

Siltaeurokoodien koulutus  
Betonirakenteet ja geosuunnittelu

Rautatiesiltojen kuormat

Ilkka Sinisalo, Oy VR-Rata Ab

## Raideliikennekuormat

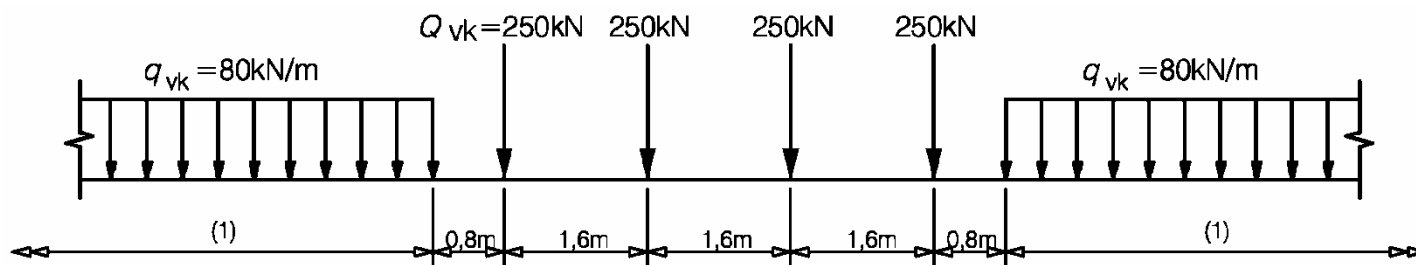
- Pystysuorat raideliikennekuormat
- Dynaamiset vaikutukset
- Keskipakokuormat
- Sivusysäyskuorma
- Veto- ja jarrukuormat
- Väsyttävät liikennekuormat
- Suistumiskuormat
  
- Aerodynaamiset kuormat

## Rautateiden kuormakaaviot

- Kuormakaavio LM71
- Kuormakaavio SW/0
- Kuormakaavio SW/2
- Kuormakaavio "kuormittamaton juna"
- Kuormakaavio HSLM
  
- kuormakaavio "todellinen juna"
- kuormakaavio "väsyttävä juna"

## Kuormakaavio LM71

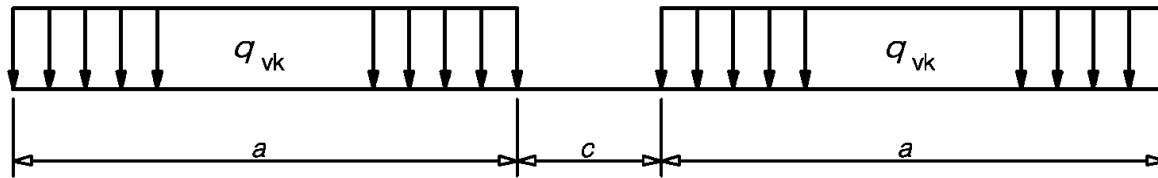
### Kuormakaavion ominaisarvot



### Luokitetut pystykuormat

Kaluston sallittu akselipaino [kN]	Mitoituskuormakaavion tunnus	$\alpha$	Luokitettu akselikuorma $\alpha \times Q_{vk}$ [kN]	Luokitettu nauhakuorma $\alpha \times q_{vk}$ [kN/m]
225	LM71-22,5	1,00	250	80
250	LM71-25	1,10	275	88
275	LM71-27,5	1,21	300	97
300	LM71-30	1,33	333	106
350	LM71-35	1,46	370	120

## Kuormakaaviot SW/0 ja SW/2



Kuormakaavio	Ominaisarvo $q_{vk}$ [kN/m]	$a$ [m]	$c$ [m]
SW/0	133	15,0	5,3
SW/2	150	25,0	7,0

- SW/0 edustaa normaalin raideliikenteen aiheuttaman pystykuormituksen staattista vaikutusta jatkuvilla siltarakenteilla
- SW/0 kerrotaan  $\alpha$ -kertoimella
- Kuormakaavio SW/2 edustaa raskasta raideliikennettä
- SW/2:n tarve ilmoitetaan suunnitteluperusteissa

## Kuormakaaviot "kuormittamaton juna"

- Yksiraiteisten siltojen poikittaisen stabiiliuden tarkistaminen (tuulikuorma)
- Koostuu tasaisesti jakautuneesta pystykuormasta, jonka ominaisarvo on 10,0 kN/m.
- Vaikuttaa kuinka monella raiteen osapituudella tahansa
- Yleensä vain mitoitettaessa rakenteita, joiden varassa on yksi raide.

## Kuormakaaviot HSLM

- Edustaa yli 200 km/h kulkevien matkustajajunien junakuormaa
- tulee tarkastella useita nopeuksia suurimpaan mitoitusnopeuteen asti
- Suurimman mitoitusnopeuden tulee yleensä olla  $1,2 \times$  suurin sillan kohdalla sallittu nopeus
- VäsytySKUORMITUS määritellään erikseen.
- Keskipakokuorman ominaisarvo määritetään käyttämällä kuormakaaviota 71
- Tarve ilmoitetaan suunnitteluperusteissa

## $\alpha$ -kerroin

- Normaalin raideliikenteen akselikuorma on 22,5 t
- $\alpha$ -kerroin ottaa huomioon rataosien normaalia korkeamman tai alhaisemman raideliikennekuorman
- $\alpha$ -kertoimella kerrotaan liikennekuormien ominaisarvot
- $\alpha$ -kertoimella kerrottuja kuormia kutsutaan "luokitetuiksi pystykuormiksi"
- $\alpha$ -kertoimeksi voidaan valita:  
0,75 – 08,3 – 0,91 – 1,00 – 1,10 – 1,21 – 1,33 – 1,46
- Suomessa on valittu  $\alpha = 1,46$
- $\alpha = 1,46$  vastaa 35 tonnin akselikuormaa  
(LM71-35:  $Q_{vk} = 370$  kN,  $q_{vk} = 120$  kN/m; vrt. RATO 3)



## Liikennekuorma kerrotaan $\alpha$ -kertoimella:

- Kuormakaavio 71
- Kuormakaavio SW/0
- Keskipakokuormat
- Sivusysäyskuorma
- Veto- ja jarrukuormat
- Suistumiskuorma
  
- Maanpaine ja maarakenteet
- Sillan ja raiteen yhteistoiminta
- Taipumarajatilatarkastelut
- Matkustajamukavuustarkastelut ( $\alpha = 1$ )

## Dynaaminen suurennuskerroin $\Phi$ ( $\Phi_2, \Phi_3$ )

- $\Phi$  on jännitysten ja värähtelyjen dynaaminen suurennuskerroin
- $\Phi$  ei koske resonanssia
- $\Phi$  ei pienennetä useampiraiteisella sillalla
- Raiteet oletetaan huolellisesti kunnossapidetyiksi

- Huolellisesti kunnossapidetylle raiteelle

- Tavanomaisesti kunnossapidetylle raiteelle

- Kertoimia  $\Phi_2$  ja  $\Phi_3$  voidaan pienentää, kun täytekerroksen paksuus on yli 1,00 m

$$\Phi_2 = \frac{1,44}{\sqrt{L_\Phi} - 0,2} + 0,82 \quad 1,00 \leq \Phi_2 \leq 1,67$$

$$\Phi_3 = \frac{2,16}{\sqrt{L_\Phi} - 0,2} + 0,73 \quad 1,00 \leq \Phi_3 \leq 2,0$$

$$\text{red } \Phi_{2,3} = \Phi_{2,3} - \frac{h - 1,00}{10} \geq 1,0$$

## Dynaamista suurennuskerrointa $\Phi$ ei käytetä

- Veto- ja jarrukuorma
- Keskipakokuorma
- Sivusysäyskuorma
  
- Kuormakaavio HSLM (1991-2 kohta 6.4.6.1.1(2))
- Kuormakaavio "todellinen juna"
- Kuormakaavio "väsyttävä juna" (1991-2 liite D) (asia avoin)
- Kuormakaavio "kuormittamaton juna" (1991-2 kohta 6.3.4)

