

Rautatiesillan vertailulaskelmat



Tekemäjärven ojan ratasilta, Oikorata
Koekuormitus 30.10.2004 TTY

Anssi Laaksonen

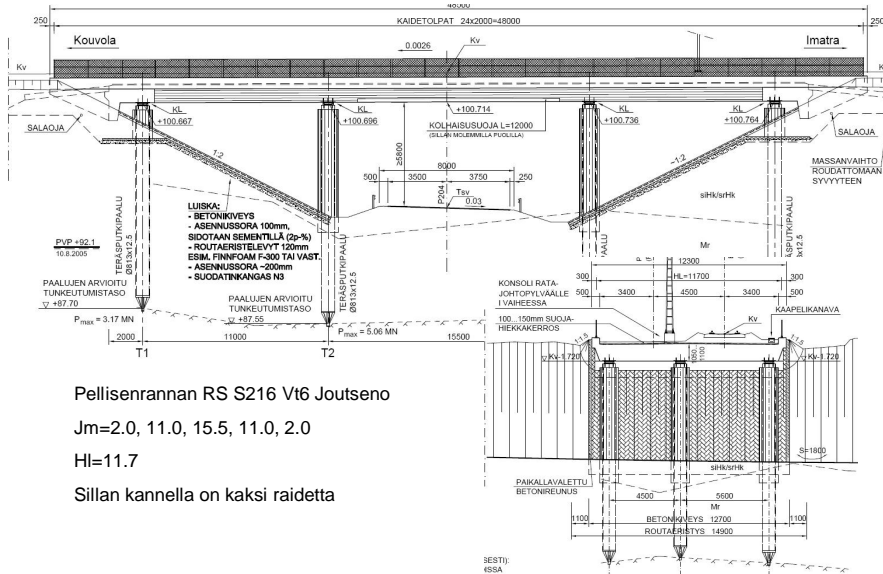
Esityksen sisältö

- 1) Vertailulaskentakohteen esittely
- 2) Vertailulaskelmien laskentaperiaate
- 3) Rautatiesillan erityispiirteitä Eurokoodissa
- 4) Jarru- ja kiihdytyskuorman analysointi
- 5) Jatkotutkimustarpeet

Tämä esitys koskee rautatiesillan erityispiirteitä: "rail-track" -analyysia ja väsytystä



Vertailulaskentakohte



Pellisenrannan RS S216 Vt6 Joutseno

Jm=2.0, 11.0, 15.5, 11.0, 2.0

Hl=11.7

Sillan kannella on kaksi raidetta

Vertailulaskelmien periaate

- Vertailulaskentakohteena olevasta sillasta on tehty kolme mallia eri tarkoituksiin
 - 1) Lineaarinen perusmalli varioiden erilaisilla tukiehoilla (jotta maan tukijouset eivät ota vetoa)
 - 2) "Rail-track" –analysis: Epälineaarinen malli jarrutus- ja kiihdytyskuormille. Tähän malliin lähtötiedoksi on otettu lineaarisen mallin (nro 1) sillan pituussuuntainen jäykkyys. **Tämän analyysin perusteella voidaan tarkistaa pitääkö NA EN 1991-2 annettu jatkuvakiskoraiteen alueella sijaitsevaa siltaa koskeva ohje paikkansa ja vältettäisiin tämän kohdan varsin laajan analyysin tekeminen tavanomaisen sillan suunnittelussa**
 - 3) Yksinkertainen palkkimalli väsytyksiä tarkasteluun

- Tämä esitys koskee rautatiesillan erityispiirteitä, edellä kohtia
- Kohdan 1 asioita on mukana vertailulaskelmien yhteenveto seuraavassa esityksessä

0000 Mallia: 2163 - 1 M270-kävelysilta (Helsinki-2020) - Nollaverroon etäisyys (Helsinki-2020) - malli_3_vrt.mtl lastauk 01.2009



