

Siltarakenteiden värähtelymitoitus värähtelymitoituksen periaatteet

TkT Risto Kiviluoma

Siltaeurokoodien koulutus 29...30.3.2010
Pasilan virastokeskuksen auditorio, Opastinsilta 12
22.3.2010

UNITED
BY OUR
DIFFERENCE



Sisällys

Johdanto

Yleiset periaatteet (normeista riippumattomat)

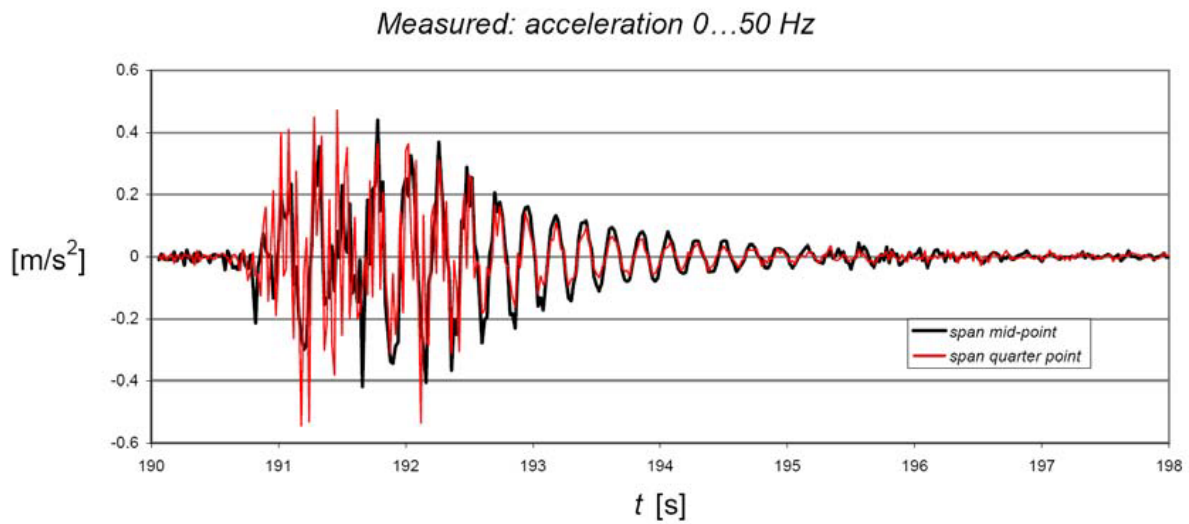
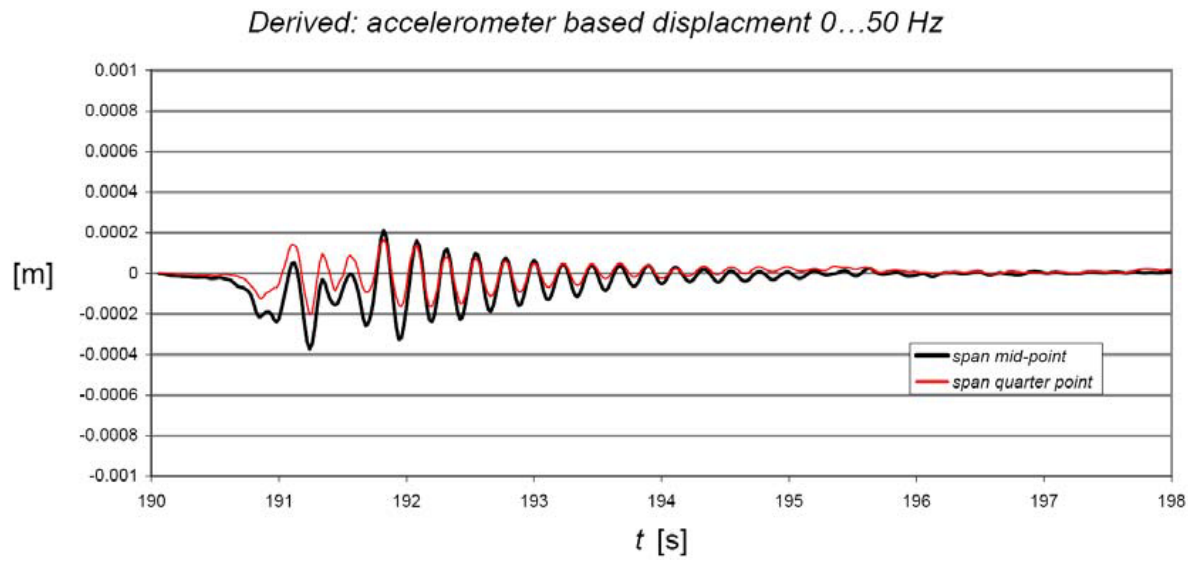
Siltojen värähtelymitoitus ja Eurokoodit

Yhteenveto



Johdanto

- Rakenteiden värähtely tai tärinä ("*vibration*") on rakenteen jaksollista liikettä (muodonmuutoksia) staattisen tasapainoaseman ympärillä
- *aika-riippuvat kuormat* aiheuttavat aina aika-riippuvan *vasteen* ja toisinaan myös värähtelyä
 1. *kuorma on dynaaminen* silloin kuin sen aiheuttamat hitausvoimat ("*massa x kiihtyvyys*") ovat niin merkittävät, että ne on otettava huomioon
 2. *kuorma on dynaaminen* silloin kun se on ajasta riippuva, ja se aiheuttaa merkittäviä dynaamisia *vaikutuksia* rakenteeseen
- tavanomaisia dynaamisia kuormia silloissa:
 - maanjäristys
 - tuuli
 - kävelijöitten ja juoksijoitten aiheuttamat herätteet
 - liikennekuorma (ajoneuvot, junat)
 - onnettomuuskuormat



Jylhärännan sillan värähtelymittaukset © WSP

- värähtelyn vaikutus:
 - epäviihtyvyyden tunne
 - visuaalinen haitta ja hämmennys
 - materiaalien kuluminen
 - väsytyt
 - materiaalin myötääminen, lohkeaminen ja rakenneosien katkeaminen
 - ylisuuret muodonmuutokset, rakenteellisen eheyden menetys
 - liikenneturvallisuusriskit, pyörien kontaktivoimat
- riippumatta värähtelyn vaikutuksesta puhutaan yleisesti *rakenteen värähtelyrajatilasta*, joka tulee rakennesuunnittelussa tarkastaa ja tarvittaessa korjata siten, ettei em. haitallisia vaikutuksia synny
- yleiset sillansuunnittelun trendit pitävät värähtelytarkastelut ajankohtaisina:
 - massan pienentäminen & materiaalin säästäminen ("halvimman urakkatarjouksen saamiseksi")
 - laskentamenetelmien (FEM-mallinnuksen) kehittyminen ja monimutkaisempien rakennemallien rohkeampi käyttö
 - pyrkimys erikoiskohteiden hoikkiin rakenteisiin ja näyttävään silta-estetiikkaan (kaupunkiympäristö ja "signature" sillat)



Iirislahden silta © WSP



Yleiset menetelmät (normeista riippumattomat)

- Rakenneanalyysin perustana on yleisimmin dynaaminen lineaarinen liikeyhtälö, matriisimuodossa

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{f\}$$

missä M = Massamatriisi; C = vaimennusmatriisi; K = jäykkyyismatriisi

- kun tarkastellaan staattista tilaa, eli rakenne on paikoillaan, ja voima f ei riipu ajasta, palautuu tämä elementtimenetelmän mukaiseksi tavanomaiseksi staattiseksi probleemaksi

$$[K]\{x\} = \{f\} \Leftrightarrow$$

$$\{x\} = [K]^{-1}\{f\}$$

missä x = siirtymä/kiertymävektori ja f = voimavektori

- dynaamisen liikeyhtälön tavanomaiset ratkaisumenetelmät:

aikataso (aika t parametrina)