## Veto- ja jarrutuskuormat

- Vaikuttavat kiskojen yläpinnassa raiteen pituussuuntaan
- Ovat tasaisesti jakautuneita kuormien vaikutuspituudelle, suunnissa huomioidaan liikenteen suunnat
- Veto- ja jarrukuormien ominaisarvot:

Vetokuorma:

$$Q_{lak} = 33 \text{ [kN/m]} \quad L_{a,b} \text{ [m]} \leq 1000 \text{ [kN]} \quad (\text{LM71, SW/0, SW/2 ja HSLM})$$

Jarrukuorma:

$$Q_{lbk} = 20 \text{ [kN/m]} \quad L_{a,b} \text{ [m]} \leq 6000 \text{ [kN]} \quad (\text{LM71, SW/0 ja HSLM})$$

$$Q_{lbk} = 35 \text{ [kN/m]} \quad L_{a,b} \text{ [m]} \quad (\text{SW/2})$$

- LM71 ja SW/0 ominaisarvot kerrotaan  $\alpha$ -kertoimella
- Ominaisarvoja ei kerrota kertoimella  $\Phi$

## Veto- ja jarrutuskuormien vähennykset

- Veto- ja jarrutuskuormien vaikutukset siltarakenteisiin lasketaan ottamalla huomioon sillan ja maan yhteisvaikutus tai tekemällä alla oleva vähennys
- Vähennys jatkuvakiskoraiteella:  
ominaisarvo-50%, enintään 600 kN
- Vähennys, kun sillan toisessa päässä kiskonliikuntalaite:  
ominaisarvo-25%, enintään 300 kN
- Veto- ja jarrukuormia ei huomioida päällysrakenteen laskelmissa, jos silta on vapaasti tuettu, sillalla on tukikerros ja jatkuvakiskoraide ja  $L < 10,0$  m
- Silloilla, joilla on vähintään kaksi raidetta, joilla on sama sallittu kulkusuunta, voidaan toisen raiteen ominaisjarrukuorma rajoittaa arvoon 1000 kN.

## Keskipakokuorma

- Keskipakokuorma ja raiteen kallistus tulee ottaa huomioon.
- Keskipakokuormien oletetaan vaikuttavan ulospäin vaakasuuntaan 2,0 m korkeudella kulkupinnan yläpuolella
- Keskipakokuorma yhdistetään pystysuuntaisen liikennekuorman kanssa
- Keskipakokuormaa kerrotaan  $\alpha$ -kertoimella
- Keskipakokuormaa ei kerrota kertoimella  $\Phi$

$$Q_{tk} = \frac{v^2}{g \times r} (f \times Q_{vk}) = \frac{V^2}{127r} (f \times Q_{vk})$$

[v] = m/s

[V] = km/h

## Sivusysäyskuorma

- Sivusysäyskuorma vaikuttaa vaakasuuntaan raiteen yläpinnassa ja kohtisuoraan raidetta vastaan
- Sivusysäyskuorman ominaisarvo  $Q_{sk} = 100 \text{ kN}$  ja se kerrotaan kertoimella  $\alpha \geq 1,46$
- Sivusysäyskuorma on siten  $146 \text{ kN}$
- Sivusysäyskuormaa ei kerrota kertoimella  $\Phi$
- Sivusysäyskuorma yhdistetään pystysuoran liikennekuorman kanssa

## Raideliikenteen kuormaryhmät

Raiteiden lukumäärä			Kuormaryhmät			Pystykuormat			Vaakakuormat			
			Viittaus tässä osassa EN 1991-2			6.3.2/6.3.3	6.3.3	6.3.4	6.5.3	6.5.1	6.5.2	Huomautus
1	2	>	Kuormitettujen raiteiden määrä	Kuormaryhmä <sup>(8)</sup>	Kuormitettu raide	LM 71 <sup>(1)</sup> SW/0 <sup>(1), (2)</sup> HSLM <sup>(6), (7)</sup>	SW/2 <sup>(1), (3)</sup>	Kuormittamaton juna	Veto, jarrutus <sup>(1)</sup>	Keskipäko-kuorma <sup>(1)</sup>	Sivusysäys-kuorma <sup>(1)</sup>	
			1	gr 11	T <sub>1</sub>	1			1 <sup>(5)</sup>	0,5 <sup>(5)</sup>	0,5 <sup>(5)</sup>	Suurin T <sub>1</sub> :n pysty- ja suurin pitkittäinen kuorma
			1	gr 12	T <sub>1</sub>	1			0,5 <sup>(5)</sup>	1 <sup>(5)</sup>	1 <sup>(5)</sup>	Suurin T <sub>1</sub> :n pysty- ja suurin pitkittäinen kuorma
			1	gr 13	T <sub>1</sub>	1 <sup>(4)</sup>			1	0,5 <sup>(5)</sup>	0,5 <sup>(5)</sup>	Suurin pitkittäinen kuorma
			1	gr 14	T <sub>1</sub>	1 <sup>(4)</sup>			0,5 <sup>(5)</sup>	1	1	Suurin poikittainen kuorma
			1	gr 15	T <sub>1</sub>			1		1 <sup>(5)</sup>	1 <sup>(5)</sup>	Poikittaisvakavuus ja "kuormittamaton juna"
			1	gr 16	T <sub>1</sub>		1		1 <sup>(5)</sup>	0,5 <sup>(5)</sup>	0,5 <sup>(5)</sup>	SW/2 ja suurin pitkittäinen kuorma
			1	gr 17	T <sub>1</sub>		1		0,5 <sup>(5)</sup>	1 <sup>(5)</sup>	1 <sup>(5)</sup>	SW/2 ja suurin poikittainen kuorma
			2	gr 21	T <sub>1</sub>	1			1 <sup>(5)</sup>	0,5 <sup>(5)</sup>	0,5 <sup>(5)</sup>	Suurin T <sub>1</sub> :n pysty- ja suurin pitkittäinen kuorma
					T <sub>2</sub>	1			1 <sup>(5)</sup>	0,5 <sup>(5)</sup>	0,5 <sup>(5)</sup>	
			2	gr 22	T <sub>1</sub>	1			0,5 <sup>(5)</sup>	1 <sup>(5)</sup>	1 <sup>(5)</sup>	Suurin T <sub>2</sub> :n pysty- ja suurin poikittainen kuorma
					T <sub>2</sub>	1			0,5 <sup>(5)</sup>	1 <sup>(5)</sup>	1 <sup>(5)</sup>	
			2	gr 23	T <sub>1</sub>	1 <sup>(4)</sup>			1	0,5 <sup>(5)</sup>	0,5 <sup>(5)</sup>	Suurin pitkittäinen kuorma
					T <sub>2</sub>	1 <sup>(4)</sup>			1	0,5 <sup>(5)</sup>	0,5 <sup>(5)</sup>	
			2	gr 24	T <sub>1</sub>	1 <sup>(4)</sup>			0,5 <sup>(5)</sup>	1	1	Suurin poikittainen kuorma
					T <sub>2</sub>	1 <sup>(4)</sup>			0,5 <sup>(5)</sup>	1	1	
			2	gr 26	T <sub>1</sub>		1		1 <sup>(5)</sup>	0,5 <sup>(5)</sup>	0,5 <sup>(5)</sup>	SW/2 ja suurin pitkittäinen kuorma
					T <sub>2</sub>	1			1 <sup>(5)</sup>	0,5 <sup>(5)</sup>	0,5 <sup>(5)</sup>	
			2	gr 27	T <sub>1</sub>		1		0,5 <sup>(5)</sup>	1 <sup>(5)</sup>	1 <sup>(5)</sup>	SW/2 ja suurin poikittainen kuorma
					T <sub>2</sub>	1			0,5 <sup>(5)</sup>	1 <sup>(5)</sup>	1 <sup>(5)</sup>	
			≥3	gr 31	T <sub>i</sub>	0,75			0,75 <sup>(5)</sup>	0,75 <sup>(5)</sup>	0,75 <sup>(5)</sup>	Lisäkuormitustapaus

