



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

Tacoma Narrows -sillan sortuminen

Jari Kauhanen

KONETEKNIikka

Kandidaatintyö

Toukokuu 2022

TIIVISTELMÄ

Tacoma Narrows -sillan sortuminen

Jari Kauhanen

Oulun yliopisto, Konetekniikan tutkinto-ohjelma

Kandidaatintyö 2022, 28 s.

Työn ohjaaja yliopistolla: Hannu Koivurova

Tämän kandidaatintyön päätavoitteena oli etsiä syitä Tacoma Narrows -sillan sortumiselle kirjallisuuskatsauksella. Työssä esitellään lukijalle Tacoma Narrows -sillan historiaa ja riippusiltoja yleisesti sekä kaksi yksinkertaista laskennallista mallia sillan sortumiselle. Työssä havainnollistetaan kuvin sortumisen aiheuttaneen oskillaation alkaminen ja pyörrevirtojen syntyminen. Laskennallisia malleja verrataan sillasta tehtyyn tuulitunnelidataan. Ensimmäinen tapauksesta tehty laskennallinen malli ei vastaa tuulitunnelidataa korkeammilla tuulen nopeuksilla mutta tästä eteenpäin viety malli vastaa dataa tarkemmin.

Tacoma Narrows -silta valmistui heinäkuussa 1940 ja sortui saman vuoden marraskuussa kestettyään voimakasta oskillaatiota lähes tunnin. Sillan liian heiveröinen, I-palkein jäykistetty kansi, oli hyvin altis värähtelyille ja se värähtelikin jo ennen onnettomuutta välillä voimakkaastikin. Värähtelyn amplitudi oli ennen sortumista korkeimmillaan jopa 1.5 metriä. Silta sortui lopulta marraskuun 7. päivänä 1940 pyörrevirtojen aiheuttaman voimakkaan vääntövärihdysliikkeen seurauksena. Kannen poikkileikkauksen kantikas muoto edesauttoi pyörrevirtojen syntymistä ja sillassa valmiiksi ollut pystysuuntainen värähtely muutti muotoaan vääntövärihtelyyn. Pyörrevirroista aiheutuva kannen normaalin suuntainen voima vaikutti kanteen vääntömomentin tavoin saaden sen vääntyilemään.

Sortuminen laittoi Yhdysvalloissa pitkien riippusiltojen rakentamisen tauolle kymmeneksi vuodeksi ja sortunut Tacoma Narrows -silta korvattiin jäykistetyimmällä sillalla vuonna 1950. Sortumisen jälkeen pitkien jänneväliden siltojen tuulianalyysit otettiin laajemmin käyttöön ja niille luotiin teoriapohja. Tapaus on vieläkin insinöörien mielenkiinnon kohteena ja siitä esitetään yhä tarkempia malleja.

Asiasanat: Tacoma Narrows, silta, sortuminen

ABSTRACT

The collapse of the Tacoma Narrows Bridge

Jari Kauhanen

University of Oulu, Degree Programme of Mechanical Engineering

Bachelor's thesis 2022, 28 pp.

Supervisor at the university: Hannu Koivurova

The main objective of this thesis was to investigate the reasons behind the collapse of the Tacoma Narrows Bridge with a literature review. The history of the Tacoma Narrows Bridge, suspension bridges in general and two simple computational models of the collapse are introduced. The beginning of oscillation and vortices which caused the collapse are demonstrated via pictures. Computational models are compared to the wind tunnel data of the bridge. First computational model did not match the wind tunnel data at the higher wind speeds, but the more advanced model matches the data more accurately.

The construction of the Tacoma Narrows Bridge was completed in July 1940, and it collapsed in November of the same year after withstanding powerful oscillations for nearly an hour. The I-beam stiffened deck of the bridge was too weak and exposed for oscillations. Before collapsing, the deck suffered hard oscillations occasionally and the amplitude of oscillations was up to 1.5 meters. The bridge finally collapsed after powerful torsional oscillation caused by vortices, on 7th November 1940. Cross-section of the deck was very square which enabled the vortices to begin. Up-down oscillation changed to torsional oscillation. Direction of force generated by vortices was perpendicular to the deck, so it effected like torque. That torque forced the deck to twist.

The collapsing caused construction works of long suspension bridges to pause for ten years. The collapsed Tacoma Narrows Bridge was replaced with more stiffened bridge in 1950. After collapsing, theory base was created for wind tunnel tests of long span bridges, and it was brought into use. The case is still area of interest of engineers and more accurate models are still introduced.

Keywords: Tacoma Narrows, bridge, collapse

ALKUSANAT

Aloitin kandidaatintyön hyvissä ajoin joulukuussa 2021 ja sain sen puserrettua kasaan seuraavana toukokuuna 2022. Kirjallisuuskatsauksen tekeminen Tacoma Narrows -sillan sortumisesta osoittautuikin yllättävän haastavaksi, sillä tarkemmat tutkimukset olivat hyvinkin pitkälle vietyjä ja teoreettisia.

