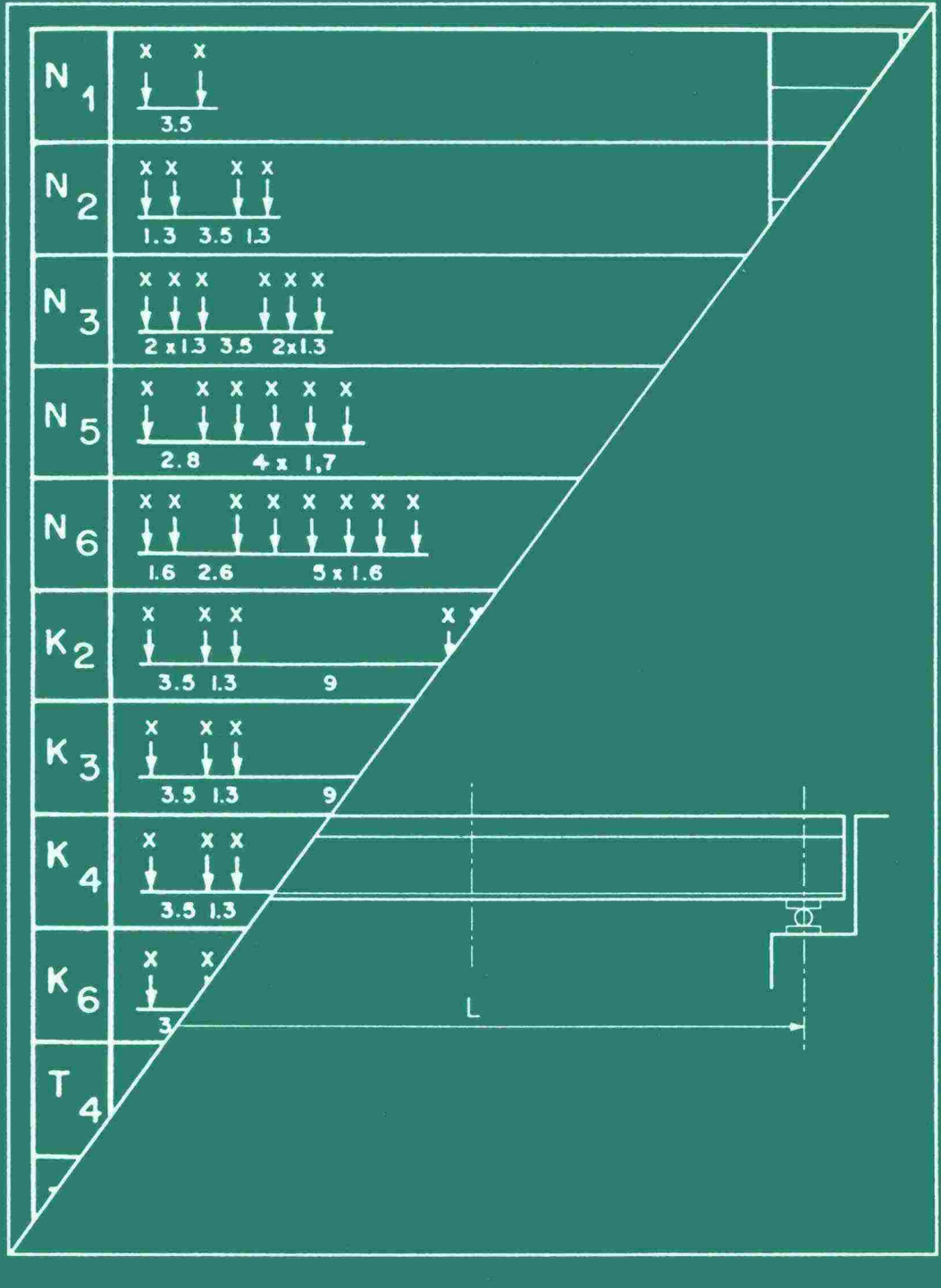
Tielaitos

Siltojen kantavuuden laskentaohje



Sillansuunnittelu

Helsinki 1992

TIEHALLINTO
Siltayksikkö

Siltojen kantavuuden laskentaohje

Tielaitos
TIEHALLINTO

Helsinki 2000

ISBN 951-47-6859-0
TIEL 2170005

Edita Oy
Helsinki 2000

Julkaisua myy:
Tielaitos, julkaisumyynti
telefaksi 0204 44 2652
e-mail elsa.juntunen@tielaitos.fi

Painotuote

Tielaitos
TIEHALLINTO
Siltayksikkö
PL 33
00521 HELSINKI
Puhelinvaihde 0204 44 150

Tielaitos

OHJE S/silta-623

17.12.1992 C.2.3.1

Jakelun mukaan

Säädösperusta
TL 117 §
Kohderyhmät
TIEH, ALUEHALLINTO

Voimassa
1.1.1993- TOISTAISEKSI

Asiasanat
SILLAT, LASKELMAT, OHJEET, KANTAVUUS

SILTOJEN KANTAVUUDEN LASKENTAOHJE, TIEL 2170005

Siltojen kantavuuden laskentaohjetta käytetään siltojen kantavuuden laskennallisessa määrityksessä. Siinä esitetään laskennallisen tarkastelun laajuus ja pääperiaatteet, erikoiskuljetuskaaviot ja niiden sijoittelu sillalle sekä laskentaperusteet varmuuskertoimineen kuormakaavioiden sallittuja arvoja määritettäessä.

Lisäksi esitetään menetelmä arvioida laskennallisesti terässillan jäljellä olevaa käyttöikää vaihtorasitusten suhteen.

Laskelmien tulosten esittämiseen tarkoitettuja lomakkeita on saatavissa tielaitoksen siltayksiköstä.

Apulaisjohtaja
Siltayksikkö

Juhani Vähäaho

Diplomi-insinööri
Siltayksikkö

Matti Kuusivaara

JAKELU Tiepiirit
S, Skk, Sts, S/silta, T, Tp
Kirjasto
Ohjekokoelma C.2.3.1
Ulkopuolinen jakelu/luettelo

LIITE Siltojen kantavuuden laskentaohje, TIEL 2170005

Olli Pyykönen

LISÄTIETOJA
Olli Pyykönen
Siltayksikkö
Puh. (90)14872897

JAKELU/MYYNTI
Tiehallitus, Painotuotevarasto
Opastinsilta 12A tai PL 33
00521 HELSINKI
Puh. (90)14872053

Alkusanat

Siltojen kantavuuden laskentaohje korvaa vuodelta 1978 olevan muistion, joka on laadittu teräsbetonisiltojen laskennassa käytettävistä laskentaperusteista.

Muistion laatimisen jälkeen ovat siltojen suunnitteluperusteet muuttuneet sekä liikennekuormat kasvaneet ja niiden muodot muuttuneet.

Ohjetta valmistelleeseen työryhmään ovat kuuluneet dipl.ins. *Matti Kuusivaara* ja dipl.ins. *Olli Pyykönen* (pj.) tiehallituksen siltayksiköstä sekä tutkija *Timo Tirkkonen* VTT:n rakennetekniikan laboratoriosta.

Helsingissä joulukuussa 1992

Siltayksikkö

Sisältö

1 YLEISTÄ 7

1.1 Ohjeen käyttö 7
1.2 Tarkastelun laajuus ja yleiset periaatteet 7
1.3 Voimasuureiden laskeminen 7

2 PYSYVÄT KUORMAT 7

3 MUUTTUVAT KUORMAT 8

3.1 Luonnonkuormat 8
3.2 Ajoneuvoasetuksen mukaiset kuormat 8
3.3 Erikoiskuljetukset 9

4 VARMUUSTARKASTELU 12

4.1 Yleistä 12
4.2 Murtorajatilatarkastelu 12
4.3 Käyttörajatilatarkastelu 13
4.3.1 Betonisillat 13
4.3.2 Liittopalkki- ja terässillat 13
4.3.3 Puusillat 13

5 TERÄSSILTOJEN VAIHTORASITUSTARKASTELU 14

5.1 Yleistä 14
5.2 Kestoikä 14

6 LASKELMIEN SISÄLTÖ JA TULOSTEN ESITYSTAPA 14

7 KIRJALLISUUSLUETTELO 15

LIITE: TERÄSSILLAN JÄLJELLÄOLEVAN KÄYTTÖIÄN LASKENTA

1 YLEISTÄ

1.1 Ohjeen käyttö

Tätä ohjetta käytetään olemassaolevien siltojen kantavuuden laskennallisessa määrityksessä.