Veto- ja jarrutuskuormat ”sillan perusmalliin” nro 1 edellä

- Jarrutus- ja vetokuorman suuruus

$$\alpha := 1.46 \quad L_{\text{ak}} = 41.5$$

$$q_{\text{lak}} := 33 \cdot \alpha \quad q_{\text{lak}} = 48.18$$

$$q_{\text{lbk}} := 20 \cdot \alpha \quad q_{\text{lbk}} = 29.2$$

$$Q_{\text{lak}}(L) := \begin{cases} L \cdot q_{\text{lak}} & I_{\text{maxa}} := \frac{1000 \cdot \alpha}{33 \cdot \alpha} \quad I_{\text{maxa}} = 30.303 \quad Q_{\text{lak}}(L) = 1.46 \times 10^3 \\ 1000 \cdot \alpha & \text{if } L \cdot 33 \cdot \alpha \geq 1000 \cdot \alpha \end{cases}$$

$$Q_{\text{lbk}}(L) := \begin{cases} L \cdot q_{\text{lbk}} & I_{\text{maxb}} := \frac{6000 \cdot \alpha}{20 \cdot \alpha} \quad I_{\text{maxb}} = 300 \quad Q_{\text{lbk}}(L) = 1.212 \times 10^3 \\ 6000 \cdot \alpha & \text{if } L \cdot 20 \cdot \alpha \geq 6000 \cdot \alpha \end{cases}$$

- Myös maksimiarvo 1000kN ja 6000kN kerrottava a:lla

NA EN 1991-2:

$$Q_{\text{lakB}}(L) := \begin{cases} 0.5 \cdot Q_{\text{lak}}(L) & Q_{\text{lakB}}(41.5) = 860 \\ Q_{\text{lak}}(L) - 600 & \text{if } Q_{\text{lak}}(L) \cdot 0.5 > 600 \end{cases}$$

$$Q_{\text{lbkB}}(L) := \begin{cases} 0.5 \cdot Q_{\text{lbk}}(L) & Q_{\text{lbkB}}(41.5) = 611.8 \\ Q_{\text{lbk}}(L) - 600 & \text{if } Q_{\text{lbk}}(L) \cdot 0.5 > 600 \end{cases}$$

- Tällä kaksiraiteisella sillalla $Q_{\text{lak}} = 41.5\text{m} \cdot 33\text{kN} \cdot 1.46 = 2000\text{kN} > 1000\text{kN} \cdot 1.46$
- $1460 \cdot 0.5 = 730\text{kN} \Rightarrow 1460 - 600 = 860\text{kN}$ molempia ratoja kohden Toiselle radalle $1460 - 600\text{kN} = 860\text{kN}$ (RSO rata1 = 854kN, rata 2 = $0.6 \cdot 854 = 512\text{kN}$)

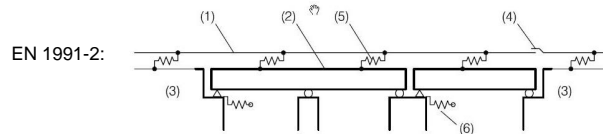
Veto- ja jarrutuskuormat ”Rail-Track” –analysis nro 2 edellä

- Veto- ja jarrutuskuormat vaikuttavat täysimääräisellä intensiteetillä kiskon yläpinnassa vaihtelevan matkan
- Kuinka suuri jarrutus- tai kiihdytyskuorma mobilisoituu rautatiesillalle, jos sillan ja maa yhteistoiminta yhdessä ratarakenteen kanssa otetaan huomioon?



Jarrutus- ja vetokuorman analysointi

- Rakenneosien jäykkyyksien keskinäiset suhteet vaikuttavat siihen kuinka paljon pituussuuntaista kuormaa sillalle mobilisoituu
- Mitä ”jäykempi” silta on suhteessa muihin osiin, sitä enemmän kuormaa sillalle mobilisoituu
- Kunkin osan jäykkyys on siis analyysia ajatellen selvitettävä
- Eurokoodissa oleva rakennemallin esimerkki



Key

- (1) Track
- (2) Superstructure (a single deck comprising two spans and a single deck with one span shown)
- (3) Embankment
- (4) Rail expansion device (if present)
- (5) Longitudinal non-linear springs reproducing the longitudinal load/ displacement behaviour of the track
- (6) Longitudinal springs reproducing the longitudinal stiffness K of a fixed support to the deck taking into account the stiffness of the foundation, piers and bearings etc.

