistuman ominaisarvo liittorakenteilla
$\psi_{0,SLS,Tdk}$	on pintalämpötilaeron (liittorakenteilla hyppäyksellisen lämpötilaeron) käyttörajatilan yhdistelykerroin
T_{dk}	on pintalämpötilaeron ominaisarvo
$\psi_{0,SLS,Tck}$	on lämpötilan muutoksen käyttörajatilan yhdistelykerroin
T_{ck}	on lämpötilan muutoksen ominaisarvo

Betoniraidoituksen väsymismitoituksen laadinnassa jännitysvaihteluväli lasketaan ainoastaan väsyttävän kuorman aiheuttamalle jännitysvaihteluvälille.

Kaavassa 6.7 lämpötilakuormien merkki ja tukipainuman esiintyvyys valitaan siten, että ne aiheuttavat tarkastettavaan poikkileikkauksen kohtaan mitoituksen kannalta epäedullisen jännityksen. Saatuihin jännityksiin lisätään väsyttävän kuorman aiheuttama vastaavan voimasuureen/jännityksen suurin ja pienin arvo. Väsymismitoituksen laadinnassa käytettävät väsyttävät kuormat on esitetty kohdissa 3.4.5 ja 3.5.5 sekä liitteissä 5 ja 7.

Rakenneteräksen korroosion vaikutukset otetaan huomioon kappaleen 5.7 mukaan.

6.6 Teräsniittien esijännitysvoima

Vanhojen teräsniittien esijännitysvoiman mitoitusarvon oletetaan olevan kaavan (6.8) mukainen, ellei tutkimuksin toisin osoiteta.

$$F_{p,c} = 0,2 \cdot f_{ur} \cdot A_0, \quad (6.8)$$

missä

f_{ur}	on niitin vetomurtolujuus (S235 vastaava teräs: $f_{ur} = 400$ MPa) ja
A_0	on niitin reiän pinta-ala.

6.7 Sillan alusrakenteiden geotekninen kantokestävyyt

Sillan alusrakenteiden geotekninen kantokestävyyt lasketaan eurokoodin soveltamisohjeen NCCI 7, Sillan geotekninen suunnittelu -ohjeen ja RATO 3 -ohjeen mukaan /5/, /6/, /7/.

Kallionvaraisesti perustetun sillan tapauksessa kiinteän kallion kestävyyttä ei tarkastella, jos tuet eivät ole liikkuneet. Mikäli perustukset on tehty kallioluiskien tai kallioleikkausten varaan, tulee perustuksen kestävyyt tarkastaa.

Sillan toiminta ei saa heikentyä siirtymien ja painumien takia. Liikennekuormien aiheuttamien siirtymien ja painumien on oltava palautuvia (kimmoinen toiminta). Tämän vaatimuksen tulee toteutua myös erikoiskuljetusten yhteydessä.

Jos paaluissa on käytetty nivelellisiä tai muunlaisia paaluelementin jäykkyydestä poikkeavia jatkoksia, tulee tämä ottaa huomioon paalujen kestävyyden laskennassa.

Jos sillan alusrakenteissa on siirtymiä, painumia tai niiden aiheuttamia vaurioita, tulee niiden syyt sekä rakenteen rakenteellinen ja geotekninen kestävyyt selvittää erikseen sovittavilla menetelmillä.

Sillan alusrakenteiden geoteknisen kestävyyden laskennassa sovellettava geotekninen luotettavuustaso määräytyy käytettävissä olevien lähtötietöjen perusteella. Mitä heikommat lähtötiedot ovat, sitä pienempi käyttöaste sallitaan. Geoteknisen kestävyyden laskentaa varten tulee olla käytettävissä riittävät lähtötiedot. Jos lähtötiedot eivät ole riittävät, selvitetään pohjasuhteet sekä alusrakenteiden mitat ja kunto tekeillä tarvittavat tutkimukset.

Geoteknisiä luotettavuustasoja on kolme:

- **Geotekninen luotettavuustaso 1**
Sillasta on käytettävissä vähintään yleispiirustus (tai vastaava), jossa on esitetty sillan perustukset tai alusrakenne mittoineen ja pohjanvahvistukset sekä siltapaikan maakerrosrakenne.
- **Geotekninen luotettavuustaso 2**
Edellisen kohdan lisäksi on käytettävissä sillan rakennesuunnitelmat laskelmineen sekä geosuunnitelmat laskelmineen tai perustamistapa-lausunto, jossa on esitetty keskeiset pohjasuhdeseikat ja alusrakenteen mitoitukseseen liittyvät asiat.
Vaihtoehtoisesti: Sillasta on käytettävissä vähintään yleispiirustus (tai vastaava), jossa on esitetty sillan perustukset tai alusrakenne mittoineen ja pohjanvahvistukset. Lisäksi siltapaikalla on tehty tai tehdään luotettavat pohjatutkimukset ja alusrakenteen tutkimukset
- **Geotekninen luotettavuustaso 3**
Sillasta löytyy edellisen kohdan lisäksi rakentamisen aikaiset laadunvarmistusdokumentit ja rakenteiden toteutumatiiedot.

Geoteknisen laskennallisen mitoituksen tulee perustua eurokoodin soveltamisohjeen NCCI 7 mukaiseen osavarmuuslukumenetelmään. Lähtötietöjen tarkkuus otetaan huomioon muuttamalla geoteknisen kestävyuden antura-, laatta- ja paaluperustusten osavarmuuslukua eurokoodin soveltamisohjeessa NCCI 7 esitetyistä seuraavalla tavalla:

- **Geotekninen luotettavuustaso 1**
Geoteknisen kestävyuden osavarmuuslukua korotetaan 50 %.
Helppoissa olosuhteissa (GL 1) korotus on 25 %.
- **Geotekninen luotettavuustaso 2**
Geoteknisen kestävyuden osavarmuuslukua ei muuteta.
- **Geotekninen luotettavuustaso 3**
Geoteknisen kestävyuden osavarmuuslukua alennetaan 0...15 %. Tässä otetaan huomioon laadunvarmistusaineiston ja rakenteiden toteutumatiötojen taso ja kattavuus.

Edellä esitetyt arvot perustuvat oletukseen, että kantavuuslaskennassa perutuksiin kohdistuvat kuormitukset vastaavat luotettavuustasoltaan NCCI 1 mukaisten kuormien todellisia vaikutuksia.

Jos sillan kuntoa on seurattu säännöllisesti ja ei ole havaittu geoteknisen kestävyuden puutteita tai heikentymistä, voidaan ilman tarkempaa alusrakenteiden geoteknistä kantokestävyuden tarkastelua sallia erikoiskuljetukselle 10 % kokonaistukireaktion kasvu kyseisen sillan suunnittelukuormien mukaiseen kokonaistukireaktioon verrattuna. Tämä edellyttää, että sillan pysyvät kuormat ja liikennekuorman epäkeskisyys eivät eroa suunnittelun aikaisista oletuksista.

7 Mitoitus käyttörajatilassa

7.1 Yleistä

Kantavuuslaskennassa siltoja ei mitoiteta pitkäaikaisille kuormille.

Rautatiesiltojen kuormitustasoa nostettaessa käyttötilatarkastelut koskevat myös kiskoon kohdistuvia muodonmuutoksia ja jännityksiä.

7.2 Betonirakenteen jännitysten ja halkeamaleveyksien rajoittaminen

Käyttörajatilatarkasteluissa tulee betonisiltojen rasituksia rajoittaa, jotta voidaan välttää haitallisen halkeilun ja palautumattomien muodonmuutoksien syntyminen.

Mikäli halkeamaleveysrajat ylittyvät varmuuden murtorajatilassa ollessa riittävä, sovitetaan tilaajan kanssa mahdollisista jatkotoimenpiteistä.

Jännittämättömien ja jännitettyjen betonisiltojen betoniraudoituksen jännitykset tulee rajoittaa kimmorajaan f_{yk} , mutta enintään arvoon 400 MPa. Betonin puristusjännitykset tulee rajoittaa arvoon $0,6f_{ck}$, jos betonin puristuspuolella ei ole rasiitukseen nähden poikittaista raudoitusta ja arvoon $0,7f_{ck}$, jos poikittaisraudoituksen tai hakojen enimmäisjakoväli on enintään 250 mm. Betoni-teräs -liittorakenteisten siltojen betonin suurin sallittu käyttörajatilan puristusjännitys on $0,7f_{ck}$.

Tavanomaisten jännittämättömien ja jännitettyjen betonisiltojen pitkäaikaisia puristusjännityksiä ja halkeamaleveyksiä ei tarkastella sillan kantavuutta arvioitaessa.

Betonin vetolujuus voidaan ottaa huomioon halkeamatarkasteluissa, jos rakenteeseen ei ole koskaan kohdistunut niin suurta kuormitusta, että kyseisen kohdan betonin vetolujuus olisi ylittynyt. Ensimmäisen halkeaman muodostumiseen vaadittava momentti (halkeamamomentti) lasketaan seuraavalla kaavalla. /22/

$$M_{cr} = f_{ctm,fl} \cdot W \quad (7.1)$$

missä

W on poikkileikkauksen taivutusvastus vedetyn reunan suhteen
 $f_{ctm,fl}$ on betonin keskimääräinen taivutusvetolujuus

$$f_{ctm,fl} = (1,6 - h) \cdot f_{ctm} \geq f_{ctm} \quad (7.2)$$

missä

h on rakenneosan korkeus [m]
 f_{ctm} on betonin vetolujuuden keskiarvo

Sallitut halkeamaleveydet jännittämättömässä teräsbetonisessa sillassa ovat

- $w_k \leq 0,35$ mm ajoneuvoasetuksen ja junien kuormille
- $w_k \leq 0,35$ mm erikoiskuljetuksille reitistökuljetuksena
- $w_k \leq 0,40$ mm erikoiskuljetuksille kertakuljetuksena
- $w_k \leq 0,50$ mm erikoiskuljetuksille valvottuna kuljetuksena

Sallitut halkeamaleveydet jännitettyssä betonisillassa ovat

- $w_k \leq 0,10$ mm ajoneuvoasetuksen ja junien kuormille
- $w_k \leq 0,10$ mm erikoiskuljetuksille reitistökuljetuksena
- $w_k \leq 0,20$ mm erikoiskuljetuksille kertakuljetuksena
- $w_k \leq 0,30$ mm erikoiskuljetuksille valvottuna kuljetuksena

Sallittu halkeamaleveys kerrotaan kertoimella $c/C_{min,dur} \leq 1,4$, missä c on todellinen betonipeite ja $C_{min,dur}$ on eurokoodin soveltamisohjeen NCCI 2 mukainen betonipeitteen ympäristöolosuhteiden vähimmäisarvo /2/. Sallittu halkeamaleveys on kuitenkin vähintään 0,10 mm.

Tartunnallisilla jänteillä jännitetyn betonisillan kestävyttä arvioitaessa suoritetaan ajoneuvoasetuksen mukaisille kuormille vetojännitysrajatilatarkastelu käyttäen kuormituksena pysyvien kuormien lisäksi 30 % kohdan 3.4.1 mukaisista kuormien ominaisarvoista. Vetojännitystarkastelulla tarkastetaan, onko rakenteessa vetojännityksetön tila.

7.3 Taipumat

Taipumat eivät saa haitata sillan toimintaa tai sen käyttäjien turvallisuutta. Sillan pää rakenneosien määrävimmät taipumat sekä sekundäärirakenteiden poikkeuksellisen suuret taipumat tulee esittää laskentatuloksissa. Mikäli sallitut taipumarajat ylitetään ja silta muuten kestää rasitukset, tulee jatkotoimenpiteistä sopia tilaajan kanssa.

Taulukossa 7.1 on esitetty tie- ja katusiltöjen taipumarajat kantavuuslaskennassa. Pääkannattajan ulokkeen taipuma saa olla kaikissa tapauksissa enintään 25 mm.

Joissain tapauksissa päärakenteen taipumalla voi olla suuri merkitys sillan pintarakenteiden ja kansirakenteen kuntoon. Tällöin tilaaja voi tiukentaa kohdekohtaisesti sallittuja taipumarajoja.

Eurokoodien mukaista puusiltöjen pysyvien kuormien viruman aiheuttamaa lisätaipumaa ei oteta huomioon.

Rautatiesiltojen muodonmuutokset vaikuttavat junan kulkuominaisuuksiin ja matkustajamukavuuteen. Nämä otetaan huomioon eurokoodin soveltamisohjeen NCCI 1 mukaisesti. /1/

Taulukko 7.1 Siltojen kantavuuslaskennassa sallitut taipumat.

Rakenne	Kuorma	Sallittu taipuma	
		kentässä	ulokkeella
Betonisillat	1 AA-kaavio	L/600	L/240
	1 EK-kaavio reitistökuljetus	L/600	L/240
	1 EK-kaavio kertakuljetus	L/500	L/200
	1 EK-kaavio valvottuna	L/400	L/160
Terässillat	1 AA-kaavio	L/600	L/240
	1 EK-kaavio reitistökuljetus	L/600	L/240
	1 EK-kaavio kertakuljetus	L/500	L/200
	1 EK-kaavio valvottuna	L/400	L/160
Betoni-teräs-liittorakenteiset sillat	1 AA-kaavio	L/600	L/240
	1 EK-kaavio reitistökuljetus	L/600	L/240
	1 EK-kaavio kertakuljetus	L/500	L/200
	1 EK-kaavio valvottuna	L/400	L/160
Puusillat	1 AA-kaavio	L/480	L/192
	1 EK-kaavio reitistökuljetus	L/480	L/192
	1 EK-kaavio kertakuljetus	L/400	L/160
	1 EK-kaavio valvottuna	L/320	L/128

7.4 Alusrakenteiden geotekninen kantokestävyys

Alusrakenteiden geoteknisen kantokestävyyslaskentaan kuuluvat maalajiominaisuuksista ja maakerrosrakenteesta riippuvat painumatarkastelut. Lasketun painuman vaikutukset otetaan huomioon myös päällysrakenteen ja pilareiden tarkasteluissa, mikäli 10 mm tukipainumaero tukilinjojen välillä ylittyy.

7.5 Laakereiden kantavuus

Mikäli laakereiden kantavuus tulee määrääväksi sillalla, sovitaan jatkotoimenpiteistä tilaajan kanssa. Alla on esitetty teräksisen rullalaakerin kantavuuden laskenta.

Suurin rullan kantavuus A_{sall} [kN] lasketaan seuraavalla kaavalla /23/

$$A_{sall} = K \cdot r \cdot l \quad (7.3)$$

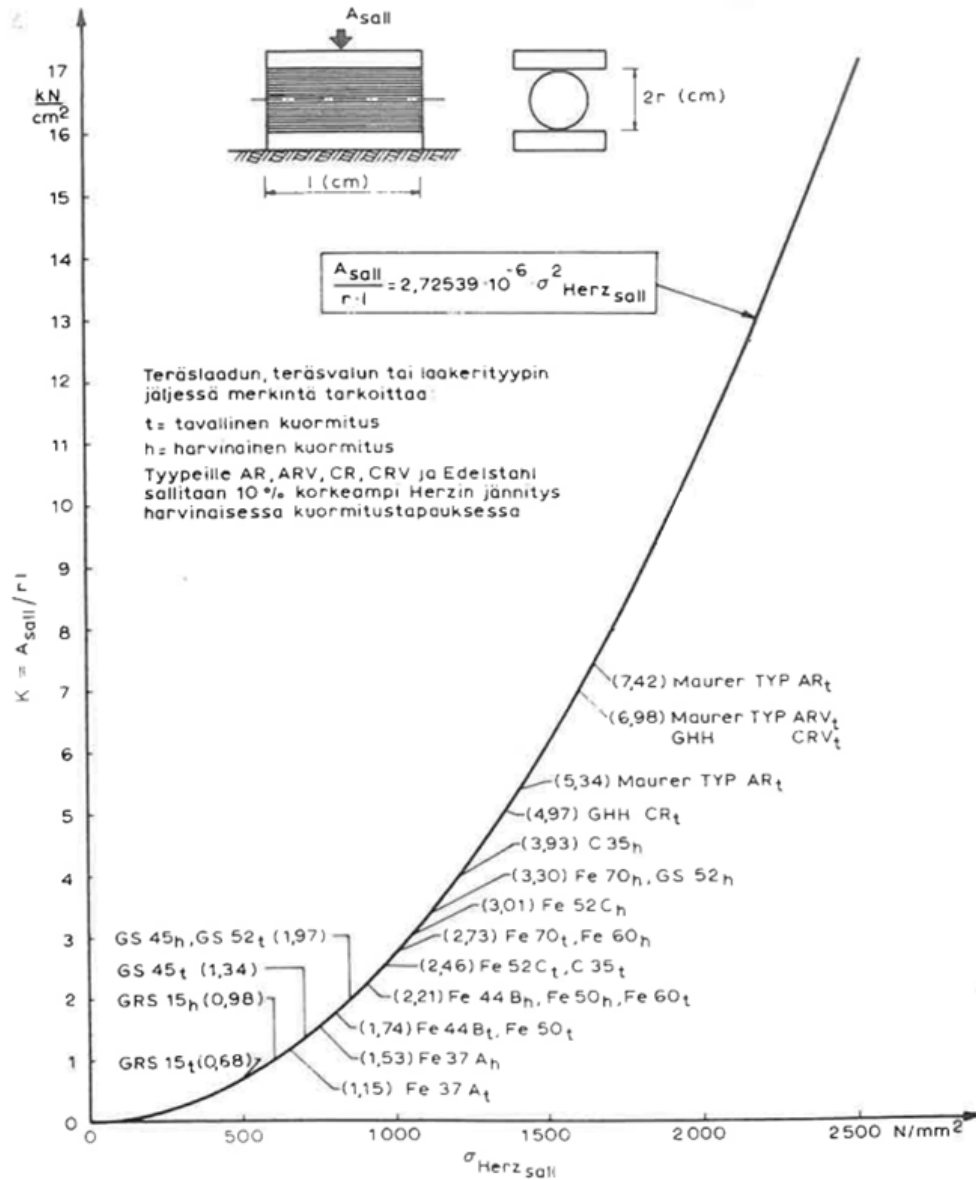
missä

K on kerroin, joka saadaan kuvasta 7.1 (kuvaajan laakerin materiaalityypin edessä suluissa oleva arvo) [kN/cm²]. Kuvasta 7.1 puuttuvilla erikoislujilla teräksillä (mm. Kreuz) K = 7,5.

r on rullan säde [cm]

l on rullan pituus [cm]

Laskettua rullan kantavuutta A_{sall} verrataan kuormien käyttörajatilan ominaisarvoihin. Kuvassa 7.1 oleva $t = tavallinen$ kuormitus kuvaa ajoneuvoasetuksen mukaisia kuormia tai erikoiskuljetusta kerta- ja reitistökuljetuksena ja $h = harvinainen$ kuvaa erikoiskuljetusta valvottuna kuljetuksena. /23/



Kuva 7.1 Rullan kantavuus eri laakerityypeillä, teräsladuilla ja kuormitustapauksilla. /23/

8 Laskelmien ja tulosten esitys

Sillan kantavuuslaskennasta tehdään tiivistelmä, jossa esitetään lyhyesti laskennassa käytetyt oleelliset asiat sekä tulokset. Laskelmien ja tulosten esittämisessä voidaan käyttää apuna Liikenneviraston julkaisua Siltojen rakennelaskelmat /36/.