Ohjeessa määritellään siltojen kantavuuden laskennallisen tarkastelun laajuus, voimasuureiden laskeminen, kuormien yhdistely sekä varmuustarkastelun periaatteet. Ohjeet koskevat siltoja, joissa ei ole kestävyyteen vaikuttavia vaurioita. Mahdollisten havaittujen vaurioiden vaikutus laskentaperusteisiin määritetään tapauskohtaisesti erikseen.

Siltojen kantavuutta voidaan selvittää myös koekuormituksilla, joita koskevat erilliset ohjeet.

1.2 Tarkastelun laajuus ja yleiset periaatteet

Sillan kantavuuden laskennassa käytetään tämän laskentaohjeen mukaisia laskentaperiaatteita ja kuormien osavarmuuskertoimia. Materiaalien sekä toissijaisesti myös kuormien osalta noudatetaan tielaitoksen julkaisemia ohjeita /5/, /6/ ja /7/ sekä yleisiä materiaaliohjeita /1/.../4/.

Laskennassa on rakennetta pyrittävä tarkastelemaan kokonaisuutena, jolloin kantavuuden arvioimisessa tarkastellaan pääsääntöisesti rakennetta sen määräävissä kohdissa, kuten esim. päärakennetta aukkojen määräävissä pisteissä ja tuilla. Mikäli määräävien pisteiden läheisyydessä on kohtia, joissa laskennallinen kantavuus on olennaisesti pienempi kuin määräävissä pisteissä, arvioidaan niiden vaikutus rakenteen varmuuteen.

1.3 Voimasuureiden laskeminen

Laskettaessa voimasuureita lineaarisen kimmoteorian mukaan otaksutaan jännityksen ja suhteellisen muodonmuutoksen suhde suoraviivaiseksi tarkasteltavaan rajatilaan asti.

Voimasuureet voidaan laskea mekanismin syntymisen perusteella, jolloin otaksutaan, että aineella ja rakenteella on sellaiset ominaisuudet, että voimasuureet poikkileikkauksessa pysyvät vakiona muodonmuutosten kasvaessa. Tämä edellyttää poikkileikkauksen riittävän muodonmuutoskyvyn tarkistamista kyseisen materiaaliohjeen mukaisesti.

2 PYSYVÄT KUORMAT

Rakenteen omapainoa laskettaessa otetaan mahdollisuuksien mukaan huomioon kantavan rakenteen todelliset mitat sekä pintarakenteiden todelliset paksuudet. Omapainoon kuuluvat lisäksi kaiteet ja muut kannen varusteet ja laitteet.

Pysyviä kuormia ovat jännitetyissä betonisilloissa lisäksi jännevoima sekä jännityshäviöt ja edelleen liittopalkkisilloissa betonin kutistuma ja viruma.

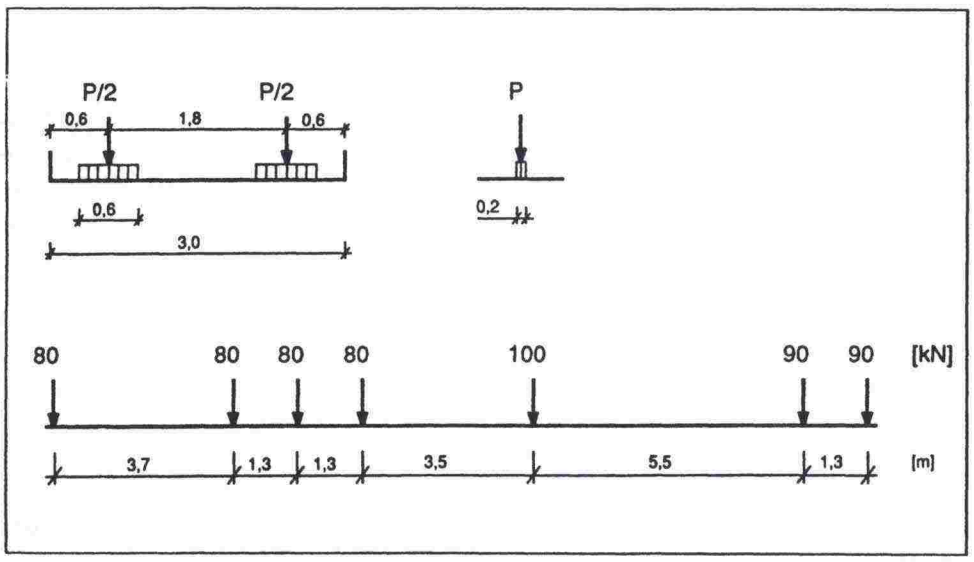
3 MUUTTUVAT KUORMAT

3.1 Luonnonkuormat

Luonnonkuormien suuruutta määritettäessä käytetään pääsääntöisesti tiehallituksen ohjetta Siltojen kuormat /6/. Luonnonkuormien suuruus määritetään kuitenkin aina tapauskohtaisesti paikallisten olosuhteiden mukaan rakenteen vaatimalla tavalla. Jos luonnonkuormat aiheuttavat rakenteeseen pakkovoimia, voidaan niiden vaikutus arvioida tapauskohtaisesti sillan materiaalin ja rakennetyypin perusteella materiaaliohjeiden mukaan.

3.2 Ajoneuvoasetuksen mukaiset kuormat

Ajoneuvoasetuksen mukainen kuormakaavio on valittu siten, että sen vaikutus sillan rakenteisiin vastaa vuoden 1990 alussa voimaantulleen ajoneuvoasetuksen mukaisen suurimman sallitun ajoneuvoyhdistelmän akseli-, teli- ja kokonaispainoja. Asetuksen mukaisia kuormia käytetään arvioitaessa sillan kelpoisuutta maanteitä ilman erikoislupia käyttäville raskaille liikennekuormille. Laskennan tuloksena määräytyy sillan painorajoitustarve.



Kuva 1: Ajoneuvoasetuksen mukainen kuormakaavio (AA)

Asetuksen mukaisen kuormakaavion kaistan leveys on 3,0 m *(kuva 1)*. Pyörän kosketuspinta sillan poikkisuuntaan on 0,6 m ja pituussuuntaan 0,2 m. Sillan pituussuunnassa kokonaispituudeltaan 16,6 m:n ajoneuvoyhdistelmän kokonaispaino on 600 kN.

Asetuksen mukaisen kuorman lisäksi siltaa voi kuormittaa kevyttä ajoneuvoliikennettä kuvaava tasainen kuorma p = 3,0 kN/m^2. Liikennekuormat voidaan sijoitella sillalle kolmella eri tavalla. Vaihtoehdoista valitaan se, joka antaa ko. rakenneosaa tarkasteltaessa määräävän vaikutuksen.