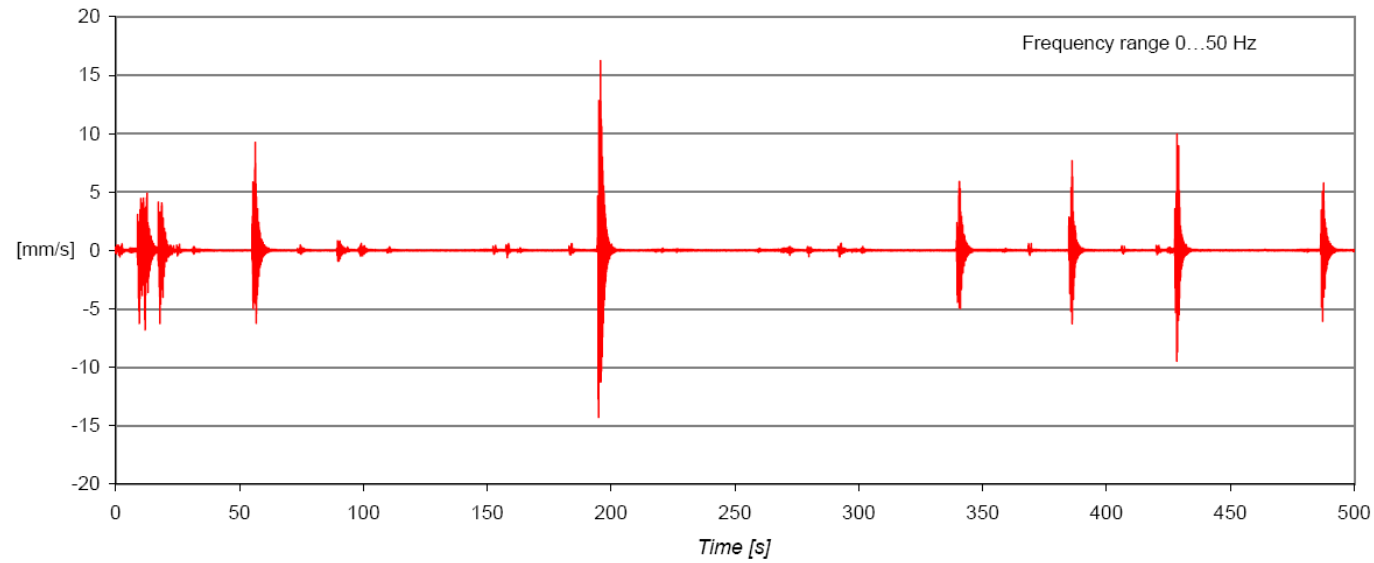
- liikeyhtälön matriisien diagonalisointi (palauttaminen yhden vapausasteen värähtelijöiksi) ja ratkaistavien tuntemattomien määrän pienentäminen *ominaismuoto-analyysin* ja vaimennusmatriisin otaksumien avulla *
- eniten käytetty menetelmä ”normitasoissa” suunnitteluohjeissa ja kokeellisessa moodianalyysissä
- suora aikaintegrointi täysillä matriiseilla

taajuustaso (taajuus f parametrina)

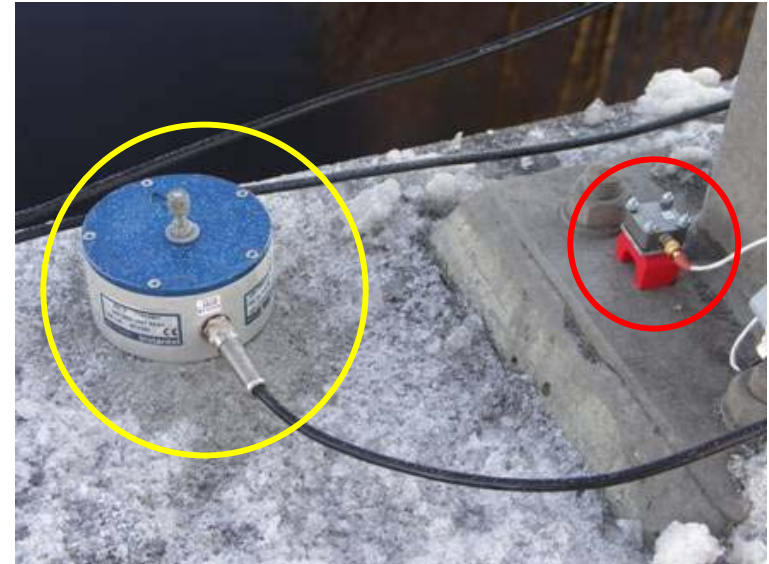
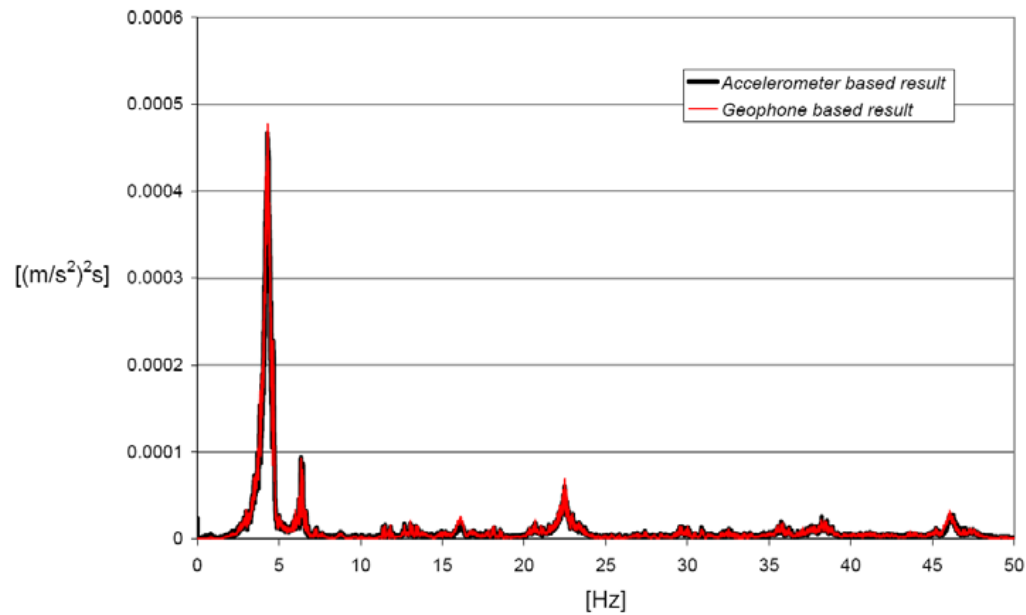
- Fourier-muunnoksen ottaminen liikeyhtälön molemmista puolista. Sovelletaan mm.
 - satunnaisvärähtelyjen spektraalianalyysissä (mm. dynaaminen tuulikuorma)
 - ominaismuotojen ja moodiparametrien *kokeellisessa* määrittämisessä todellisesta rakenteesta tai pienoismallista
 - värähtelyn *taajuussisällön* määrittämiseen ja eri taajuusalueiden erottamiseen & signaalinkäsittelyyn