8.1 Sillan lähtötiedot

Sillan lähtötiedoissa kuvataan tarkasteltava kohde laskennan kannalta tarpeellisessa laajuudessa. Alla on listattu yleisimpiä lähtötiedoissa esitettäviä asioita.

- siltanumero
- suunnitelmanumero
- siltatyyppi
- sijainti
- rakennusvuosi
- suunnittelukuorma
- peruskorjausvuodet ja peruskorjaustoimenpiteet
- perustamistapa ja pohjaolosuhteet
- oleelliset mitat
- raiteiden asemat ja tukikerroksen korkeus
- muut olennaiset rakenteet ja varusteet
- materiaalit
- kantavuuslaskentaan vaikuttavat mahdolliset tutkimukset ja sillan kunto

Liitteenä voidaan esittää myös lähtötietoja täydentäviä tietoja, esimerkiksi piirustukset, tutkimustulokset jne. Mikäli kantavuuslaskennan kannalta oleellisia lähtötietoja ei ole saatavilla, sovitaan toimenpiteistä erikseen tilaajan kanssa.

8.2 Laskennan lähtötiedot

Laskennan lähtötiedoissa esitetään rakenneanalyysiin vaikuttavat lähtötiedot ja oletukset.

- mahdollisten vaurioiden tai olosuhteiden vaikutukset laskentaan
- kantavuuslaskentaohjeesta poikkeavat menetelmät perusteluineen
- erikseen sovitut asiat
- materiaaliominaisuudet
- kuormat

8.3 Rakenneanalyysi

Rakenneanalyysissä tehtävät mitoitusvaikutukset ja helpotukset esitetään selkeästi laskelmissa.

- kuvaus rakennemallista
- rakennemallin poikkileikkausarvot ja niihin vaikuttavat asiat
- rakennemallin rakenteen ja maan yhteistoiminnan periaatteet
- kuormien sijoittelu
- kuormien yhdistely
- muut laskennassa käytetyt oletukset ja helpotukset perusteluineen
- voimasuureet ja siirtymät

8.4 Mitoitus

Mitoituksen tuloksena määritetään erikoiskuljetuskaavioiden suurimmat sallitut akselipainot, erikoiskuljetuksen käyttöaste tai sillan painorajoituksen tarve.

- esitetään, mitkä asiat on mitoitettu
- rakenteiden kestävyysmitoitukset

8.5 Yhteenveto

Lopuksi kootaan mitoitusvaikutukset yhteen ja tehdään kantavuuslaskennasta yhteenveto. Lisäksi esitetään mahdolliset jatkotoimenpiteet. Päälysrakenteen kantavuuden tiettyjen välivaiheiden ja tulosten esittämisessä sovelletaan myöhemmin julkaistavaa laskentataulukkoa.

Taitorakennerekisteriä varten tiesiltöjen erikoiskuljetuskaavioiden kantavuusarvot esitetään suurimpina mahdollisina akselipainoina (X) seuraavien voimasuureiden osalta:

- *päärakenteen määräävä kenttämomentti*
- *päärakenteen määräävä tukimomentti*
- *päärakenteen määräävä leikkausvoima maatuilla*
- *päärakenteen määräävä leikkausvoima välituilla*
- *määräävä tukireaktio maatuilla*
- *määräävä tukireaktio välituilla*
- *sekundäärirakenteen/poikkipalkin/kannen poikkisuunnan määräävä rasitus*

niin, että kunkin voimasuureen osalta 100 % käyttöaste toteutuu.

Viiteluettelo

1. Eurokoodin soveltamisohje, Siltojen kuormat ja suunnitteluperusteet - NCCI 1. Verkkojulkaisu. Helsinki, Liikennevirasto, 2014.
2. Eurokoodin soveltamisohje, Betonirakenteiden suunnittelu – NCCI 2. Verkkojulkaisu. Helsinki, Liikennevirasto, 2014.
3. Eurokoodin soveltamisohje, Teräs- ja liittorakenteisten siltojen suunnittelu – NCCI 4. Verkkojulkaisu. Helsinki, Liikennevirasto, 2014.
4. Eurokoodin soveltamisohje, Puurakenteiden suunnittelu – NCCI 5. Verkkojulkaisu. Helsinki, Liikennevirasto, 2013.
5. Eurokoodin soveltamisohje, Geotekninen suunnittelu – NCCI 7 – Siltojen ja pohjarakenteiden suunnitteluohjeet. Verkkojulkaisu. Helsinki, Liikennevirasto, 2013.
6. Sillan geotekninen suunnittelu, Sillat ja muut taitorakenteet. Verkkojulkaisu, Helsinki, Liikennevirasto, 2012.
7. Ratatekniset ohjeet (RATO) osa 3. Verkkojulkaisu. Helsinki, Ratahallintokeskus 2008.
8. SFS-EN 1992-1-1. Eurokoodi 2. Betonirakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt ja sen kansallinen liite.
9. SFS-EN 338. Structural timber. Strength classes.
10. SFS-EN 335. Durability of wood and wood-based products. Use classes: definitions, application to solid wood and wood-based products.
11. SFS-EN 1995-1-1. Eurokoodi 5. Puurakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt ja sen kansallinen liite.
12. B4. Suomen Rakentamismääräyskokoelma. Betonirakenteet. Ohjeet 2005. Helsinki, Ympäristöministeriö, 2005.
13. B7. Suomen Rakentamismääräyskokoelma. Teräsrakenteet. Ohjeet 1996. Helsinki, Ympäristöministeriö, 1996.
14. B10. Suomen Rakentamismääräyskokoelma. Puurakenteet. Ohjeet 2001. Helsinki, Ympäristöministeriö, 2000.
15. by 50 Betoninormit 2004. Helsinki, Suomen Betoniyhdistys r.y., 2004. ISBN 952-5075-60-5.
16. Siltojen korjausohjeet – SILKO. Jatkuvasti täydennettävä kansiosarja. Verkkojulkaisu.
17. Sillantarkastusohje. Helsinki, Tiehallinto, 2004. ISBN 951-803-195-9, TIEH 2000008-04.
18. RIL 63 c Puurakenteiden normit (1969, 1970) 1973. Vammala, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto r.y.
19. RIL 120-2001 Puurakenteiden suunnitteluohjeet. Helsinki, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto r.y. ISBN 951-758-420-2.
20. RIL 205-2003 Puurakenteiden suunnittelu, Euronormi. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto r.y. ISBN 951-758-437-7.
21. by 131 Jännebetonirakenteiden mekaniikka ja mitoitus. 1-Luokan betonirakenteiden suunnittelija 1989. Suomen Betoniyhdistys r.y. ISBN 951-9365-39-7.
22. by 210 Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus 2008. Suomen Betoniyhdistys r.y., Matti V. Leskelä. ISBN 978-952-5075-96-0.
23. RIL 167-2-1992 Teräsrakenteet II 1992, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto r.y. ISBN 951-758-269-2.
24. Teräsbetonirakenteiden palomitoitus korjausrakentamisessa. Diplomityö. Tampereen Teknillinen Yliopisto, Juho Keitaanniemi, 2012.

25. RIL 205-1-2009 Puurakenteiden suunnitteluohje, Eurokoodi SFS-EN 1995-1-1. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto r.y. ISBN 978-951-758-510-1
26. RIL 106 Puurakenteet. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto r.y. ISBN 951-758-006-1.
27. RIL 120 Puurakenteiden suunnitteluohje 1978. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto r.y. ja Suomen Standardoimisliitto.
28. SFS-EN 14081-1 + A1. Puurakenteet. Lujuuslajiteltu poikkileikkaukseltaan suora-kaiteen muotoinen rakennuspuutavara. Osa 1: Yleiset vaatimukset ja sen kansallinen liite.
29. SFS-EN 1993-1-9. Eurokoodi 3: Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-9: Väsyminen ja sen kansallinen liite.
30. RIL 153 Liimapuurakenteet. Suomen Rakennusinsinöörien liitto r.y. ISBN 951-758-043-6.
31. Rakentajain kalenteri 1976. Rakennusmestarien keskusliitto. ISBN 951-676-003-1.
32. Taitorakenteiden tarkastusohje. LO 17/2013. Helsinki, Liikennevirasto, 2013.
33. Sillantarkastuskäsikirja – Suunnittelu- ja toteuttamisvaiheen ohjaus. LO 26/2013. Helsinki, Liikennevirasto, 2013.
34. RIL 254-2011 Paalutusohje 2011 - PO-2011. Osa 1: suunnittelun perusteet. Osa 2: paalutusohje. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto r.y., Suomen Geoteknillinen Yhdistys r.y. ISBN 978-951-758-528-6.
35. Betonisiltojen korjaussuunnitteluohje - Betonisiltojen levennyksen ja suurempien valukorjausten mitoitus- ja suunnitteluohje. Helsinki, Liikennevirasto, 2011.
36. Siltojen rakennelaskelmat. Verkkojulkaisu. Helsinki, Liikennevirasto, 2012.
37. Taitorakenteiden rakennussuunnitelmien tarkastusohje. Verkkojulkaisu. Helsinki, Liikennevirasto, 2014.
38. Elinkeino- Liikenne- ja Ympäristökeskus. Verkkosivu. www.ely-keskus.fi
39. SFS-EN 15528. Kiskoliikenne. Ratalinjojen luokitus. Rautatievaunujen kuormitusrajat ja infrastruktuuri.
40. SFS-EN 14080. Timber structures. Glued laminated timber and glued solid timber. Requirements.

Teräspalkkibetoniset laattasillat

1 Yleistä

Teräspalkkibetonisella laattasillalla tarkoitetaan tässä liitteessä siltaa, jossa profiilitaan I tai H muotoiset teräspalkit on valettu täysin tai palkin alalaippaa lukuun ottamatta betonilaatan sisään jännevälin suunnassa. Betonin tulee peittää teräspalkkien ylälaippa kokonaan. Rakenteessa on tavanomaisesti poikittaisessa suunnassa joko sileitä tankoja tai harjaterästankoja. Rakenne käsitetään pääsuunnassa liittopalkki- tai teräsrakenteena ja poikittaisessa suunnassa teräsbetonirakenteena.

Kyseisen tyyppin siltoja rakennettiin Suomessa lähinnä rautateille 1900 -luvun alkupuolella. Alun perin sillat suunniteltiin siten, että vain teräspalkit toimivat kantavana rakenteena, jolloin olettamalla betonin ja teräksen toimivan liittorakenteena voidaan saavuttaa alkuperäistä korkeampia kantavuuksia.

Mikäli teräsosien korroosioastetta ei erikseen selvitetä, tulee kantavuuslaskennassa käyttää vähintään 2 mm korroosiovähennystä alalaipan paksuudesta ja 4 mm korroosiovähennystä alapinnan poikittaisten betoniterästankojen halkaisijasta. Korroosioauriot voivat ilmetä teräspalkkien suuntaisina halkeamina betonilaatan alapinnassa.

Siltojen kantavuuslaskentaohjetta sovelletaan tässä liitteessä, ellei toisin mainita.

Teräspalkkibetonisella poikkileikkauksella tarkoitetaan tässä liitteessä yhden teräspalkin ja sitä ympäröivän betonin muodostamaa poikkileikkausta, jonka leveys on teräspalkkien k/k-jako.

Tämän liitteen ohjeet pohjautuvat Tampereen teknillisellä yliopistolla vuosina 2011–2012 tehtyyn tutkimukseen.

2 Rakenneanalyysi

2.1 Kuormat

Kutistuman ja lämpötilakuormien vaikutukset päällysrakenteeseen voidaan jättää huomiotta.

Rakentamisjärjestys tulee ottaa huomioon rakenteen kimmoisten jännitysten laskennassa.

2.2 Poikkileikkauksen jäykkyys

Teräspalkkibetonisen poikkileikkauksen taivutusjäykkyyttä ja jännityksiä laskettaessa oletetaan betonilaatan halkeilleen kimmoisalle neutraaliakselille asti, jolloin jäljelle jäänyt puristuspuolen betonilaatta voidaan muuntaa teräkseksi kimmokertoimien suhteella.

2.3 Yksinkertaistettu tarkastelu

Teräspalkkibetoninen laatta voidaan käsitellä yksiulotteisena rakenneosana (palkki-rakenteena), kun kunkin pystykuorman oletetaan jakautuvan laatan leveys suunnassa laattakaistalle, jonka leveys riippuu kuorman leveydestä. Laattakaistan leveyttä las-
kettaessa kuorman jakautuminen eri kerrosten läpi laatan painopiste akselille voidaan ottaa huomioon kantavuuslaskentaohjeen kohdan 5.1 mukaan.

Esimerkki kuorman jakaantumisesta leveys suunnaiselle laattakaistalle teräspalkki-
betonisen laatan yksiulotteisessa tarkastelussa.

- Laatan leveys $B = 10$ m ja jänneväli $L = 5$ m.
- Omapaino $g = 20$ kN/m².
 - Oman painon vaikutus on
$$m_g = \frac{g \cdot B \cdot L^2}{8 \cdot B} = 63 \text{ kNm/m}$$
- Hyötykuorma $F = 250$ kN, vaikutusleveys $B_F = 4,0$ m.
 - Vaikutus hyötykuormalle on
$$m_F = \frac{F \cdot L}{4 \cdot B_F} = 78 \text{ kNm/m}$$
- Maksimirasitus saadaan summaamalla.
 - $m_g + m_F = 141$ kNm/m

Tässä yksinkertaistetussa analyysissä poikittaisen suunnan vaikutusta kantavuuteen ei tarvitse tarkastella. Tämän kappaleen mukaan lasketun kantavuuden saavuttami-
nen edellyttää kuitenkin laatan poikittaisen suunnan vaurioitumista. Jos poikittaisen
suunnan vaikutusta ei erikseen tarkastella, tulee silta asettaa tehostettuun tarkkai-
luun.

2.4 Laattateoriaan perustuva tarkastelu

Rakenne voidaan mallintaa kuten normaali laatta joko lineaarisesti kimmoisella laat-
tamallilla tai arinamallilla, joissa rakenteen eri jäykkydet pää- ja poikkisuunnassa on
otettu huomioon. Rakenteen poikki- ja pituussuunnan tarkastelut tehdään kahdella
tavalla, joista valitaan mitoittavin vaihtoehto.

- Rakenteen molempien suuntien taivutus- ja vääntöjäykkyys otetaan huomioon
täydellä arvolla.
- Rakenteen poikittaisen suunnan taivutus- ja vääntöjäykkyys otetaan huomi-
oon puolella arvolla.

2.5 Jatkuvat sillat

Konservatiivinen arvio rakenteen toiminnasta on olettaa jatkuvan sillan jänteiden
toimivan erillisinä vapaasti tuettuina laattoina.

Jos jatkuvuus halutaan ottaa huomioon, on varmistettava, että rakenne on todellisu-
udessa rakennettu jatkuvana eikä teräspalkkien jatkuvuutta ole katkaistu välituella.
Mikäli rakenteen oletetaan toimivan liittorakenteena välituella tai kun laatan alapinta
on puristettuna, otetaan tarkastelussa huomioon ainoastaan teräspalkin alareunan
yläpuolella oleva betoni.

3 Rajatilamitoitus

3.1 Käyttörajatila

Käyttörajatilassa lasketaan tartuntajännitys teräspalkin ja betonilaatan rajapinnassa, taipumat sekä halkeamaleveydet poikittaisessa suunnassa.

Tartuntajännityksen laskennassa oletetaan teräspalkin suuntainen betonin puristusresultantin suuruuden muutos (leikkausvuo) tasaiseksi leikkausjännitykseksi teräspalkin ja betonin väliselle rajapinnalle. Leikkausjännitys lasketaan seuraavalla kaavalla.

$$\tau = \frac{\alpha}{(\alpha+1)e} \frac{Q}{l} \quad (3.1)$$

missä Q on poikkileikkauksessa vaikuttava pystysuuntainen leikkausvoima ja α sekä e halkeilleen poikkileikkauksen ominaisuuksia. Liittopoikkileikkauksen liittojäykkyyserroin α lasketaan seuraavalla kaavalla.

$$\alpha = \frac{e^2}{EI_{c+a}} \cdot \frac{EA_c \cdot EA_a}{EA_{c+a}} \quad (3.2)$$

missä

e	on osien neutraaliakselien välinen etäisyys
EA_c	on betonin aksiaalinen jäykkyys
EA_a	on teräsoosan aksiaalinen jäykkyys
EA_{c+a}	on osien aksiaalijäykkyyksien summa
EI_{c+a}	on osien taivutusjäykkyyksien summa

Leikkausvoimaa ei tarvitse katsoa lähempää kuin $2d$:n päästä rakenteen päätytuelta. d on etäisyys teräspalkin alalaidasta betonilaatan yläpintaan.