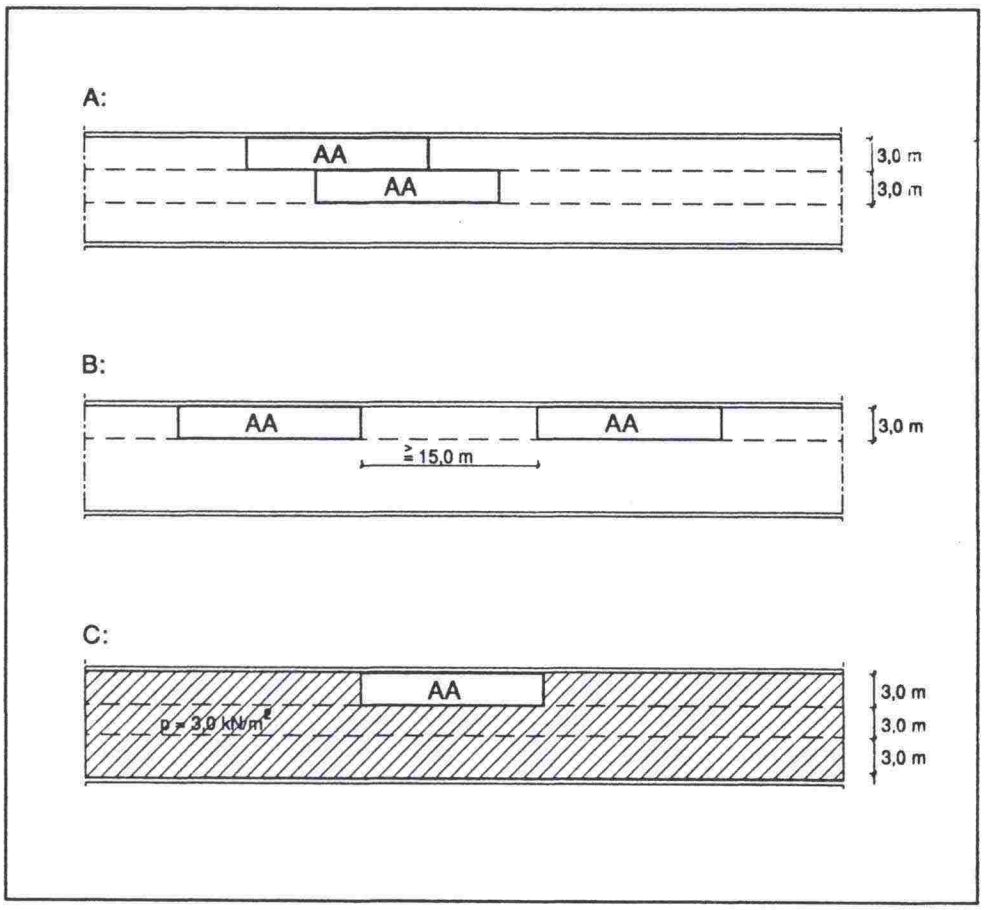
Kuormakaavio voi sijaita sillan poikkisuunnassa ajoradalla sekä siihen samassa tasossa liittyvällä pientareella. Sillalla voi samanaikaisesti esiintyä

korkeintaan kaksi kuormakaaviota. Kaaviot voivat sijaita välittömästi rinnakkain tai peräkkäin siten, että kaavioiden väli on vähintään 15,0 m *(kuvat 2a ja 2b)*. Edelleen siltaa voi kuormittaa yksi asetuksen mukainen kaavio ja tasainen pintakuorma *(kuva 2c)*. Pintakuorma voi olla osittain jatkuva siten, että se antaa määräävän vaikutuksen. Pintakuorma voidaan jättää huomioimatta ajoneuvokaavion kohdalta kaistaa.

Sysäyksen vaikutus otetaan huomioon kertomalla kunkin akselin paino sysäyskertoimella Φ, jonka suuruus määritellään jännemitan funktiona kaavan (1) mukaan.

$$\Phi = 1{,}40 - 0{,}006 \cdot L \geq 1{,}10 \qquad (1)$$

Kaavassa L on tarkasteltavan rakenneosan jännemitta.



Kuva 2: Esimerkki asetuksen mukaisten kaavioiden sijoittelusta

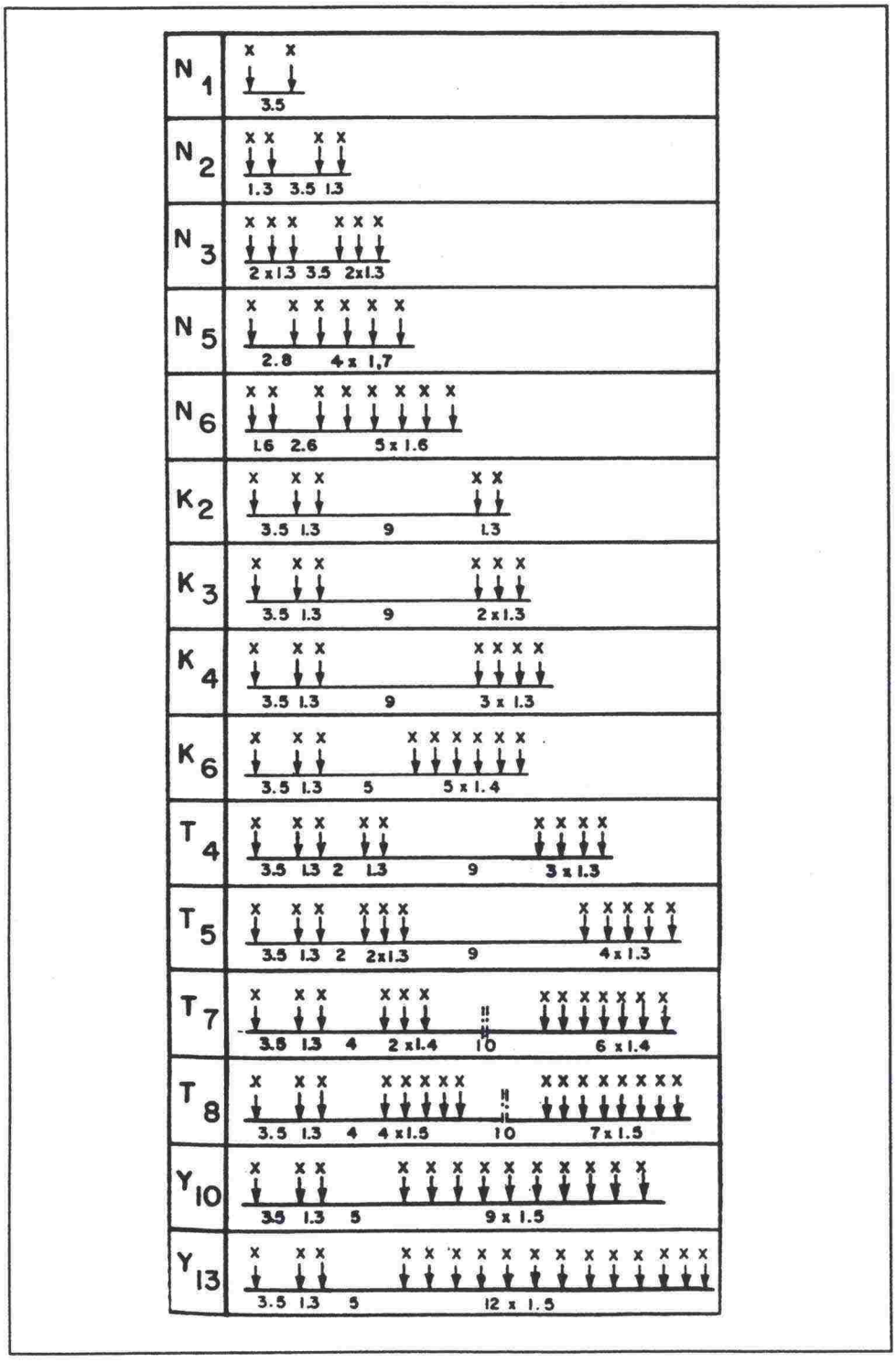
3.3 Erikoiskuljetukset

Yliraskaat erikoiskuljetukset jaetaan siltojen kantavuuden arvioinnissa kahteen luokkaan:

- yleiskuljetus, jolloin yliraskas kuljetus voi ylittää sillan luvan voimassaoloaikana useamman kerran ja
- valvottu kuljetus, jolloin yliraskas kuljetus ylittää sillan kerran tielaitoksen valvonnassa ajamalla edullisinta ajolinjaa sillan yli.