Haluan kiittää kandidaatintyön ohjaajaani yliopistonlehtori Hannu Koivurovaa avusta aiheen valinnassa ja neuvoista työn kirjoittamisessa. Toivottavasti lukijalle selviää tämän työn luettuaan hieman tämän mielenkiintoisen ja monille tutun ilmiön tapahtumien kulusta. Mikäli aihe ei ole kovin tuttu, suosittelen katsomaan Internetistä videon sillan sortumisesta, sillä itsekkin kiinnostuin aiheesta sen nähtyäni.

Oulu, 16.5.2022

Jari Kauhanen
Jari Kauhanen

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

SISÄLLYSLUETTELO

MERKINNÄT JA LYHENTEET

1 Johdanto	7
2 Tacoma Narrows -sillan historia	8
2.1 Sillan rakentaminen	8
2.2 Sillan sortuminen	8
3 Riippusillat	10
3.1 Yleistä riippusilloista	10
3.2 Riippusiltojen kansirakenne	11
4 Tacoma Narrows -sillan sortumisen syyt	13
4.1 Rakenteen heikkous sortuman syynä	13
4.2 Oskillaatiot ennen sortumista	13
4.3 Sortumisen aiheuttanut oskillaatio	14
4.4 Pyörrevirtaukset sillan kannella	14
4.5 Teoriat pyörrevirtausten syntyisestä ja vaikutuksesta	15
4.5.1 Allan Larsenin esitys	15
4.5.2 Daniel Greenin ja William G. Unruhin esitys	18
5 Sortumisesta opittua	23
5.1 Sortumisen jälkeen	23
5.2 Tuulianalyysit	23
6 Yhteenveto	24
Lähteet	25

MERKINNÄT JA LYHENTEET

A	amplitudi
B	leveys
F	voima
T	jaksonaika
t	aika
M	vääntömomentti
U	tuulen nopeus
U_c	kriittinen tuulenopeus
u	tuulen nopeuden suhde kriittiseen tuulen nopeuteen
α	vääntökulma

1 JOHDANTO

Valmistuessaan jänneväliltään maailman kolmanneksi pisin silta, Tacoma Narrows, sortui Yhdysvalloissa 1940 tuulen vaikutuksessa vain muutama kuukausi valmistumisensa jälkeen. Tapaus ei tullut aivan yllättäen, sillä sillan kansirakenteen heikkoudesta oli ennakkoon varoiteltu ja kannen oli huomattu huojuvan tuulessa silminnähden, mistä silta saikin jo alussa lempinimekseen ”Galloping Gertie”. Näin vanhasta tapauksesta ainutlaatuisen ja kiinnostavan on tehnyt siitä taltioitu video, jossa näkyy sillan voimakkaat oskillaatiot ennen sortumista. Video on jopa toiminut todisteena ilmiöille, jotka ovat auttaneet sortumisen syyn selvittämisessä.

Tämän kandidaatin työn tavoitteena on selvittää sortumisen syitä kirjallisuuskatsauksella. Sortumisen syitä on selvitetty aina sortumisvuodesta nykypäiviin asti. Aluksi työssä käydään läpi Tacoma Narrows -sillan historiaa ja riippusiltoja sekä niiden kansirakenteita yleisesti, minkä jälkeen paneudutaan sortumisen syihin. Työ on rajattu kahteen yksikertaiseen malliin sortumisesta. Työssä esitellään ensimmäinen tapauksesta luotu laskennallinen malli, jonka on tehnyt tekniikan tohtori Allan Larsen sekä tästä pidemmälle viety Danien Greenin ja William G. Unruhin malli. Malleja verrataan sillasta luotuun tuulitunnelidataan. Lopuksi käydään vielä läpi, miten sortuminen vaikutti silloin yhdysvaltalaiseen siltojen rakentamiseen ja mitä vaikutuksia sillä on vielä tämän päivän siltojen suunnittelussa.

2 TACOMA NARROWS -SILLAN HISTORIA

2.1 Sillan rakentaminen

Syyskuun 27. päivänä 1938 rakennustyöt aloitettiin Washingtonin osavaltioon Tacoman kaupunkiin Puget Sound -lahden ylittävään Tacoma Narrows -siltaan, joka avattiin liikenteelle heinäkuun 1. päivänä 1940. Silta oli malliltaan riippusilta (suspension bridge) ja valmistuessaan maailman kolmanneksi pisin 853 metrin jänneväliällään. Nämä kaksi pidemmällä jänneväliällä olevaa siltaa sijaitsivat myös Yhdysvalloissa; San Franciscossa Golden Gate -silta ja New Yorkissa George Washington -silta, joista molemmat oli rakennettu 1930-luvulla ja malliltaan riippusiltoja. Tacoma Narrows maksoi 6 miljoonaa dollaria, ja siinä oli kaksi kaistaa ja laidoilla kapeat kevyen liikenteen väylät. Kansirakenteen poikkileikkauksen korkeus oli vain 1,3 m ja leveys 11,9 m, mikä oli tämän kokoiseen siltaan liian vähän. (Virola 2002; Adekanye & Washington 2018)

Silta sai lempinimekseen ”Galloping Gertie” huojuessaan jo alun alkaen silmin nähden, mikä houkutteli kiinnostuneita pitkienkin matkojen päästä katsomaan aaltoilevaa siltaa. Lisäksi sillan rakennusaikana työntekijöiden kerrotaan tulleen merisairaiksi sillan kansirakenteen huojunnasta (Virola 2002). Tämä enteili jo pahaa, ja silta romahtikin vain muutama kuukausi rakennustöiden valmiiksi saamisen jälkeen.