( ) Tarkennus ks. EN1991-2 taulukko 6.11



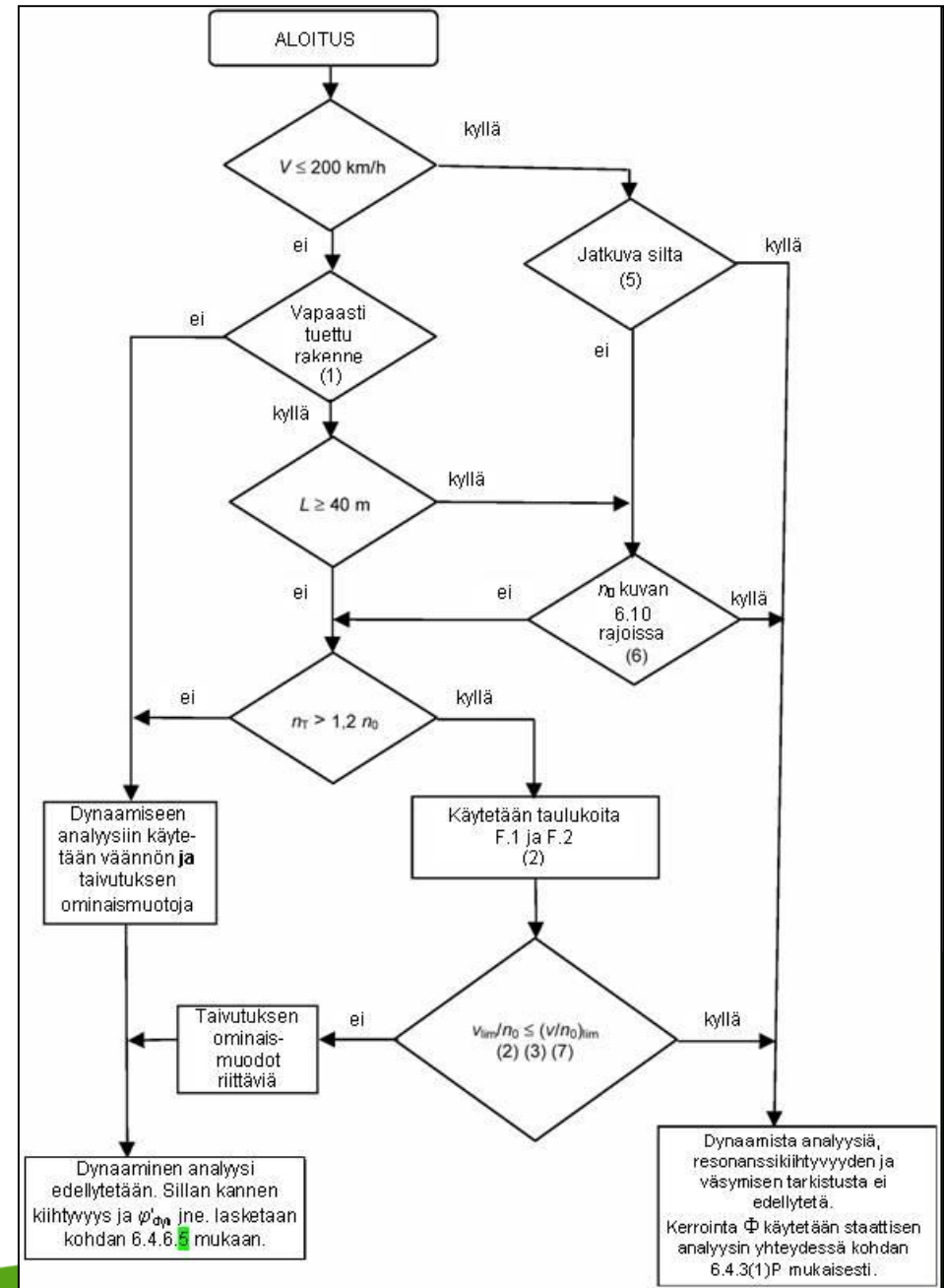
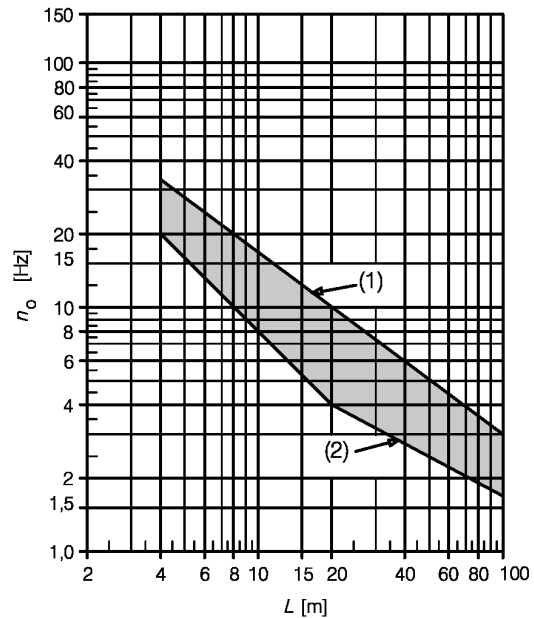
## Dynaaminen mitoitus

- Ominaistaajuuden  $n_0$  yläraja  

$$n_0 = 94,76L^{-0,748}$$
- Ominaistaajuuden  $n_0$  alaraja  

$$n_0 = 80/L \quad 4 \text{ m} \leq L \leq 20 \text{ m}$$

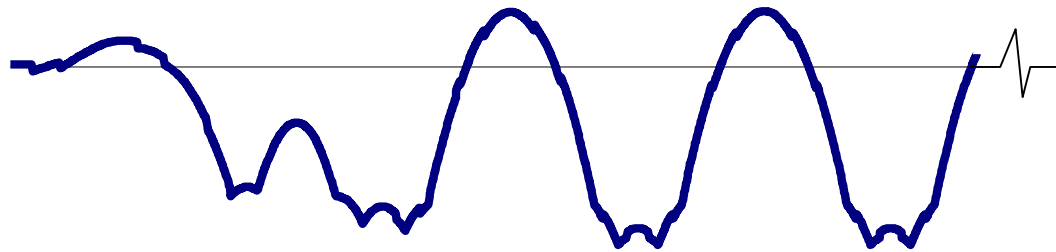
$$n_0 = 23,58L^{-0,592} \quad 20 \text{ m} < L \leq 100 \text{ m}$$