Erikoiskuljetusten pyörien kosketuspinnan mitat ovat samat kuin ajoneuvoasetuksen mukaisella kuormalla. Sysäyskerroin määritellään yleiskuljetuksilla kaavan (1) mukaan. Valvotuilla kuljetuksilla otetaan sysäyskertoimen arvoksi aina $\Phi = 1{,}10$.

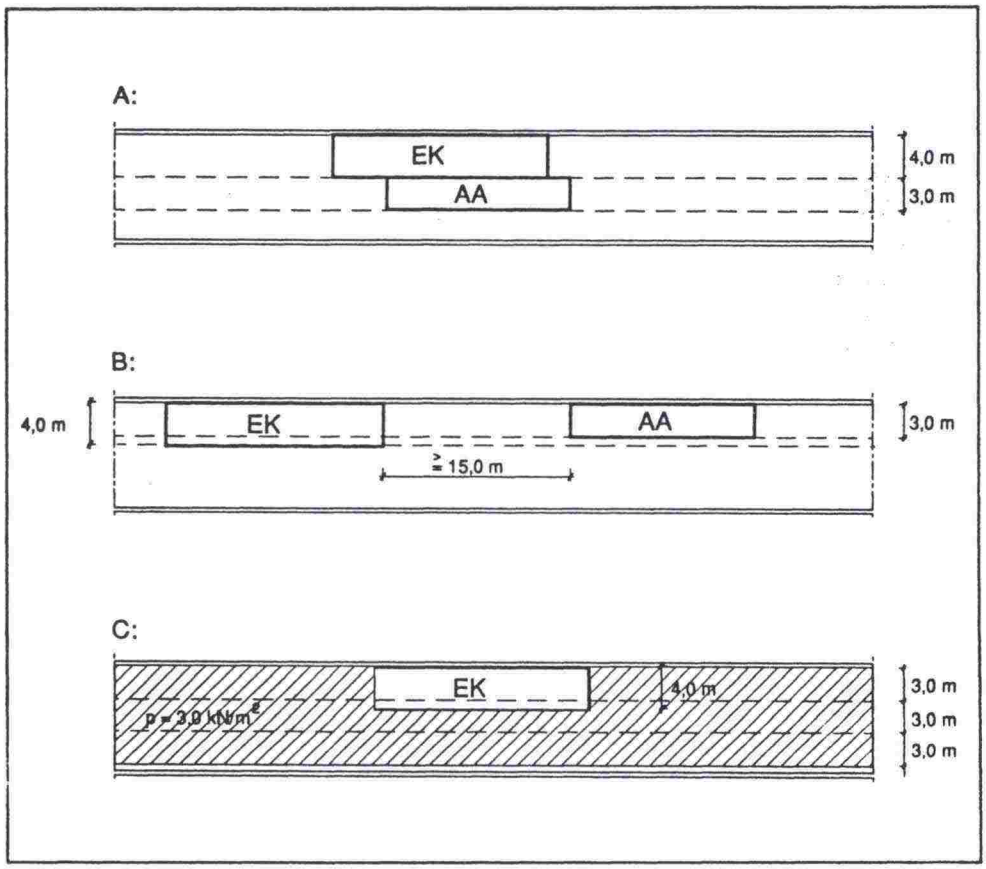
Erikoiskuljetuskaavio on sillan poikkisuunnassa 4,0 m:n levyinen. Tarkasteltavia kuormakaavioita on 15 kappaletta *(kuva 3)*.



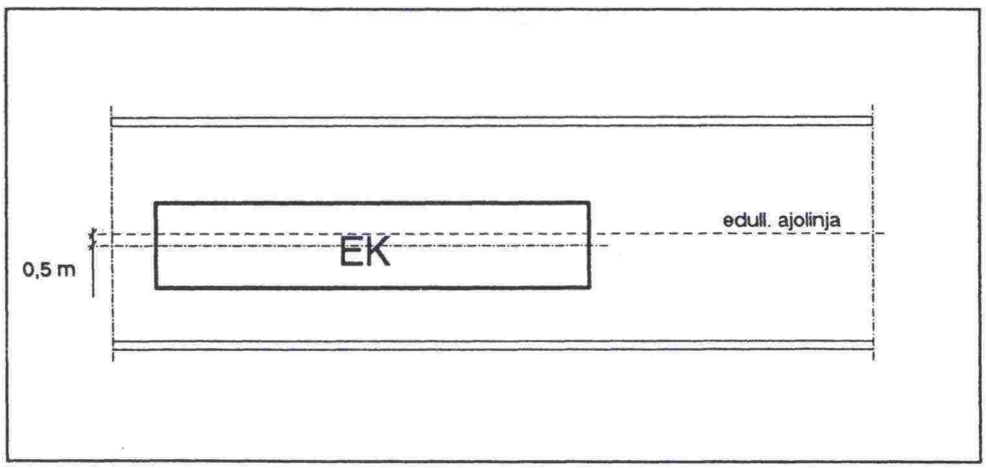
Kuva 3: Erikoiskuljetuskaaviot (EK)

Kuormakaaviot sijoitetaan sillalle yksin, yhdessä ajoneuvoasetuksen mukaisen kuorman tai yhdessä tasaisen pintakuorman kanssa. Sijoitteluperiaatteet on esitetty *kuvassa 4.*

Määriteltäessä valvotulle erikoiskuljetukselle sallittavia akselipainoja, sijoitetaan erikoiskuljetuskaavio *kuvan 5* mukaisesti yksin sillalle siten, että poikkeama edullisimmasta ajolinjasta e = 0,5 m.



Kuva 4: Erikoiskuljetus- ja asetuskaavioiden sijoittelu



Kuva 5: Tielaitoksen valvonnassa olevan erikoiskuljetuskuormakaavion sijoittelu sillalle

4 VARMUUSTARKASTELU

4.1 Yleistä

Rakenteelle suoritetaan murtorajatilatarkastelu, jolloin rajatilana on esimerkiksi myötääminen, murtuminen, stabiiliuden menetys tai mekanismin syntyminen. Lisäksi suoritetaan käyttörajatilatarkastelu, jolloin määräävä suure on yleensä taipuman suuruus tai betonirakenteilla halkeamaleveys.

4.2 Murtorajatilatarkastelu

Murtorajatiloissa materiaalien osavarmuuskertoimet ovat suunnitteluohjeiden mukaiset. Kuormien osavarmuuskertoimet määritetään erikseen arvioitaessa sillan kestävyyttä asetuksen mukaisille liikennekuormille tai raskaille erikoiskuljetuksille. Osavarmuuskertoimet ovat kaikille siltatyypeille seuraavat (suluissa erikoistapauksissa käytettävät alennetut varmuuskertoimet):

- **pysyvät kuormat** $\gamma_g = 1{,}2\ (1{,}1)$ tai $0{,}9$

- **liikennekuormat, painorajoitustarkastelu**

  - yksi AA-kaavio $\gamma_p = 1{,}45\ (1{,}3)$
  - kaksi AA-kaaviota $\gamma_p = 1{,}30\ (1{,}1)$
  - yksi AA-kaavio + pintakuorma $\gamma_p = 1{,}30\ (1{,}1)$

- **liikennekuormat, sillan kantavuus erikoiskuljetuksille**

  a) valvottu kuljetus: EK: $\gamma_p = 1{,}20\ (1{,}10)$

  b) yleiskuljetus:
  - yksi EK-kaavio: EK: $\gamma_p = 1{,}30\ (1{,}15)$
  - AA + EK-kaavio: EK: $\gamma_p = 1{,}20\ (1{,}0)$
    AA: $\gamma_p = 1{,}30\ (1{,}15)$
  - EK + pintakuorma: EK: $\gamma_p = 1{,}20\ (1{,}0)$
    p: $\gamma_p = 1{,}30\ (1{,}15)$

Edellämainittuja kuormien osavarmuuskertoimia käytetään pääsääntöisesti arvioitaessa sillan kestävyyttä päärakenteen suhteen. Sekundäärirakenteissa, joissa vaurioituminen on paikallista, voidaan varmuustasoa alentaa. Mikäli sekundäärirakenteiden osalta rajatila ei johda päärakenteen vaurioitumiseen, voidaan sekundäärirakenteiden kestävyyttä arvioitaessa käyttää edellälueteltuja alennettuja kuormien osavarmuuskertoimia (suluissa olevat arvot).