© A-insinööri Oy 3.4.2009

www.a-insinoorit.fi

Yleistä analyysistä

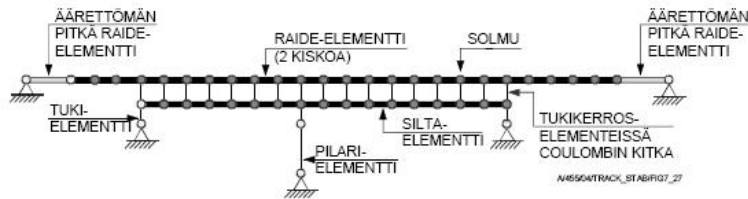
- Sillan pituussuuntainen jäykkyys puskepalkkien ja alusrakenteiden välityksellä saadaan edellä esitetystä mallista 1, joka tässä tapauksessa oli 487 MN/m, joka tarkoittaa että silta liikkuu 1 MN kuormasta 2.05 mm.
- Rakennemallin 1 tukiehdot on määritetty nykyohjeiden mukaisesti
- Analyysissä oli UIC60 kiskot
- Kiskoja on mallinnettu 100.2 m sillan puskepalkkien ulkopinnoista eteenpäin. Eurokoodissa vaatimus 100m kohdassa EN 1991-2 Annex G, kohta G.4.
- Radan ”pätkien” päässä on 400 MN/m puoliavaruutta kuvaaja jousi
- Analyysi keskittyy pituussuuntaiseen käyttäytymiseen
- Esitetystä analyysistä ei käsitellä lämpötilakuormaa

© A-insinööri Oy 3.4.2009

www.a-insinoorit.fi

Rakennesien välisiä vuorovaikutuksia

- Kisko on kiinni pölkkyssä
 - Tämän käyttäytyminen on yksinkertaistettu kimmoiseksi ja ideaaliplastiseksi
- Pölkky on tuettu maahan
 - Tähän on annettu käyttäytyminen Eurokoodien rautatiesiltojen kuormat osassa
- 25 m etäisyydeltä 50 m etäisyydelle sillan päästä lukien ja joka 4. pölkky on kiinnitetty kiskoon pituussuuntaan kiinteästi Mathee-ankkureilla
- Analyysissä, ainakin yksinkertaisessa, tarvitaan lähtötieto mikä on kiskon ja maan välinen vuorovaikutus

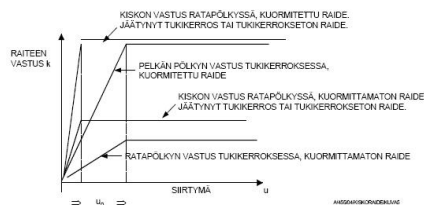


© A-insinöörit Oy 3.4.2009

www.a-insinöörit.fi

Kiskon ja pölkyn välinen vuorovaikutus

- Analyysissä on oletettu että suurin leikkausvastus (läpiveto vastus) liittoksessa on SKL13 mukainen 12 kN/liitos
- Voiman on oletettu kehittyvän 1 mm kiskon ja pölkyn välisellä siirtymällä
- Tällöin yhdessä liittimessä $k = 12/0.001 = 12 \text{ MN/m/liitos}$ ja lujuus 12 kN/liitos



© A-insinöörit Oy 3.4.2009

www.a-insinöörit.fi

Pölkyn ja maan välinen vuorovaikutus

- Pölkyn ja maan välisen pituussuuntaisen käyttäytymisen plastiseksi leikkausvastukseksi on annettu NA EN 1991-2:ssa 20...40 kN/m/raide epäsuotuisissa ja 50...60 kN/m/raide suotuisissa olosuhteissa. Laskemissa on asetettu, että voima kehittyy 2 mm siirtymätasolla
- Lisäksi on oletettu, että pölkyn ja maan välinen jäykkyys on suurempi sillan kansirakenteen kohdalla. Seuraavassa taulukossa on esitetty käytetyt pölkyn ja maan väliset jäykkyys- ja lujuusarvot:

$k = F/x$	Kuormitettu	Kuormittamaton
Silta	$60/0.002 = 30 \text{ MN/m}$	$30/0.002 = 15 \text{ MN/m}$
Ratapenger	$40/0.002 = 20 \text{ MN/m}$	$20/0.002 = 10 \text{ MN/m}$