Muuttuja l on se teräspoikkileikkauksen piiri, johon betoni tartunnalla kiinnittyy. Piirin laskennallinen arvo riippuu siitä, onko profiili kokonaan betonin sisällä vai ei:

$$l = \begin{cases} 2h_w + 2b_f, & \text{jos teräspalkki on täysin betonin ympäröimä} \\ 2h_w + b_f, & \text{jos teräspalkin alapinta ei ole betonilaatan sisällä} \end{cases} \quad (3.3)$$

missä h_w on teräspalkin uuman korkeus ja b_f laipan leveys.

Jos käyttörajatilan ominaiskuormilla laskettu tartuntajännitys ylittää arvon 0,7 MPa, ei rakennetta voi tarkastella liittorakenteena käyttö- eikä murtorajatilassa. Jos rakenne on rakennettu tukemattomana, ei laatan oman painon vaikutuksia tarvitse ottaa huomioon tartuntajännityksessä.

Taipumia laskettaessa voidaan rakenteen pääsuunnan taivutusjäykkyydeksi olettaa halkeilemattoman ja täysin halkeilleen tilan keskiarvo.

Poikittaisessa suunnassa halkeamaleveydet lasketaan samalla tavalla kuin teräsbetonirakenteessa.

3.2 Murtorajatila

Uuman lommahdusta, shear lag -ilmiötä tai palkkien kiepahdusta ei tarvitse ottaa huomioon. Jos käyttörajatilan tartuntajännitys on liian korkea ($> 0,70$ MPa), ei rakennetta voi murtorajatilassa käsitellä liittorakenteena.

Teräspalkkibetonisen rakenteen poikkileikkauksen kestävyuden voi tarkistaa poikkileikkausluokissa 2 tai 3. Poikkileikkausluokassa 3 rakenteen voi olettaa toimivan liittorakenteena ilman liukuman vaikutusta, jos käyttörajatilassa tartuntajännitys on alle $0,7$ MPa.

Poikkileikkausluokassa 2 kestävyuden voi tarkistaa ideaaliplastisella jännitysjakamalla, mutta betonin puristusresultantin arvo voi olla enintään:

$$N_{c,max} = a \cdot l \cdot \tau_d \quad (1.4)$$

missä

a	on tarkastettavan poikkileikkauksen ja tuen välinen etäisyys
l	on kaavan 1.3 mukainen piiri
τ_d	on tartuntajännityksen maksimiarvo murtorajatilassa, jona käytetään arvoa $1,0$ MPa

Pääsuunnan leikkauskestävyyttä määritettäessä betonin vaikutusta ei oteta huomioon. Jos poikkileikkauksen leikkausvoima on yli puolet sen plastisesta leikkauskestävyydestä, tulee leikkausvoiman vaikutus taivutuskestävyyteen ottaa huomioon.

Poikittaisessa suunnassa rakenne käsitellään teräsbetonirakenteena. Mikäli poikittaisen suunnan kestävyys lineaarisesti kimmoisen laattateorian mukaisen tarkastelun perusteella ylittyy, voidaan rakenne tarkastella tämän liitteen kappaleen 2.3 mukaisella yksinkertaistetulla mallilla, jos kyseisellä tavalla saavutetaan suurempi kantavuus. Tällöin todennäköisyys sillan vaurioitumiseen kasvaa ja silta tulee asettaa tehostettuun tarkkailuun.

4 Väsyminen

Väsymistarkastelu tehdään ainoastaan teräspalkin vedetylle laipalle. Jännitykset lasketaan joko liittorakenteena tai pelkkänä teräsrakenteena riippuen siitä, täyttyykö käyttörajatilan tartuntajännitysraja.

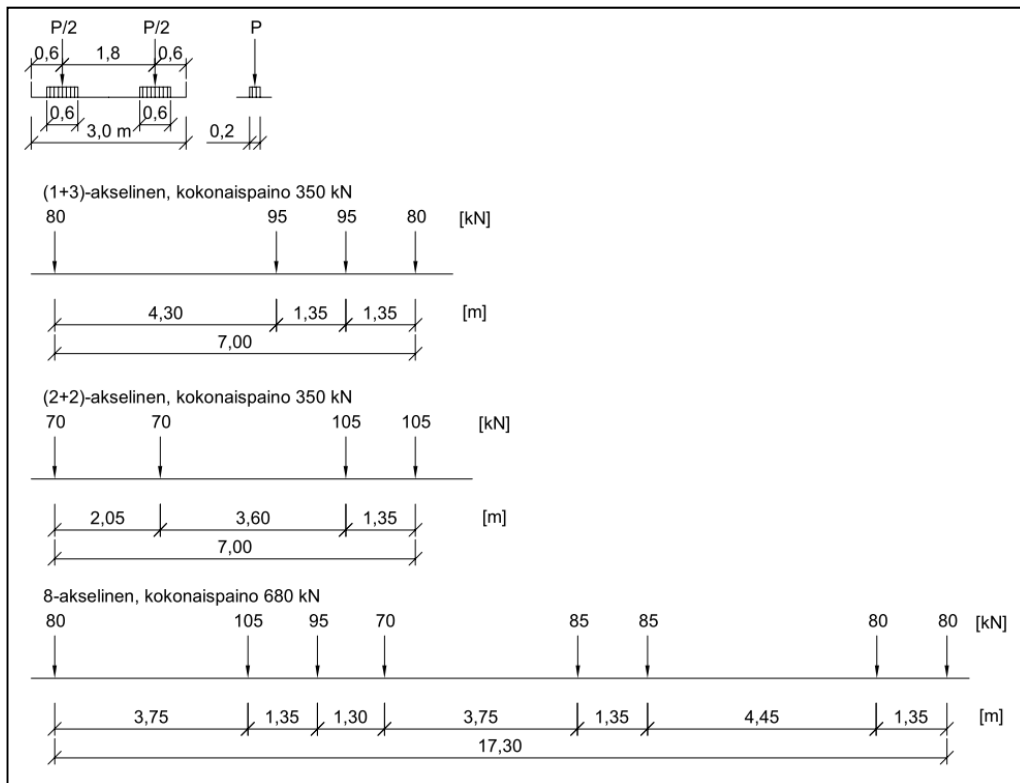
Sillan painorajoituksen määrittäminen

1 Yleistä

Tämä ohje on tarkoitettu pääasiassa Liikenneviraston hallinnoimien tiesiltojen painorajoitusten määrittämiseen. Ohjetta voidaan soveltaa myös kuntien, kaupunkien sekä yksityistiekuntien ylläpitämien siltojen painorajoitusten määrittämiseen.

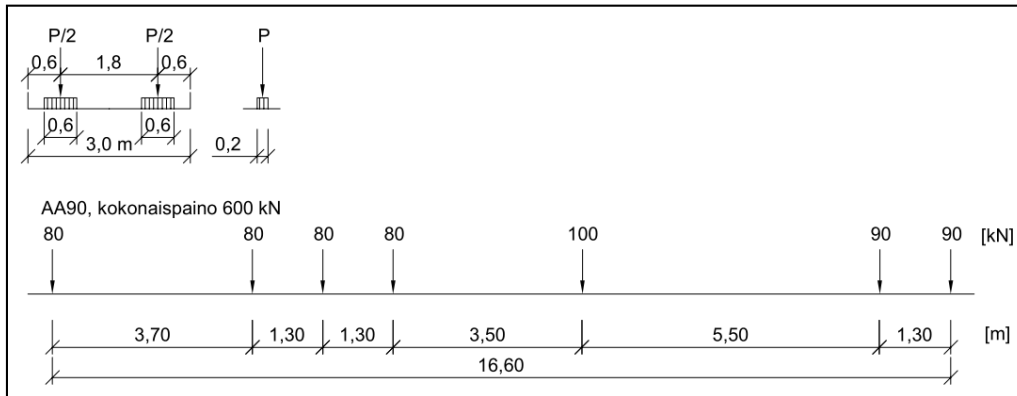
2 Painorajoitustarpeen määrittäminen

Kun sillalle ei voida kantavuuden tai kunnon perusteella sallia vuoden 2013 ajoneuvoasetuksen mukaisia kuormia, tulee sillalle asettaa painorajoitus. Painorajoitus perustuu kantavuuslaskentaan. Kuvissa 2.1 ja 2.2 on esitetty painorajoitustarkastelussa käytettävät kaaviot.



Kuva 2.1. Sillan painorajoituksen määrittämisessä käytettävät kaaviot.

Kuvan 2.1 kaavioita käytetään kun silta kestää kuvan 2.2 mukaisen vuonna 1990 voimaan tulleen ajoneuvoasetuskaavion AAgo.



Kuva 2.2. Vuoden 1990 ajoneuvoasetuksen mukainen kuormakaavio AA90.

Jos silta ei kestä kaaviota AA90, tulee painorajoitusmerkinnän määrittäminen arvioida erikseen tilaajan kanssa sovittavalla tavalla. Kuvan 2.1 mukaiset kaaviot eivät tällöin sovellu painorajoitusmerkinnän määrittämiseen.

Muut kuormat ja laskentaperiaatteet ovat Siltöjen kantavuuslaskentaohjeen mukaisia.

3 Painorajoitusmerkinnän määrittämisen pääperiaatteet

Tämä ohje koskee painorajoitusmerkinnän määrittämisen pääperiaatteita. Painorajoituksen esittäminen liikennemerkeissä tehdään omien säädösten mukaan.

Painorajoitusmerkinnän määrittäminen riippuu monesta eri tekijästä, kuten jännemitoista, hyödyllisestä leveydestä, siltatyypistä sekä kantavuusvajeesta.

Painorajoituksen määrittämisessä on erotettavissa eri kantavuustasoja, jotka perustuvat kunkin aikakauden ajoneuvoasetukseen. Osassa silloista on ollut AA90 kaavion perusteella määritetty painorajoitusmerkintä ennen vuoden 2013 asetuskaavion voimaan tuloa. Näihin siltoihin on jouduttu määrittämään uudet painorajoitusmerkinnät.

Painorajoitusmerkinnällä voidaan rajoittaa ajoneuvon akselimassaa, 2-akselisen telin massaa, 3-akselisen telin massaa, ajoneuvon kokonaismassaa ja/tai yhdistelmän kokonaismassaa. Sallittu massa esitetään tonneina [t]. Luettelo painorajoitetuista silloista löytyy Liikenneviraston verkkosivuilta osoitteesta

<http://www.liikennevirasto.fi/tieverkko/sillat-ja-tunnelit/siltarajoitukset#.Vkxej26ROUR>.

Vakiintunut tapa on esittää painorajoitus esimerkiksi muodossa -/18/24/35/-, joka tarkoittaa siltaa, jossa

- akselimassaa ei rajoiteta
- 2-akselisen telin massa saa olla enintään 18 t
- 3-akselisen telin massa saa olla enintään 24 t
- ajoneuvon kokonaismassa saa olla enintään 35 t

Ajoneuvon suurin sallittu kokonaismassa rajoittaa yhdistelmän sallitun kokonaismassan arvoon 35 t + 35 t = 70 t, vaikka yhdistelmän suurinta sallittua kokonaismassaa ei ole esitetty.

Tiesilloilla käytetään yleensä akselipainomerkintöjen osalta tasatonneja:

- akseli: 6 t, 8 t,
- 2-akselinen teli: 18 t, 16 t, 13 t, 10 t,
- 3-akselinen teli: 24t, 20 t, 16 t.

3-akseliselle telille ei ole olemassa omaa painorajoitusmerkkiä vaan sen rajoitustarve esitetään 2-akselisen telin painorajoitusmerkin lisäkilvellä. 3-akselista teliä ei siis voi rajoittaa ilman 2-akselisen telin painorajoitusmerkkiä. Yleensä 3-akselisen telin painorajoitus esitetään 2-akselisen telin lisäkilvellä taulukon 3.1 mukaisella tavalla. Esitustavasta voidaan poiketa yksittäisissä tapauksissa erikseen sovittaessa.

Taulukko 3.1. 2-akselisen telin painorajoitusmerkin yhteydessä yleisimmin tarvittavat 3-akselisen telin lisäkilvet.

2-aks. telin painorajoitus	3- aks. telin lisäkilpi
18 t	24 t
16 t	20 t
13 t	16 t

Jos 2-akselisen telin painoa ei tarvitse rajoittaa, mutta 3-akselisen telin painoa täytyy rajoittaa, asetetaan merkintätavasta johtuen 2-akselisen telin painorajoitusmerkiksi 21 t.

Kuvassa 1.3 on esimerkki sillan painorajoituksen esittämisestä liikennemerkeillä. Kuvan mukainen 70 t yhdistelmän rajoitusmerkki on asetettu selventämään yhdistelmän kokonaispainon suurinta sallittua massaa, koska 35 t ajoneuvon kokonaispainomerkki koskee myös perävaunun massaa.



Kuva 8.3 Esimerkki sillan painorajoituksen esittämisestä. Kuvan painorajoitusmerkintä on -/18/24/35/70. Ajoneuvon sallittu massa on 35 t, yhdistelmän sallittu kokonaismassa 70 t, 2-akselisen telin sallittu massa 18 t ja 3-akselisen telin sallittu massa 24 t.

Luotettavuusanalyysin ja tilastollisten menetelmien käyttäminen siltojen kantavuuslaskennassa

1 Käsitteet

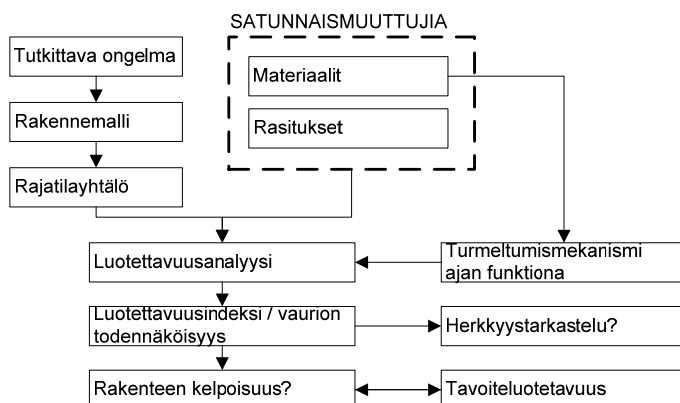
Deterministinen suure on analyysissä käytettävä muuttuja, jolle ei oleteta lainkaan satunnaisuutta. Muuttuja käsitellään vakiona.

Stokastinen suure on analyysissä käytettävä satunnainen muuttuja, jota ei yksittäisenä voida tarkoin ennustaa. Laajemmassa otoksessa jokin jakauma kuvaa kyseisen muuttujan arvojen realisoitumistodennäköisyyttä. Stokastisen muuttujan otoksella on keskiarvo ja hajonta.

Fraktiili on sellainen tilastollinen tunnusluku joka rajaa jonkin prosenttiosuuden havainnoista alapuolelleen.

2 Luotettavuusanalyysi rakennetekniikassa

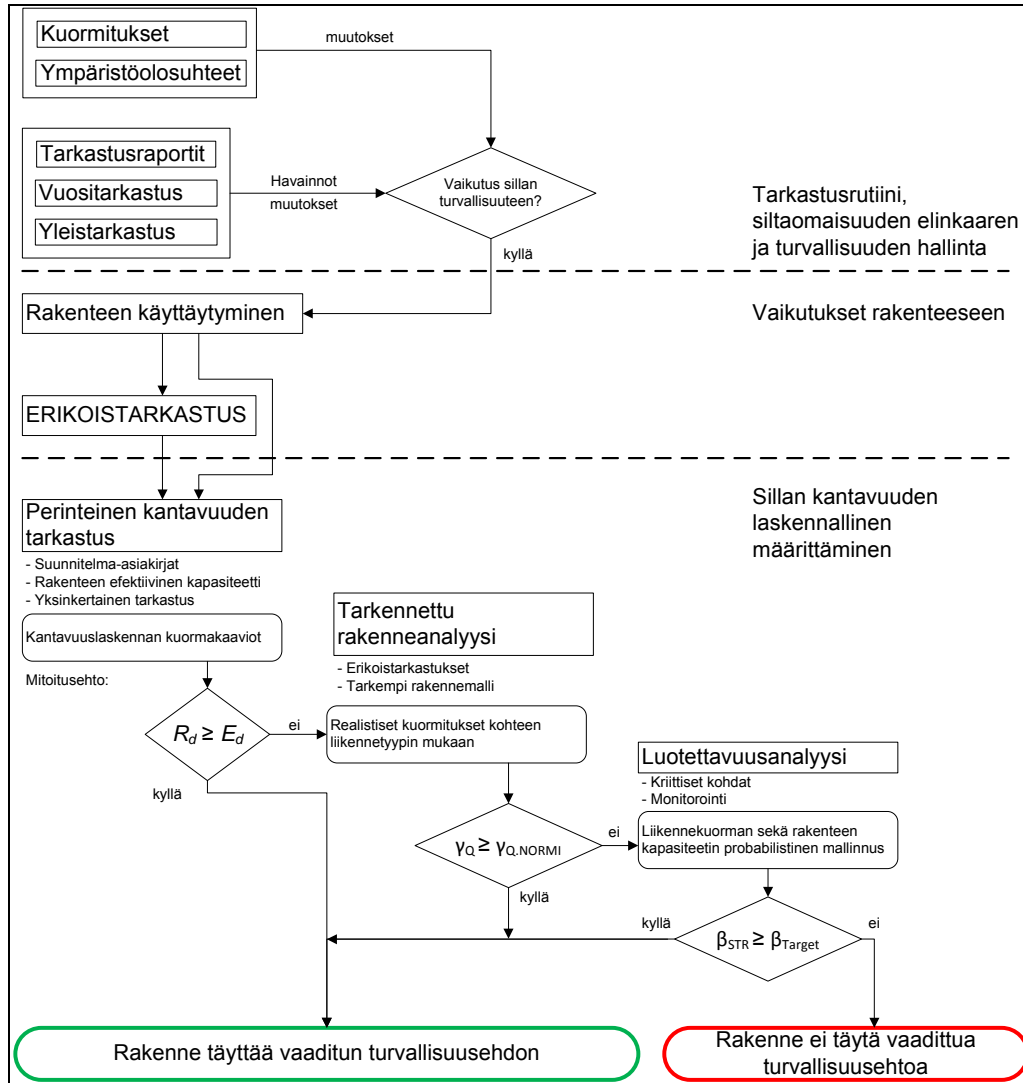
Luotettavuusanalyysi ja tilastolliset menetelmät ovat yleisesti käytössä monilla teollisuuden aloilla riskien hallinnassa ja tuotteiden optimoinnissa. Luotettavuusanalyysiä voidaan tietyissä tapauksissa soveltaa myös rakennetekniikkaan. Yksittäisten siltojen tai näistä valikoitujen rakenneseosien luotettavuutta voidaan arvioida tilastollisin menetelmin. Lähtökohtana on tutkia millä tavalla rasitusten ja materiaaliominaisuuksien satunnaisuus vaikuttaa rakenteen turvallisuuteen ja käytettävyyteen. Tässä liitteessä esitetään yleisiä näkökohtia tilastollisten menetelmien soveltamisen pohjaksi.