Alennettujen osavarmuuskertoimien käyttäminen päärakenteiden kestävyyden laskennassa edellyttää, että kyseessä on uusittava silta, jolla on lyhennetty käyttöikä. Rakenteen murtumistavan pitää myös olla sellainen, että oireita tapahtuvasta murtumisesta voidaan havaita jo hyvissä ajoin ennen murtumaa. Jotta murtumisoireet voitaisiin havaita, on silta otettava alennettuja kertoimia käytettäessä tehostettuun tarkkailuun. Kysymykseen tulevat siltatyypit ovat esim. betoniset laatta- ja palkkisillat sekä valssatut teräspalkkisillat.

4.3 Käyttörajatilatarkastelu

4.3.1 Betonisillat

Halkeamaleveyden tulee täyttää tavallisissa betonisilloissa seuraavat ehdot:

a) $w_k \leq 0{,}35$ mm - yhdelle ajoneuvoasetuksen kaaviolle ja

b) $w_k \leq 0{,}40$ mm - erikoiskuljetuskaaviolle (yleiskuljetuksen osalta).

Valvotulle erikoiskuljetukselle ei aseteta halkeamaleveysrajoituksia.

Jännitetyissä betonisilloissa ovat halkeamaleveyden enimmäisarvot halkeilua rajoittavien terästen suhteen vastaavilla kuormilla:

a) $w_k \leq 0{,}15$ mm ja b) $w_k \leq 0{,}20$ mm.

Halkeilua rajoittavia teräksiä suojaavan betonipeitteen todellisen paksuuden vaikutus suurimpaan sallittuun halkeamaleveyteen otetaan huomioon betonirakenneohjeiden /7/ mukaisella kaavalla.

Arvioitaessa jännitetyn betonisillan kestävyyttä ajoneuvoasetuksen mukaiselle kuormalle, suoritetaan vetojännitysrajatilatarkastelu käyttäen kuormituksena pysyvien kuormien lisäksi 30 % kohdan 3.2 mukaisesta kuormasta.

Halkemaleveyttä laskettaessa kuormina käytetään pysyvien ja muuttuvien kuormien ominaisarvoja. Sillalle sallittu kuormitus määritetään halkemaleveyden suhteen pääsääntöisesti päärakenteelle. Sekundäärirakenteiden osalta halkeamatarkastelu sovitaan tapauskohtaisesti. Halkeamaleveyttä laskettaessa otetaan mahdollisuuksien mukaan huomioon betonin todellinen lujuus.

Mikäli em. halkeamaleveysrajat kuitenkin laskennallisesti ylittyvät murtorajatilassa lasketun varmuuden ollessa riittävä, eikä sen perusteella sillalle sallittavia kuormia rajoiteta, asetetaan silta tehostettuun tarkkailuun.

Sallitun taipuman raja-arvoa ei betonisilloille tavallisesti aseteta, eikä sallittavia kuormia rajoiteta taipuman perusteella edellyttäen, että taipumat eivät haittaa sillan toimintaa.

4.3.2 Liittopalkki- ja terässillat

Terässilloissa suurin sallittu taipuma on a = L/500 ajoneuvoasetuksen mukaiselle liikennekuormalle (kohta 3.2). Suurempien taipumien salliminen edellyttää, että suuret taipumat eivät haittaa sillan toimintaa eivätkä sen käyttäjien turvallisuutta. Erikoiskuljetuksille ei taipumatarkastelua vaadita.

Riippusilloissa ja vinoköysisilloissa arvioidaan taipumakriteerit erikseen.

4.3.3 Puusillat

Puusilloissa suurin sallittu taipuma on a = L/200 pysyville kuormille + ajoneuvoasetuksen mukaiselle liikennekuormalle ja L/250 pelkälle ajoneuvoasetuksen mukaiselle liikennekuormalle.

Suurempien taipumien salliminen edellyttää, että taipumat eivät haittaa sillan toimintaa eivätkä sen käyttäjien turvallisuutta. Erikoiskuljetuksille ei taipumatarkastelua vaadita.

5 TERÄSSILTOJEN VAIHTORASITUSTARKASTELU

5.1 Yleistä

Terässiltojen vaihtorasitustarkasteluun liittyviä ohjeita on annettu lähteissä /1/, /2/ ja /5/.

Materiaalin osavarmuuskertoimille käytetään vaihtorasitustarkastelussa arvoja väliltä 1,0...1,6 halutusta varmuustasosta riippuen. Osavarmuuskertoimen valinnan vaikutus voidaan nähdä liitteen esimerkistä. Arvoa 1,6 pienempien arvojen käyttäminen osavarmuuskertoimelle edellyttää sillan ottamista säännölliseen tarkkailuun.

5.2 Kestoikä

Terässillan kestoiän (=jäljelläoleva käyttöikä) laskenta voidaan suorittaa arvioimalla sillan liikennemäärät ja liikennekuormat joko tilastoista (ks. liite) tai suorittamalla sillan väsymisen kannalta määräävälle kohdille jännitysten pitkäaikaismittaus.

Vanhan sillan kestoiän laskennassa tulee ottaa huomioon siltaa sen käyttöönotosta lähtien jo rasittaneet jännitysvaihtelut. Niiden vaikutus voidaan laskea esimerkiksi liitteessä esitetyllä tavalla. Siinä on otettu huomioon raskaiden ajoneuvojen kokonaispainojen ja liikennemäärien jatkuva nousu.

Kestoikälaskennan perusteella kriittisiksi havaitut rakenneosat tulee ottaa tehostettuun tarkkailuun mahdollisen säröilyn havaitsemiseksi riittävän varhain.

6 LASKELMIEN SISÄLTÖ JA TULOSTEN ESITYSTAPA

Laskelmien lopputuloksena saadut sillan kantavuustiedot esitetään rakenneosittain kantavuuslomakkeilla sekä koko sillan osalta yhteenvetolomakkeella. Kantavuuslomakkeet jaotellaan rakenteen materiaalin mukaan.

Sillan pääkannattajien osalta tulee esittää vaikutusviivat määräävistä suureista. Vaikutusviivojen tulee olla laadittu kuorman ominaisarvoilla (käyttämättä osavarmuus- ja sysäyskertoimia).

Erikoiskuljetusten sallittujen akselipainojen määrittämiseksi tulee esittää laskelmat määräävien rakennepoikkileikkausten liikennekuormille käytettävissä olevasta kapasiteetista (kokonaiskapasiteetista pysyvien kuormien ja mahdollisen ajoneuvoasetuskuorman osuus vähennettynä).

Tietokonelaskelmista tulee esittää myös tuloksia selventävä yhteenveto.

7 KIRJALLISUUSLUETTELO

/1/ SFS 2378. 1985. Hitsaus. Väsyttävästi kuormitettujen teräsrakenteiden hitsausliitosten mitoitus ja lujuuslaskenta. Helsinki: Suomen standardoimisliitto. 41 s.

/2/ Suomen rakentamismääräyskokoelma: B4 Betonirakenteet. Ohjeet 1987, muutettu 1989 ja 1990. Helsinki: Ympäristöministeriö.