* vaimennus esitetään *ominaismuotokohtaisten* vaimennuskertoimien avulla

Velocity record 17-Nov-2008 11:38:09; span mid-point

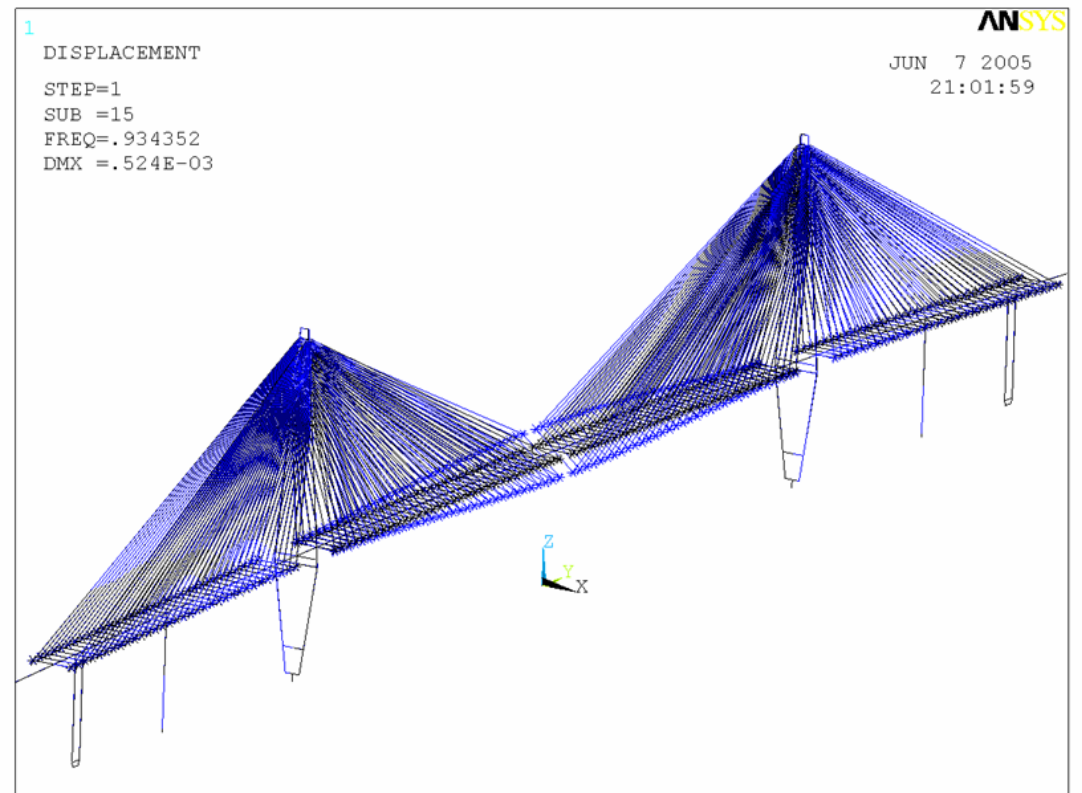
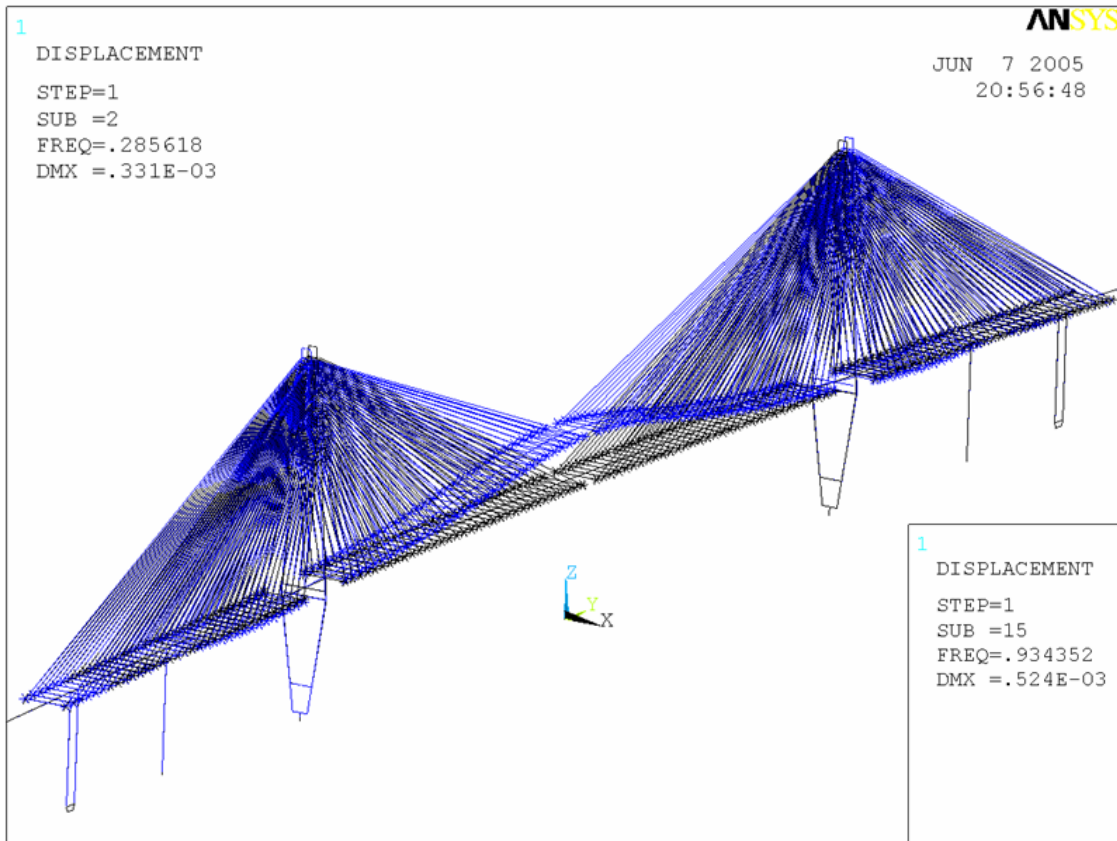


Comparison of ambient auto-spectra for acceleration: span mid-point



Jylhärannan sillan värähtelymittaukset © WSP

- Siltojen värähtelyiden laskennallinen määrittäminen
 - yleiskäyttöinen FEM-ohjelma dynamiikkaoptioilla on tavanomaisin dynaamisen rakenneanalyysin työkalu:
 - ominaismuotoanalyysi
 - transienttianalyysi (suora aikaintegrointi tai moodisummaus): ”aikahistoria-analyysi” ajasta riippuville kuormille
 - vastespektrianalyysi (maanjäristyskuormat)
 - FEM-mallinnus toimii yleisesti luotettavasti silloin kuin kuorman aikariippuvuus tunnetaan tai voidaan luotettavasti otaksua rakenteen eri pisteissä
 - tuulikuorman vaikutusmekanismit ovat ongelmallisia mallinnettavia
- Siltojen värähtelyiden kokeellinen määrittäminen
 - Värähtelymittaukset ja kokeellinen moodinanalyysi todellisesta sillasta
 - Tuulitunnelikokeet (värähtelevällä eli ”aeroelastisella” pienoismallilla)
 - Visuaalinen ja optinen tarkkailu ja videointi (jos kantavien rakenteiden värähtelyt näkyvät ovat ne yleensä jo ongelmallisia)
 - Käyttäjien haastattelut: värähtely on/ei ole aistittavissa tai epämukavaa