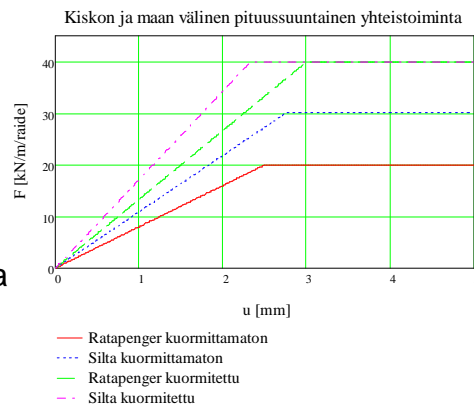
Kiskon ja maan välinen vuorovaikutus

- Kahta edellä kuvattua vuorovaikutusta voisi ajatella jousina k_1 ja k_2 jotka ovat sarjassa, josta seuraa:

$$\frac{1}{k_{\Sigma}} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2}, \text{ jolloin}$$

$$k_{\Sigma} = \frac{k_1 k_2}{k_1 + k_2}$$

- Jousiparin "lujuus" on pienempi jousien lujuudesta. $F_u = \min(F_1 \text{ ja } F_2)$

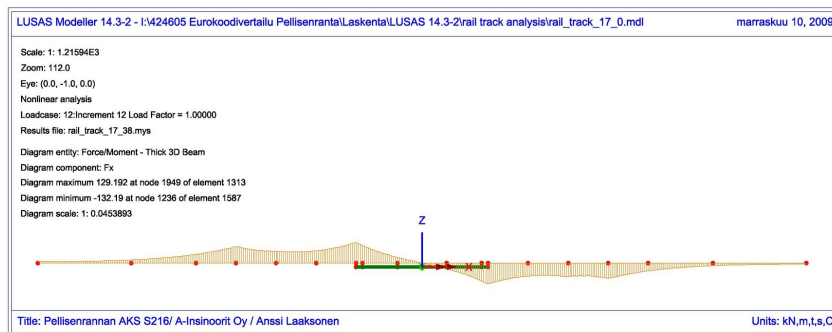


Kuormittamisesta

- Laskennassa sillan suurimman pituussuuntaisen kuorman saavuttamiseksi on analysoitu 6 erilaista jarru- tai kiihdytyskuorman asemaa pituussuuntaan nähden. Jarrukuormia asetettiin 5 eri asemaan.
- Jarrukuormaa oli koko sillan matkalla ja 0, 12.6, 25.2, 37.8 ja 70.8 päähän sillan puskepalkin ulkopinnasta. Täten jarrukuorman suurin mallinnettu pituus oli $41.5 + 2 * 70,8 = 183.1$ m.
- Kiihdytyskuorman tapauksessa suurin kiihdytyskuorma ($L=30.3$ m) asetettiin sillan kansirakenteen päälle suurimman pituussuuntaiset kuorman aikaansaamiseksi sillan rakenteille.

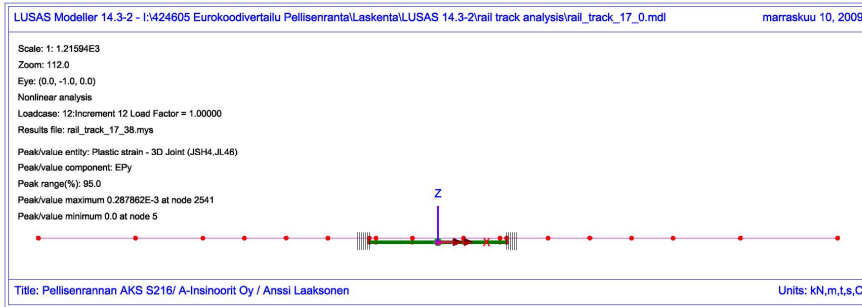
Kiskon normaalivoiman jakauma

- Tapauksessa, jossa jarrukuormaa on 37.8 m sillan puskepalkin ulkopinnasta penkereelle päin, jolloin $L_b = 117.1$ m.



Myötäävät vuorovaikutukset

- Kohdat, joissa kiskon ja maan välinen vuorovaikutus on myötäävällä alueella tapauksessa, jossa jarrukuormaa on 70.8 m sillan puskupalkin ulkopinnasta penkereelle päin, jolloin $L_b = 117.1$ m.



