

TIESILTOJEN VÄSYMISMITOITUS

Siltaeurokoodikoulutus- Teräs-, liitto- ja puusillat
29.-30.3.2010 Pasila

Antti Silvennoinen, WSP Finland

UNITED
BY OUR
DIFFERENCE

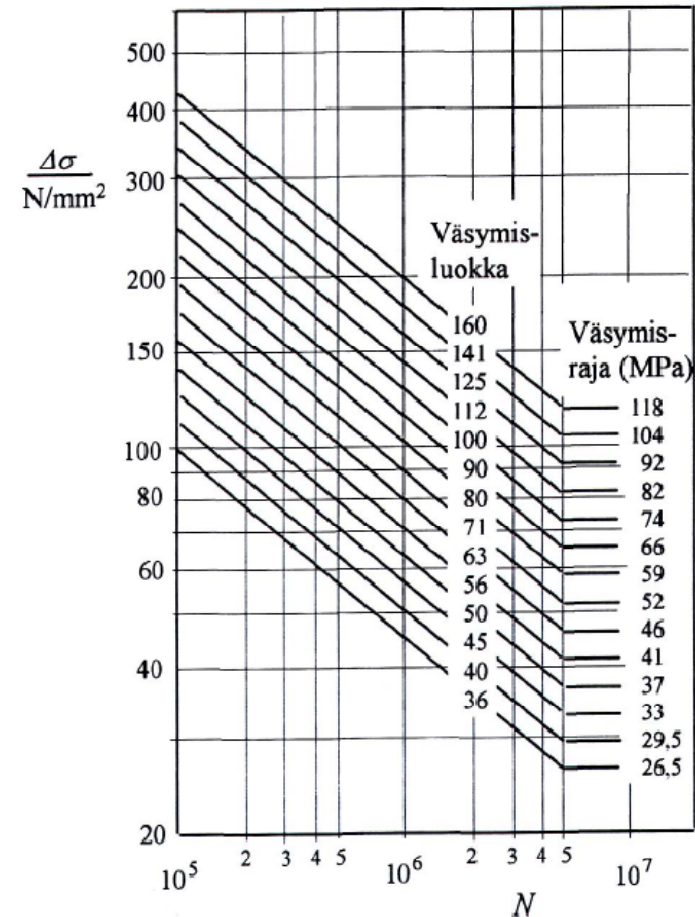


TIESILTOJEN VÄSYMISMITOITUS

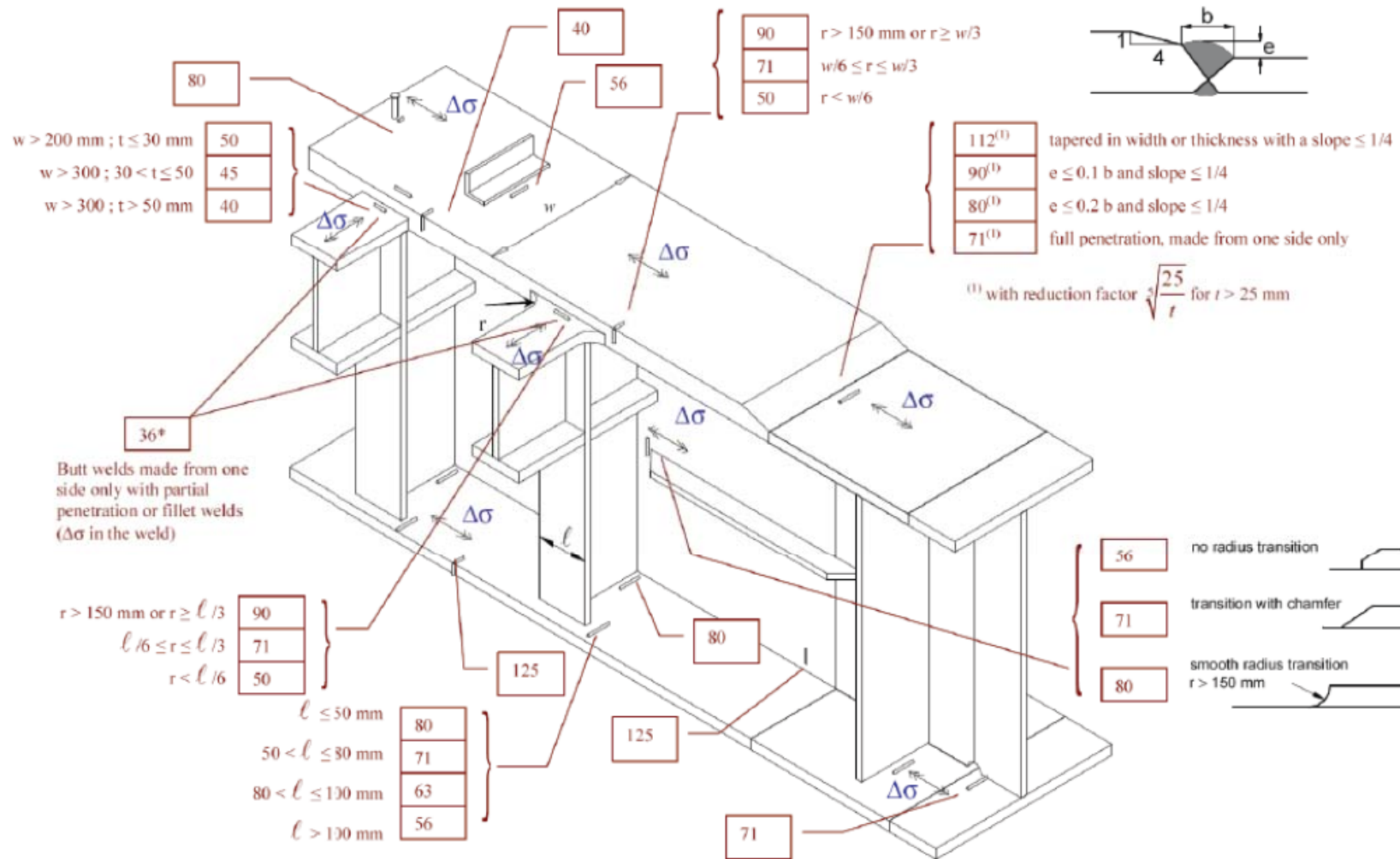
- Väsymisilmiö
- Materiaaliosavarmuuskertoimet
- Väsymisluokat
- FLM3
 - λ -kertoimen määrittely
- FLM4
 - Minerin summa