/3/ Suomen rakentamismääräyskokoelma: B7 Teräsrakenteet. 1988. Helsinki: Ympäristöministeriö.

/4/ Suomen rakentamismääräyskokoelma: B10 Puurakenteet. 1990. Helsinki: Ympäristöministeriö.

/5/ Tielaitos, Tiehallitus 1989. Teräsrakenneohjeet. Helsinki. 1989. TVH 722349.

/6/ Tielaitos, Tiehallitus 1991. Siltojen kuormat. Helsinki. 1991. TIEL 2172072.

/7/ Tielaitos, Tiehallitus 1992. Betonirakenneohjeet. Helsinki, 1992. TIEL 2172073.

TERÄSSILLAN JÄLJELLÄOLEVAN KÄYTTÖIÄN LASKENTA

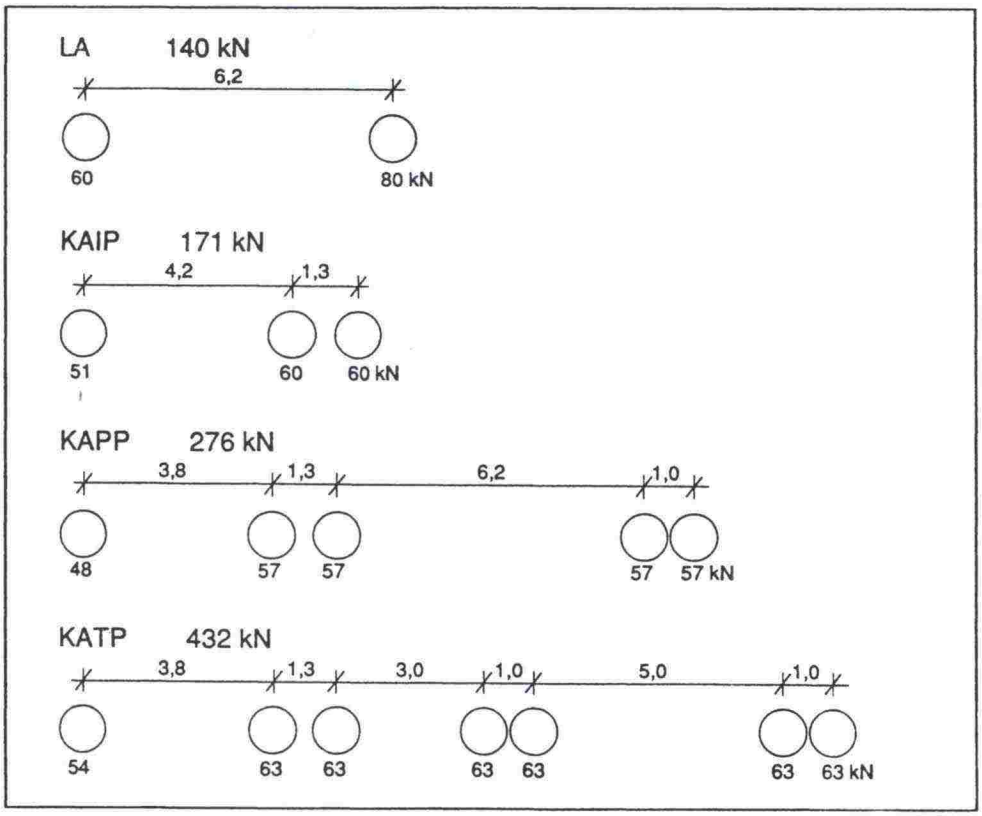
1 YLEISTÄ

Esimerkkinä terässillan jäljelläolevan käyttöiän laskennasta on tarkasteltu Hännilänsalmen sillan teräksisille jäykistyspalkeille suoritettua laskentaa. Laskennassa otetaan huomioon siltaa sen elinaikana (1962-) jo rasittanut raskas kuormitus, jota tarkastellaan jakamalla se neljään tavallisimpaan ajoneuvotyyppiin.

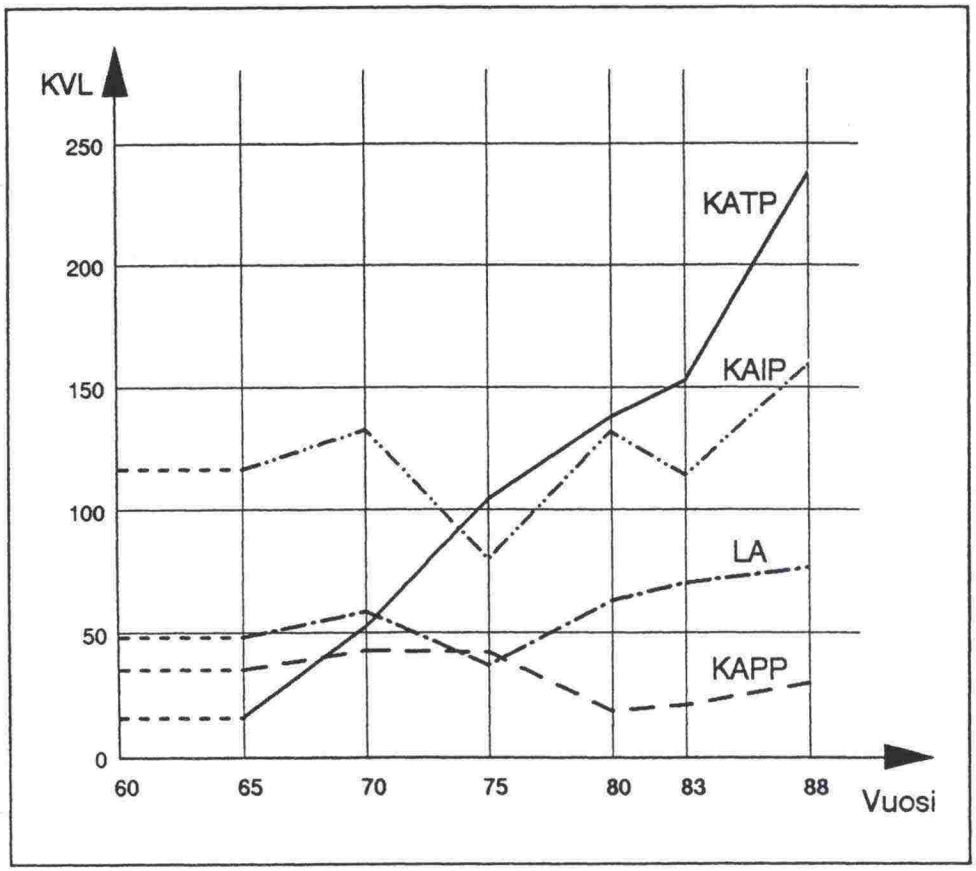
2 RASKAAN LIIKENTEEN AJONEUVOTYYPIT

Laskelmassa tarkastellut raskaan liikenteen ajoneuvotyypit ovat linja-auto (LA), kuorma-auto ilman perävaunua (KAIP), kuorma-auto puoliperävaunulla (KAPP) sekä kuorma-auto täysperävaunulla (KATP).

Ajoneuvotyyppien akselimäärät, -välit ja -painot on otettu lähteessä /1/ "V. Roos: Siltojen vaihtorasituskertymä, RIL K109-1989" esitetystä vaihtorasituskuormasarjasta. Siinä esitetyt ajoneuvojen painot on saatu vuoden 1986 akselipainotutkimuksesta. Lähteen vaihtorasituskuormasarja on esitetty *kuvassa L1.*



Kuva L1. Tieliikenteen siltojen vaihtorasituskuormasarja /1/.



Kuva L2. Raskaan ajoneuvoliikenteen määrien kehitys Hännilänsalmen sillalla.