2.2 Sillan sortuminen

Sillan kohtaloksi koitui marraskuun 7. päivä vuonna 1940, kun se sortui tuulessa, jonka nopeus oli 19 m/s. Noin klo. 10 aikoihin aamulla silta joutui tuulen vaikutuksesta voimakkaaseen vääntöväärähdysliikkeeseen, joka sai aikaan jopa noin 4,3 metrin värähdysamplitudin. Tämä tuhosi sillan lopulta noin tunnin kuluttua värähtelyn alkamisesta. (Kiviluoma 1997; Chen & Duan 2014 s. 364; Olson et al. 2015)

Sortumisessa sillan pääjäänne romahti kahdessa osassa Puget Sound -lahden pohjaan. Silta ehdittiin sulkea liikenteeltä, joten henkilövahingoilta vältyttiin. Tosin, erään reportterin sillalle jättämään autoon jäi koira sisälle, joka tipahti veteen sillan sortuessa. Tapahtuma on tullut hyvin tunnetuksi siitä taltioidun videon ansiosta, jonka monet ovat

näht. Videolle saatiin taltioitua sillan voimakas vääntöväärähdysliike sekä romahtaminen (Virola 2002; Olson et al. 2015)

3 RIIPPUSILLAT

3.1 Yleistä riippusilloista

Riippusillat ovat vinoköysisiltojen ohella toinen vedettyihin siltatyyppeihin kuuluvista siltamalleista, ja ne sekoittuvatkin helposti keskenään samankaltaisuutensa vuoksi. Riippusillan kansirakenteen kannatus tapahtuu vetotangoilla (kuvassa 1 valaistuin), jotka ovat kiinni pyloneista roikkuvasta riippuköydestä. (Kuva 1.) Riippuköysien päät on ankkuroitu maahan sillan molemmista päistä päätyankkureilla. Vinoköysisillassa köydet ovat suoraan kiinni kansirakenteessa. (Kuva 2.) Riippusilloja ja vinoköysisilloja rakennetaan paikkoihin, joissa on tarve pitkälle jänneväliille. (Pulkinen 2018, s. 56–57)



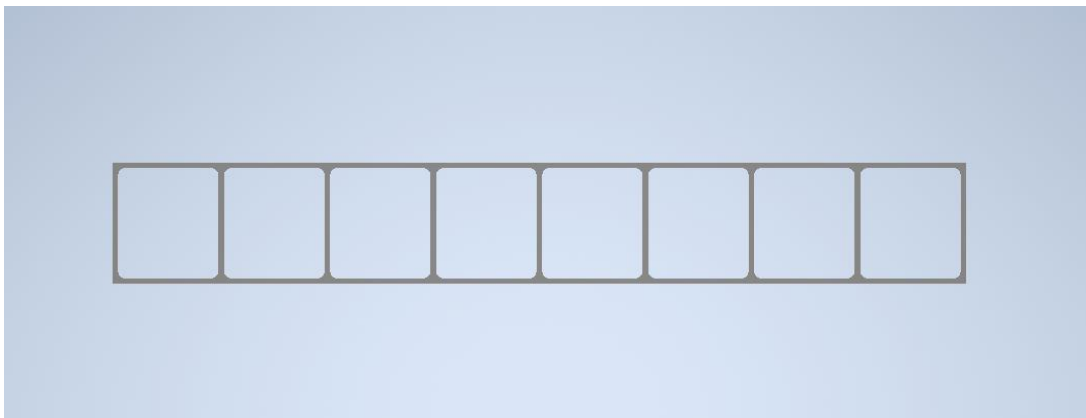
Kuva 1. San Francisco–Oakland Bay Bridge -riippusilta (Wikimedia Commons 2017)



Kuva 2. Jilu Bridge -vinoköysisilta Taiwanissa (Wikimedia Commons 2014)