Dolsan sillan ominaismuotoanalyysi © WSP

- Kun sillan rakenteiden värähtelyt on määritetty (laskennallisesti tai kokeellisesti) voidaan yleensä aina muodostaa *staattiset korvauskuormat*, jotka riittävällä tarkkuudella ottavat huomioon dynaamiset lisärasitukset staattisessa rakenneanalyysissä
 - värähtelyt aiheuttavat useasti rasituksia kohtiin jossa niitä ei staattisilla kuormilla ole. Staattisen kuorman suora kertominen ”dynaamisella lisäkertoimella” ei aina johda luotettavaan tulokseen. Luotettavimmat staattiset korvauskuormat määritetään värähtelyn ominaismuotojen, massajakauman ja laskettujen kiihtyvyyksien kautta
- Staattiset korvauskuormat ovat suositeltava tapa yhdistää värähtelyasiantuntijan / tuulitunnelianalyysin tulokset käytännön rakennesuunnitteluun ja kuormayhdistelyyn

Siltojen värähtelymitoitus ja Eurokoodit

- Siltojen värähtelytarkastelut ovat perinteisesti olleet ”tutkijoiden ja tiedemiesten” tehtäväkenttää vaadittavien erikoisosaamisen, mittauslaitteistojen ja ohjelmistojen johdosta
 - tutkimusorganisaatiot on hälytetty apuun jälkikäteen, kun silta on osoittautunut liian värähtelyherkäksi
 - värähtelymittauksiin perustuvaa tutkimustietoa saadaan silloista koko ajan lisää, mm. instrumentointitekniikoiden kehittymisen myötä. Käytännön rakennesuunnitteluun saadaan verifioituja yksinkertaistettuja värähtelyn laskentakriteereitä
- Eurokoodi uutena ja yksityiskohtaisena suunnitteluohjeena tuo rakennesuunnitteluun lukuisia värähtelyä koskevia yksinkertaistettuja ohjeita ja lähtötietoja

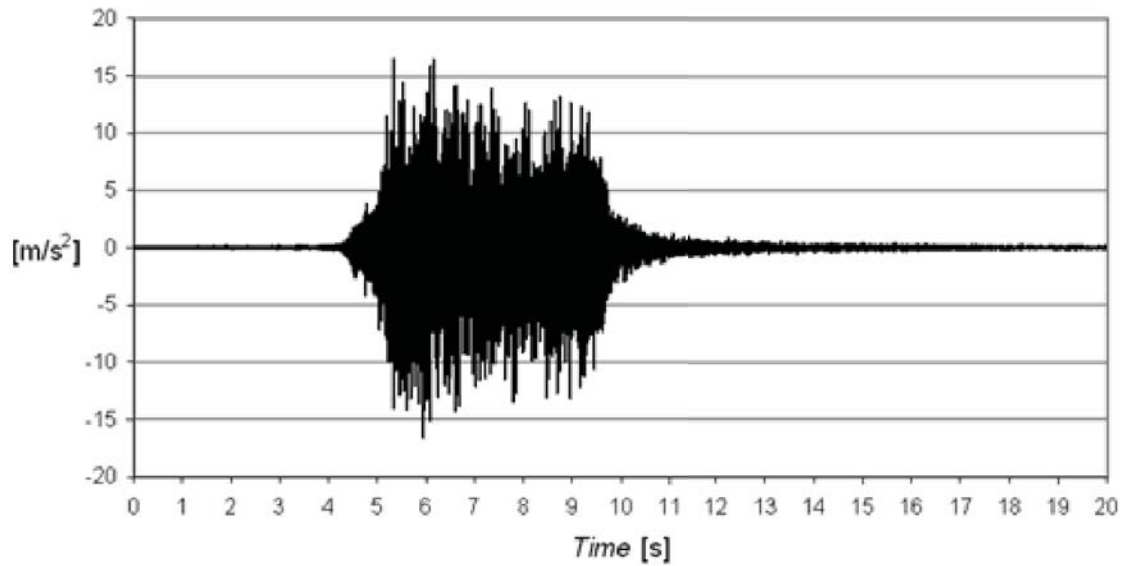
SFS-EN-1990/A1 Rakenteiden suunnitteluperusteet

- Kohta A2.4.2 käsittelee tiesiltojen värähtelykriteereitä
 - kohdassa viitataan yleisiin mukavuuskriteereihin
- Kohta A2.4.3 käsittelee kvl siltojen värähtelytarkasteluja
 - dyn. mitoitusperusteena 8-15 kävelijän ryhmä
 - jatkuva kävelijävirta (> 15 kävelijää)
 - ajoittaiset festivaali ja koreograafiset tapahtumat
 - tarkastelu voidaan jättää tekemättä (kyseissä suunnassa) jos sillan ominaistaajuus on
 - > 5 Hz pystysuuntaisille värähtelylle
 - > 2,5 Hz vaakavarähtelylle
 - kiihtyvyyden sallitut maksimit (suositukset):
 - 0,7 m/s² pystyvärähtely
 - 0,2 m/s² vaakavarähtely
 - 0,4 m/s² poikkeukselliset tungokseen liittyvät tapahtumat
 - kiihtyvyyksmaksimien taajuusaluetta ei ole annettu – se tulisi aina antaa raja-arvosuosituksen yhteydessä. Korkeataajuisella tärinällä on harvoin merkitystä
 - todetaan että laskentamallit ovat virhealttiita ja suositellaan rajatapauksissa *varausten* suunnittelua *vaimentimien asennukselle*

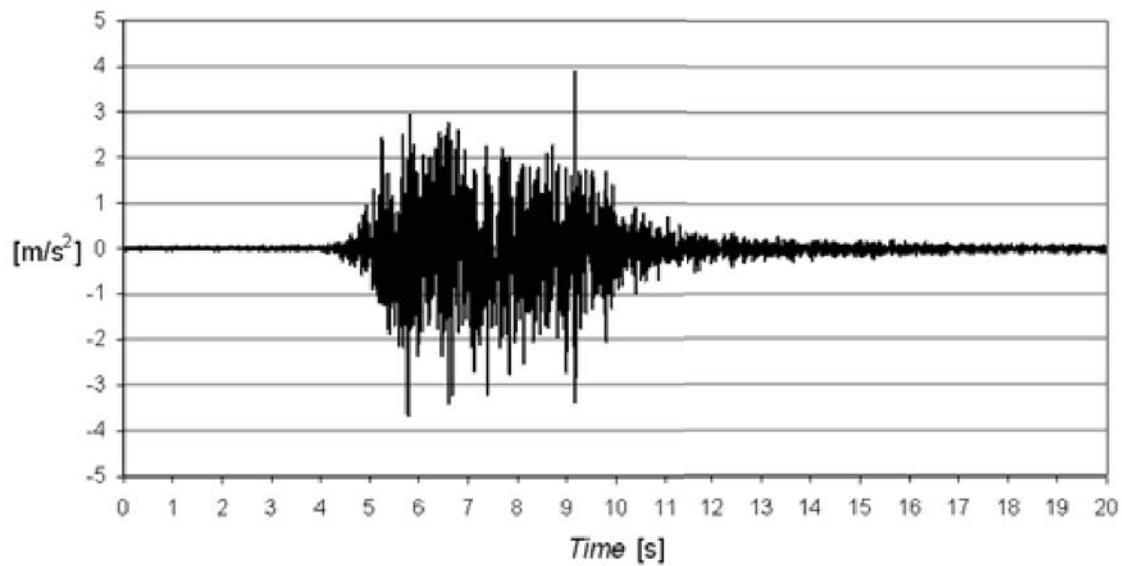
- Kohta A2.4.4 käsittelee rautatiesiltojen värähtelytarkasteluja
 - värähtelykriteerien tarve:
 - radan stabiliteetti
 - pyörien kontaktivoimien katoaminen
 - vaunujen telien ja sillan vaakavärähtelyn resonanssin välttäminen
 - matkustajien mukavuus (tarkastellaan taipumien kautta)
 - suositukset maksimikiikhtyvyyksiksi (turvallisuus)
 - 5 m/s² maksimi sillat jossa rata on ilman *tukikerrosta*
 - 3,5 m/s² tukikerroksen kanssa
 - em. kiihtyvyydet määritellään taajuusalueella nolasta *suurimpaan* arvoista
 - 30 Hz
 - 1,5*tarkasteltavan rakenneosan ominaistaajuus
 - tarkasteltavan rakenneosan 3. ominaistaajuus