Tuloksia koottuna

- Kuormitettuna tukikerroksen suurin kapasiteetti edellä määritellyillä reunaehdoilla Pellisenrannan sillalle on $F_{max} = 40 \cdot 41.5 \cdot 2 = 1660 \cdot 2 = 3220$ kN. Pituussuuntainen kuorma on NA-EN 1991-2 mukaan on $F_{a,b} = 1720$ kN.

$L_{a,b}$ [m]	L [m]	F_{mob} [kN]	$F_{a,b}$ [kN]	$F_{mob}/F_{a,b}$	F_{max} [kN]	σ_{rail} [MPa]	D_x [mm]	D_r [mm]
30.3	-11.2	1261	1720	0.73	3220	60	2.60	1.52
41.5	0	1022	1720	0.59	3220	48	2.10	1.00
66.7	12.6	1225	1720	0.71	3220	56	2.50	1.11
91.9	25.2	1323	1720	0.77	3220	45	2.72	1.16
117.1	37.8	1364	1720	0.79	3220	45	2.79	1.18
183.1	70.8	1396	1720	0.81	3220	42	2.86	1.19

$L_{a,b}$ = Jarru- tai kiihdytyskuorman kokonaispituus

L = Kuormituksen etäisyys sillan puskupalkin ulkopinnasta penkereiden suuntaan.

F_{mob} = Sillan rakenteille mobilisoitunut pituussuuntainen kuorma

$F_{a,b}$ = NA EN 1991-2 mukainen jarru- tai kiihdytyskuorma sillan rakenteille

F_{max} = Koko sillan matkalla olevan kuormitetun tukikerroksen plastinen leikkausvastus

σ_{rail} = Suurin kiskon jännitys puristuksesta ja vedosta

D_x = Sillan siirtymä pituussuuntaan, suurin sallittu on 5 mm EN 1991-2 6.5.4.5.2

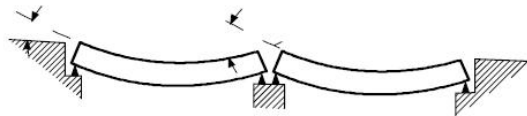
D_r = Kiskon ja sillan kannen välinen siirtymäero pituussuuntaisesta kuormituksesta

- Kansallisen liitteen NA EN 1991-2 yksinkertaistettu menettely jarru- ja kiihdytyskuorman analysointiin on Pellisenrannan AKS:lle turvallisella puolella noin 20 %. Yksinkertaistettu menetelmä sopii siis hyvin Pellisenrannan AKS:lle.

Jatkotutkimustarpeet

Rail-Track analysis:

- Vastaava analyysi tulisi tehdä eripituisille ja myös yksiraiteisille silloille
- Kiskojen jännityksiä tulisi analysoida. Jolloin myös lämpötilaeron vaikuttaa kiskojen ja siltarakenteen välillä
- Sillan kansirakenteen taipuman vaikutuksia kiskojen jännityksiin tulisi analysoida

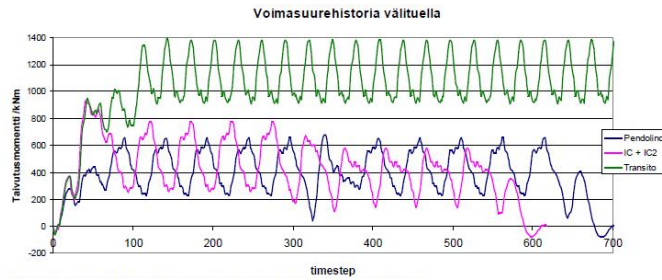


Väsytyksanalyysi, tavoite

- Määrittää sovituskertoimen kuormakaavion LM71 ja SW/0 aiheuttamien jännitysvaihteluvälien ja todellisten junakuormakaavioiden aiheuttaman väsytyksaurion välille
 - Sovituskertoimet ovat tapauskohtaisia
 - Määritetyt kertoimet pätevät vertailukohteelle Pellisenrannan alikulkusillalle
- Samalla pyrittiin tunnistamaan ongelmakohtia ja kehitystarpeita väsytyksmitoituksessa