**Yhteisellä matkalla**

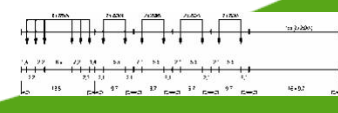
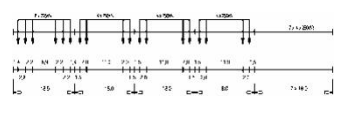
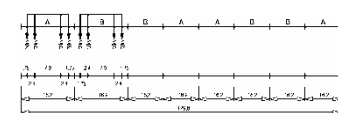
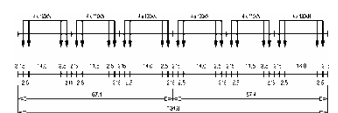
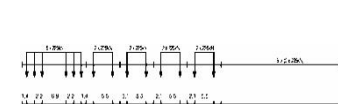
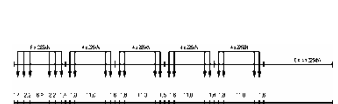
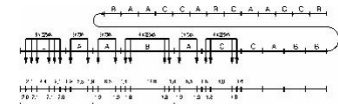
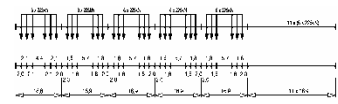
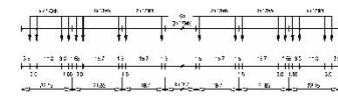
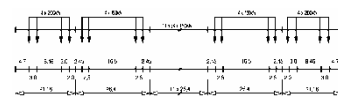
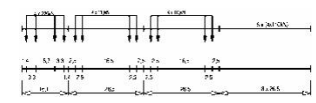
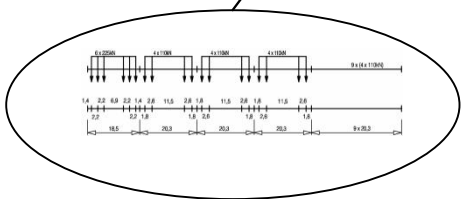
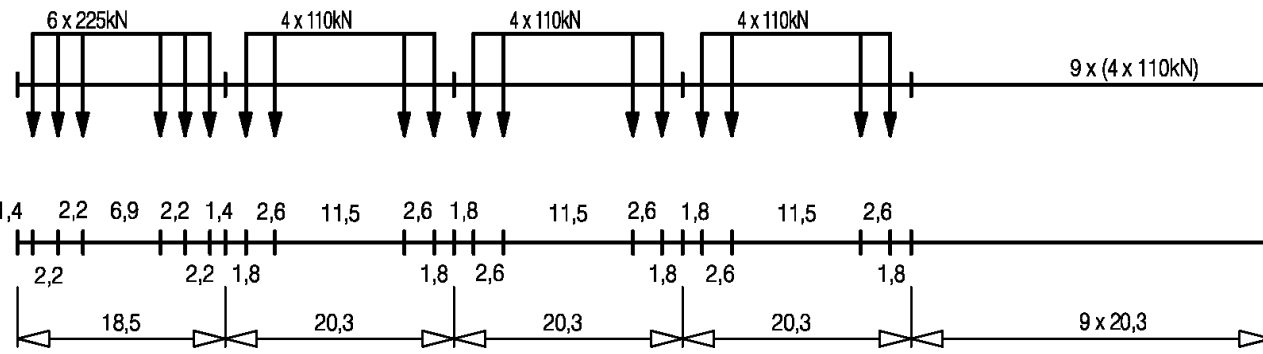
## Väsyttävät liikennekuormat

- Enintään kahdelle raiteelle epäedullisimpiin paikkoihin
- Tarkastelussa otetaan huomioon suunniteltu käyttöikä
- Tarkastelu perustuu sekaliikennetyyppeihin:
  - "vakioliikenne",
  - "liikenne 250 kN akselein" ja
  - "kevyt sekaliikenne"
- Kunkin raiteen liikennemäärä on  $25 \times 10^6$  tonnia/vuosi
- Eurokoodin sekaliikennetyypit eivät ehkä sovellu Suomeen -selvitystyö käynnissä



Yöpikajunan kuormitusta 3-aukkoisen sillan keskellä

# Väsymistarkasteluissa käytettävät junatyytit (EN1991-2 Liite D)



## Väsyttävän liikenteen koostumus (EN1991-2 Liite D)

### Vakiojunaliikenteen koostumus

tyyppi	määrä /vrk	massa [t]	suorite [10 <sup>6</sup> t/a]
1	12	663	2,90
2	12	530	2,32
3	5	940	1,72
4	5	510	0,93
5	7	2160	5,52
6	12	1431	6,27
7	8	1035	3,02
8	6	1035	2,27
	<b>67</b>		<b>24,95</b>

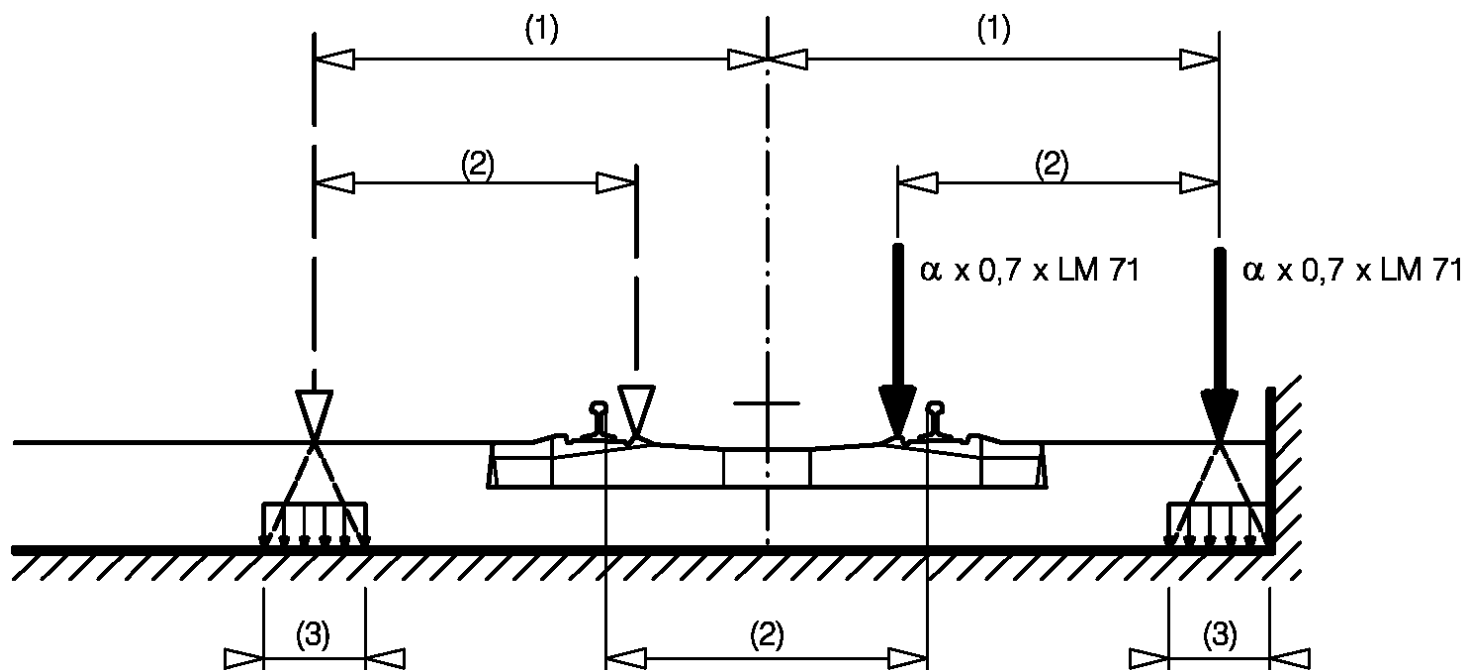
### Raskaan junaliikenteen koostumus

tyyppi	määrä /vrk	massa [t]	suorite [10 <sup>6</sup> t/a]
5	6	2160	4,73
6	13	1431	6,79
11	16	1135	6,63
12	16	1135	6,63
	<b>51</b>		<b>24,78</b>