- suositus sillan ominaistajuuden *minimiksi* poikkisuuntaisessa vaakavärähtelyssä
 - $f_{b0} > 1,2$ Hz
- matkustajien mukavuus *junassa* sen ylittäessä sillan (pystykiihtyvyys)
 - hyvä < 1 m/s²
 - keskinkertainen < 1,3 m/s²
 - hyväksyttävä < 2 m/s²
- kohta A2.4.4.3.3 antaa ohjeet juna-silta yhteisvaikutusanalyysiin silloin kuin pystykiihtyvyys on tarkastettava *matkustusmukavuuden* kannalta
 - myös vaunujen dynamiikka (telien jousitus ja vaimennus) on otettava huomioon

Sensor A2: Acceleration response at frequency range 0...1000 Hz



Sensor A2: Acceleration response at frequency range 0...50 Hz



Temmesjoen ratasillan mittaukset © WSP

SFS-EN-1991-1-1 ”Yleiset kuormaotaksumat”

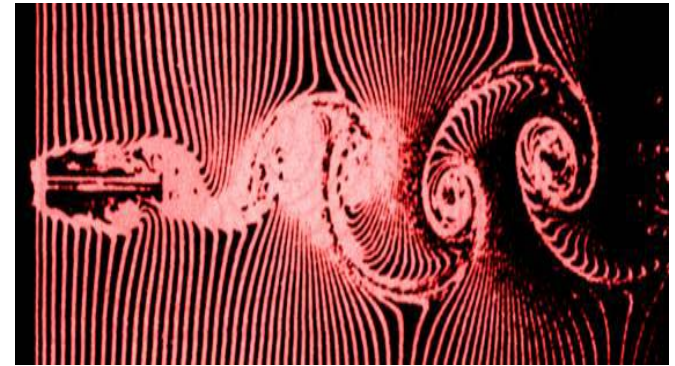
- Kohta 2.2 määrittelee kuormamallien laadintasäännöt
 - Kuormat vaikutus tulee tarkastella *valestationaareilla* malleilla (”staattisella mitoituksella”)
 - Kuormat *voivat* sisältää dynaamiset vaikutukset (esim. liikennekuorman sysäyksen) silloin kuin kuorma *ei ole resonanssissa* rakenteen kanssa
 - Jos *resonansseja* voi esiintyä tai kuormat aiheuttavat merkittäviä kiihtyvyyksiä tulee vaikutukset luokitella *dynaamisiksi* ja kuormien vaikutukset tarkastella dynaamisella analyysillä (” värähtelymitoituksella”)

SFS-EN-1991-1-6 ”Rakentamisen aikaiset kuormat”

- Dynaamiset tarkastelut tulee tehdä samoilla periaatteilla kuin valmiissakin silloissa
- Rakentamisen aikaiset laitteet yms. massat, tuulipinta-alat yms tulee ottaa huomioon

SFS-EN-1991-4 Yleiset kuormat. Osa 1-4 Tuulikuormat

- Liite F sisältää ohjeita rakenteen dynaamisten lähtötietoparametrien määrittämiseksi, joita voidaan hyvin soveltaa myös muihin kuin tuulivärähtelyihin
 - värähtelyn ominaistajuudet
 - värähtelyjen ominaismuodot
 - yleistetyt massat
 - vaimennuksen logaritminen dekrementti
 - Esim. värähtelytarkasteluissa keskeinen suunnitteluparametri; *alimman ominaismuodon* vaimennus (log. dekrementti):
 - $\delta = \delta_s + \delta_a + \delta_d$, missä rakenteellinen vaimennus* $\delta_s =$
 - 2% (hitsiliitoksiset terässillat)
 - 3% (pultatut terässillat)
 - 4% (liittorakenteiset sillat, esijännitetyt betonisillat ja betonisillat ilman halkeamia)
 - 10% (halkeilleet betonisillat)
 - 6...12% (puusillat)
- * köysikannatteisille silloille em. arvot kerrotaan kertoimella 0,75



...tuulikuormat

yksinkertaistettuja laskentamalleja silloille:

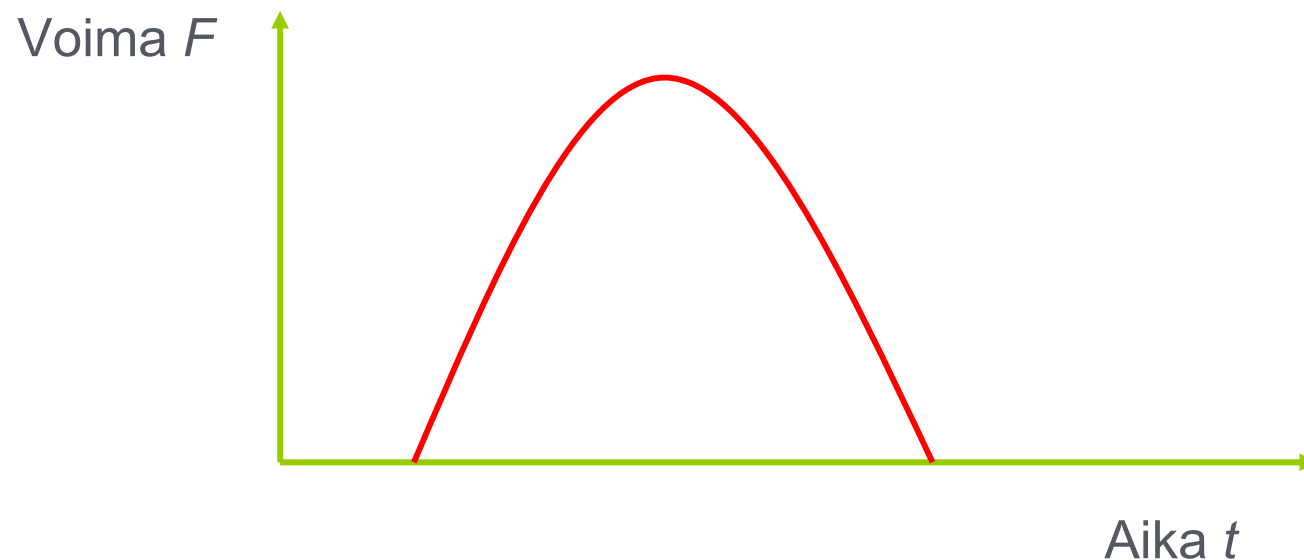
- tärinä (mm. suuret sillat jossa alhainen ominaistajuus < 2 Hz)
 - ainoastaan tuulen suuntainen värähtely ja aerodynaaminen vaimennus
 - satunnaisvärähtelyjen teoria perustana
- pyörreratailmiö (mm. terässillat ja pylonit koosta riippumatta)
 - herätevoimien korrelaatioon/satunnaisvärähtelyjen teoriaan perustuva malli
- laukkaaminen (mm. suuret pylonit rakennusvaiheessa)
 - poikkileikkauksen muotoon (aerodynaamiseen vaimennukseen) perustuva malli
- Tuulikuorman dynaamiset lisärasitukset otetaan huomioon rakennekertoimella $c_s c_d$

c_s = rakenteen koon redusointikerroin (≤ 1) liittyen puuskatuulen ominaisuuksiin

c_d = dynaaminen lisä (≥ 1), tavanomaisesti värähtelyherkille siltarakenteille 1,0...1,3