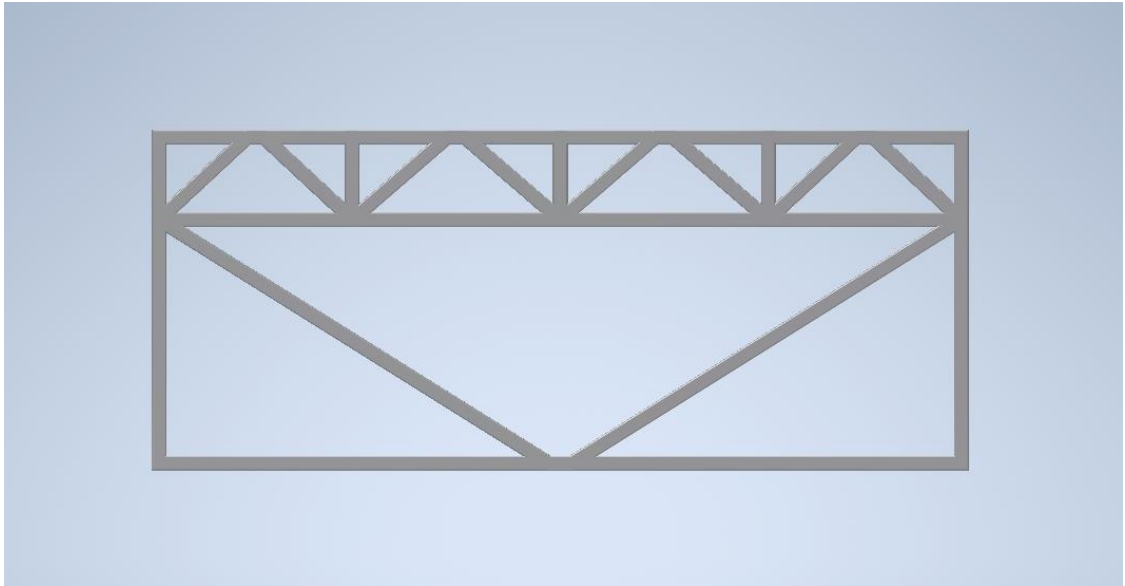
3.2 Riippusiltojen kansirakenne

Sillan kansirakenteet ovat liikennöityjä tasorakenteita, jossa liikenne kulkee sillan pituussuuntaan (Pulkinen 2018, s. 269.) Riippusiltojen kansirakenteen jäykistys kulkee pituussuunnassa sillan kannen liikennöidyn osan alla ja sen tarkoituksena on kantatella liikenteestä sekä luonnonilmiöistä aiheutuvat kuormitukset. Tacoma Narrows –sillan sortumisessa esille nousee kannen heikkous. Siinä oli I-palkein jäykistetty kansi (havainnollistava kuva 3), joka on yksi kolmesta yleisimmistä kannen jäykistysmenetelmistä. (Chen & Duan 2014, s. 364–366)



Kuva 3. I-palkki jäykistys poikkileikkaus, (mukaillen Chen & Duan 2014, s. 370)

Toinen Tacoma Narrows -silta rakennettiin teräsristikolla jäykistetyllä kansirakenteella, joka oli huomattavasti edellistä jäykempi. Kuvassa 4 on havainnollistettu teräsristikko jäykisteen rakenne. (Chen & Duan 2014, s. 364.)



Kuva 4. Teräsristikko jäykistysen poikkileikkaus, (mukaillen Chen & Duan 2014, s. 370)

4 TACOMA NARROWS -SILLAN SORTUMISEN SYYT

4.1 Rakenteen heikkous sortuman syynä

Pienemmän liikennekapasiteetin, yleensä kaksikaistaisten, riippusiltojen rakennetta oli 1930-luvun lopulta lähtien heikennetty ja silloista oli pyritty tekemään ”siroja” ennen Tacoma Narrows -sillan sortumista (Petroski 2018). Heikentäminen oli tässä vaiheessa jo niin pitkällä, että sillan kansirakenne heilui silminnähden pienemmässäkin tuulessa ja autojen ajaessa yli. Kansirakenteen jäykistyspalkin vähäistä vääntöjäykkyyttä ja poikkileikkauksen laatikkomaista ja epävirtaviivaista muotoa, johon tuuli pääsee helposti vaikuttamaan, pidetään keskeisinä syinä sortumiseen. (Kiviluoma 1997; Virola 2002)

Mainittakoon, että eräs insinööri oli varoitellut jo suunnitteluvaiheessa kannen liiallisesta kapeudesta. Menestyneen suunnittelukonsultin ylimielisyydestä ja vaikutuksesta johtuen varoituksia ei kuitenkaan kuunneltu. Tacoma Narrows on edelleenkin suurin silta, joka on sortunut tuulessa (Petroski 2018)

4.2 Oskillaatiot ennen sortumista

Liikenteelle avaamisen jälkeen sillassa havaittiin puhtaasti pystysuuntaisia oskillaatioita ilman vääntöliikettä. Oskillaatiot olivat verrattain matalan taajuuden, noin 0,13 Hertsin solmottomasta jopa 0,5 Hertsin seitsemän solmuiseen oskillaatioon asti. Värähdysamplitudit olivat suurimmillaan 1,5 metrin luokkaa. (McKenna 2014)

Noin 16 m/s tuulessa silta pysyi lähes staattisena, mutta heikossa, noin 1,3 m/s tuulessa havaittiin jopa 1,2 metrin amplitudista oskillaatiota. Silta kesti kovimmillaan 21 m/s tuulen. (McKenna 2014)

Näitä oskillaatiota ei kuitenkaan pidetty riittävän vakavina vaan odotettiin, että pienillä muutoksilla ne saataisiin kitkettyä pois. Lokakuussa 1940 sillan sivujänteisiin kerettiin tehdä muutoksia, joilla niiden värähtelyä saatiin vähennettyä. Muutostyöt pääjäljenteeseen oli tilattu, mutta silta kerkesi romahtaa ennen niiden aloittamista. (McKenna 2014)