### Kevyen junaliikenteen koostumus

tyyppi	määrä /vrk	massa [t]	suorite [10 <sup>6</sup> t/a]
1	10	663	2,4
2	5	530	1,0
5	2	2160	1,4
9	190	296	20,5
	<b>207</b>		<b>25,3</b>

## Suistumiskuormat, mitoitus tilanne I



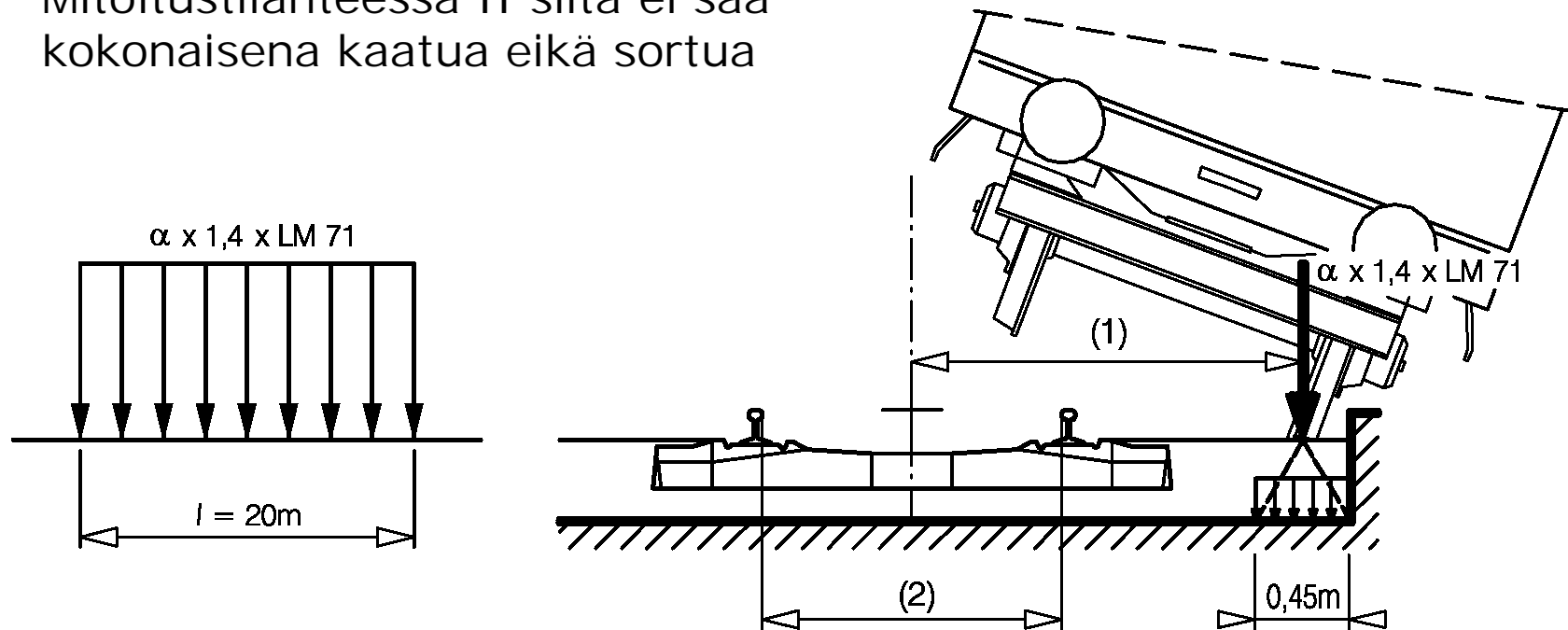
(1) Max 1,5 x 1524 mm

(2) 1524 mm

(3) 450 x 450 mm<sup>2</sup>

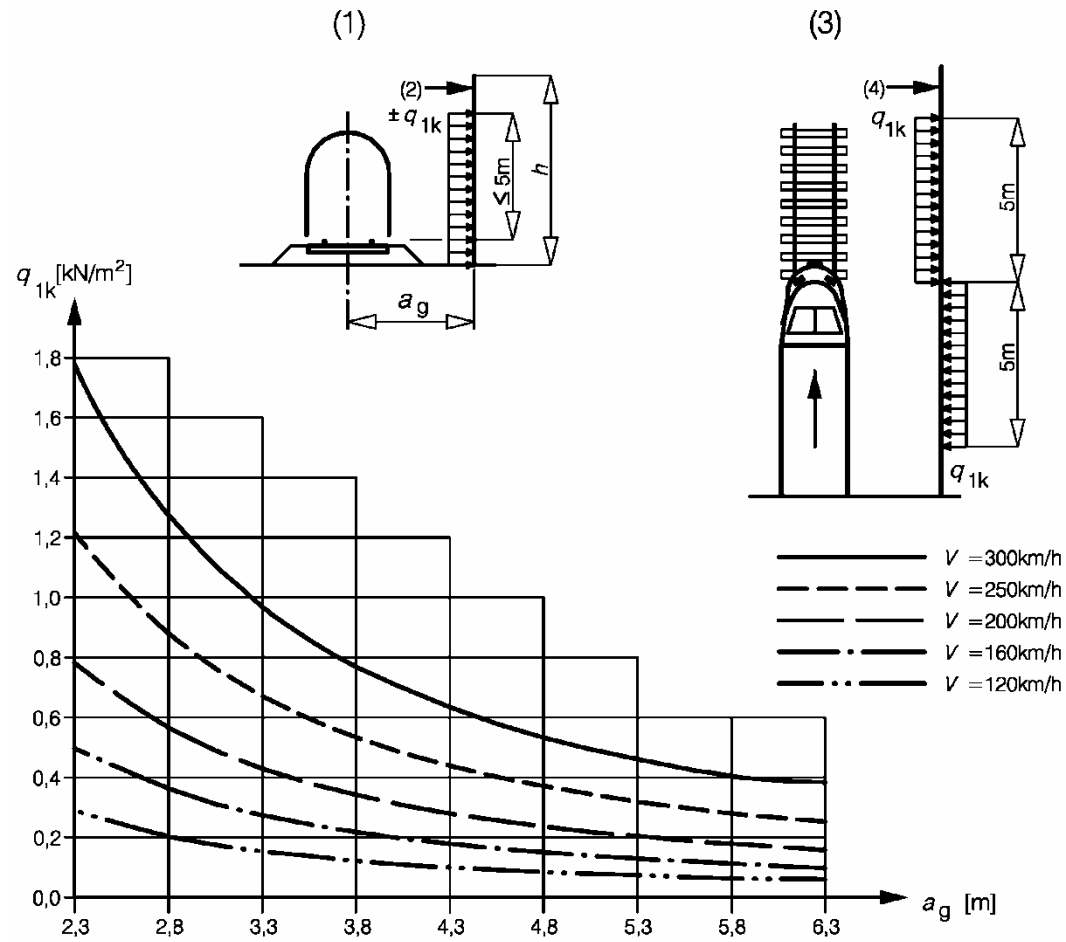