SFS-EN-1991-7 Yleiset kuormat. Osa 1-7 Onnettomuuskuormat

- Liite C sisältää ohjeita törmäyskuorman mallintamiseen dynaamisena impulssikuormana (ajoneuvojen, junien ja laivojen törmäykset)
- yleisesti dynaaminen mallintaminen auttaa ymmärtämään mitä rakenteessa tapahtuu törmäyksessä. Pariaatteessa voidaan käyttää hyväksi korkeiden siltapilareiden ja päällysrakenteen joustavuutta, ja mikäli törmäyksessä sallitaan osittainen vaurioituminen – myös materiaalien plastisoitumista



SFS-EN-1991-2 Siltojen liikennekuormat

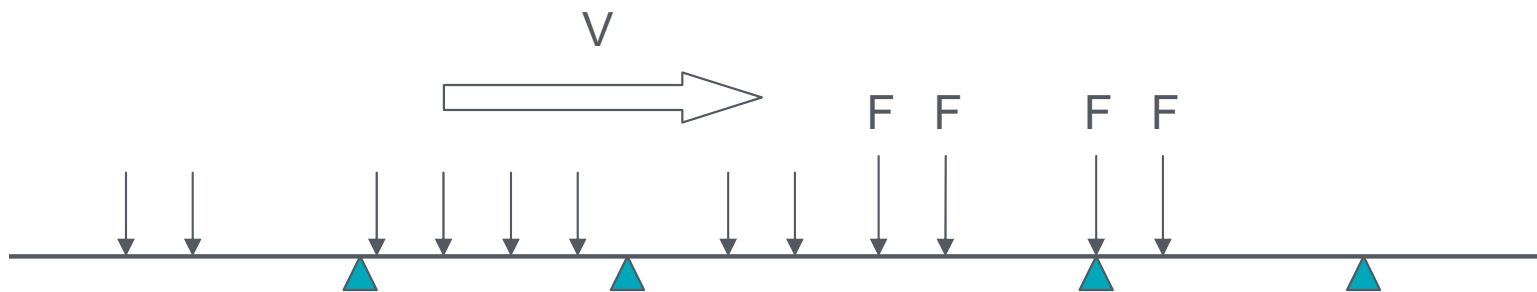
- Kohta 5.7 käsittelee kevyen liikenteen siltojen dynaamista mallinnusta:
 - sillan dynaamisista ominaisuuksista riippuen *tulee* määrittää rakenteen määräävät ominaistajuudet (pystysuuntainen taivutus, vaakasuuntainen taivutus ja vääntö) käyttäen soveltuvaa rakennemallia
 - todetaan että kävelijöitten aiheuttamat herätteet voivat olla resonanssissa:
 - 1..3 Hz pystysuunta
 - 0,5...1,5 Hz vaakasuunta
 - juoksijaryhmä (maks.) 3 Hz
 - kuormamallit ja kriteerit jätetään avoimiksi (kansallisen liitteen mukaan / projektikohtaisesti)

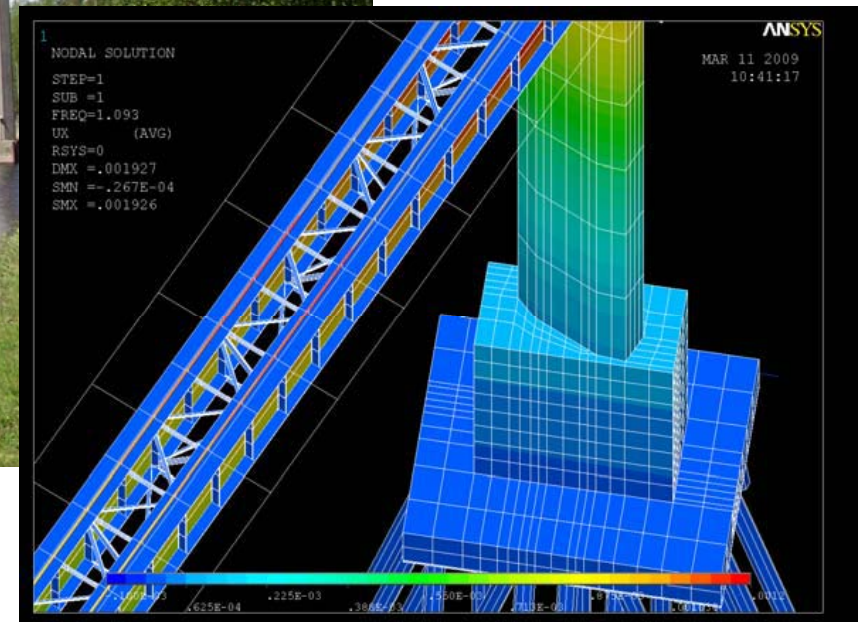
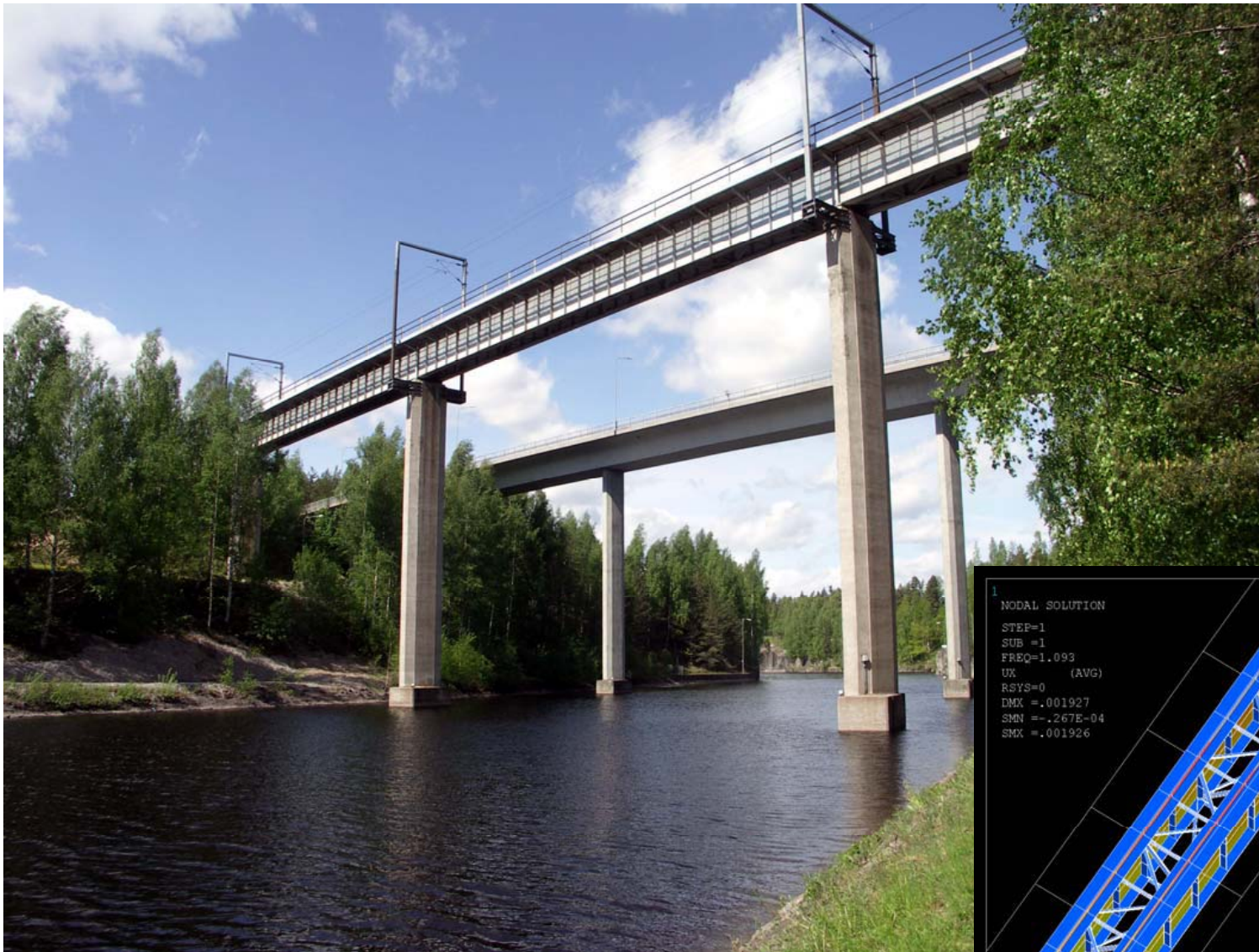
=> ei apua suunnitteluun silloin kuin ominaistajuuksia on alueella ≤ 5 Hz