Väsymisilmiö

- Väsymisilmiöön vaikuttavat:
 - Jännityksen vaihteluväli
 - Jännitysjaksojen lukumäärä
 - Rakenneosan väsymislujuus
- S-N-käyrät
- Rakenteet luokitellaan väsymiskestävyyden perusteella väsymisluokkiin. Eurokoodissa väsymisluokka määritetään 2×10^6 jännitysjakson kohdalla.
- Väsymismitoitus perustuu jännitysvaihteluväleihin ja jännitysjaksojen lukumääriin



Väsymisluokat



Väsymismitoitus

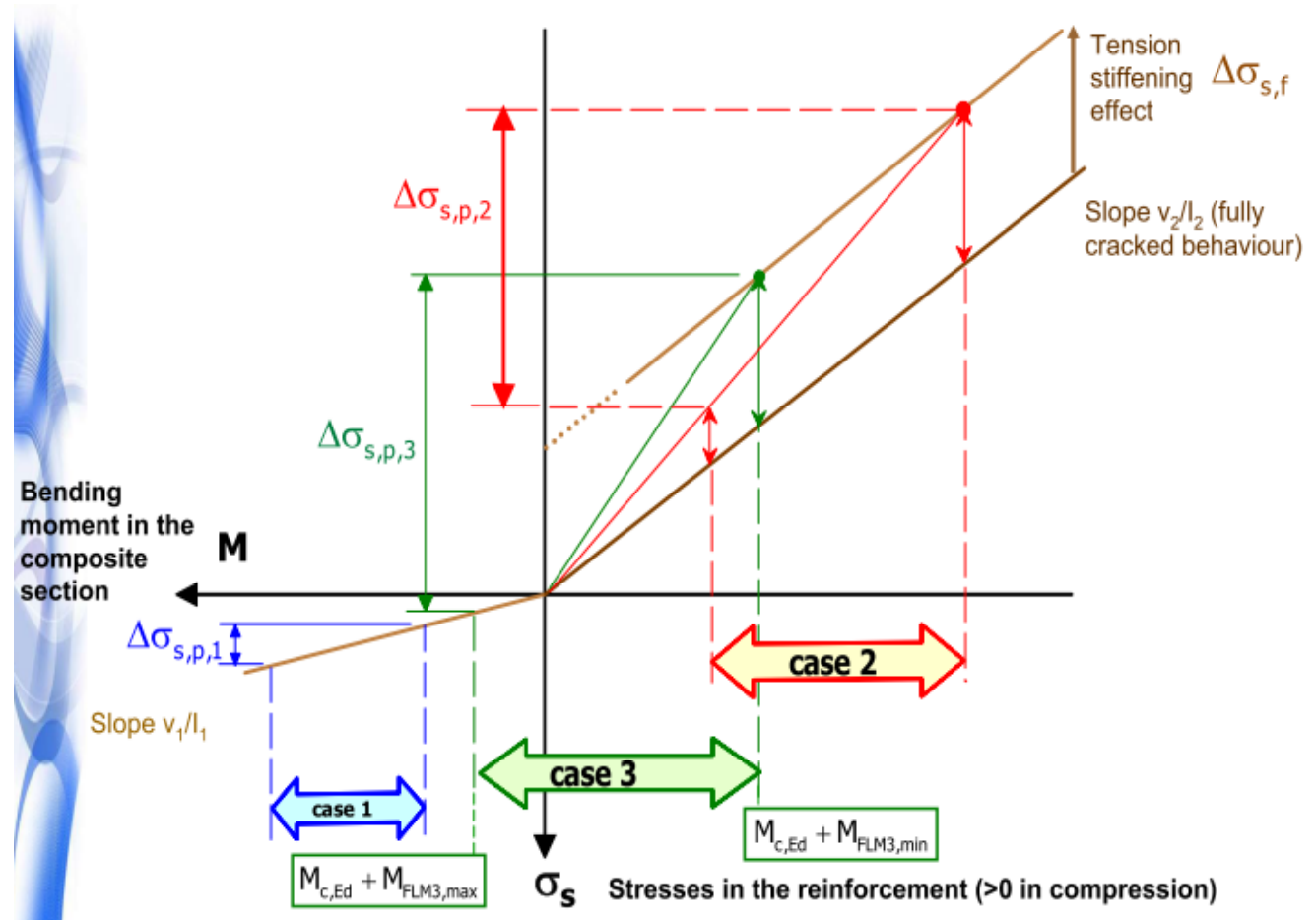
Liittosillassa väsymismitoitus tulee suorittaa:

- Rakenneteräkselle
- Betonille
- Betoniteräksille
- Liitoksille (vaarnat)

Mikä on lähtötilanne (sillan jännitystila) josta lähdetään laskemaan väsyttävän kuorman aiheuttamaa jännitysvaihteluväliä

Case 1	$\sigma_{c,Ed,max,f} > 0$ $\sigma_{c,Ed,min,f} > 0$
Case 2	$\sigma_{c,Ed,max,f} < 0$ $\sigma_{c,Ed,min,f} < 0$
Case 3	$\sigma_{c,Ed,max,f} > 0$ $\sigma_{c,Ed,min,f} < 0$

Betoniteräksen
jännitysvaihtelut
(esimerkki)



Vetojäykistys (Tension stiffening effect)

- Vaikuttaa betoniteräksiin
- Vastaavaa menetelmää ei ole ollut nykyisessä mitoituksessa
- Eurokoodissa ei ole nykyistä "20 prosentin betonisääntöä" rasituksia laskettaessa
 - $\Delta\sigma_{s,f}$ vastaa osittain samaa asiaa
- "20 prosentin säännön" pois jättämisen vaikutuksia tutkitaan, ja mahdollisesti sen käyttö säilytetään sovellusohjeissa.

$$\Delta\sigma_{s,f} = 0.2 \frac{f_{ctm}}{\alpha_{st}\rho_s} \quad \alpha_{st} = \frac{A_l}{A_a I_a} \quad \rho_s = \frac{A_{s,eff}}{A_{c,eff}} \cdot 100$$

Case 1	$\sigma_{c,Ed,max,f} > 0$ $\sigma_{c,Ed,min,f} > 0$	$\Delta\sigma_{s,p} = \Delta M_{FLM3} \frac{v_1}{I_1}$
Case 2	$\sigma_{c,Ed,max,f} < 0$ $\sigma_{c,Ed,min,f} < 0$	$\Delta\sigma_{s,p} = \left[M_{c,Ed} + M_{FLM3,min} \right] \frac{v_2}{I_2} + \Delta\sigma_{s,f} \left(1 - \frac{M_{c,Ed} + M_{FLM3,max}}{M_{c,Ed} + M_{FLM3,min}} \right)$
Case 3	$\sigma_{c,Ed,max,f} > 0$ $\sigma_{c,Ed,min,f} < 0$	$\Delta\sigma_{s,p} = \left(M_{c,Ed} + M_{FLM3,max} \right) \frac{v_1}{I_1} - \left[M_{c,Ed} + M_{FLM3,min} \right] \frac{v_2}{I_2} + \Delta\sigma_{s,f}$

Käytettävät materiaaliosavarmuuskertoimet, rakenneteräs

Taulukko 3.1 Aineosavarmuustarkastelu suositeltavat arvot väsytyksmitoituksessa

Luotettavuustarkastelu	Vaurion seuraukset	
	Pienet	Suuret
Vaurionsietoperiaate	1,00	1,15
Varman kestämisen periaate	1,15	1,35

= 1 [EN1993-2, 9.3 (1)P]

$$\gamma_{FF} \Delta \sigma_E \leq \frac{\Delta \sigma_c}{\gamma_{Mf}}$$

$$\gamma_{FF} \Delta \tau_{E2} \leq \frac{\Delta \tau_c}{\gamma_{Mf}}$$

EN1993-1-9

(2) Vaurionsietoperiaatetta käytettäessä rakenteella tulee olla hyväksyttävä luotettavuus siten, että rakenne käyttäytyy hyväksyttävästi suunnitellun käyttöajan edellyttäen, että etukäteen suunniteltuja tarkastus- ja huolto-ohjeita noudatetaan rakenteen koko suunnittelun käyttöajan väsymisvaurioiden löytämiseksi ja korjaamiseksi.

(3) Varman kestämisen periaate antaa hyväksyttävän luotettavuustason siten, että rakenne käyttäytyy tyydyttävästi suunnitellun käyttöajan ilman säännöllistä väsymisvaurioiden käytön aikaista tarkastusta. Varman kestämisen periaatetta sovelletaan tapauksissa, joissa yhdessä rakenneosassa syntyvät paikalliset säröt voivat nopeasti aiheuttaa rakenneosan tai rakenteen murtumisen.