3 RASKAAN LIIKENTEEN MÄÄRÄT

Sillan yli kulkevan raskaan liikenteen määrät on saatu kyseisen tieosuuden liikennelaskennoista vuosilta 1965, -70, -75, -80, -83 ja -88. Ajoneuvomäärien kehitys sillalla on esitetty *kuvassa L2.*

4 RASKAAN LIIKENTEEN KOKONAISPAINOJEN KEHITYS

Raskaan liikenteen ajoneuvojen kokonaispainojen kehitys on saatu suoritetuista akselipainotutkimuksista. Niissä on esitetty ajoneuvotyyppien keskimääräisten kokonaispainojen kehitys.

Vaihtorasitustarkasteluissa on parempi kokonaispainosuure kuitenkin painotettu kokonaispaino Q_p, joka on laskettu kunkin ajoneuvotyypin kokonaispainojakautumasta *kaavalla (1)*:

$$Q_p = [\Sigma(p_j/100) \cdot Q_j^3]^{1/3} \qquad (1),$$

jossa Q_j on ajoneuvotyypin painoluokan j (esim. 100...120 kN) paino ja
p_j on painoluokan j prosenttiosuus

Keskimääräiset vuosien 1960...86 kokonaispainot Q_k on muutettu painotetuiksi kertomalla ne vuoden 1986 akselipainotutkimuksen ajoneuvotyyppien painojakautumien perusteella määritetyillä kertoimilla k_a /1/:

$k_a = Q_p/Q_k$, (2)

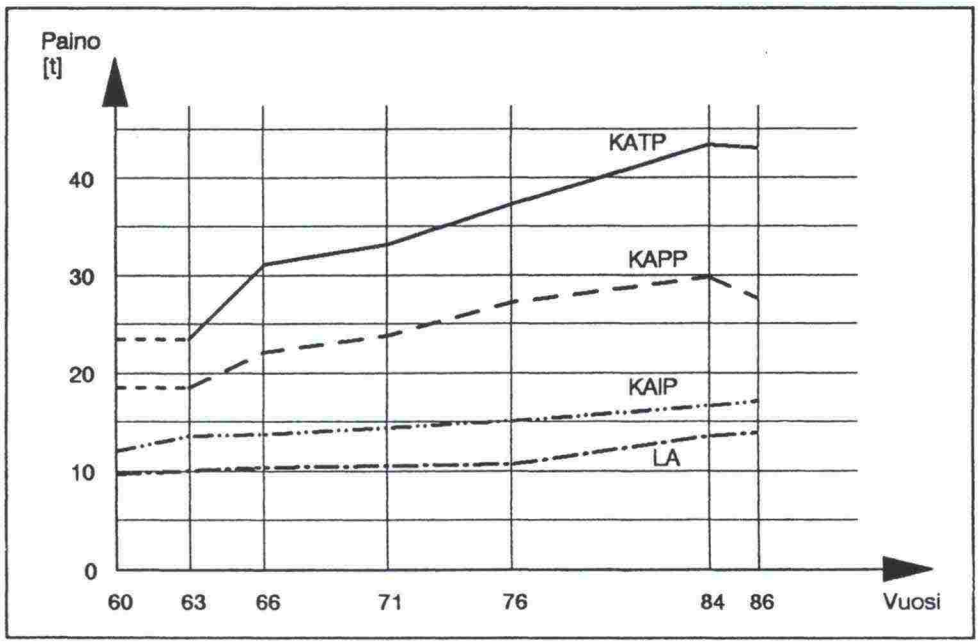
k_{LA} = 10,73/10,35 = 1,038 (akselipainotutkimus 1976)

k_{KAIP} = 17,1/11,0 = 1,555

k_{KAPP} = 27,6/24,1 = 1,145

k_{KATP} = 43,2/33,8 = 1,278

Painotettujen kokonaispainojen kehitys vuodesta 1963 on esitetty *kuvassa L3.*



Kuva L3. Raskaan liikenteen painotettujen kokonaispainojen kehitys 1960...88.

5 EKVIVALENTTIEN JÄNNITYSVAIHTELUIDEN LUKUMÄÄRÄT

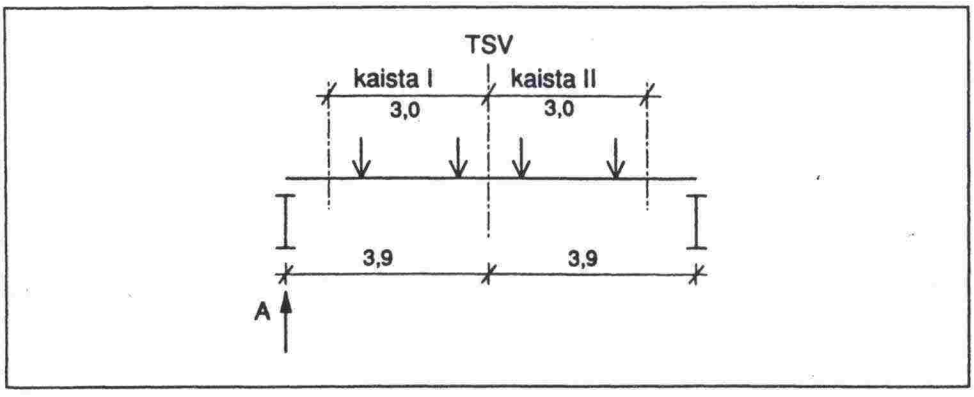
Koska eri ajoneuvotyyppien akselivälit ja -määrät on otaksuttu vakioiksi, voidaan ajoneuvomäärät vuosina 1962...90 muuttaa ekvivalenteiksi arvoiksi vuoden 1986 tasolle suoraan painotettujen kokonaispainojen suhteilla.

Laskenta on suoritettu taulukkolaskentaohjelmalla. Viimeisten liikennelaskentojen ja akselipainotutkimusten jälkeen on arvojen otaksuttu pysyneen vakiona.

Laskelmassa on otettu huomioon se, että kokonaisliikennemäärä jakautuu tasan sillan kummallekin kaistalle. Eri kaistoilla sijaitsevien ajoneuvojen *(kuva L4)* vaikutus palkkiin on laskettu vipuvarsisäännöllä seuraavasti:

$A_I = 0{,}6923\ Q_I$; $A_{II} = 0{,}3077\ Q_{II}$

Verrataan kaistan II aiheuttamaa rasitusta kaistan I aiheuttamaan. Laskettaessa kaistoille yhteistä ekvivalenttien jännitysvaihteluiden kokonaismäärää saadaan vuosittaiseksi arvoksi (i=vuosi, N_i vuosittainen kokonaisliikennemäärä):



Kuva L4. Kahden kaistan sijoitus Hännilänsalmen sillalle.

$$N_{0koki} = [1+(0,3077/0,6923)^3] \cdot N_i/2 \cdot (Q_{pi}/Q_{p86})^3$$
$$= 1,0878 \cdot N_i/2 \cdot (Q_{pi}/Q_{p86})^3$$

Esimerkkinä ekvivalentin jännitysvaihtelun määrästä on *taulukossa L1* esitetty KATP:n jännitysvaihteluiden määrien laskenta.

Vuoden 1986 tasoon lasketuiksi ekvivalenteiksi jännitysvaihteluiden kokonaismääriksi vuosina 1962...90 saatiin seuraavat arvot:

LA:	218444	KAPP:	146702
KAIP:	527259	KATP:	533430

Taulukko L1. Ajoneuvotyypin KATP ekvivalentin jännitysvaihtelun laskenta.