...siltojen liikennekuormat

- Kohta 6.4 käsittelee *rautatiesiltojen* dynaamisesta mallinnusta (mukaan lukien resonanssien vaikutus)
- ainoastaan pystysuuntainen värähtely on mukana
 - suuremmat rautatiesillat värähtelevät huomattavasti myös vaakasuunnassa
- suunnitteluproseduuri:
 1. silta lasketaan staattisesti käyttäen dynaamisia lisiä
 2. tarkastetaan onko silta laskettava dynaamisesti kohdan 6.4 mukaisesti
 3. tarkastetaan ovatko kiihtyvyyden sallituissa rajoissa
 4. rasiusten osalta: jos silta on laskettava dynaamisesti, verrataan tulosta staattiseen menetelmään. Varmalla puolella olevaa käytetään
 5. tarkastetaan vaikuttaako värähtely väsytystarkasteluun

- ratasiltojen laskentaperiaate (kohta 6.4):
 - sillasta on laadittava dynaaminen rakennemalli (esim. FEM) kohdan ohjeiden mukaisesti
 - vaimennuksen arvona käytetään kyseisen kohdan taulukoituja arvoja
 - akselikuormat ovat *pistemäisiä staattisia kuormia* jotka voivat kulkea yli nopeusalueella 40 km/h... V_{maks} (eri nopeudet on tutkittava)
 - kun $L < 10$ m voidaan kuorman jakaantuminen kiskoista, pölkyistä ja tukikerroksesta ottaa huomioon
 - kun $L < 30$ m junan ja sillan yhteisvaikutus pienentää resonanssivastetta
 - tämä voidaan ottaa huomioon vaimennuksen lisänä $\Delta\zeta$
 - $\Delta\zeta = 0 \dots 0,66\%$ (= 0...4% logaritminen dekrementti)
 - laskettuja dynaamisia rasituksia kasvatetaan *radan ja kiskon epätäydellisyydet* huomioon ottavalla *dynaamisella lisällä φ''*





Saimaan kanavan ratasillan dynaaminen analyysi ja mittaukset © WSP

SFS-EN-1992-2 Betonisillat

- Kohta 113.2 käsittelee rakentamisen aikaisia kuormia
 - tasapainotetulla ulokemenetelmällä rakennettavan sillalle on tarkasteltava muottikaluston tippuminen dynaamisena kuormitustapauksena murtorajatilassa

EN 1993-1-11 Teräsrakenteet: ”rakenteet jossa jännitettyjä komponentteja” (= köysiä ja kannatintankoja)

- Kohta 2.3.6 määrittelee että:
 - vähintään yhden jännitetyn komponentin vaihto on tarkasteltava
 - minkä tahansa jännitetyn komponentin pettäminen (”esim. köyden katkeaminen”) tulee tarkastella onnettomuuskuormana

- kohta antaa yksinkertaisen staattisen mallin jolla tarkastelu voidaan tehdä:

$$Ed = 1,5Ed2 - Ed1$$

missä

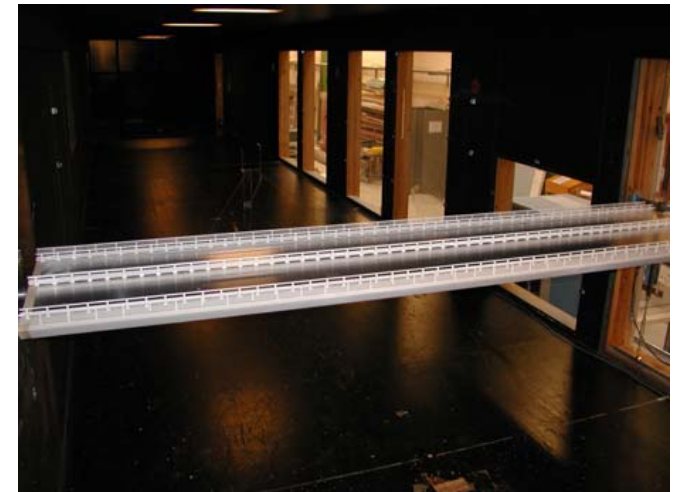
Ed1 = rasiustila kaikki köydet ehjänä

Ed2 = rasiustila ilman katkennutta köyttä

- Kohta 8 tunnistaa köysivärähtelyjen mekanismeja
 - Tuulen vaikutus
 - Tärinä
 - Pyörreratailmiö
 - Laukkaaminen
 - Heräte-tärinä
 - Tuuli-sade-köysi yhteisvaikutus
 - Toisten rakenneosien aiheuttama värähtely (köysi-pyloni/kansi)
 - Resonanssit
 - Köyden parametrinen heräte
 - Kohta 8.2 määrää että *köysikannatteisten rakenteiden* tuuli-sade-köysi yhteisvaikutusvärähtelyitä on tarkkailtava ja suunnittelussa on niihin varauduttava esim. seuraavista menetelmistä:
 - Köyden pinnan aerodynaaminen muotoilu
 - Vaimentimen asentaminen
 - Köysien välisten siteiden käyttö

SFS-EN-1993-2 Teräsrakenteiden suunnittelu: terässillat

- Kohta 10 tunnistaa *kokeellisten* menetelmien käytön suunnittelussa
 - värähtelyparametrit voidaan mitata todellisesta rakenteesta
- Kohta 10.3 tunnistaa *tuulitunnelikokeet* tuulen vaikutusmekanismien varmistamiseksi
 - kokeet tulee tehdä jos ei laskennallisesti tai referenssikohteista saada riittävää varmuutta sillan rakenteellisesta turvallisuudesta
 - rakentamisen aikana
 - valmiissa sillassa
 - testauksen sisältö vastaa pitkälti tuulikuorma-eurokoodia



Nevan vinoköysisillan tuulitunnelikokeet Tanskassa
© Institute Gibrostroy most St. Petersburg