## Suistumiskuormat, mitoitusilanne II

- Mitoitusilanteessa II silta ei saa kokonaisena kaatua eikä sortua

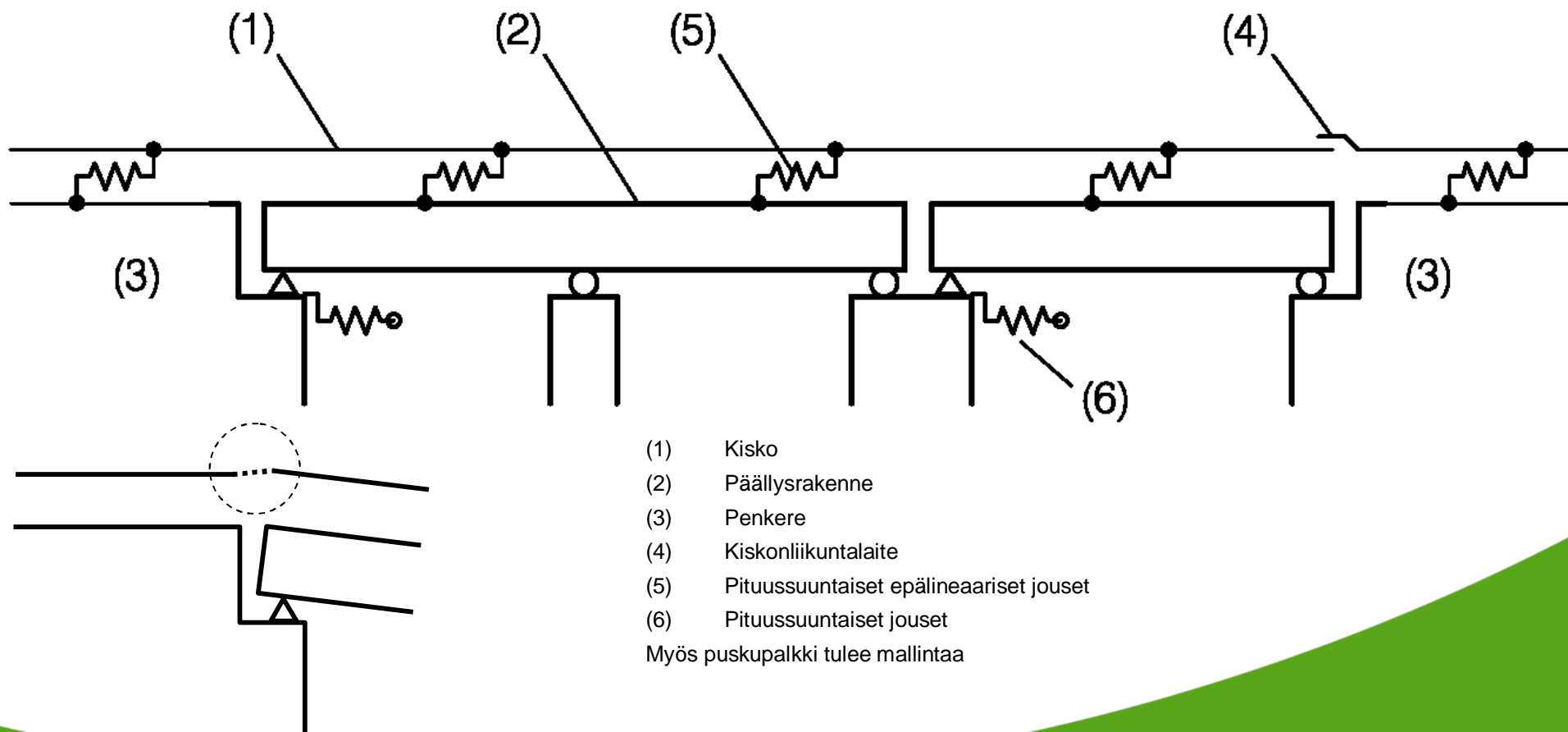


- (1) Rakenteen reunaan vaikuttava kuorma
- (2) 1524 mm

## Aerodynaamiset kuormat

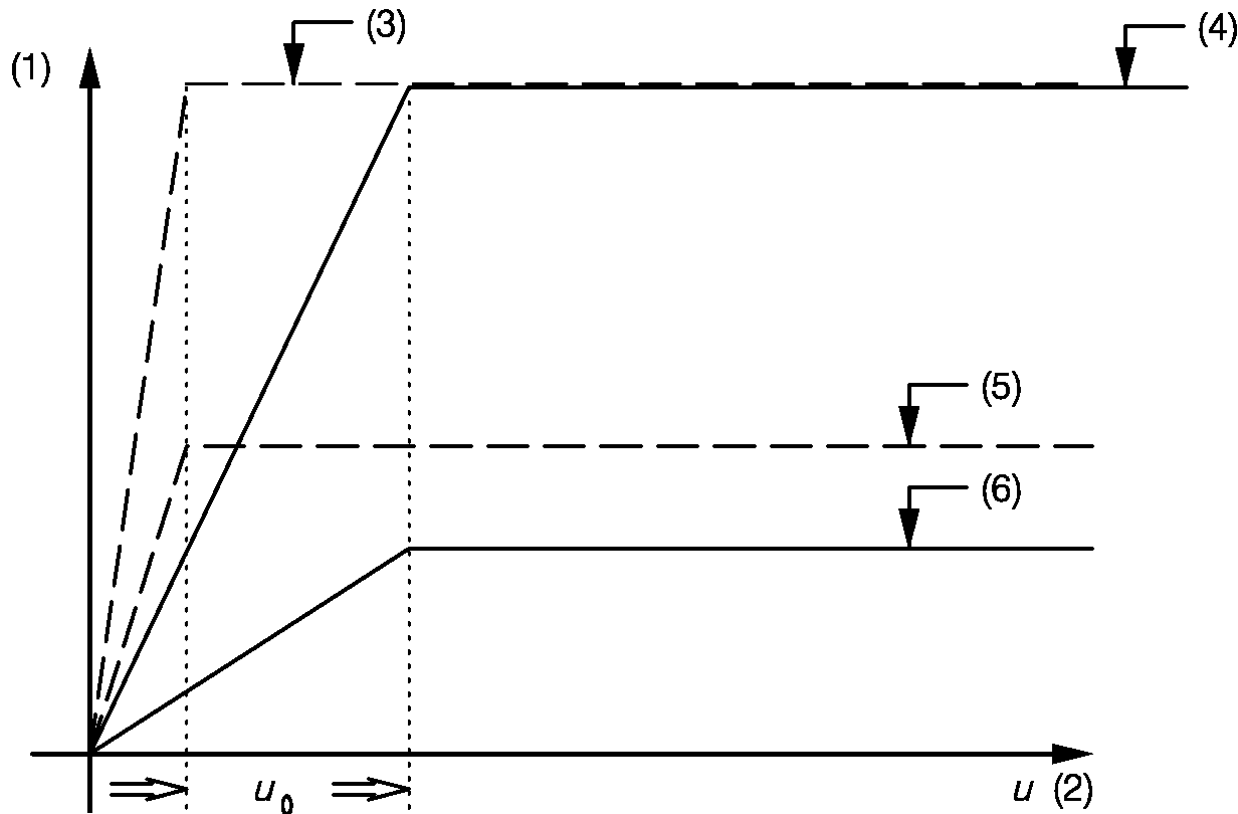


## Silta-raide-rakenne





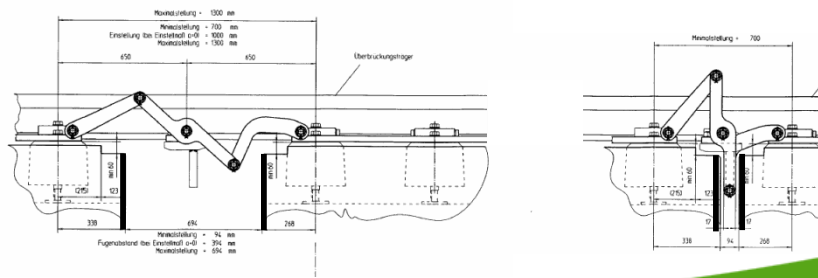
## Leikkausvoiman riippuvuus kiskon ja kannen välisestä siirtymäerosta