Kuva 2.4 Rakenteen luotettavuuden määrittäminen luotettavuusanalyysin avulla.

Kuvassa 2.2 on esitetty sillan elinkaaren aikainen turvallisuuden ja luotettavuuden hallintaprosessi, joka etenee sillan käytönaikaisesta seurannasta erikoistarkastuksiin sekä kantavuusarviointiin. Kantavuuslaskentaa voidaan pitää moniportaisena prosesse-

sina, jossa yksittäisten luotettavuudeltaan puutteellisten detaljien tai rakenneosien osalta siirrytään aina tarkempaan analyysiin, jotta rakenteen todellinen turvallisuustaso saadaan määriteltyä tarvittaessa liiallista konservatismia välttäten.



Kuva 2.5. Sillan turvallisuuden arviointi ja luotettavuusanalyysin sijoittuminen prosessissa.

Lisätietoa aiheesta on Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 20/2014 -julkaisuna "Luotettavuusanalyysin perusteita siltöjen kantavuuden arvioinnissa". Linkki julkaisuun

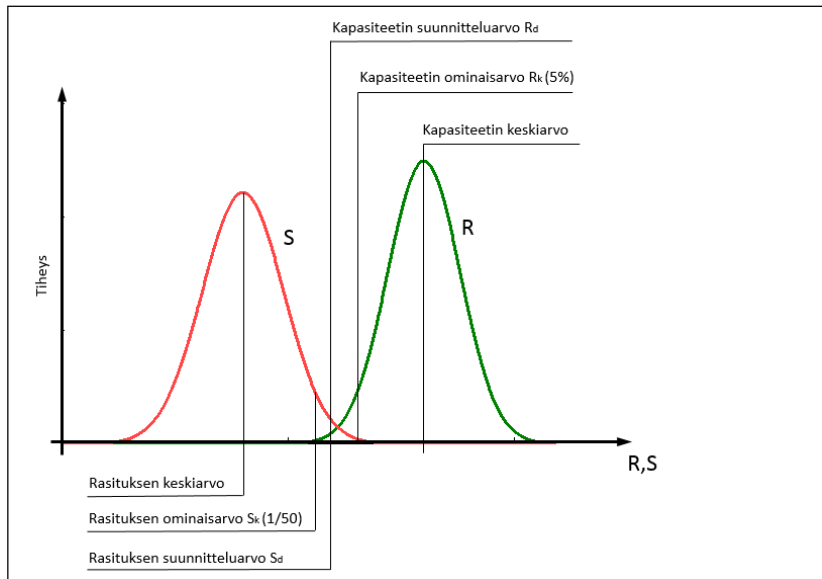
http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf8/lts_2014-20_luotettavuusanalyysin_perusteita_web.pdf

3 Yleistä

Rakenteen luotettavuudella tarkoitetaan rakenteen kykyä täyttää sille ennalta asetetut vaatimukset ennalta määritellyn ajanjakson aikana. Vastaavasti tilannetta, jossa edellä mainitut kriteerit eivät täyty, kutsutaan vaurioitumiseksi tai vikaantumiseksi. Vaurion todennäköisyyden matemaattisena mallina voidaan käyttää rajatilayhtälöä:

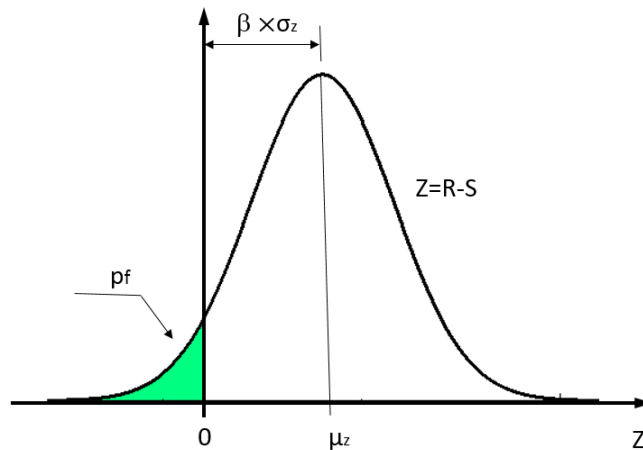
$$P_f = P(R - S \leq 0) \quad (8.2)$$

missä R kuvaa systeemin kestävyyttä ja S rasitusta.



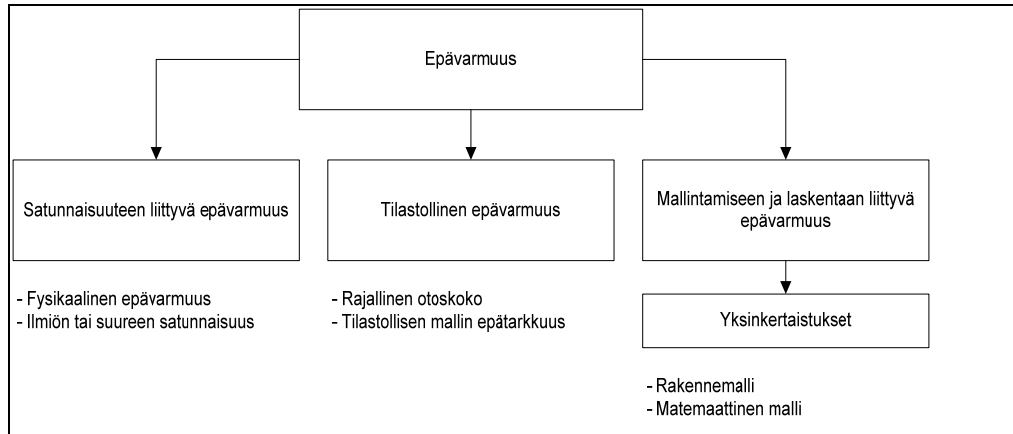
Kuva 3.1 Rasiuksen (S) ja kestävyuden (R) todennäköisyysjakaumat kuvattuna samalla akselilla.

Rakenteen kestävyyttä sekä rakenteeseen kohdistuvaa rasiusta ei voida pitää vakiona tai deterministisenä suurena vaan niitä on käsiteltävä satunnaisina ilmiöinä. Jos edellä mainitut ovat satunnaismuuttujia, on myös niiden erotus (varmuusmarginaali) luonteeltaan satunnaismuuttuja.



Kuva 3.2 Varmuusmarginaalin (Z) jakauma, sekä vaurion todennäköisyys p_f .

Edellä mainittuihin suureisiin liittyvä satunnaisuus on seurausta muun muassa kaaviokuvassa 3.3 esitetystä lähteistä. Fysikaalinen epävarmuus on esimerkiksi seurausta materiaalien epätäydellisyydestä valmistustoleransseista ja kuormien vaihtelusta. Tilastollinen epävarmuus puolestaan liittyy rajoitteisiin kuormailmiöiden tai materiaalien ominaisuuksien tilastollisessa tutkimuksessa. Mallintamisen epävarmuus liittyy rakenne- ja materiaalimallien yksinkertaistuksiin sekä kuormien mallintamiseen.



Kuva 3.3. Epävarmuuden lähteet rakenneanalyysissä.

Näiden lisäksi rakenteen turvallisuuteen vaikuttavina epävarmuuden lähteinä voidaan pitää rakenteen suunnitteluun, valmistukseen, ylläpitoon ja käyttöön liittyvää inhimillistä erehdystä tai tästä johtuvaa poikkeuksellista tilannetta.

4 Tavoiteluotettavuus

Tavoiteluotettavuus on rakenteen luotettavuudelle asetettava vähimmäistaso. Vaadittavaan tavoiteluotettavuuteen jotakin tiettyä rajatilaa vastaan vaikuttaa kyseiseen rajatilaan joutumisen seuraukset. Riski puolestaan tarkoittaa vaurion tai vahingon todennäköisyyttä kerrottuna sen seurauksilla. Siltarakenteiden luotettavuuden yhteydessä tarkasteltavia riskejä voivat olla muun muassa: riskit ihmishengelle tai -terveydelle, taloudelliset menetykset, liikennejärjestelmän häiriötila, jne.

Tavoiteluotettavuuden arvoja seuraamusluokittain on esitetty standardissa SFS-EN 1990. Käytännössä näiden soveltaminen rajoittuu rakenteiden uudissuunnitteluun. Koska olemassa oleville rakenteille ei ole esitetty tavoiteluotettavuustasoa, voidaan näitä pitää turvallisena lähtökohtana. Tavoiteluotettavuus voidaan ratkaista myös tapauskohtaisesti.

Taulukko 4.1. Standardin SFS-EN1990 [taulukko B2] suositeltavista vähimmäisarvoista johdetut luotettavuusindeksin β arvot murtorajatilassa seuraamusluokissa CC1...3 (RC1...3).

Tarkastelu-aika (a)	β		
	CC1	CC2	CC3
1	4,20	4,70	5,20
6	3,77	4,32	4,86
12	3,60	4,16	4,72
18	3,49	4,07	4,63
24	3,41	4,00	4,57
30	3,35	3,95	4,53
36	3,30	3,91	4,49
50	3,21	3,83	4,42
100	3,00	3,65	4,27

Joissakin kansallisissa normeissa sekä ohjeissa on esitetty tavoiteluotettavuuden arvoja sekä näiden määrittämisen perusteita myös olemassa olevien rakenteiden analysoinnin pohjaksi. Tavoiteluotettavuuden arvoon voivat alentavasti vaikuttaa muun muassa vaurion seurausten vähäisyys, rakenteen sitkeys vaurion jälkeen tai vaurioitumisen havaitseminen helposti ennakolta sekä rakenteen tarkastettavuus. Tällainen menetelmä on esitetty kirjallisuusviitteessä [1]

5 Kuormat

Siltarakenteen elinkaaren aikana siihen vaikuttavat kuormitukset ovat luonteeltaan stokastisia. Tästä johtuen niitä ja niiden aiheuttamia rasituksia tulee käsitellä satunnaismuuttujina.

5.1 Omat painot

Rakenteen oman painon satunnaisuus on peräisin poikkeamista rakenteen mitoissa sekä materiaalien tiheyksien vaihtelussa. Oman painon aiheuttamien rasitusten satunnaisuus aiheutuu edellä mainittujen lisäksi rakenteiden epäideaalisuudesta mukaan lukien poikkeamat ja epätarkkuudet rakentamisessa tai vähitellen elinkaaren aikana muuttunut rakenteen mekaaninen toiminta.

Edellä esitettyjen perusteella voidaan melko tarkasti yleistää oman painon aiheuttamien rasitusten olevan normaalijakautuneita. Kirjallisuudessa on yleisesti esitetty rakenteiden oman painon vaikutusten olevan normaalijakautuneita 10 % hajonnalla, kun kyseessä on paikalla valmistettu rakenne tai rakenneosia. Esivalmisteisen rakenteen osan tapauksessa hajonta voidaan olettaa 8 % suuruiseksi.

5.2 Pysyvät kuormat

Pysyvien kuormien satunnaisuus sekä jakauman muoto ja parametrit tulee päätellä tapauskohtaisesti. Yleisesti kyseeseen tulevat normaali- ja log-normaalijakaumat. Jotkin pysyvät kuormat käyttäytyvät tilastollisesti kuten omat painot. Toisaalta esimerkiksi tukikerroksen painon aiheuttama kuormitus voi poiketa hyvinkin paljon epäedulliseen suuntaan.

Tyypillisimmistä siltarakenteisiin vaikuttavista pysyvistä kuormista sekä näiden tilastollisista ominaisuuksista voidaan esittää seuraavaa.

- Laitteiden ja varusteiden painosta johtuva kuormitus perustapauksissa päätellään vastaavasti kuin rakenteiden omasta painosta
- Tukikerroksen painosta johtuva kuormitus on log-normaalijakautunut 25 % hajonnalla
- Päällysteiden painosta johtuva kuormitus vastaavasti kuin tukikerros
- Maan vaakasuuntainen lepopaine riippuu monista satunnaisista tekijöistä, joten lepopaineen hajonnan on oltava suurempi, kuin hajonnan maanpaineen pystykomponentissa

5.3 Luonnonkuormat

Muuttuvat luonnonkuormat noudattavat yleisesti jotakin ääriarvojakaumaa. Muuttuvien kuormien ja ääriarvojakaumien käytön yhteydessä oleellisena osana on kuorman

toistumisjakson määrittäminen. Ääriarvojakauma kuvaa jonkin satunnaismuuttujan jonkin ajan kuluessa ilmenevien ääriarvojen jakautumista. Tällainen on esimerkiksi vuosittaisten maksimivedenkorkeuksien jakauma. Ääriarvojakaumia ovat mm. Gumbelin, Weibullin sekä Fréchetin jakaumat.

5.4 Hyötykuormat

Muuttuvat hyötykuormat noudattavat vastaavalla tavalla kuin luonnonkuormat jotakin ääriarvojakaumaa.

Muuttuvien kuormien tapauksessa on tilastollisen yhdistelyn kannalta oleellista tietää myös kuormitusten hetkellisten arvojen jakauma sekä tyypillinen kuormituksen kesto-aika. Tyypillisesti yhden kuorman ääriarvon vaikuttaessa sattumanvaraisella ajanhetkellä, todennäköisimmin muut kuormat ovat keskimääräisessä arvossaan.

6 Rakenteen kestävyys

Rakenteen tai rakenneosan kestävyys on riippuvainen monista eri tekijöistä: rakenteen mitoista, materiaalien lujuuksista, kimmo-ominaisuuksista sekä jossain tapauksissa myös kuorman tyypistä. Edellä mainittuihin fysikaalisiin ominaisuuksiin sisältyvä epävarmuus aiheuttaa sen, että rakenteen kestävyys R on myös satunnaismuuttuja. Rakenneosan koostuessa useista materiaaleista tulee kaikkien liittyvien satunnaismuuttujien vaikutus kestävyteen huomioida.

Lisäksi tulee tarvittaessa huomioida laskentaa varten tehtävästä rakenne- ja materiaalimallin idealisoinnista aiheutuva epätarkkuus.

Kirjallisuuslähteessä [3] on esitetty tilastollisia parametreja tyypillisimmille murtorajatilan ilmiöille eri materiaaleilla. Taulukossa esitettyihin arvoihin on syytä suhtautua kriittisesti ja käyttää niitä ideaalitapauksen (täysin tunnetun mekanismin) parametreina. Rakenteen monimutkaisuudesta ja laskentamallista riippuen epävarmuutta on syytä kasvattaa. Esim. viitteen [2] menetelmillä.

Taulukko 6.1. Tilastollisia parametreja tyypillisimmille rakennusmateriaaleille ja murtorajatilan ilmiöille [3]

Materiaali	MRT	μ_R/R_k	V_R
Teräs	M	1,12	0,100
	Q	1,14	0,105
Teräsbetoni	M	1,14	0,130
	Q	1,20	0,155
Jännebetoni	M	1,05	0,075
	Q	1,15	0,140

Rakenneosien kestävyysien oletetaan tyypillisesti olevan log-normaali-jakautuneita. Vaihtoehtoisesti voidaan määrittää rakenneosan kestävyteen vaikuttavien suureiden tilastolliset parametrit (tärkeimpänä yleensä lujuus) ja ratkaista numeerisesti rakenteen kestävyden odotusarvo ja varianssi. Tällaiseen soveltuvia menetelmiä ovat esimerkiksi MVFOSM ja Monte Carlo-simulaatio.

6.1 Materiaalikoeksiin perustuva lujuuden määrittäminen:

Standardissa SFS-EN 1990 [4] liitteessä D on esitetty materiaalikoekappaleisiin perustuva lujuudenmäärittämenetelmä. Tätä voidaan uudisrakentamisen ohella soveltaa myös olemassa olevien rakenteiden analysointiin. Menetelmässä kytetään huomioimaan rajallisesta otoskoosta riippuva tilastollinen epävarmuus. Materiaalin lujuudelle ei tulisi käyttää pienempää variaatiokerrointa kuin 10 %. [4]

6.2 Taulukoituja jakaumaparametreja tyypillisille rakennusmateriaaleille [2]

Seuraavissa taulukoissa esiintyviä materiaaliparametreja on mahdollista soveltaa edellisessä kohdassa esitetyn kokeellisen menetelmän tukena esimerkiksi olettamalla taulukoissa esitetty variaatiokerroin tunnetuksi, jolloin otoskoosta johtuva epävarmuus pienenee.