4.3 Sortumisen aiheuttanut oskillaatio

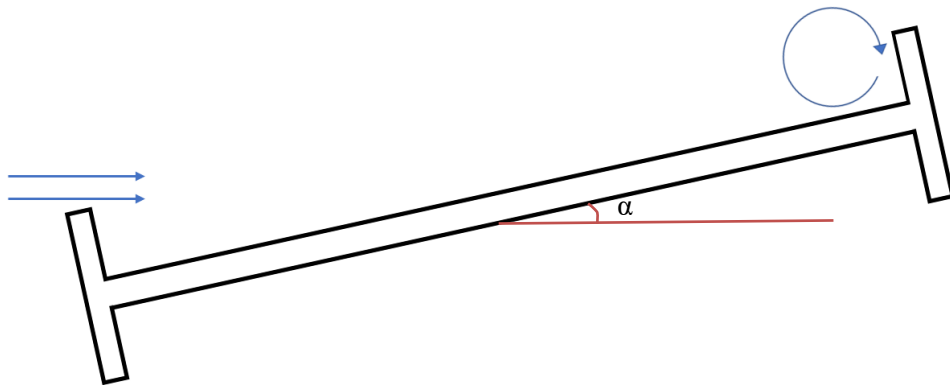
Marraskuun 7. päivän aamuna silta alkoi värähdellä pystysuunnassa normaalia kovemmin 19 m/s tuulessa. Liikettä on kuvailtu kahdeksan tai yhdeksän solmuiseksi oskillaatioksi 1,2–1,5 metrin amplitudilla ja aiemmin koettua korkeammalla taajuudella. Yhtäkkiä oskillaatio vaihtui voimakkaaseen vääntövärähdysliikkeeseen, jossa sillan pääjäljenteellä kansi vääntyili noin 45 astetta molempiin suuntiin 4,3 metrin amplitudilla vaihdellen solmuttomasta yksisolmuiseen liikkeeseen. Muutostöillä vahvistetuissa sivujäljenteissä värähtely pysyi vaimeampana siihen asti, kunnes pääjäljente romahti veteen noin tunnin kuluttua värähtelyn alkamisesta. (McKenna 2014)

Voimakkaan vääntöliikkeen alkamisesta on esitetty useampia teorioita. Ensimmäiset selitykset painottuivat sillan rakenteellisiin ongelmiin tai tuulen värähdystaajuuden aiheuttamasta resonanssista sillan rakenteisiin. Pidemmälle vietyt tutkielmat ovat osoittaneet mahdollisuuden pyörrevirtauksien syntymisestä sillan muodosta ja tuulen vaikutuskulmasta sillan rakenteisiin johtuen. (Arioli & Gazzola 2015)

4.4 Pyörrevirtaukset sillan kannella

Yhtenä tärkeimpänä todisteena syntyneille pyörrevirtauksille on sillan sortumisesta taltioitu video. Siinä näkyy hajoavasta kannesta irtoavan betonipölyn lennähtävän pyörrevirtauksen muodossa kannen yli leveysuunnassa. Pyörrevirtauksen liikkeelle ja sillan vääntyilylle löytyi yhdistävä tekijä; Se laita, jossa oli pyörrevirtaus, oli vääntöliikkeessä korkeammalla. (Green & Unruh 2006)

Kuvassa 5 on havainnollistettu pyörrevirtauksen aikaansaama vääntöliike. Virtauksen ollessa oikealla laidalla on vääntöliike ääriasennossaan vastapäivään.



Kuva 5. Pyörrevirtauksen vaikutus

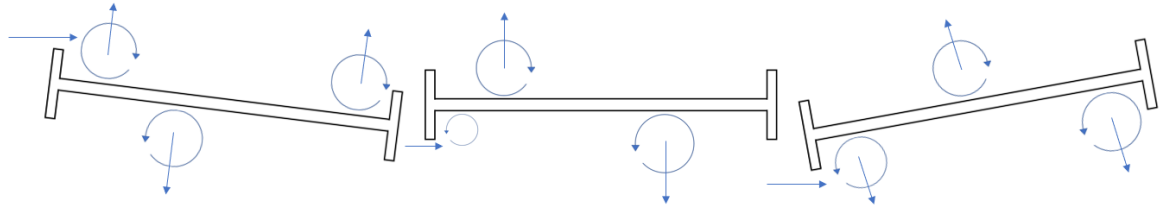
4.5 Teoriat pyörrevirtausten syntymisestä ja vaikutuksesta

Kannen poikkileikkauksen jo valmiiksi vääntöliikkeelle altis kantikas ja H-mallinen muoto edesauttoi pyörrevirtausten muodostumista. Tutkimuksissa huomattiin, että kannen ylä- ja alapinnoille muodostui säännöllisesti pyörrevirtoja. (Green & Unruh 2006)