SFS-EN-1995-2 Puusillat

- Kohta 7.3 määrittää käytettävät vaimennuskertoimet ”jos muuta ei ole verifioitu”:
 - $\zeta = 1 \%$ (= 6% logaritminen dekrementti) rakenteet ilman mekaanisia liitoksia
 - $\zeta = 1,5 \%$ (= 9% logaritminen dekrementti) rakenteet joissa mekaanisia liitoksia
- Liite B sisältää jalankulkijoiden aiheuttaman värähtelyn laskentamenetelmän yksiaukkoisille vapaasti tuetulle puiselle palkki- tai ristikkosillalle
 - * huom. kaavat dimensiosta riippuvia kg, m
 - pystysuuntainen värähtely, yksi *kävelijä*
 - $a_{\text{vert},1} = 200/(M \zeta)$ kun $f_{\text{vert}} \leq 2,5$ Hz
 - $a_{\text{vert},1} = 100/(M \zeta)$ kun $2,5 < f_{\text{vert}} \leq 5$ Hz, missä M = sillan kannattimen massa
 - pystysuuntainen värähtely, n kävelijää ($n = 13$ tai $0,6 \cdot$ kannen ala)
 - $a_{\text{vert},n} = 0,23 a_{\text{vert},1} n k_{\text{vert}}$
 - k_{vert} = taulukoitu kerroin ≤ 1 ; riippuen pystyvärähtelyn ominaistaajuudesta
 - pystysuuntainen värähtely, yksi *juoksija*
 - $a_{\text{vert},1} = 600/(M \zeta)$ kun $2,5 < f_{\text{vert}} \leq 3,5$ Hz

- Vaakasuuntainen värähtely, yksi *kävelijä*
 - $a_{\text{hor},1} = 50/(M \zeta)$ kun $0,5 < f_{\text{hor}} \leq 2,5$ Hz
- Vaakasuuntainen värähtely, n kävelijää ($n = 13$ tai $0,6 \cdot$ kannen ala)
 - $a_{\text{hor},1} = 0,18 a_{\text{hor},1} n k_{\text{hor}}$
 - $k_{\text{hor}} =$ taulukoitu kerroin ≤ 1 ; riippuen vaakavärähtelyn ominaistaajuudesta

SFS-EN-1998-1 ”rakenteiden suunnittelu maanjäristyksille”

- yleiset määräykset, kuormat ja rakennusten määräykset
- standardi määrittää elastiset *vastespektrit* rakenneanalyysiin
- elastinen vastespektri = yhden vapausasteen lineaarisen värähtelijän *vaste* (esim. maksimikiihtyvyys) todellisessa (yleisesti lyhytkestoisessa) maanjäristyksessä
 - vastespektri annetaan aina tietylle vaimennuksen arvolle, sekä todellisen rakenteen määräävälle taajuusalueelle
 - voidaan määrittää *kokeellisesti* rakentamalla joukko em. värähtelijöitä ja mittaamalla niillä todellisia maanjäristyksiä
- vastespektri = ”maanjäristyksen kuormamäärittely”
 - sillan perustukset värähtelevät synkronissa maan kanssa

SFS-EN-1998-2 ”rakenteiden suunnittelu maanjärsityksille - sillat”

(standardi *ei* kata riippusilloja, puusilloja, muurattuja siltoja, avattavia siltoja tai kelluvia siltoja)

- yleiset periaatteet: murtorajatila:
 - silta saa ei romahtaa maanjäristyksessä: sen on säilytettävä eheydensä ja sillä on oltava riittävä ”jäännös” kuorman kantokyky
 - plastisia niveliä saa muodostua pilareihin
 - sillan kannen primääri kantavat rakenteet tulee säilyä ehjinä
 - jos silta sijaitsee seismisesti aktiivisella alueella (maanjäristyksiä esiintyy useasti sillan käyttöiän aikana), tulee sen suunnittelussa ”pyrkiä” vauriokestoisuuteen, pelastusliikenteen mahdollistamiseen, helppoon korjaamiseen yms
- yleiset periaatteet: käyttörajatila
 - useasti toistuvien maanjäristysten voimakkuuksilla ainoastaan sillan sekundääri-rakenteet sekä värähtelyn dissipaatorakenteet saavat vaurioitua

- rakenneanalyysin perusteeksi määritellään elastinen vastespektrianalyysi
- maanjäristyksessä oletettava rakenteen vaimennus on moninkertainen muihin analyyseihin nähden (koska plastisten nivelien muodostuminen on sallittua):
 - $\zeta = 2 \%$ (= 12% logaritminen dekrementti) hitsatut terässillat
 - $\zeta = 5 \%$ (= 31% logaritminen dekrementti) betonisillat

- annetuista vastespektreistä lasketaan todellisen sillan vaste mieluiten 3-dimensioisella FEM-rakennemallilla *ominaismuotoanalyysiä* apuna käyttäen
 - rakenne mallinnetaan yhden vapausasteen värähtelijöillä
 - rasitukset ja siirtymätila kombinoidaan tietyillä yhdistelysäänöillä
- eri rakenneosien kimmoisia rasituksia redusoidaan kertoimilla, jotka ottavat huomioon todellisen ei-kimmoisan toiminnan
- Kohta 4.2.4 sallii epälineaarisen aikahistoria-analyysin käytön
 - menetelmää on käytettävä rinnakkain elastisen vastespektrianalyysin kanssa
 - rasituksia pienentäviä vaikutuksia voidaan käyttää vain tiettyihin detaljeihin.

Yhteenveto

- Eurokoodi ”tunnistaa” useita rakenteiden värähtelymitoitukseen liittyviä erikoiskysymyksiä
 - asiantuntijalle tämä mahdollistaa viittaamiseen ko. ilmiöihin ja tarvittaessa perustella lisätarkastelujen tarvetta
 - rakennesuunnittelijalle ja opettajille nämä kenties toimivat ”jatko-opintojen” innoittajana
- Eurokoodi sisältää joitain kiihtyvyyden raja-arvoja joihin rakennemallin tai todellisen sillan värähtelyvasteita voi verrata:
 - kevyen liikenteen sillat
 - rautatiesillat

- Eurokoodi sisältää vain vähän siltojen värähtelyille käyttökelpoisia laskentarutiineja
 - yleisiä laskentaperusteita ja analyysin vaatimuksia on annettu
 - itse laskentaan tarvitaan tyypillisesti yleiskäyttöinen FEM-ohjelma dynamiikkaoptiolla
 - on annettu määritelmiä ohjeita milloin dynamiikkatarkasteluita *ei* tarvitse tehdä
 - laskentarutiinien saaminen *kansallisiin liitteisiin* onnistuu periaatteessa vain jos maassa sattuu olemaan kyseisen alan erikoisasiantuntijoita. Silloinkin riskinä on että malleista tulee testaamattomia ja liian vaikeaselkoisia
- yksityiskohtaisimmat mitoitusohjeet liittyvät *perinteisiin* dynamiikkatarkasteluihin
 - tuuli (148 sivua)
 - maanjäristys (231 + 148 sivua)
- myös rautatiesiltojen ohjeistus on kattava

- Eurokoodin dynamiikkatarkastelut ovat käyttäjän kannalta
 - osittain viimeistelemättömiä – esim:
 - vaimennusotaksumia annetaan 4 eri niteessä käyttäen sekaisin logaritmista dekrementtiä δ ($\approx 2\pi\zeta$) ja vaimennuskerrointa (ζ). Ainoastaan tuulinormi tunnistaa aerodynaamisen vaimennuksen ja ulkoisten vaimentimen vaikutuksen mutta arvot koskevat vain alinta ominaismuotoa
 - vaikeampia normeja ei ole ”viitsitty” suomentaa
 - sovellusalueeltaan häilyviä. Dynamiikkakysymykset esiintyvät tyypillisesti erikoisrakenteisissa silloissa. Laskentarutiinit ovat useasti ”ohjeellisina liitteinä”
 - yksityiskohtaisuudeltaan vaihtelevia. Jotkin rutiinit edellyttävät viikkojen laskentatyön erikoisohjelmistoilla tai usean kuukauden kestoisia tuulitunnelikokeita ja toiset asiat kuitataan muutamalla kaavalla tai viitteellä Eurokoodin toisiin osiin
- Haasteistaan huolimatta Eurokoodia voidaan pitää askeleena kohti värähtelymitoitukseltaan paremmin hallittuja siltarakenteita.