- Suomessa valitaan käytettäväksi ”Suuret vaurion seuraukset” ja ”Varman kestämisen periaate”
- kyseinen valinta on yleinen Euroopan maissa
- valinta vaikuttaa osaltaan yleiseen rakenteiden varmuustasoon ja on huomioitu muussa varmuusajattelussa (varmuutta väsymistä vastaan voidaan säätää lisää I_2 :n valinnassa)

Käytettävät materiaaliosavarmuuskertoimet, vaarnat

2.4.1.2 Materiaali- ja tuoteominaisuuksien mitoitusarvot

(6)P Silloissa kannallisten tappien väsymistarkastelussa tulee käyttää osavarmuuslukuja γ_{Mf} ja $\gamma_{Mf,s}$

EN1994-2

HUOM. Osavarmuusluvun γ_{Mf} arvo on sama, jota käytetään standardissa EN 1993-2. Osavarmuusluvun $\gamma_{Mf,s}$ arvo voidaan esittää kansallisessa liitteessä. Osavarmuusluvun $\gamma_{Mf,s}$ suositusarvo on 1,0.

γ_{Mf}

--> ks. edellinen sivu

$\gamma_{Mf,s}$

--> Suomen kansallisessa liitteessä on valittu arvo 1,25

- sama valinta kuin mm. ranskalaisilla

- perustuu selvitykseen 2008-2009

- valinta vaikuttaa osaltaan yleiseen rakenteiden varmuustasoon ja on huomioitu muussa varmuusajattelussa (varmuutta väsymistä vastaan voidaan säätää lisää $l_{v,2}$:n valinnassa)

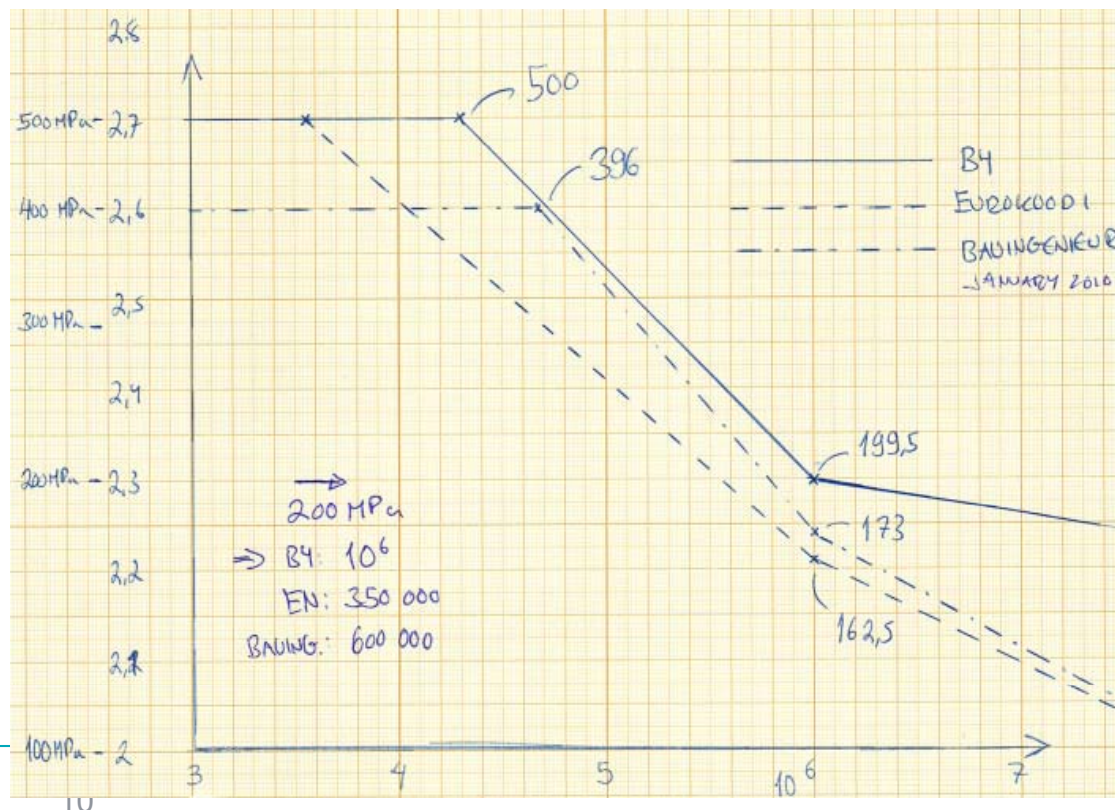
$$\gamma_{Ff} \Delta \sigma_E \leq \frac{\Delta \sigma_c}{\gamma_{Mf}}$$

= 1 [EN1993-2, 9.3 (1)P]

Käytettävät materiaaliosavarmuuskertoimet, betoniteräs

YM:n kansallisessa liitteessä (ENA-EN1992-1-1, kohta 6.8.4) määrätään käyttämään ”teräksen spesifikaation mukaista” S-N -käyrää (=B4:n mukaista käyrää). Alla olevassa kuvassa on esitetty eurokoodin suosituskäyrä, B4:n käyrä sekä eräs saksalainen tutkimustulos.