4.5.1 Allan Larsenin esitys

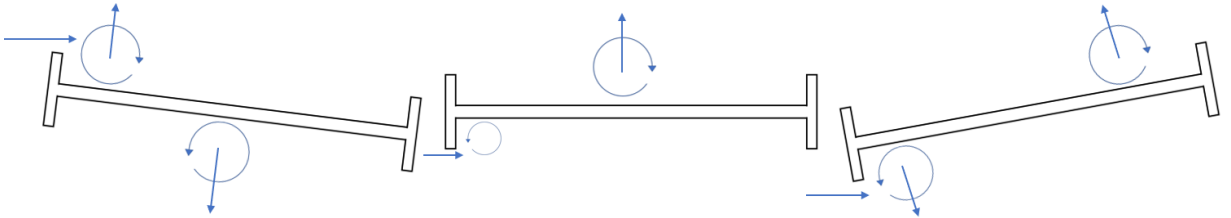
Tekniikan tohtorin Allan Larsenin muodostamissa malleissa pyörrevirtausten liikkeistä esiteltiin kolme erilaista tapausta. Tapauksissa silta värähtelee valmiiksi omalla resonanssitaajuudellaan (0.2 Hz) ja pyörrevirtaus muodostuu tuulen yläpuoleiselle sivulle kannen vääntökulman, α :n, ollessa 0. Pyörrevirtauksessa syntyy matalapaineinen keskus, joka imee sitä kannen pintaa vasten. Joka kerta kun kansi vääntöliikkeessään ohittaa vaakatason, syntyy uusi pyörrevirtaus, joka liikuu kannella aiheuttaen aikariippuvaisen momentin. (Green & Unruh 2006)

Tapaus 1: Alle kriittisen tuulen nopeuden, pyörrevirtaus ei ehdi ylittää kannen keskikohtaa puolikkaan periodin aikana (kuva 6). Tällöin pyörrevirtausten aiheuttama negatiivinen nettotyö vaimentaa oskillaatiota. (Green & Unruh 2006)



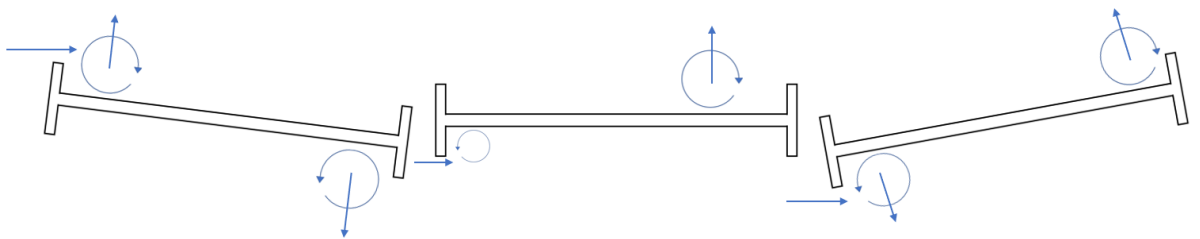
Kuva 6. Tapaus 1, (mukaiillen Green & Unruh 2006)

Tapaus 2: Kriittisellä tuulen nopeudella pyörrevirtaus ylittää kannen keskikohdan tarkalleen puolikkaan periodin aikana (kuva 7). Tällöin aiheutettu nettotyö on 0. (Green & Unruh 2006)



Kuva 7. Tapaus 2, (mukaiillen Green & Unruh 2006)

Tapaus 3: Yli kriittisen tuulen nopeuden, pyörrevirtaus ehtii periodin aikana ylittää kannen keskikohdan (kuva 8). Tämä aiheuttaa kanteen positiivisen nettotyön, mikä lisää oskillaatiota. (Green & Unruh 2006)



Kuva 8. Tapaus 3, (mukaiillen Green & Unruh 2006)

Sillan värähdellessä omalla resonanssitaajuudellaan värähtelyn jaksonaika on 5 sekuntia. Larsenin havainnoissa pyörrevirtauksen kulkiessa kannen yli 3,6–4 (t_d) sekunnin ajassa, oskillaatio alkaa voimistua. Kannen vääntökulmaa (α) ja sen derivaattaa kuvataan yhtälöillä

$$\alpha = A \sin \frac{2\pi t}{T}, \quad (1)$$

$$\dot{\alpha} = \frac{A2\pi t}{T} \cos \frac{2\pi t}{T}, \quad (2)$$

missä A on oskillaation amplitudi, T jaksonaika ja t pyörrevirran viettämä aika kannella. Pyörrevirran poikkileikkauksella viettämästä ajasta riippuvalle vääntömomentille pätee kaava