Huomioitava taulukoissa esitetyistä arvoista:

- Voimassa ainoastaan materiaaleille ja rakenneosille joiden vaurioituminen on vähäistä
- Karakteristiset arvot ovat 10% fraktiileja (DS 411:73 tai 84 mukaisesti)
- Ainoastaan fysikaalinen epävarmuus (hajonta lujuudessa) on huomioitu

Taulukko 6.2. *Betonin sylinterilujuuden tyypillisiä odotusarvoja sekä variaatiokertoimia a) puristuslujuuden karakteristisilla arvoilla (f_{ck}) (DS 411 1949, 1973, 1984 mukaisesti) b) sekoitussuhteilla [2].*

f_{ck} [MPa]	$E[f_c]$ [MPa]	V_{f_c}	Mix ratio	$E[f_c]$ [MPa]	V_{f_c}
5	6.76	0.22	1:2:2	35	0.35
10	12.8	0.18	1:2:3	29	0.35
15	18.9	0.17	1:2½:3½	23	0.35
20	24.8	0.16	1:3:5	19	0.35
25	30.6	0.15	1:4:7	10	0.35
30	36.2	0.14	1:5:8	7	0.35
35	41.7	0.13			
40	47.0	0.12			
45	52.8	0.12			
50	58.7	0.12			

Taulukko 6.3. *Teräslaatujen myötörajojen karakteristisia arvoja (f_{yk}) sekä odotusarvoja eri rakenneteräsladuille. [2]*

Steel type	f_{yk} [MPa]			Mean value [MPa]			Standard Deviation [MPa]
	$t \leq 16$	$16 < t \leq 40$	$40 < t$	$t \leq 16$	$16 < t \leq 40$	$40 < t$	All t
St 37	235	225	215	304	293	283	25
Fe 360	235	225	215	304	293	283	25
St 42 A	260	250	240	328	319	308	25
St 42, -1, -2, -3	260	250	240	328	319	308	25
St 44	275	265	255	344	334	324	25
St 42, B, C, D	275	265	255	344	334	324	25
Fe 430	275	265	255	344	334	324	25
St 50	340	330	320	410	400	390	25
St 52	340	330	320	410	400	390	25
Fe 510	355	345	335	426	416	405	25

Taulukko 6.4. Raudoitusterästen myötölujuuksien karakteristisia arvoja, sekä (f_{yk}) sekä odotusarvoja eri raudoiteteräslaaduille. [2]

Type	Symbol	Diameter [mm]	f_{yk} [MPa]	Mean value [MPa]	Standard Deviation [MPa]
Smooth bars	Fe 360	≤ 16	235	304	25
	Fe 360	> 16	225	293	25
	Fe 430	≤ 16	275	345	25
	Fe 430	> 16	265	334	25
	Fe 510	≤ 16	355	426	25
	Fe 510	> 16	345	416	25
Kamstål	Ks 410	-	410	482	25
	Ks 550	-	550	623	25
Tentorstål	T	-	550	623	25

Viiteluettelo

1. Canadian Standards Association ASSOCIATION (CSA). Existing Bridge Evaluation to CSA Standard CAN/CSA-S6-88, Design of Highway Bridges. Supplement No 1, CSA, Rexdale, Toronto, Canada, 1990.
2. Reliability-Based Classification of the Load Carrying Capacity of Existing structures 2004. Document 291, Guideline document, Road Directorate, Ministry of Transport – Denmark. Road Directorate, Kööpenhamina.
3. Holicky, A. & Collins, K. 2013. Reliability of Structures. Boca Raton , Yhdysvallat, CRC Press.
4. SFS-EN-1990 (2006). Eurokoodi. Rakenteiden suunnitteluperusteet. Suomen Standardisoimisliitto SFS, Helsinki, standardi.
5. Luotettavuusanalyysin perusteita siltöjen kantavuuden arvioinnissa. Liikennevirasto. Helsinki 2014. ISBN 978-952-255-4

Betonisten rautatiesiltojen jäljellä olevan käyttöiän arviointi

1 Yleistä

Betonia on alettu käyttää rautatiesilloissa jo 1900-luvun alussa. Varsinaisten teräs-betonisten rautatiesiltojen rakentaminen yleistyi 1950-luvulla. Ensimmäisiä väsymismitoituksia rautatiesilloille on tehty 1970–80-luvun taitteessa. Tästä syystä Suomen rataverkolla on runsaasti väsymismitoittamattomia betonisia rautatiesiltoja.

Tässä liitteessä esitetään laskentamenetelmä tukikerroksellisten betonisten rautatiesiltojen päällysrakenteen väsymisrasituksen kertymäasteen ja tähän perustuvaan sillan jäljellä olevan käyttöiän arviointiin. Muut rajatilat tulee tarkistaa aina tämän lisäksi. Tavanomaisilla rautatiesilloilla alusrakenteen väsymistä ei tarvitse tarkistaa.

Teräsbetonisillan väsymismurtotapoja on kaksi, betoniterästen ja betonin väsymismurto. Jälkimmäinen on erittäin harvinainen, mikäli betoni on hyvässä kunnossa. Tämän vuoksi väsymiskertymän laskenta perustuu tässä liitteessä ainoastaan betoniteräksen väsymiseen.

Tämän liitteen ohjeet pohjautuvat aiheesta Tampereen teknillisellä yliopistolla vuosina 2013–2014 tehtyyn tutkimukseen. Lisätietoa aiheesta on Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 28/2014 – julkaisuna "Betonisten rautatiesiltojen jäljellä olevan käyttöiän arvioiminen". Linkki julkaisuun http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf8/lts_2014-28_betonisten_rautatiesiltojen_web.pdf

Tähän julkaisuun sisältyy liite, joka sisältää rautatieliikenteen kuormitushistoriaa. Liitteen tietoja tarvitaan jäljellä olevan käyttöiän arviointiin ja sen voi saada tarvittaessa sähköisenä Liikennevirastosta.

2 Laskenta

Betoniteräksen ja jänneteräksen vaurioitumisen suhteen ekvivalentti jännitysvaihteluväli lasketaan yksiaukkoisissa siltarakenteissa kaavan 1.1 ja jatkuvissa siltarakenteissa kaavan 1.2 mukaan.

$$\Delta\sigma_{s, equ} = \lambda_s * \Delta\sigma_{LM71-22,5} \quad (1.1)$$

$$\Delta\sigma_{s, equ} = \lambda_s * \max(\Delta\sigma_{LM71-22,5} ; \Delta\sigma_{SW/0-22,5}) \quad (1.2)$$

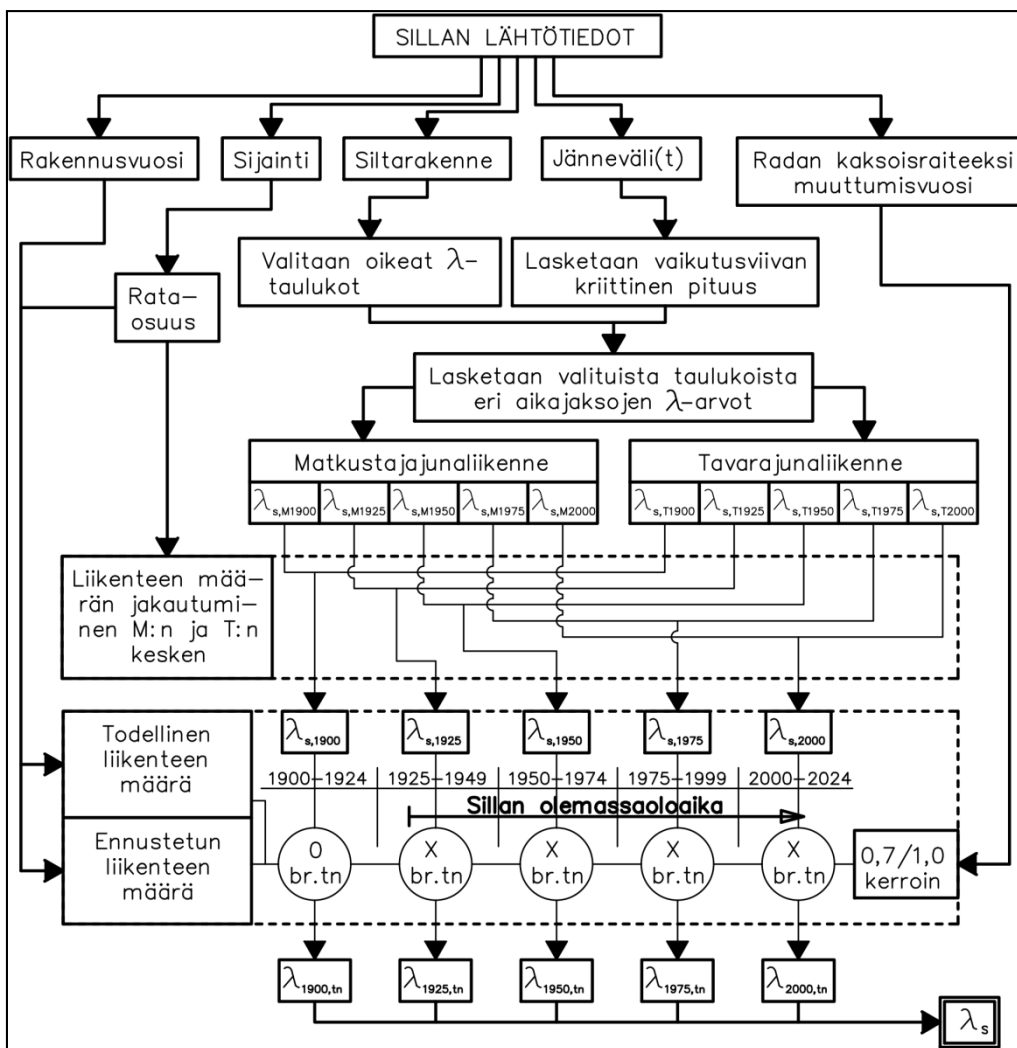
Laskennassa voidaan käyttää kuormakaaviota LM71-22,5 vaikka silta sijaitsee rataosuudella, jossa nykyisin on sallittu akselipaino 250 kN.

Raudoitteen jännityksen laskennassa käytetään teräksen ja betonin kimmokertoimien suhteelle arvoa 10. Ekvivalenttia jännitysvaihteluväliä $\Delta\sigma_{s, equ}$ verrataan betoniteräksen eurokoodin mukaiseen väsymislujuuteen.

Laskentamenetelmästä on laadittu kaksi eri tarkkuustason mallia λ_s -kertoimen laskentaan, laskentamalli A ja laskentamalli B. Ensimmäisistä suositellaan käytettävän tarkempaa laskentamallia A.

2.1 Laskentamalli A

Laskentamallissa A lähtötietoina tarvitaan sillan rakentamisvuosi, sijainti rataverkolla ja tiedot sillan rakenteesta. Lisäksi tarvitaan useampiraiteisilla radoilla lisäraiteen rakentamisvuosi. Laskentamallissa A huomioidaan 25 vuoden aikajaksoissa kaluston ominaisjunat, liikenteen jakautuminen matkustaja- ja tavaraliikenteen kesken sekä toteutunut liikennemäärä rataosuuksittain. Lisäksi jäljellä olevan käyttöiän laskemista varten on tehty liikennemääräennusteet vuoteen 2050 asti. Kuvassa 1 on esitetty vuokaavio laskentamallista A.



Kuva 6. Vuokaavio laskentamallista A.

Taulukoiden 1 ja 2 avulla lasketaan eri aikajaksojen matkustajaliikenteen $\lambda_{s,Mi}$ -kertoimet ja tavaraliikenteen $\lambda_{s,Ti}$ -kertoimet perustuen vaikutusviivan kriittiseen pituuteen (ks. EN 1992-2). Jatkuvilla siltarakenteilla λ -kertoimia tarvitaan enemmän, koska sillan eri kohdat, keskijänne, reunajänne ja välituen alue, tulee tarkistaa erikseen.

Taulukko 2. Eri aikajaksojen tavaraliikenteen $\lambda_{s,\pi}$ -kertoimet.

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 vaihdelta 2 m ja 20 m välillä, saadaan seuraavasta yhtälöstä:
 $\lambda_{s,1}(L) = \lambda_{s,1}(2\text{ m}) + [\lambda_{s,1}(20\text{ m}) - \lambda_{s,1}(2\text{ m})] * (\log L - 0,3)$

Taulukko 3. Eri aikajaksojen matkustajaliikenteen $\lambda_{s,Mi}$ -kertoimet.

Yksiaukkoiset sillat: matkustajajunaliikenne							
Aikajakso	L ≤ 2	2 < L < 5	5,00	5 < L < 20	20,00	20 < L < 35	L ≥ 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		

Sillan sijainnin perusteella, huomioidaan kokonaisliikennemäärän, eli bruttotonnien, jakautuminen matkustaja- ja tavaraliikenteen kesken. Tämä tapahtuu Liikennevirastolta erikseen saatavan sähköisen liitteen ja kaavan 1.3 avulla.

$$\lambda_{s,i} = \sqrt[9]{[M_i] * \lambda_{s,Mi}^9 + [T_i] * \lambda_{s,Ti}^9} \quad (1.3)$$

missä $[M_i]$ on sähköisessä liitteessä esitetty matkustajaliikenteen osuus ja $[T_i]$ tavaraliikenteen osuus. Näiden summa on aina 1,0. Näin saadaan siltarakenne- ja rataosakohtaiset λ -kertoimet eri aikajaksoille. Nämä sisältävät kukin 2 500 milj. bruttotonnia eli 100 vuoden aikana vuosittaisen 25 milj. bruttotonnin liikennekertymän.

Matkustaja- ja tavaraliikenteen λ -kertoimien yhdistelyn jälkeen huomioidaan kunkin aikajakson kohdalla toteutunut todellinen liikennemäärä sähköisen liitteen mukaan. Jokainen $\lambda_{s,i}$ skaalataan vuosittaisen keskimääräisen liikennemäärän ja aikajakson vuosien määrällä, jolloin saadaan parametrit $\lambda_{s,i,tn}$. Skaalaus tapahtuu kaavan 1.4 avulla

$$\lambda_{s,i,tn} = \lambda_{s,i} * \sqrt[9]{\frac{(Vol_i [milj. br. tn])}{N_{years,i} [a]}} * \sqrt[9]{\frac{N_{years,i} [a]}{100 [a]}} \quad (1.4)$$

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

Alla on esitetty joidenkin kaksoisraideosuuksien rakentamivuodet.

Pohjois-Louko–Seinäjäjoki, 1992
Seinäjäjoki–Ruha, 2012
Tampere–Orivesi, 1967
Tampere–Lielähti, ainakin 1985 lähtien
Toijala–Tampere, 1953
Riihimäki–Toijala, 1961
Hyvinkää–Riihimäki, 1910
Kerava–Hyvinkää, ainakin 1956 lähtien
Pasila–Kerava, ainakin 1956 lähtien
Helsinki–Pasila, ainakin 1956 lähtien
Helsinki–Kirkkonummi, noin 1963
Kerava–Lahti, 2006
Riihimäki–Lahti, ainakin 1956 lähtien
Lahti–Kouvola, ainakin 1956 lähtien
Kouvola–Juurikorpi, ainakin 1956 lähtien
Kouvola–Luumäki, 1957

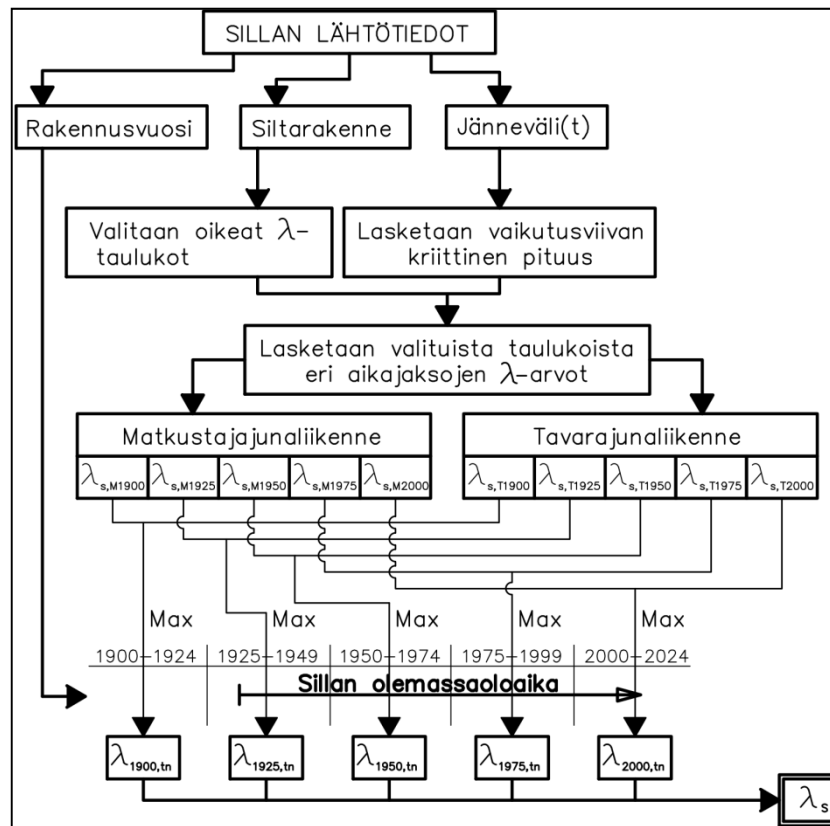
Siltakohtainen ekvivalentti vauriokerroin saadaan lopuksi laskettua kaavan 1.5 avulla. Sillan jäljellä oleva käyttöikä selvitetään iteroimalla siten, että saadaan ekvivalentti jännitysvaihteluväli $\Delta\sigma_{s,equ}$ yhtä suureksi kuin väsymisluku.

$$\lambda_s = \sqrt[9]{\sum \lambda_{s,i,tn}^9} \quad (1.5)$$

Useampiraiteisilla radoilla, jossa vierekkäiset sillat toimivat rakenteellisesti yhdessä, jännitysvaihteluvälin selvittäminen vaatii suunnittelijan tekemää kohdekohtaista arviointia. Näissä silloissa suurimmat jännitysvaihteluvälit syntyvät todennäköisesti tilanteissa, joissa kaksoisraiteen molemmat raiteet on samanaikaisesti kuormitettu.