Väsytyksanalyysi, laskennan vaiheet 1/2

- Määritettiin eri junakuormakaavioiden aiheuttama jännitysspektri
 - 10 Suomalaista junakuormakaaviota
 - 12 EN 1991-2 liitteen D junakuormakaaviota (Ei käsitellä tässä, vertailun vuoksi)
- Rainflow-analyysin kautta määritettiin jokaiselle kuormakaavioille ekvivalenttijännitysvaihteluväli, joka kuvaa yhtä ylityskertaa
 - saadut arvot ovat siltakohtaisia
- Ekvivalenttijännitysvaihteluväliä verrataan kaavioiden LM71 ja SW/0 aiheuttamaa jännitysvaihteluväliin
 - Junakuormakaaviokohtaiset sovitekertoimet (λ_1 -kerroin)



© A-insinöörit Oy 3.4.2009

www.a-insinoorit.fi

Väsytyksanalyysi, laskennan vaiheet 2/2

-Suomen rataverkosto

- jaottelu "light, standard, heavy" ei päde
- on arvioitava rataosan liikenteen jakauma ja määrät ja laskettava kerroin $\lambda_{s1} \cdot \lambda_{s2}$

-Kertoimet λ_{s3} ja λ_{s4} säilyvät ennallaan (käyttöikä ja samanaikaiset junat)

$$\Delta\sigma_{s,eq}(N=10^6) = \lambda_s \Phi \Delta\sigma_{s,LM71/SW0}$$

$$\lambda_s = \lambda_{s,1} \lambda_{s,2} \lambda_{s,3} \lambda_{s,4}$$

Rataosuuden liikennetyypit		Hämeenlinna -Tampere	Kerava -Lahti	Kajaani -Kuhmo	Turku -Salo
TAVARA-LIIKENNE	Perus	1	1	0	0
	Vahän	0	0	1	1
	Transito	0	1	1	0
HENKILÖLIIKENNE	Runkoverkko	1	1	0	1
	Muu verkko	0	0	1	0
	Taajamaliikenne	1	1	0	1
	Kaupunkiradat	0	0	0	0
	Venäjän liikenne	0	1	0	0
	Yöjunat	1	0	0	0

Junien ylitys/d	Hämeenlinna -Tampere	Kerava -Lahti	Kajaani -Kuhmo	Turku -Salo
tavara	20	20	6	6
tavara 25t	4	4	0	0
transito	0	6	6	0
Pendolino	13	13	1	13
IC	35	35	4	35
pika	10	10	8	10
yöpika	4	0	0	0
sm4	40	40	8	40
sm5	0	0	0	0
sm6	0	6	0	0

$\lambda_{s,1} \cdot \lambda_{s,2}$

Välituki	0.577	0.588	0.568	0.521
Keskikerroin	0.615	0.614	0.563	0.569

© A-insinöörit Oy 3.4.2009

www.a-insinoorit.fi

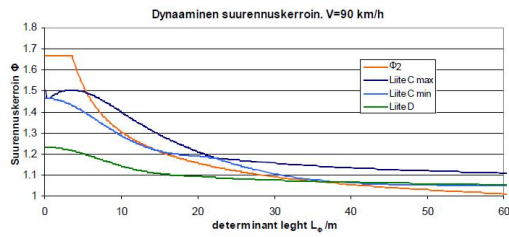
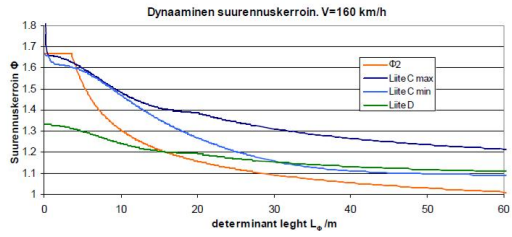
Väsytyksanalyysi, jatkotutkimustarpeet

-Mikä on oikea dynaaminen suurennuskerroin?

- Kuorman pitäisi vastata todellisuutta
- Yksityiskohtaisemman menetelmän pitäisi antaa pienempiä arvoja, eikä toisin päin.
- Φ_2 epätarkin
- Liite C tarkin

- λ -kertoimien kaavat vastaamaan Suomen junakalustoa ja rataverkosta (sekä A500HW $k_2=25$)

- Betonin väsytykskestävyyden kertoimien laskenta mutkikasta, koska keskijännitys vaikuttaa väsytykskestävyyteen



Kiitos mielenkiinnosta!

Kysymyksiä?