Materiaaliosavarmuutena käytetään standardin suositusarvoa 1,15



$$\gamma_{F,fat} \Delta\sigma_E \leq \frac{\Delta\sigma_{Rsk}}{\gamma_{S,fat}} \quad \gamma_{S,fat} = 1.15$$

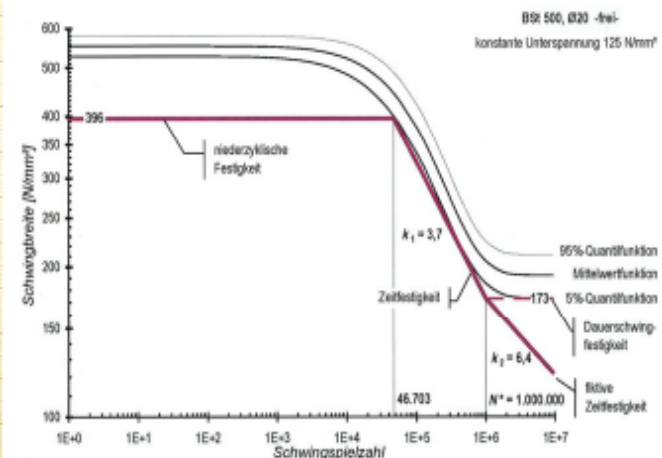


Bild 19: Anpassung der Bemessungsdiagramme nach DIN 1045-1: Variante A
Fig. 19: Adjustment of the design diagram acc. to DIN 1045-1: option A

Väsymismitoitus, rakenne- ja betoniteräkset

- Rakenneteräkset:

$$\gamma_{Ff} \Delta\sigma_E \leq \frac{\Delta\sigma_c}{\gamma_{Mf}} \quad \gamma_{Ff} \Delta\tau_E < \frac{\Delta\tau_c}{\gamma_{Mf}}$$

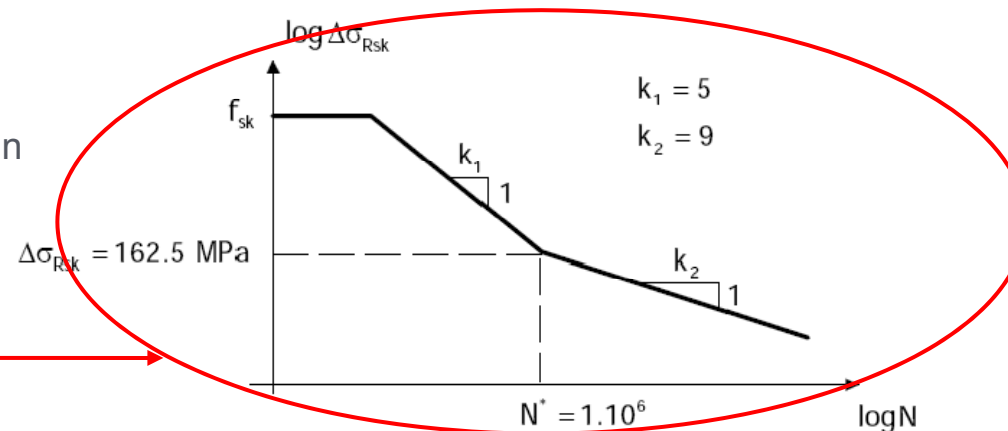
- Yhteisvaikutusehto:

$$\left(\frac{\gamma_{Ff} \Delta\sigma_E}{\Delta\sigma_c / \gamma_{Mf}} \right)^3 + \left(\frac{\gamma_{Ff} \Delta\tau_E}{\Delta\tau_c / \gamma_{Mf}} \right)^5 \leq 1.0$$

- Betoniteräkset:

$$\gamma_{F,fat} \Delta\sigma_E \leq \frac{\Delta\sigma_{Rsk}}{\gamma_{S,fat}} \quad \gamma_{S,fat} = 1.15$$

Suomessa käytetään B4:n mukaista kuvaajaa. Eurokoodin mukainen taulukko erittäin konservatiivinen.



Vaarnojen väsymismitoitus

- Laippa vedolla:

$$\gamma_{Ff} \Delta\tau_E \leq \frac{\Delta\tau_c}{\gamma_{Mf,s}}$$

$$\gamma_{Ff} = 1.0$$

$$\gamma_{Mf,s} = 1.0$$

- Laippa puristuksessa:

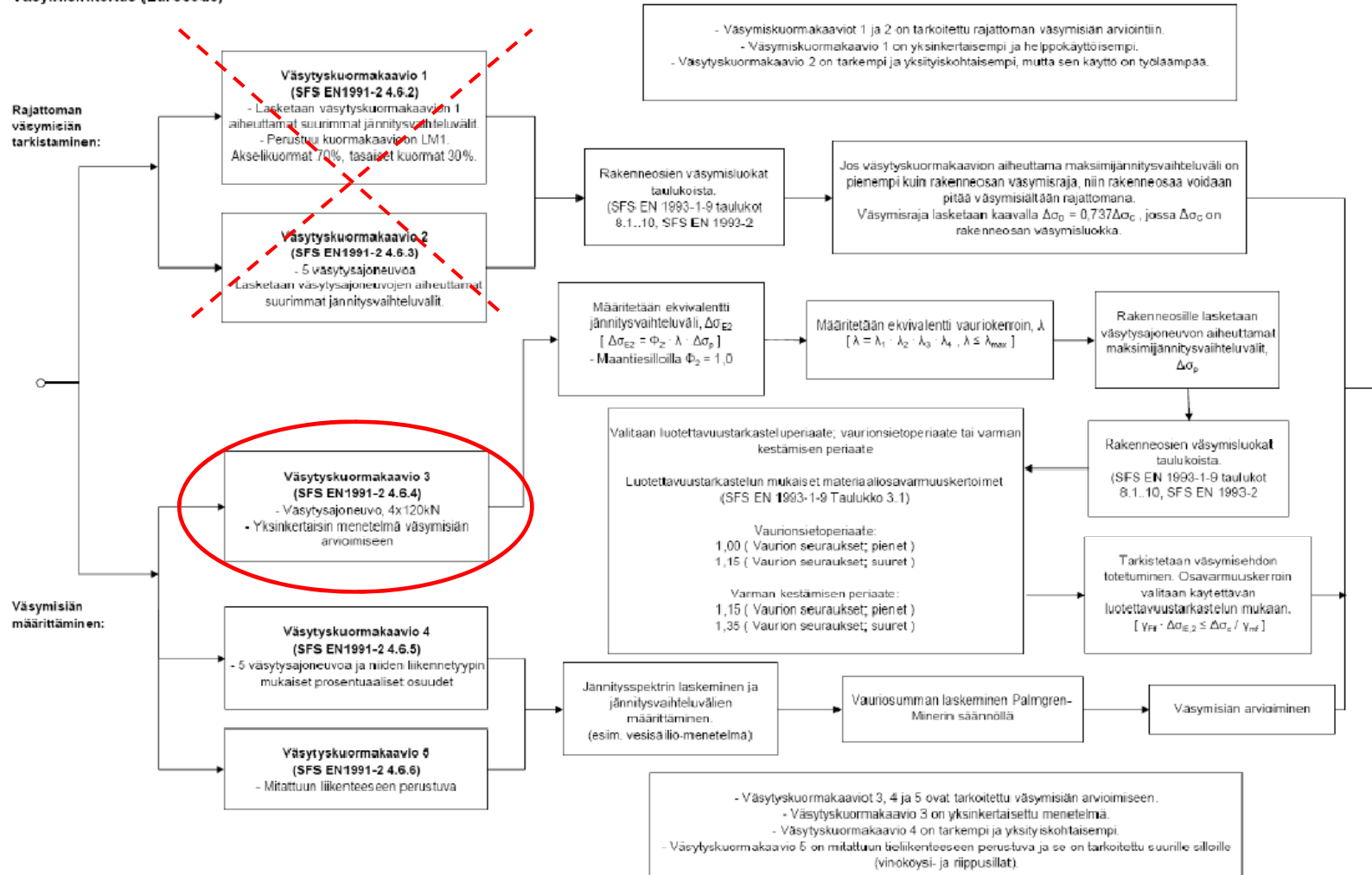
$$\gamma_{Ff} \Delta\sigma_E \leq \frac{\Delta\sigma_c}{\gamma_{Mf}}$$

$$\gamma_{Ff} \Delta\tau_E \leq \frac{\Delta\tau_c}{\gamma_{Mf,s}}$$

$$\frac{\gamma_{Ff} \Delta\sigma_E}{\Delta\sigma_c / \gamma_{Mf}} + \frac{\gamma_{Ff} \Delta\tau_E}{\Delta\tau_c / \gamma_{Mf,s}} \leq 1.3$$

Väsymismitoituksen kulku

Väsymismitoitus (Eurocode)



FLM3

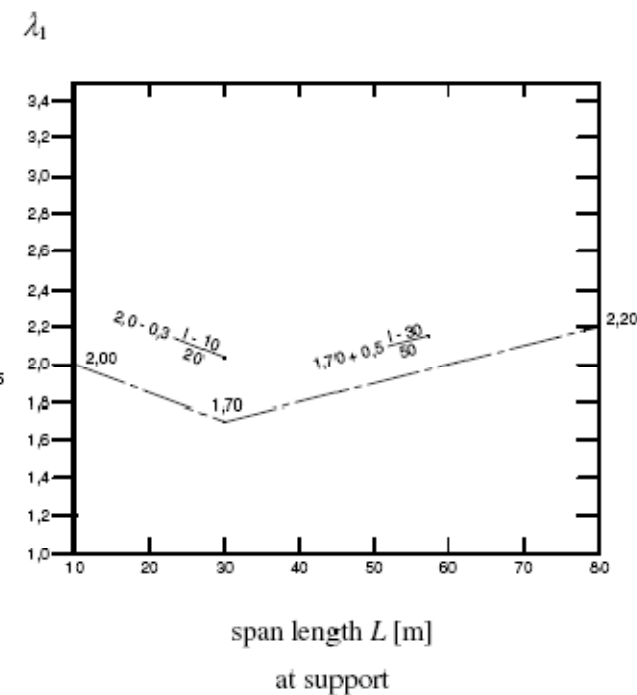
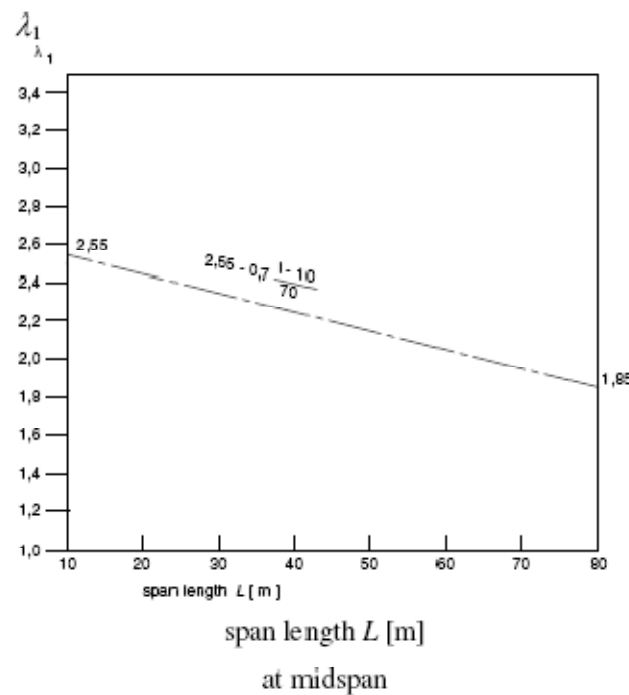
- $\Delta\sigma_{E2}$, ekvivalentti jännitysvaihteluväli, joka vastaa kahta miljoonaa kuormanvaihtoa
- λ -kertoimen määrittely:
 - λ_1 -kerroin ottaa huomioon sillan pituuden
 - λ_2 -kerroin ottaa huomioon liikennemäärän ja –jakauman. (Esitetty tarkemmin edellisessä esitelmässä.)
 - λ_3 -kerroin ottaa huomioon sillan käyttöiän
 - λ_4 -kerroin ottaa huomioon kuormitettujen kaistojen määrän
 - $\lambda_{\max}$ -kerroin määrittää maksimiarvon ja ottaa huomioon väsymisrajan
- Liikuntasaumalaitteiden läheisyydessä käytetään dynaamista suurennoskerrointa $\Delta\phi_{\text{fat}}$