Vuosi	N_i	$N_i/2$	Q_{pi}	$k_q=Q_{pi}/Q_{p86}$	k_q^3	N_{0koki}
62	5800	2900	23,5	0,54398	0,16097	508
63	5800	2900	23,5	0,54398	0,16097	508
64	5800	2900	26,1	0,60417	0,22053	696
65	5800	2900	28,6	0,66204	0,29017	915
66	8400	4200	31,2	0,72222	0,37671	1721
67	11300	5650	31,6	0,73148	0,39139	2406
68	13900	6950	32,0	0,74074	0,40644	3073
69	16800	8400	32,4	0,75000	0,42187	3855
70	19300	9650	32,8	0,75926	0,43769	4595
71	23400	11700	33,2	0,76852	0,45390	5777
72	27000	13500	34,0	0,78704	0,48751	7159
73	30700	15350	34,8	0,80556	0,52274	8729
74	34700	17350	35,7	0,82639	0,56436	10651
75	38300	19150	36,5	0,84491	0,60315	12564
76	40900	20450	37,3	0,86343	0,64369	14319
77	43100	21550	38,1	0,88194	0,68600	16081
78	45600	22800	38,9	0,90046	0,73013	18108
79	48200	24100	39,6	0,91667	0,77025	20193
80	50400	25200	40,4	0,93519	0,81789	22420
81	52200	26100	41,2	0,95370	0,86744	24628
82	54200	27100	41,9	0,96991	0,91241	26897
83	55800	27900	42,7	0,98843	0,96568	29308
84	62100	31050	43,5	1,00694	1,02098	34485
85	68600	34300	43,3	1,00231	1,00696	37571
86	74600	37300	43,2	1,00000	1,00000	40575
87	80700	40350	43,2	1,00000	1,00000	43893
88	86900	43450	43,2	1,00000	1,00000	47265
89	86900	43450	43,2	1,00000	1,00000	47265
90	86900	43450	43,2	1,00000	1,00000	47265
					N_{0kok} =	533430

6 EKVIVALENTTIEN JÄNNITYSVAIHTELUIDEN SUURUUDET

Kuvan L1 mukaisten ajoneuvokaavioiden Hännilänsalmen sillan jäykistyspalkkiin aiheuttamat taivutusmomentin arvot laskettiin riippusilloille tehdyllä laskentaohjelmalla. Sillä saatiin maksimi- ja minimitaivutusmomenteiksi pisteessä 27,5 m eri ajoneuvoille, kun ne oli sillan sivusuunnassa sijoitettu kaistalle I *(kuva L4)*.

Taulukko L2. Lasketut maksimi- ja minimitaivutusmomentit eri ajoneuvotyypeille.

Ajon.	Q_p	M_{max}	M_{min}	ΔM
LA	140	692	-318	1010
KAIP	171	873	-401	1274
KAPP	276	1191	-637	1828
KATP	432	1869	-990	2859
	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]

Edellisissä taivutusmomentin arvoissa on sysäyskertoimelle otettu arvo Φ = 1,0.

Jännitysvaihtelun $\Delta\sigma_{ekv}$ arvot on laskettu yhtälöstä (3):

$$\Delta\sigma_{ekv} = \Delta M \cdot E_s \cdot e/(EI) , \qquad (3)$$

jossa $E_s = 210\,000$ N/mm^2
$e = 0{,}9281$ m
$EI = 4359{,}5$ MNm^2 (täysi liittotoiminta)

Lasketut jännitysvaihtelun arvot on esitetty *taulukossa 3.*

Taulukko L3. Jännitysvaihtelun $\Delta\sigma$ arvot eri ajoneuvotyypeille.

Ajon.	$\Delta\sigma_{ekv}$
LA	45,2
KAIP	57,0
KAPP	81,7
KATP	127,8
	[N/mm^2]

7 KESTOIÄN LASKEMINEN

Teräsrakenteen jäljelläolevan käyttöiän eli kestoiän laskenta pohjautuu rakenteen tiettyä jännitysvaihtelua vastaavaan jännitysvaihteluiden määrään, jonka rakenne kestää. Laskennassa käytetään osavarmuuskerrointa γ_m, jonka arvoksi on valittu joko $\gamma_m = 1{,}6$ tai $\gamma_m = 1{,}0$.

Jäykistyspalkin väsytysluokaksi valitaan 140 (valssattu profiili, uumassa niittiliitos). Rasitusvaihteluiden määrää $N = 5 \cdot 10^6$ vastaavaksi ominaisväsymisrajaksi saadaan tällöin $\Delta f_k = 103$ N/mm^2.

Koska palkin laipan ainevahvuus on yli 25 mm, kerrotaan laskettu jännitysvaihtelu kertoimella k_s /2/:

$k_s = (t/25)^{0,25} = (40/25)^{0,25} = 1,1247.$

Rakennetta jo rasittanut ominaisväsymisrajaa vastaava jännitysvaihtelun määrä saadaan laskettua seuraavalla kaavalla (ks huomioitu):

$$N_- = \Sigma N_{0i} \cdot (\Delta\sigma_{ekvi} \cdot k_s/\Delta f_k)^3 \qquad (4)$$

Sijoittamalla kohdista 5 ja 6 ekvivalenttien jännitysvaihteluiden suuruudet ja määrät, saadaan termin N_- arvoksi *taulukon 4* mukaisesti.

Taulukko L4. Jännitysvaihteluiden määrän N_- laskenta.

Ajon.	N_{0i}	$\Delta\sigma_{ekvi}$	$(\Delta\sigma_{ekvi}k_s/\Delta f_k)^3$	N_{-i}
LA	218444	45,2	0,1202	26257
KAIP	527259	57,0	0,1695	127122
KAPP	146702	81,7	0,7932	104158
KATP	533430	127,8	1,9102	1449649
	[kpl]	[N/mm^2]	[-]	[kpl]

$\Rightarrow N_- = \Sigma N_{-i} = 1,707 \cdot 10^6$

Rakenteen jäljelläoleva käyttöikä saadaan laskettua ominaisväsymisrajaa ja jäljelläolevien jännitysvaihteluiden määrän N_+ perusteella.

$N_+ = N - N_- = 5 \cdot 10^6 - 1,707 \cdot 10^6 = 3,293 \cdot 10^6.$

Lasketaan ensin vuodessa tapahtuvat ominaisväsymisrajaa Δf_k vastaava jännitysvaihtelu N_{+v}.

Sillan liikennemääriksi vuodessa otetaan vuoden 1988 määrät. Niitä vastaavat jännitysvaihtelut saadaan *taulukosta L4*. Laskenta on suoritettu *taulukossa L5* seuraavaa kaavaa käyttäen.

$$N_{+v} = \Sigma N_{+vi} = \Sigma N_{0i} \cdot (\Delta\sigma_{ekvi} \cdot k_s/\Delta f_k)^3 \qquad (5)$$

Taulukko L5. Jännitysvaihteluiden määrän N_{+v} laskenta.

Ajon.	N_{0i}	$\Delta\sigma_{ekvi}$	$(\Delta\sigma_{ekvi}k_s/\Delta f_k)^3$	N_{+vi}
LA	15066	45,2	0,1202	1811
KAIP	31546	57,0	0,2411	7606
KAPP	5983	81,7	0,7932	4248
KATP	47265	127,8	1,9102	128447
	[kpl]	[N/mm2]	[-]	[kpl]

$\Rightarrow N_{+v} = 142112$

Rakenteen kestoikä (osavarmuuskertoimella 1,0) saadaan suoraan suhteella N_+/N_{+V}:

=> $T = 3{,}293 \cdot 10^6/142112 = 23{,}2$ vuotta.

Osavarmuuskertoimella 1,6 saadaan suunnitteluarvoa vastaavaksi iäksi:

=> $T_d = T/1{,}6^3 = 5{,}7$ vuotta.

8 KIRJALLISUUSLUETTELO

/1/ Roos, V. 1990. Siltojen vaihtorasituskertymä. Helsinki: Rakennusinsinöörien liitto. RIL K109-1989.

/2/ Suomen rakentamismääräyskokoelma: B7 Teräsrakenteet. 1988. Helsinki: Ympäristöministeriö.

ISBN 951-47-6859-0
TIEL 2170005