2.2 Laskentamalli B

Laskentamallissa B lähtötietoina tarvitaan sillan rakentamisvuosi ja tiedot sillan rakenteesta. Laskentamallissa B huomioidaan 25 vuoden aikajaksoissa kaluston ominaisjunat, mutta liikennemäärä oletetaan olevan 25 milj. br. tn /raide /vuosi. Useampiraiteisilla radoilla ei saa tehdä vastaavaa liikennemäärä vähennystä mitä laskentamallissa A esitetään. Kuvassa 2 on esitetty vuokaavio laskentamallista B.



Kuva 7. Vuokaavio laskentamallista B.

Vastaavasti kuin mallissa A, laskentamallissa B lasketaan taulukoiden 1 ja 2 avulla sekä matkustaja-, että tavaraliikenteen λ -kertoimet. Näistä valitaan kullekin 25 vuoden aikajaksolle arvoltaan suurempi kerroin, $\lambda_{s,i,max} = \max[\lambda_{s,Mi}; \lambda_{s,Ti}]$. Laskentamallin B $\lambda_{s,B}$ -kerroin lasketaan kaavojen 1.6 ja 1.7 avulla.

$$\lambda_{s,i,B} = \lambda_{s,i,max} * \sqrt[9]{\frac{N_{years,i} [a]}{100 [a]}} \quad (1.6)$$

$$\lambda_{s,B} = \sqrt[9]{\sum \lambda_{s,i,B}^9} \quad (1.7)$$

3 Toimenpiteet laskennallisen väsymisiän ylittyessä

Tietyissä tilanteissa λ -kertoimia on mahdollista laskea tarkemmin. Tällainen tilanne on esimerkiksi rataosuudella, jolla on 200 kN akselipainorajoitus. Tarkempien λ -kertoimien laskenta vaatii tarkempia ominaisjunia, joka kasvattaa työmäärää runsaasti ominaisjunien muodostamistyön, jännityshistorialaskujen ja rainflow-analyysoien takia.

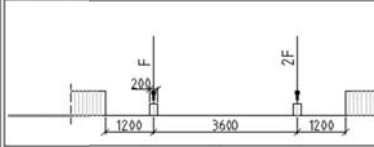
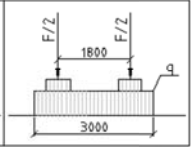
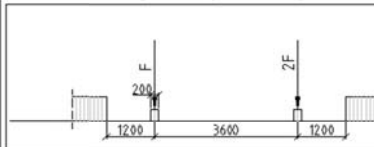
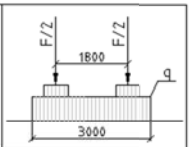
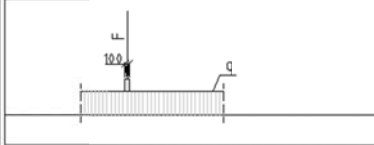
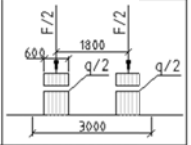
Sillalle voidaan tehdä erikoistarkistus tarkempia laskelmia varten tai silta voidaan asettaa tehostettuun tarkkailuun. Tehostettua tarkkailua varten on tehtävä tarkkailu- tai monitorointisuunnitelma.

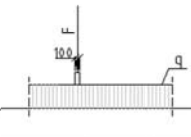
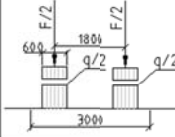
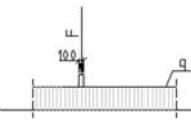
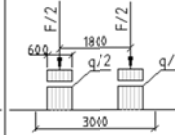
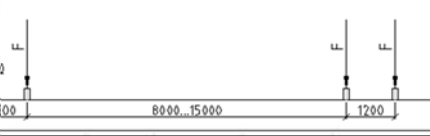
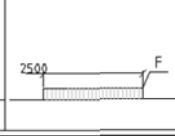
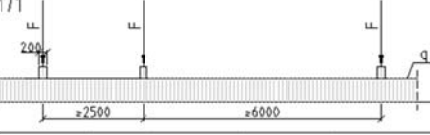
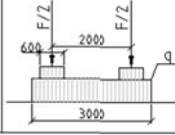
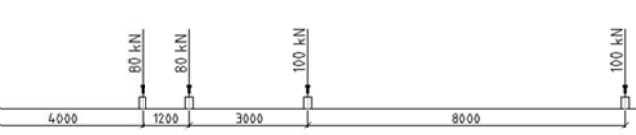
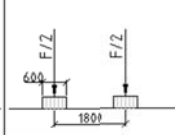
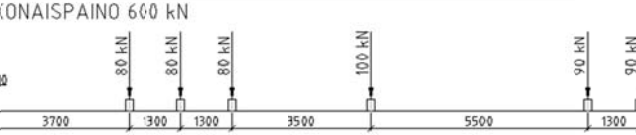
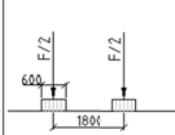
Kuvaajat eri aikakausien suunnittelukuomien ja vuoden 2013 ajoneuvoasetuskuorman taivutusmomenttien suhteista

1 Laskennassa käytetyt liikennekuormat

Taulukossa 1 on kappaleen 2 vertailuissa käytetyt liikennekuormat, kuormien sysäyslisät ja murtorajatilan mitoitusarvojen osavarmuusluvut.

Taulukko 8. Laskennassa käytetyt liikennekuormat, sysäyslisät ja osavarmuusluvut.

Nimi/ Vuosi/ Mitoitus- menetelmä	Kuormat	Akseli- kuormat	Pintakuorma	Sysäyslisä	Kuormakerroin
9 T 1930-luku Sallitut jännitykset		$F=30 \text{ kN}$	$q=4 \text{ kN/m}^2$	sisältyy kuormaan	$1,5^{(9)}$
	Sillalla voi vaikuttaa samanaikaisesti kaksi (2) ajoneuvoa, tai yksi (1) ajoneuvo ja pintakuorma.				
					
12 T 1940-luku Sallitut jännitykset		$F=40 \text{ kN}$	$q=4 \text{ kN/m}^2$	sisältyy kuormaan	$1,5^{(9)}$
	Sillalla voi vaikuttaa samanaikaisesti kaksi (2) ajoneuvoa, tai yksi (1) ajoneuvo ja pintakuorma.				
					
AI 1955 Sallitut jännitykset		Kaista 1: $F=140 \text{ kN}$ Kaista 2: $F=140 \text{ kN}$ Kaista 3:	$q=12-24 \text{ kN/m}^{(3)}$ $q=12-24 \text{ kN/m}^{(3)}$ $q=12-24 \text{ kN/m}^{(3)}$	akselikuormaan: 1,4	$1,5^{(9)}$
					

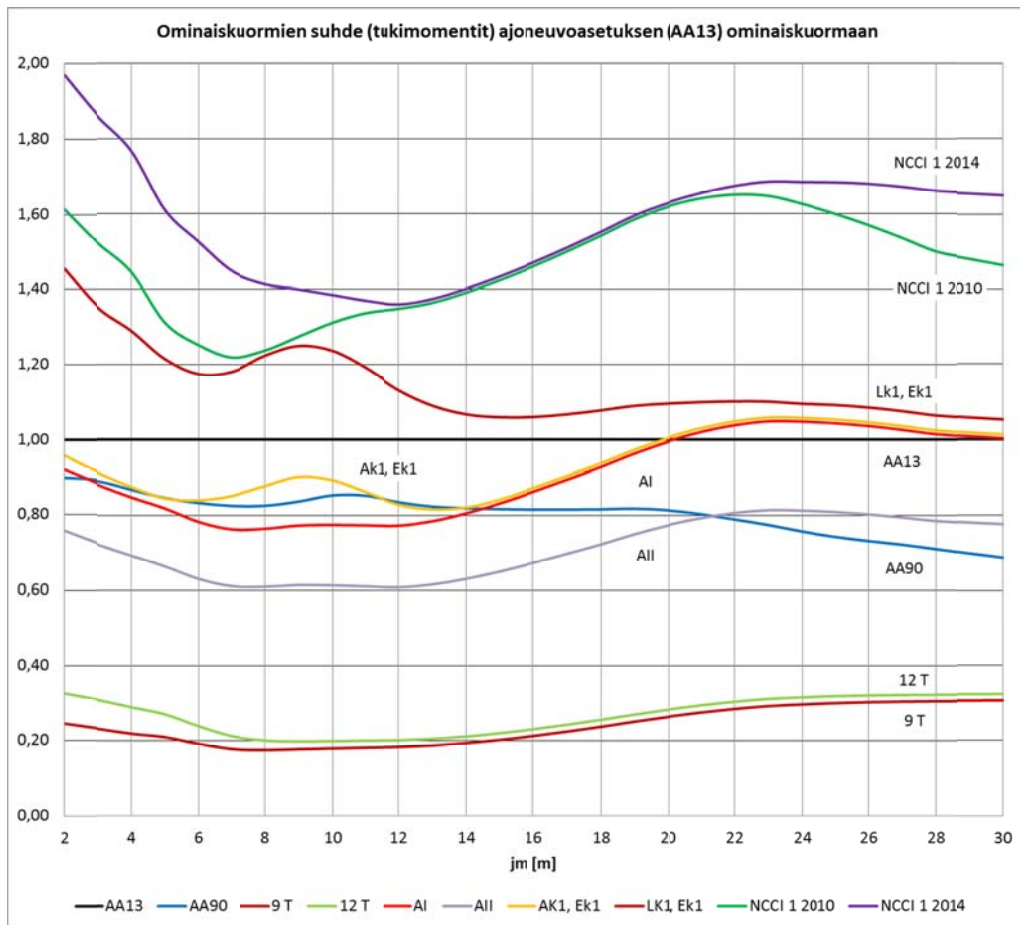
AII		Kaista 1: $F=120 \text{ kN}$ $q=9-18 \text{ kN/m}^{(3)}$	akselikuorman: 1,4	1,5 ⁽⁹⁾
1955		Kaista 2: $F=120 \text{ kN}$ $q=9-18 \text{ kN/m}^{(3)}$		
Sallitut jännitykset		Kaista 3: $q=9-18 \text{ kN/m}^{(3)}$		
				
Ak1, Ek1 ⁽⁶⁾	Ak1:	Kaista 1: $F=120 \text{ kN}$ $q=12-24 \text{ kN/m}^{(3)}$	Ak: 1,4	1,5 ⁽⁹⁾
1969		Kaista 2: $F=120 \text{ kN}$ $q=12-24 \text{ kN/m}^{(3)}$		
Sallitut jännitykset	Ek1:	Kaista 3: $q=12-24 \text{ kN/m}^{(3)}$	Ek: 1,4	
				
				
PKM 71	Lk1:	Kaista 1: $F=210 \text{ kN}$ $q=3 \text{ kN/m}^2$	Lk: sisältyy	Lk: 1,6
1971		Kaista 2: $F=210 \text{ kN}$ $q=3 \text{ kN/m}^2$		
Rajatila		Kaista 3: $q=3 \text{ kN/m}^2$		
				
MAA 75		Kaista 1: $F=- \text{kN}^{(2)}$	1,4-0,006xjm $\geq 1,10$	1,5 ⁽⁹⁾
1975		Kaista 2: $F=- \text{kN}^{(2)}$		
Sallitut jännitykset				
				
AA90		Kaista 1: $F=- \text{kN}^{(2)}$ $q=3 \text{ kN/m}^2$	1,4-0,006xjm $\geq 1,10$	1 kaavio: 1,45
1990		Kaista 2: $F=- \text{kN}^{(2)}$ $q=3 \text{ kN/m}^2$		2 kaaviota: 1,30
Rajatila		Kaista 3: $q=3 \text{ kN/m}^2$		
		<p>Sillalla voi vaikuttaa samanaikaisesti⁽³⁾ (2) ajoneuvoa, tai yksi (1) ajoneuvo ja pintakuorma⁽⁴⁾.</p>		
		<p>KOKONAISPAINO 600 kN</p> 		

Lk1, Ek1 ⁽⁷⁾ 1990 Rajatila	Lk1: Kaista 1: F=210 kN Kaista 2: F=210 kN Kaista 3: q=3 kN/m ² Aks: Kaista 1: F=260 kN Kaista 2: F=260 kN EK1: Kaista 1: F=300 kN	q=3 kN/m ² q=3 kN/m ² q=3 kN/m ²	Lk: sisältyy Ek: 1,4	Lk: 1,8 Ek: 1,4
Lk1				
Akseli				
Ek1				
Lk2, Ek2 ⁽⁷⁾ 1990 Rajatila	Lk2: Kaista 1: F=160 kN Kaista 2: F=160 kN Kaista 3: q=2 kN/m ² Aks: Kaista 1: F=200 kN Kaista 2: F=200 kN EK2: Kaista 1: F=200 kN	q=2 kN/m ² q=2 kN/m ² q=2 kN/m ²	Lk: sisältyy Ek: 1,4	Lk: 1,8 Ek: 1,4
Lk2				
Akseli				
Ek2				
NCCI 1 ⁽⁸⁾ 2010 Rajatila	LM1 ⁽⁵⁾ : Kaista 1: F=300 kN Kaista 2: F=200 kN Kaista 3: F=100 kN LM2: Kaista 1: F=400 kN LM3: q=45 kN/m ²	q=9 kN/m ² q=2,5 kN/m ² q=2,5 kN/m ²	sisältyy kuormaan	1,35
LM1				
LM2				
LM3				

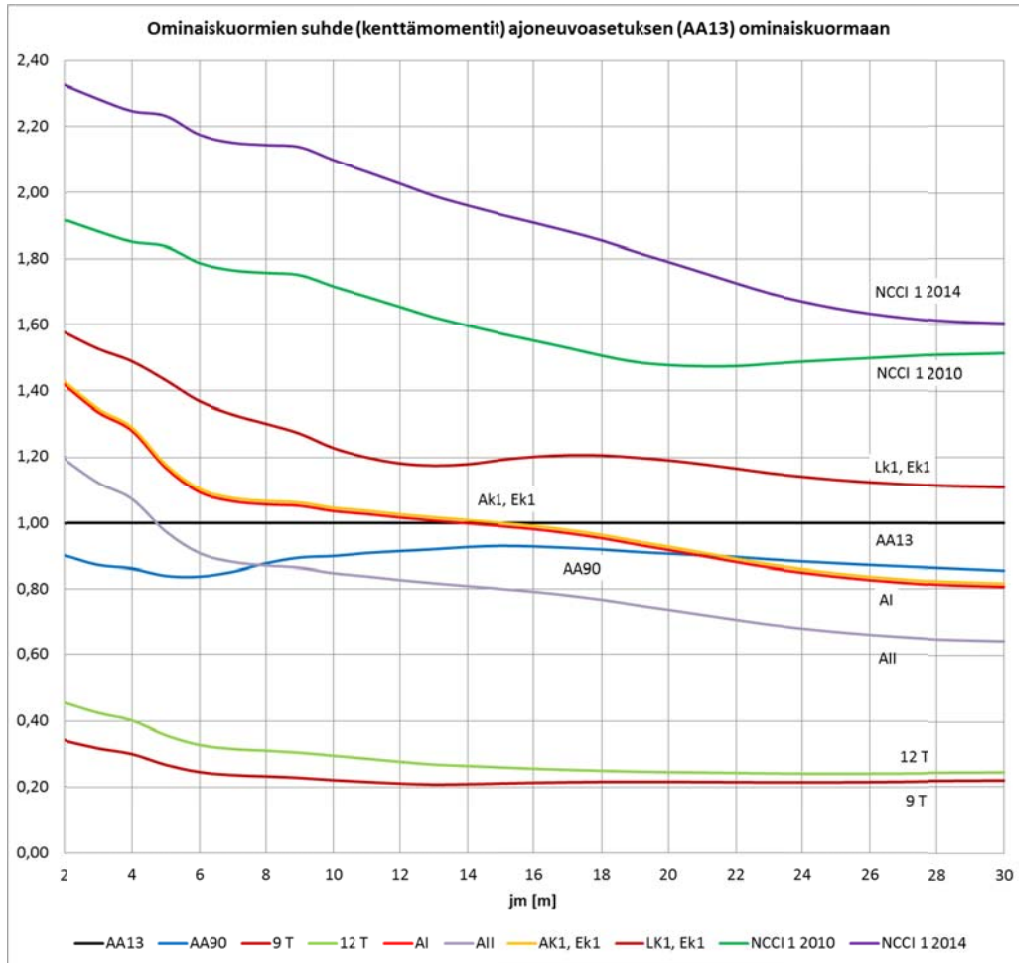
AA13		Kaista 1: F=- kN ⁽²⁾ q=4,5 kN/m ²	1,4-0,006xjm ≥ 1,10	1 kaavio: 1,45
2013		Kaista 2: F=- kN ⁽²⁾ q=4,5 kN/m ²		2 kaaviota: 1,30
Rajatila		Kaista 3: q=4,5 kN/m ²		
		Sillalla voi vaikuttaa samanaikaisesti ⁽¹⁾ (2) ajoneuvoa, tai yksi (1) ajoneuvo ja pintakuorma.		
NCCI 1⁽⁸⁾	LM1:	Kaista 1: F=300 kN q=9 kN/m ²	sisältyy kuormaan	1,35
2014		Kaista 2: F=200 kN q=6 kN/m ²		
Rajatila		Kaista 3: q=3 kN/m ²		
	LM2:	Kaista 1: F=400 kN		
	LM3:	q=45 kN/m ²		
⁽¹⁾ Peräkkäisten ajoneuvojen minimiväli on 15 m.				
⁽²⁾ Akselikuorma vaihtelee.				
⁽³⁾ Nauhakuorman intensiteetti riippuu jännemittien pituudesta tai vaikutusviivan nollakohtien etäisyydestä, jos tämä on lyhyempi. Kun jännemitta on välillä 15 - 75 m, lasketaan intensiteetti kaavalla:				
$p_0 \cdot \frac{1}{4} \cdot \left(1 + \frac{90}{l + 15} \right)$				
missä p ₀ on nauhakuorman intensiteetin maksimi. Suurempaa jännemittaa kuin 75 m ei käytetä.				
⁽⁴⁾ Pintakuorma ei vaikuta ajoneuvon kohdalla.				
⁽⁵⁾ Telit sijoitetaan päällysrakenteita tarkasteltaessa kuormakaistan keskelle. Kanner yksityiskohtia tarkasteltaessa vierekkäisten kuormakaistojen telien pyöräkuormien keskinäinen etäisyys sillan				
⁽⁶⁾ Kuormat Ak1 ja Ek1 ovat vaihtoehtoisia, eivätkä vaikuta samanaikaisesti.				
⁽⁷⁾ Kuormat Lk, akseli ja Ek ovat vaihtoehtoisia, eivätkä vaikuta samanaikaisesti.				
⁽⁸⁾ Kuormat LM1, LM2 ja LM3 ovat vaihtoehtoisia, eivätkä vaikuta samanaikaisesti.				
⁽⁹⁾ Murtorajatilan vertailuissa sallituilla jännityksillä suunniteltujen siltöjen kuorman kertoimena on käytetty arvoa 1,5.				