- (1) Raiteeseen vaikuttava pituussuuntainen leikkausvoima pituusyksikköä kohti
- (2) Kiskon ja sitä tukevan sillan kannen yläpinnan välinen siirtymäero
- (3) Pölkyissä kiinni olevien kiskojen leikkausvastus (kuormitettu raide) (jäätynyt tukikerros tai tukikerrokseton raide tavanomaisin kiinnikkein)
- (4) Tukikerroksessa olevien pölkkyjen leikkausvastus (kuormitettu raide)
- (5) Ratapölkkyissä kiinni olevien kiskojen leikkausvastus (kuormittamaton raide) (jäätynyt tukikerros tai tukikerrokseton raide tavanomaisin kiinnikkein)
- (6) Tukikerroksessa olevien pölkkyjen leikkausvastus (kuormittamaton raide)

## Silta-raide-rakenteen mitoituskriteerit

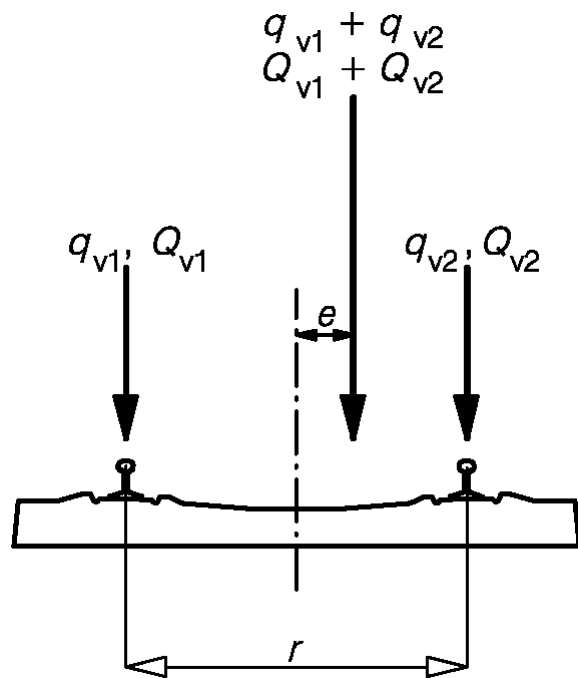
- UIC 60 -kiskojen lisäjännitykset muuttuvista kuormista
  - puristus:  $\leq 72 \text{ N/mm}^2$
  - veto:  $\leq 92 \text{ N/mm}^2$ .
- Veto- ja jarrukuormien aiheuttama raiteen suuntainen siirtymä saa olla enintään:
  - 5 mm jatkuvakiskoraiteella, jossa ei ole kiskonliikuntalaitteita, tai kiskonliikuntalaitteen ollessa vain kansirakenteen toisessa päässä
  - 30 mm, kun kansirakenteen molemmissa päissä on kiskonliikuntalaite ja tukikerros on jatkuva kannen päissä.
  - 30 mm ylittävät siirtymät tulee sallia vain, kun käytetään tukikerroksen katkaisulaitetta ja kiskonliikuntalaitetta.



## Silta-raide-rakenteen mitoituskriteerit

- Pystysiirtymä pystysuuntaisista liikennekuormista kannen päässä saa olla enintään:
  - 8 mm, kun yhteistoiminta otetaan huomioon
  - 10 mm, kun yhteistoiminta jätetään huomiotta
- Pystysuuntainen siirtymäero muuttuvista kuormista peräkkäisten rakenneosien välillä saa olla enintään :
  - 3 mm, kun suurin sallittu nopeus on enintään 160 km/h
  - 2 mm, kun suurin sallittu nopeus on yli 160 km/h.

## Kuorman poikittainen jakautuminen



$$q_{v1}, q_{v2}, Q_{v1}, Q_{v2} = (1)$$

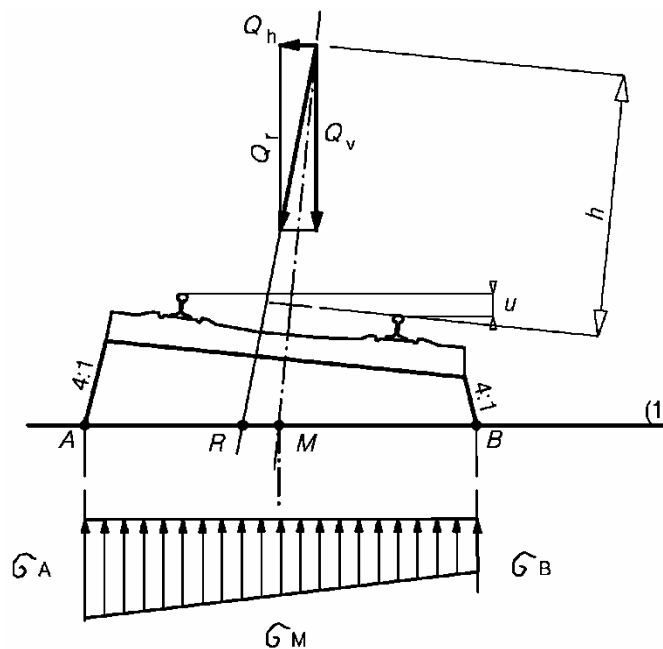
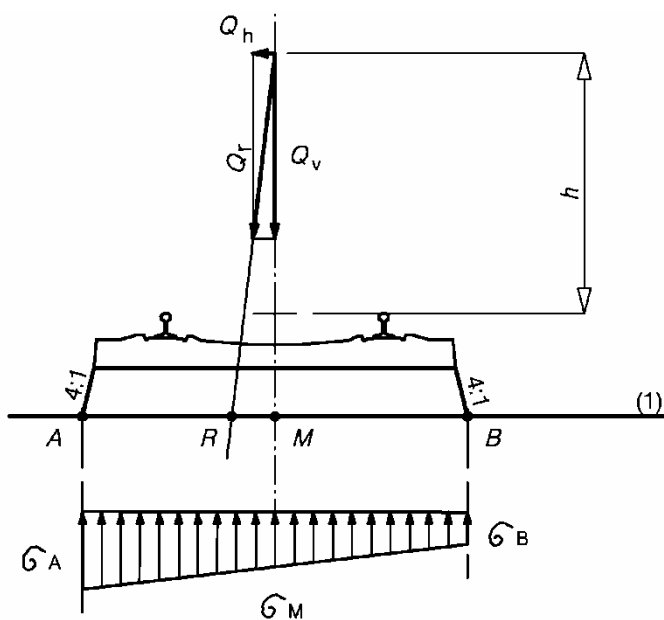
$$q_{v1} + q_{v2}, Q_{v1} + Q_{v2} = (2)$$