$$M = \frac{FB}{2} \left(1 - \frac{t}{2}\right), \quad (3)$$

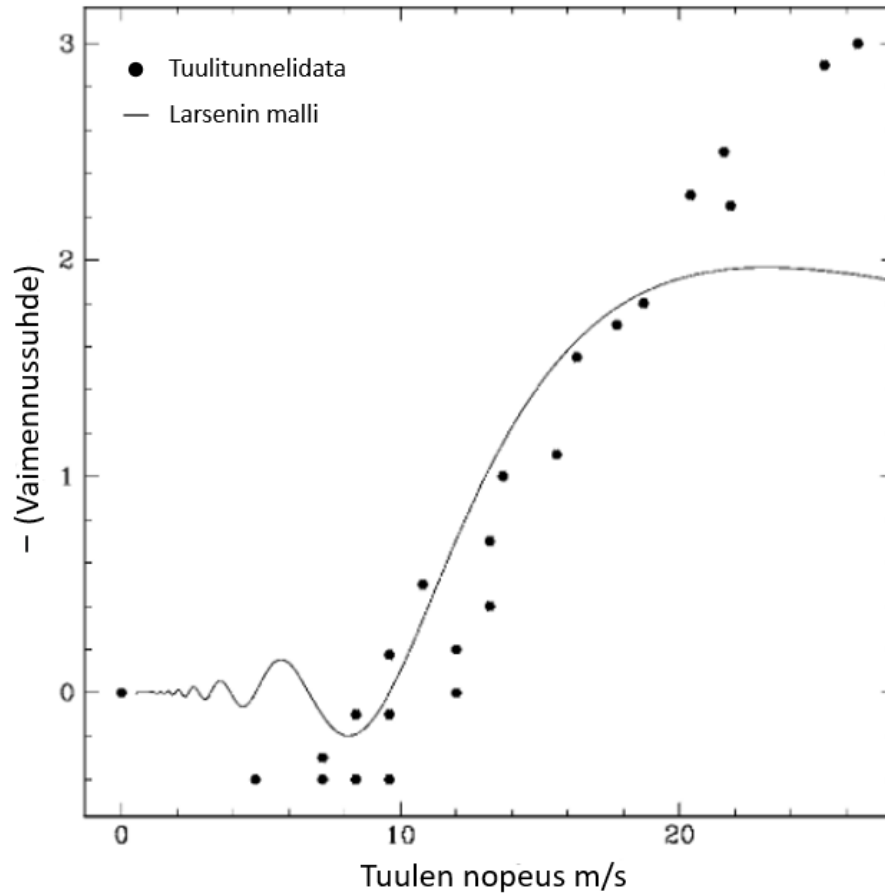
missä F on pyörrevirran aiheuttama voima, B sillan poikkileikkauksen leveys (11,9 m) ja t pyörrevirran viettämä aika sillan kannella. (Green & Unruh 2006)

Yhdistämällä (2) ja (3) saadaan kanteen vaikuttanut työ yhden periodin aikana yhtälöllä

$$\int_0^{t_d} (M\dot{\alpha}) dt = \frac{FB}{2} A \left[\sin\left(\frac{2\pi}{u}\right) + \frac{u}{\pi} \left(\cos\left(\frac{2\pi}{u}\right) - 1 \right) \right], \quad (4)$$

missä u on tuulennopeuden (U) suhde kriittiseen tuulennopeuteen (19 m/s) $u = \frac{U}{U_c}$. Bernoullin yhtälöön perustuen pyörrevirran aiheuttaman voiman F suuruus riippuu tuulennopeudesta $F = U^2$. (Green & Unruh 2006)

Larsenin teoria jätti muutaman kysymyksen auki. Muun muassa miten pyörrevirtaukset syntyivät ja liikkuivat. Larsenin teorian kaavan (4) avulla on kuitenkin pystytty muodostamaan negatiivinen vaimennussuhde tuulen nopeuden funktiona (kuva 9). (Green & Unruh 2006)



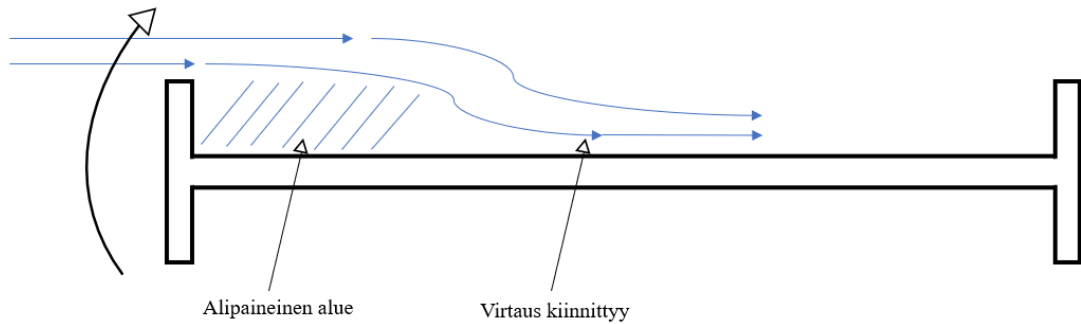
Kuva 9. Larsenin malli ja tuulitunnelidata (mukaiillen, Green & Unruh 2006)

Larsenin mallissa käyrä seuraa tuulitunnelidatan arvoja tuulennopeuden ollessa alle kriittisen nopeuden. Hajontaa esiintyy korkeammilla tuulennopeuksilla. Tuulitunnelidata on peräisin Othmari H. Ammannin, Theodore von Kármánin ja Glenn B. Woodruffin tekemästä raportista. (Green & Unruh 2006)

4.5.2 Daniel Greenin ja William G. Unruhin esitys

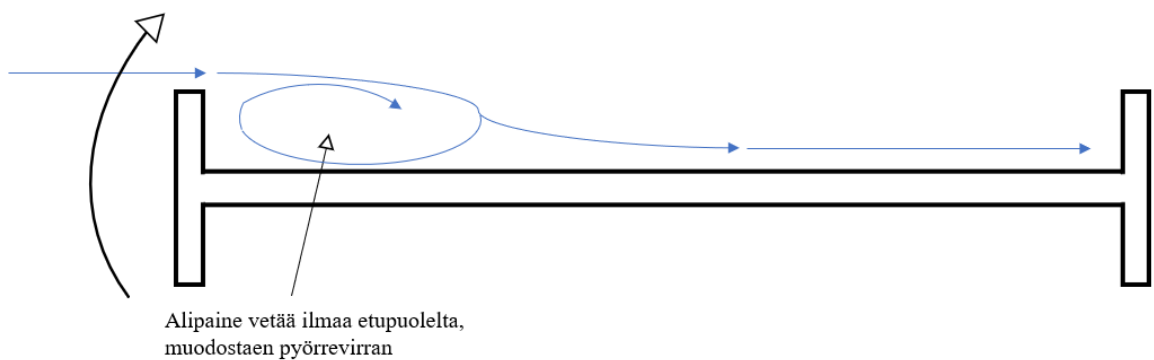
Allan Larsenin teoriassa huomattujen epäkohtien seurauksena tutkimista on edelleen jatkettu. Yhden lukuisista jatkojalostavista tutkimuksista ovat suorittaneet Daniel Green ja William G. Unruh. Heidän tarkoituksensa oli saada tarkemmin tuulitunnelidataan verrannollinen malli ja tehdä yksityiskohtaisempi esitys pyörrevirtojen synnystä. (Green & Unruh 2006)