2 Eri aikakausien suunnittelukuormien ja vuoden 2013 ajoneuvoasetuskuorman taivutusmomenttien suhteet

Kuvissa 1, 2 ja 3 on esitetty eri aikakausina suunnittelussa käytettyjen liikennekuormien ja ajoneuvoasetuksen 2013 (AA13) mukaisten kuormien ominaisarvoilla laskettujen taivutusmomenttien väliset suhteet eri jännemitoilla.

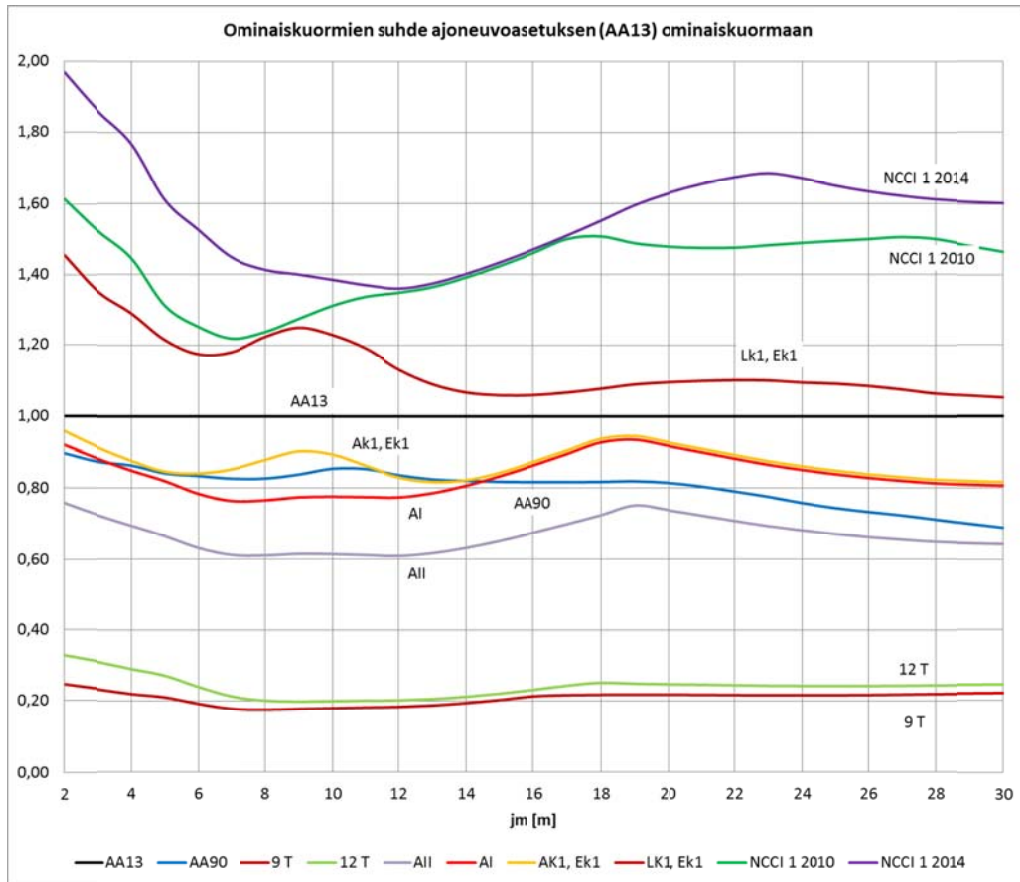


Kuva 8. Kuormien ominaisarvoilla laskettujen tukimomenttien suhteet eri jännemitoilla.



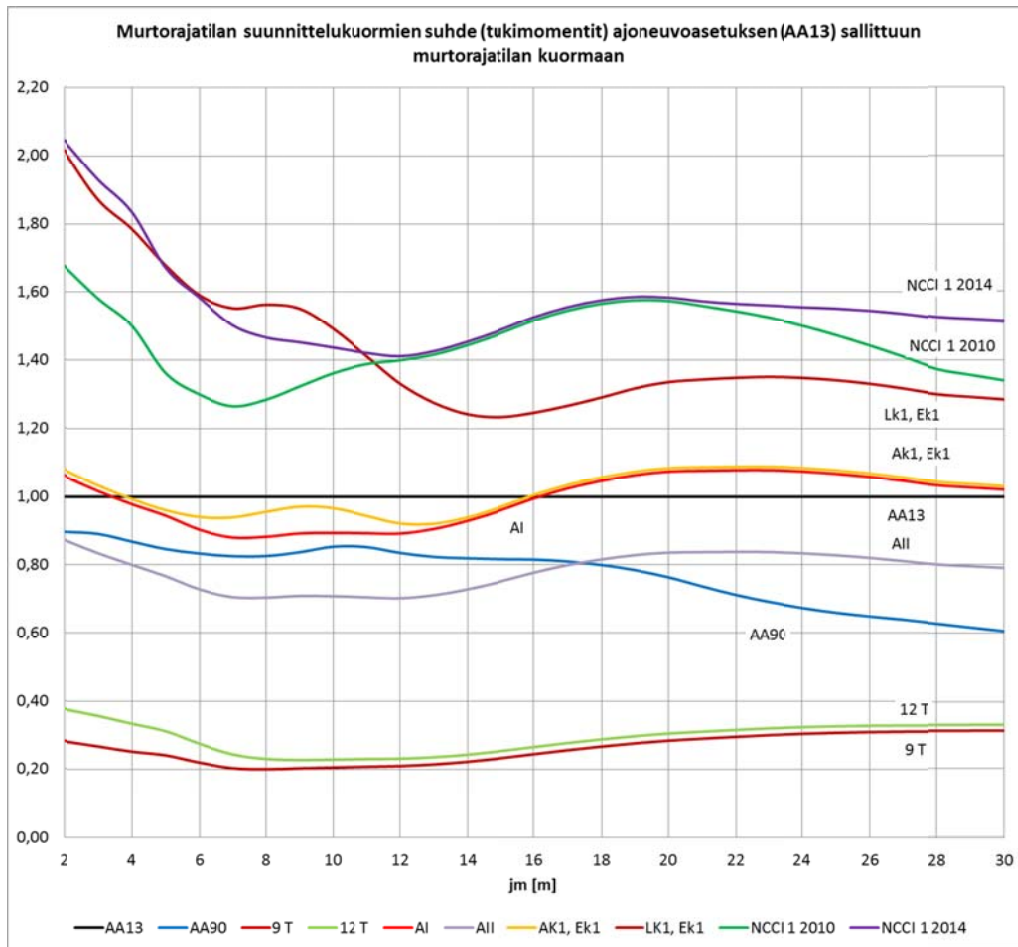
Kuva 9. Kuormien ominaisarvoilla laskettujen kenttämomenttien suhteet eri jänne-
mitoilla.

Kuvassa 3 on esitetty pienempi suhdeluku kuvista 1 ja 2.

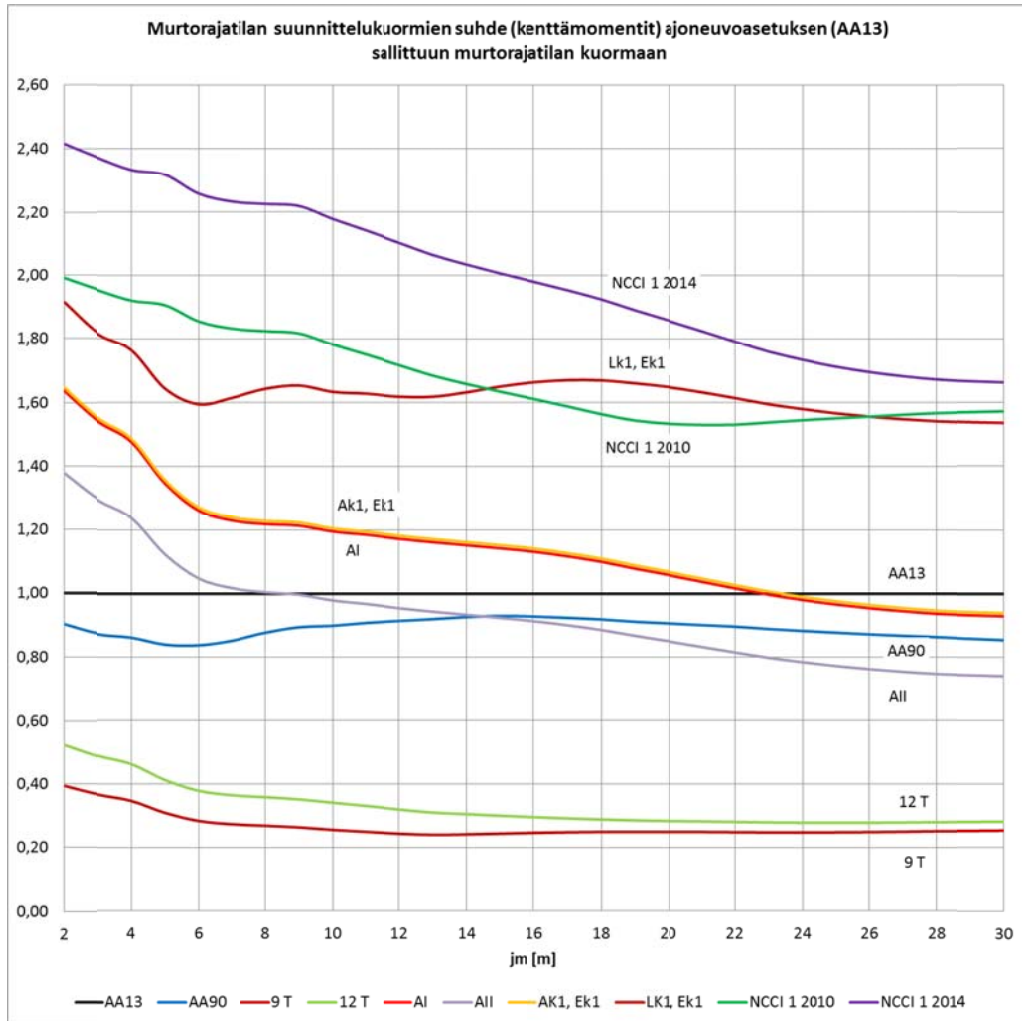


Kuva 10. Kuormien ominaisarvoilla laskettujen momenttien suhteet eri jänne-
mitoilla.

Kuvissa 4, 5 ja 6 on esitetty eri aikakausina suunnittelussa käytettyjen liikennekuormien ja ajoneuvoasetuksen 2013 (AA13) mukaisten kuormien murtorajatilan mitoitusarvoilla laskettujen taivutusmomenttien väliset suhteet eri jännemitoilla.

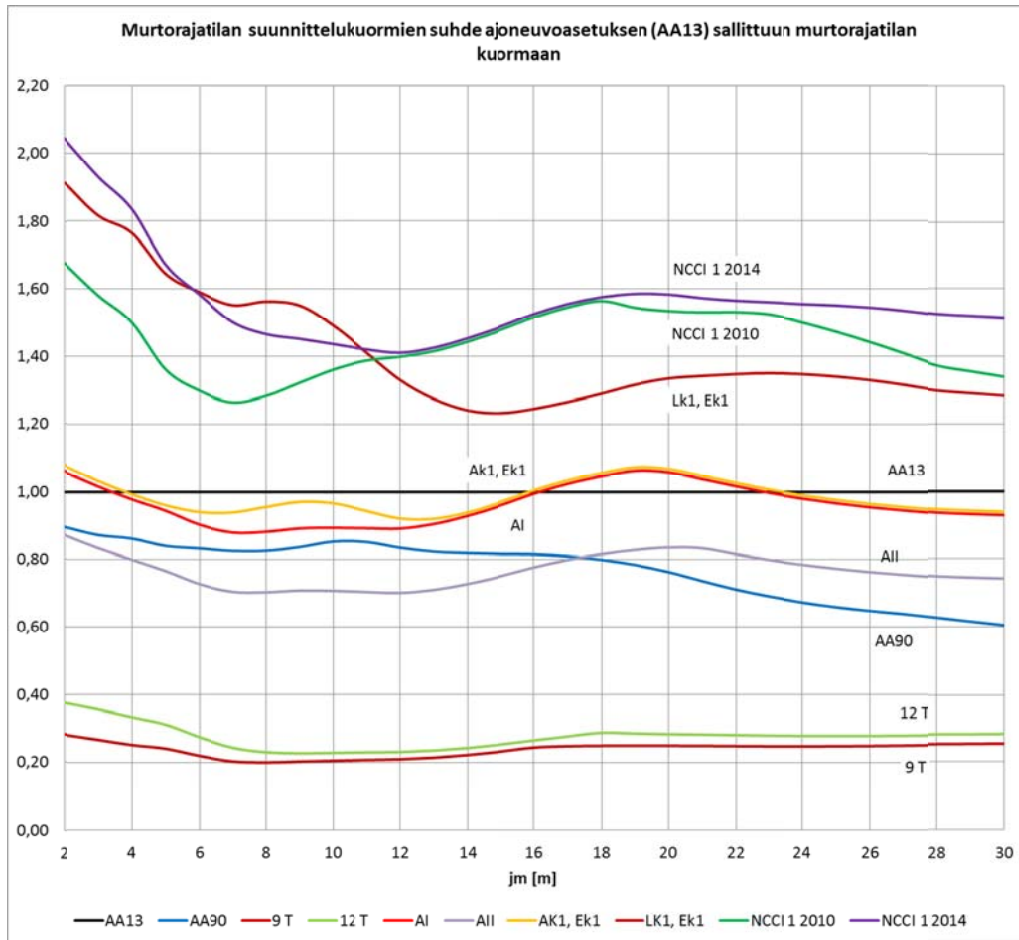


Kuva 11. Kuormien murtorajatilan mitoitusarvoilla laskettujen tukimomenttien suhteet eri jännemitoilla.