$$\frac{q_{v2}}{q_{v1}}, \frac{Q_{v2}}{Q_{v1}} \leq 1,25$$

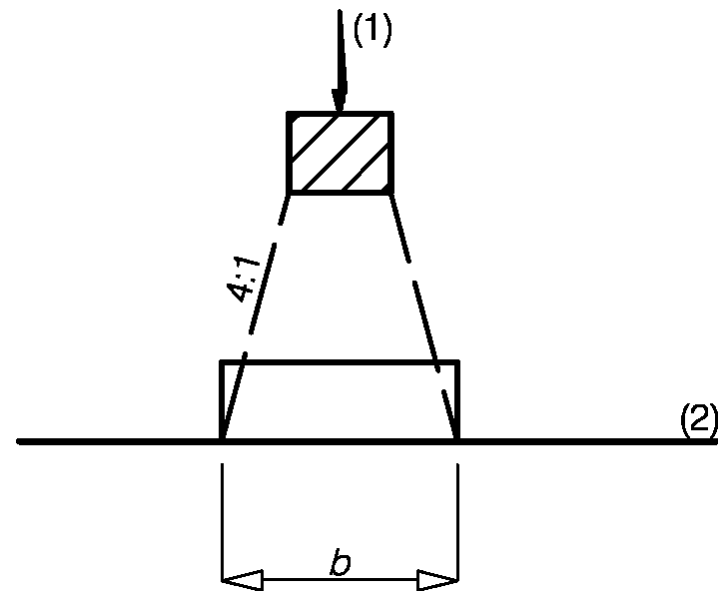
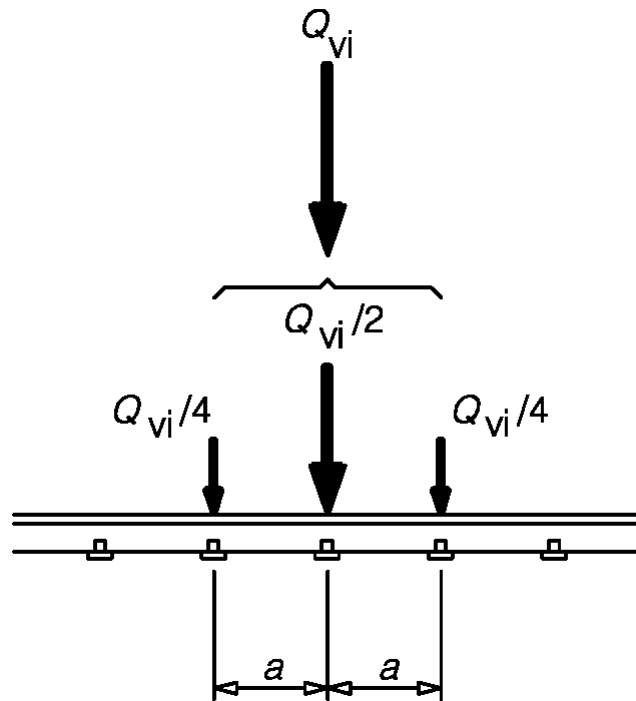
$$e \leq \frac{r}{18}$$

$$r = 1585 \text{ mm}$$

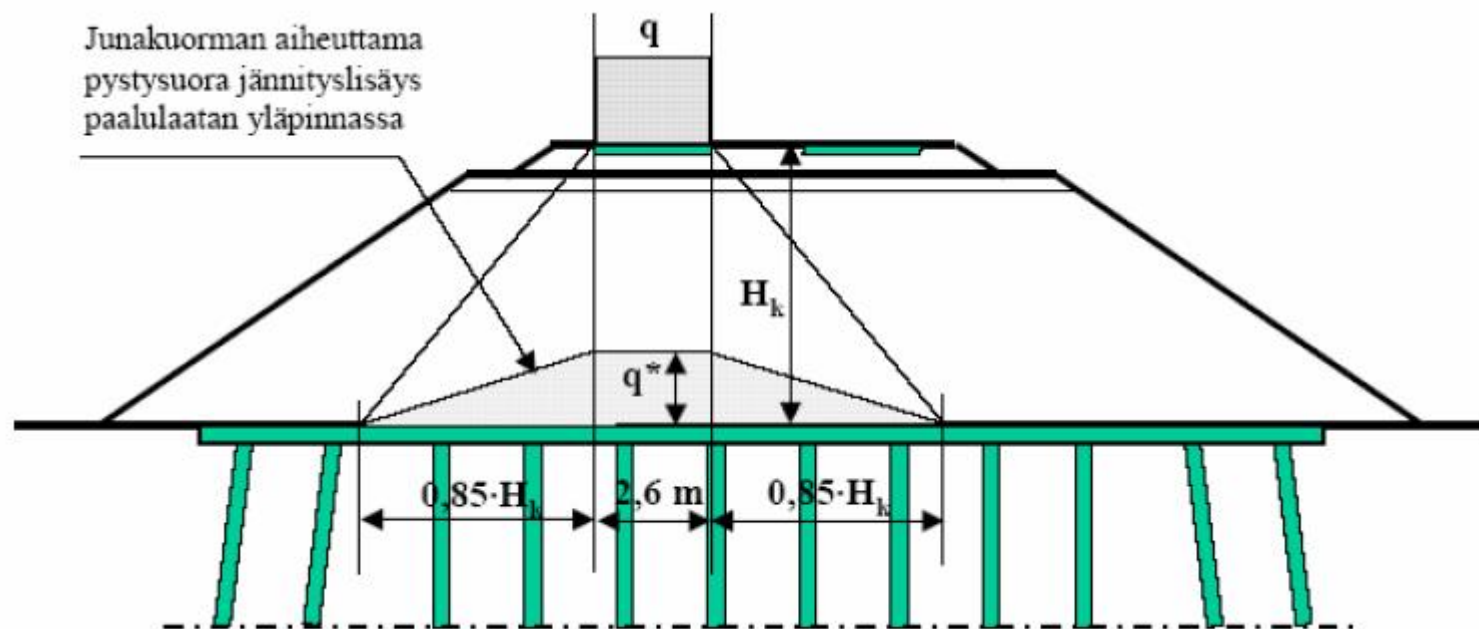
# Kuorman poikittainen jakautuminen



# Kuorman pitkittäinen jakautuminen



## Kuorman jakautuminen penkereessä (RATO 3)



$q$  on kuormitustapausta vastaava nauhakuorma (kN/m)

$H_k$  on rakennekerrosten kokonaispaksuus (m)

$q^*$  on pengerkuorman aiheuttama pystysuora jännityslisäys raiteen alapuolella (kPa)

$$q^* = \frac{q}{2,6 + 0,85 \cdot H_k}$$

## Yleisöltä suljettujen kulkukäytävien kuormat

- Kulkukäytävät, jotka on tarkoitettu vain luvan saaneiden henkilöiden käytettäväksi.
- Tasaisesti jakautunut kuorma, jonka ominaisarvo on  $q_{fk} = 5 \text{ kN/m}^2$ .
- Yksinään vaikuttava pistekuorma  $Q_k = 2,0 \text{ kN}$ , jonka vaikutusala on  $200 \times 200 \text{ mm}^2$ .
- Henkilöiden aiheuttamat, kaiteisiin tai erottaviin seiniin vaikuttavat vaakasuuntaiset kuormat valitaan osan EN 1991-1-1 luokkien B ja C1 mukaisesti.





Kiitos mielenkiinnosta!