$$\Delta\sigma_{E2} = \lambda\Phi_2\Delta\sigma_p$$

$$\lambda = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \lambda_4 < \lambda_{\max}$$

FLM3, jatkoa

- λ_1 -kerroin määritetään alla olevien kuvaajien perusteella. (SFS EN1993-2, fig. 9.5)
- Kerroin määritetään jännemitan funktiona kentälle ja tuelle erikseen.



FLM3, jatkoa

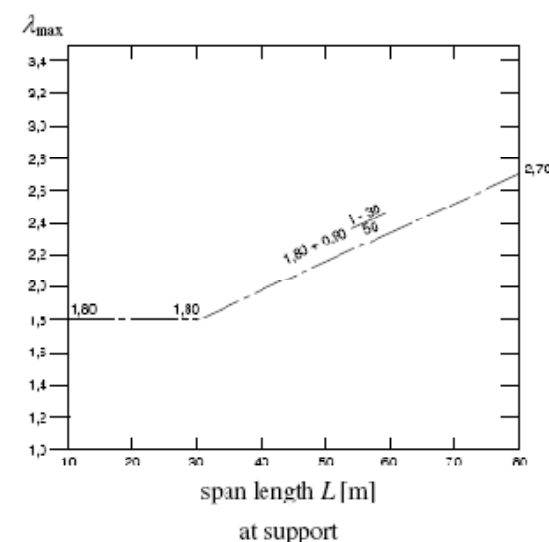
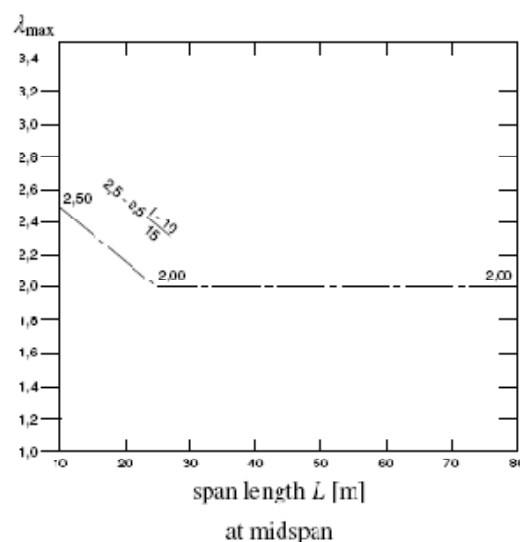
- λ_3 -kertoimen määritetään suunnitellun käyttöiän perusteella
- Kansallisessa liitteessä määritetty, että λ_4 -kertoimelle käytetään Suomessa aina arvoa 1. Merkitys olisi vähäinen, vaikka laskettaisiin tarkasti.
- $\lambda_{\max}$ -kerroin määritetään jännemittojen funktiona kenttään ja tuelle erikseen.

$$\lambda_3 = \left(\frac{t_{Ld}}{100} \right)^{1/5}$$

Table 9.2: λ_3

Design life in years	50	60	70	80	90	100	120
Factor λ_3	0,871	0,903	0,931	0,956	0,979	1,00	1,037

$$\lambda_4 = \left[1 + \frac{N_2}{N_1} \left(\frac{\eta_2 Q_{m2}}{\eta_1 Q_{m1}} \right)^5 + \frac{N_3}{N_1} \left(\frac{\eta_3 Q_{m3}}{\eta_1 Q_{m1}} \right)^5 + \dots + \frac{N_k}{N_1} \left(\frac{\eta_k Q_{mk}}{\eta_1 Q_{m1}} \right)^5 \right]^{1/5}$$



FLM3, jatkoa

- λ -kertoimien arvoja määritettäessä rakenneteräksille käytetään 5-potensseja ja vaarnoille 8-potensseja (johtuen S-N-käyrän kaltevuudesta)