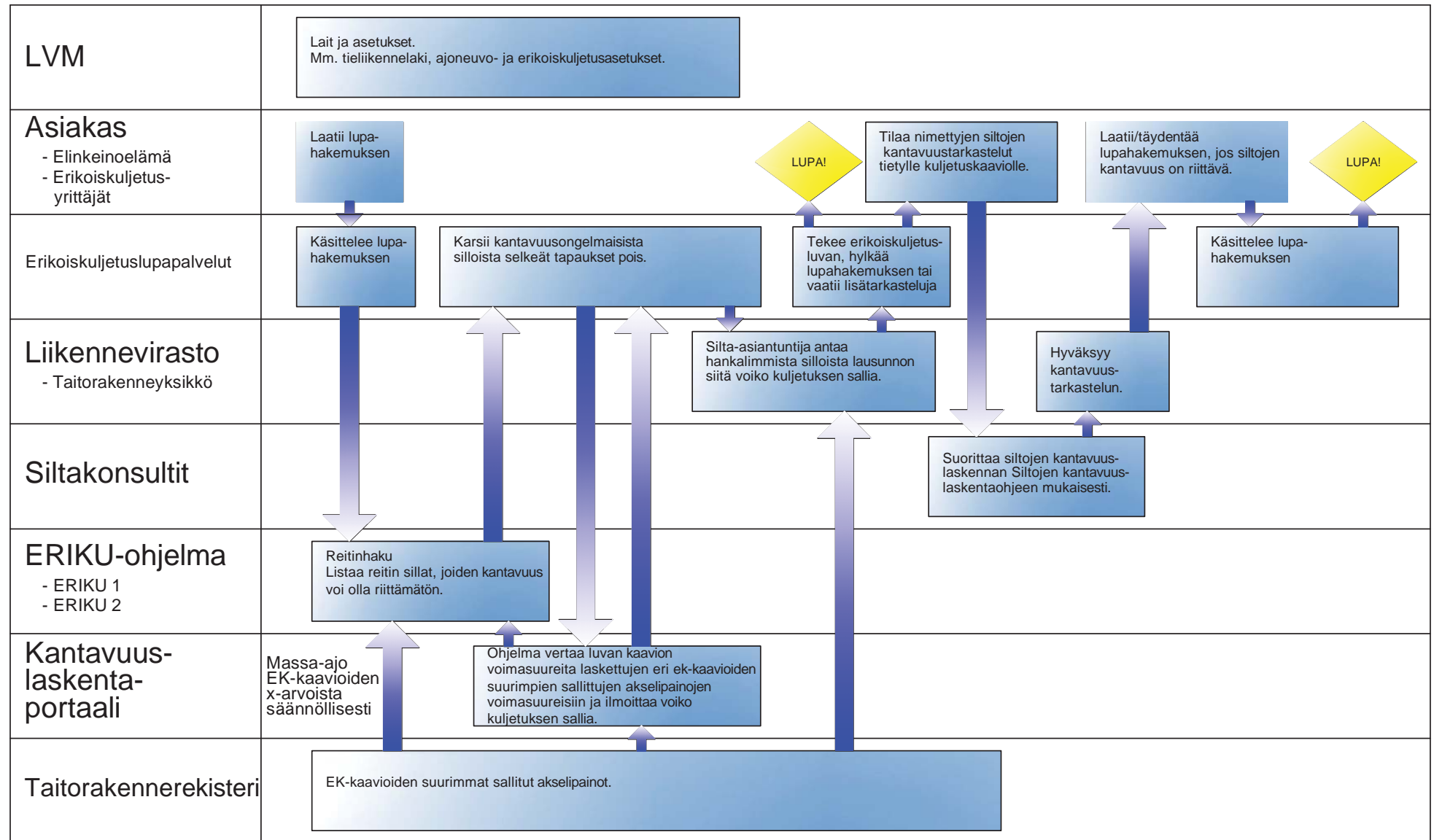


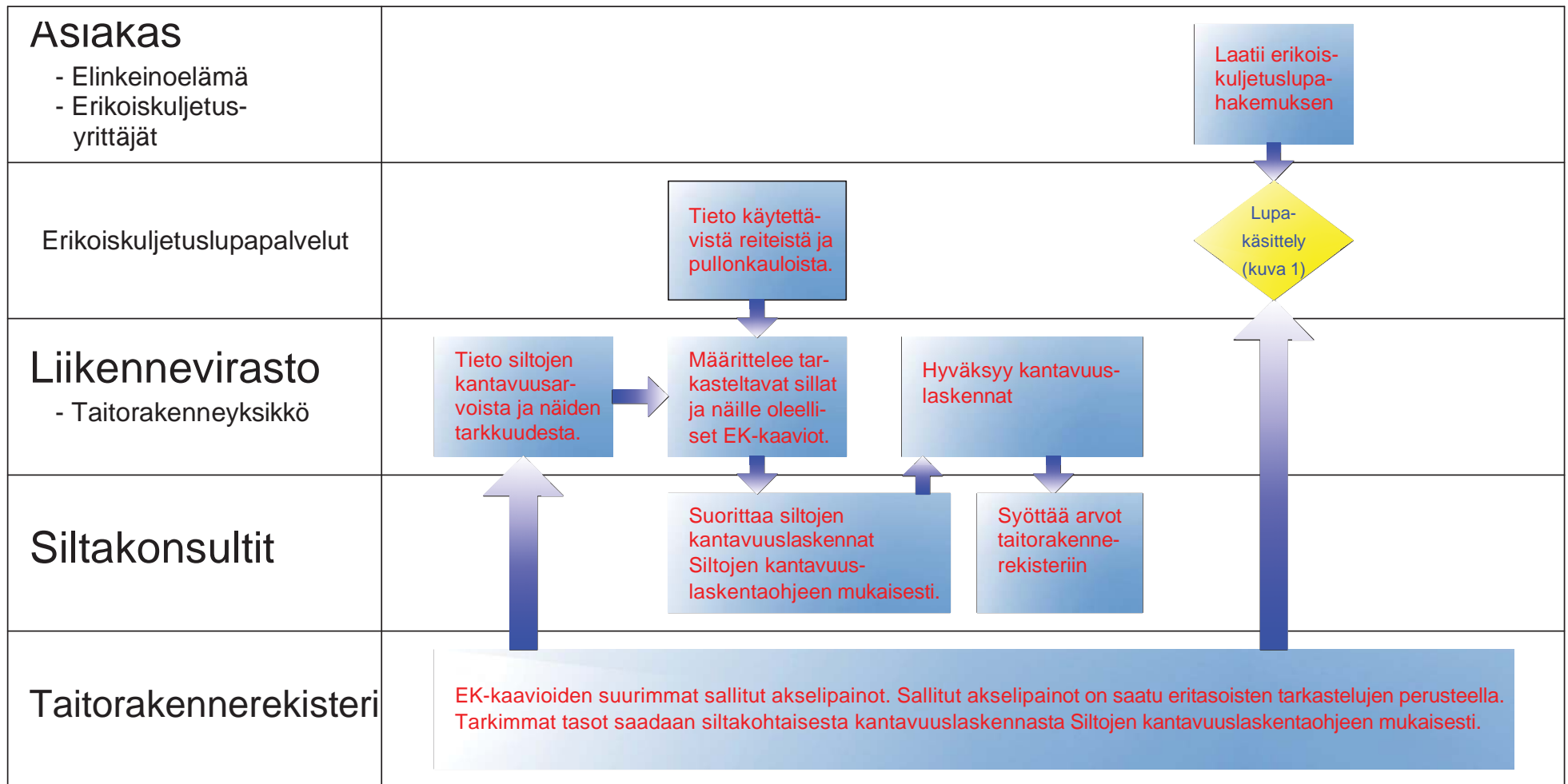
Kuva 12. Kuormien murtorajatilan mitoitusarvoilla laskettujen kenttämomenttien suhteet eri jännemitoilla.

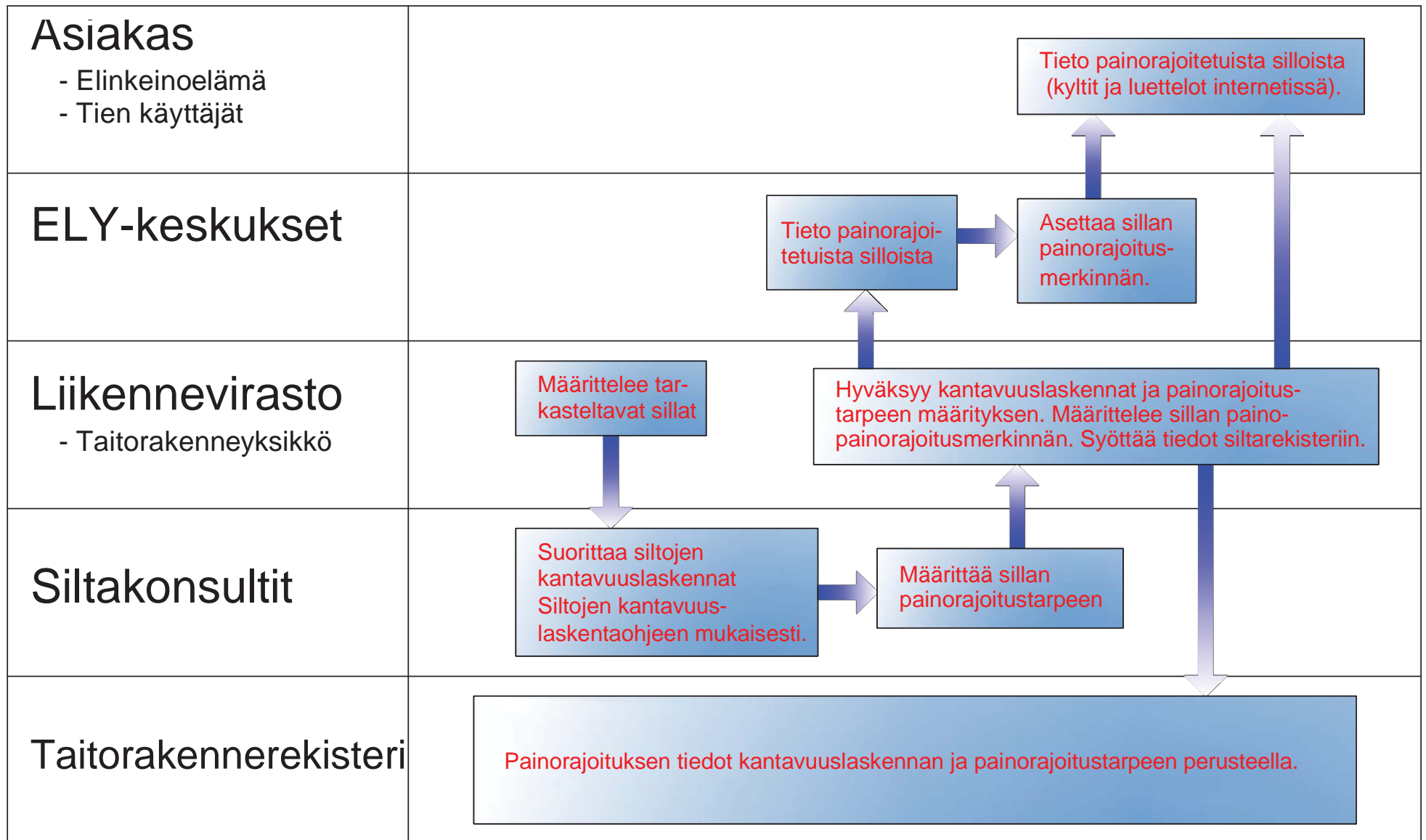
Kuvassa 6 on esitetty pienempi suhdeluku kuvista 4 ja 5.

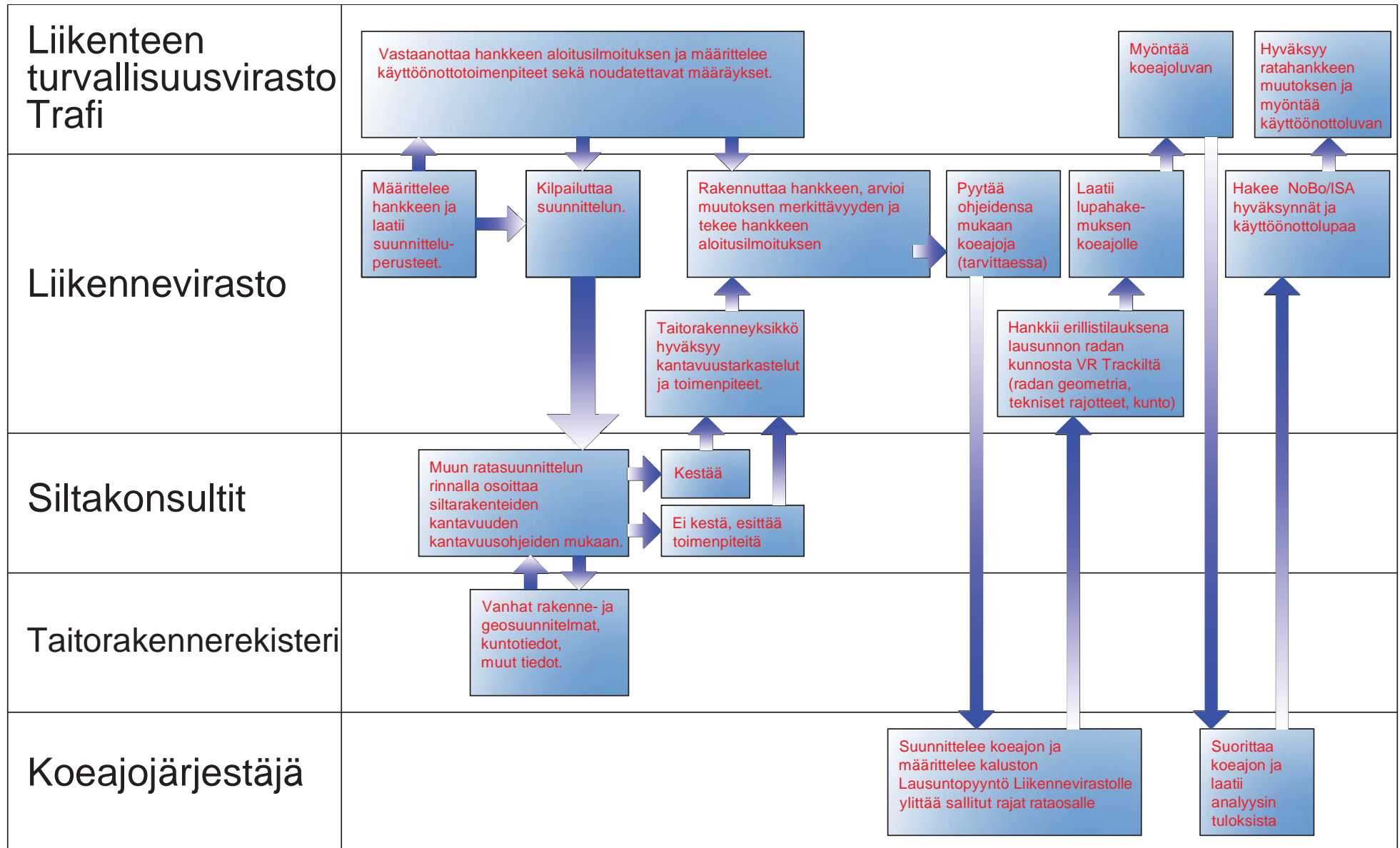


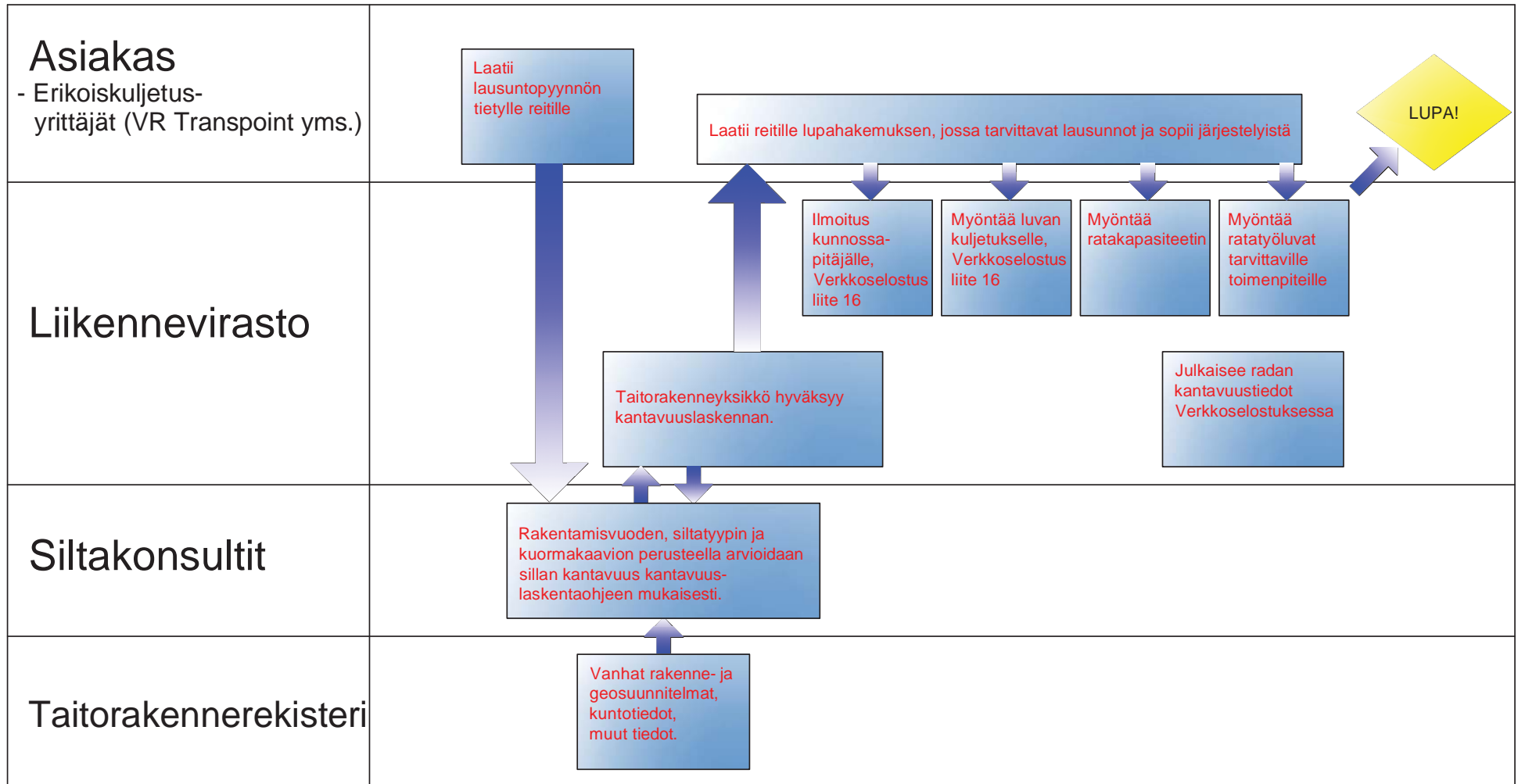
Kuva 13. Kuormien murtorajatilan mitoitusarvoilla laskettujen momenttien suhteet eri jännemitoilla.











Liik
enne
vira
sto

ISSN-L 1798-663X
ISSN 1798-6648
ISBN 978-952-317-196-1
www.liikennevirasto.fi