- FLM3:n mukainen väsymismitoitus: $\lambda = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \lambda_4 < \lambda_{\max}$

$$\Delta \sigma_{E2} = \lambda \Phi_2 \Delta \sigma_p$$

$$\gamma_{Ff} \Delta \sigma_{E2} \leq \frac{\Delta \sigma_c}{\gamma_{Mf}}$$

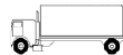
FLM4

- Mitoitus tapahtuu taulukoiden EN 1991-2 4.5(n) ja 4.7 perusteella
- Viranomaisen määrittää liikenteen luokat, ja mahdollisesti uudet ekvivalentit akselikuormat (jotta saadaan eurokoodin taulukot vastaamaan suomalaista liikennettä)
- Palmgren-Minerin sääntö

Taulukko 4.5(n) Odotettavissa oleva raskaiden ajoneuvojen suuntaa-antava lukumäärä vuotta ja hitaan liikenteen kaistaa kohti

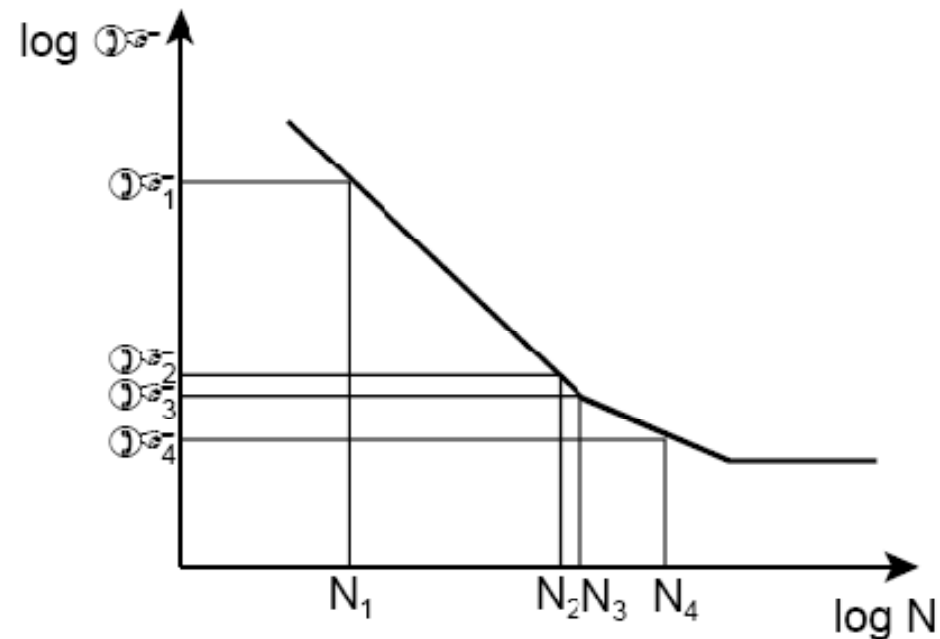
Liikenteen luokat		N_{ons} vuotta ja hitaan liikenteen kaistaa kohti
1	Moottori-, moottoriliikenne- ja muut tiet, joilla suuntaa kohti on vähintään 2 kaistaa, joilla kuorma-autoista muodostuva liikennemäärä on suuri	$2,0 \times 10^6$
2	Moottori-, moottoriliikenne- ja muut tiet, joilla kuorma-autoista muodostuva liikennemäärä on keskimääräinen	$0,5 \times 10^6$
3	Päätiet, joilla kuorma-autojen liikennemäärä on vähäinen	$0,125 \times 10^6$
4	Paikallistiet, joilla kuorma-autojen liikennemäärä on vähäinen	$0,05 \times 10^6$

Taulukko 4.7 Ekvivalenttien kuorma-autojen sarja

AJONEUVOTYYPPI			LIIKENTEEN TYYPPI			
1	2	3	4	5	6	7
			Kauko-liikenne	Keskipitkä liikenne	Paikallis-liikenne	
KUORMA-AUTO	Akselivälit (m)	Ekvivalentit akselikuormat (kN)	Kuorma-autojen osuus	Kuorma-autojen osuus	Kuorma-autojen osuus	Pyörä-tyyppi
	4,5	70 130	20,0	40,0	80,0	A B
	4,20 1,30	70 120 120	5,0	10,0	5,0	A B B
	3,20 5,20 1,30 1,30	70 150 90 90	50,0	30,0	5,0	A B C C
	3,40 6,00 1,80	70 140 90 90	15,0	15,0	5,0	A B B B
	4,80 3,60 4,40 1,30	70 130 90 80 80	10,0	5,0	5,0	A B C C C

Minerin summa (Palmgren-Minerin vauriokertymä sääntö)

- Lineaarinen kumulatiivinen vauriolaskelma joka perustuu Palmgren-Minerin sääntöön
- Tarkempi menetelmä kuin λ -kertoimeen perustuva laskenta
- n , jännitysjaksojen lukumäärä tietyllä jännitysvaihteluvälillä
- N , murtumisen aiheuttama jännitysjaksojen lukumäärä ko. jännitysvaihteluvälillä
- $D_L = 1$



$$\sum \frac{n_i}{N_i} = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} + \frac{n_4}{N_4} \leq D_L$$