Ennen pyörrevirran syntymistä kannessa ei ole vääntöliikettä. Virtauksen kulkiessa tuulen yläpuolella olevan reunan yli, syntyy virtaukseen alipaineinen alue heti reunan jälkeen, joka alkaa ”vetämään” virtausta kiinni kannen pintaan (kuva 10). (Green & Unruh 2006)



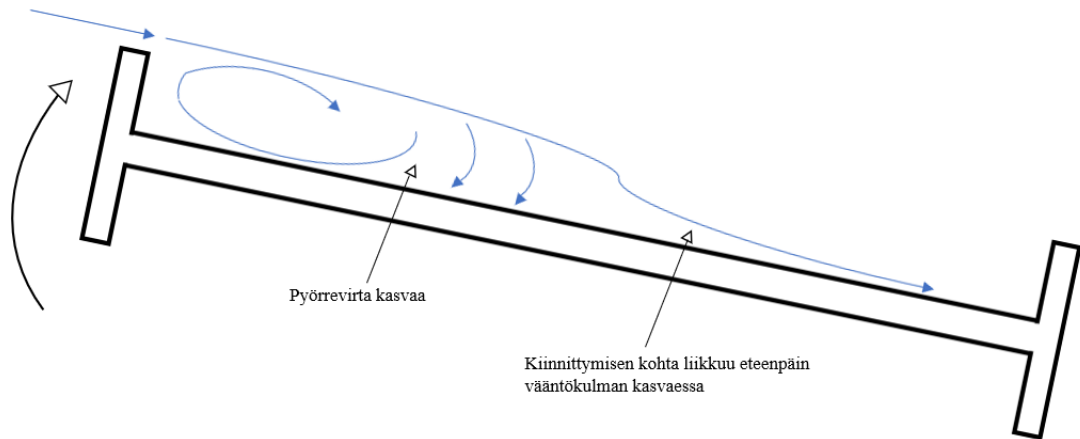
Kuva 10. Alkutilanne, (mukaillen Green & Unruh 2006)

Alipaineinen alue vetää edellä olevaa virtausta taaksepäin muodostaen pyörrevirtauksen. Pyörrevirta pysyy paikoillaan reunan kohdalla siihen asti, kunnes pyörrevirrasta aiheutuva ylöspäin suuntautuva voima kasvaa riittävän suureksi ja kansi alkaa vääntyä pyörrevirran puoleisesta laidasta ylöspäin. (kuva 11)



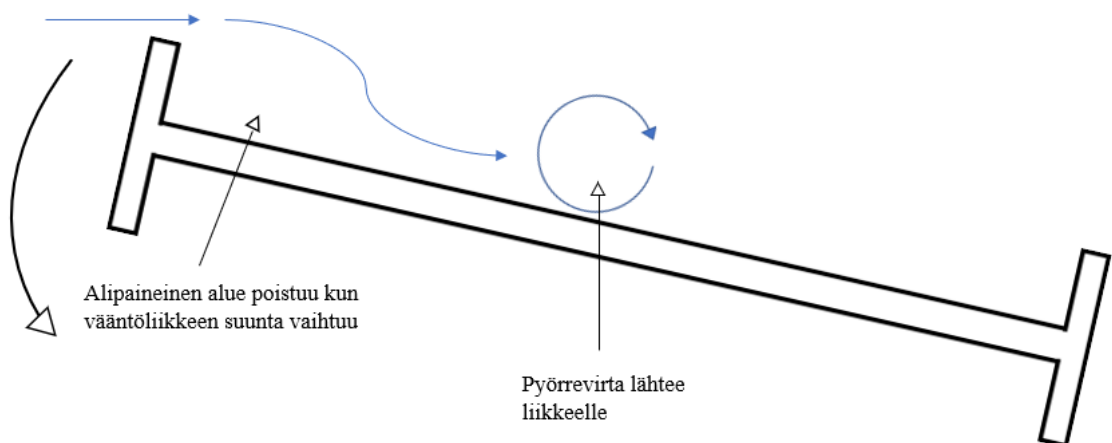
Kuva 11. Pyörrevirran syntyminen ja vääntöliikkeen alkaminen, (mukaillen Green & Unruh 2006)

Pyörrevirta lähtee liikkumaan kannen leveyssuuntaa pitkin kannen vääntöliikkeen aiheuttaman virtauksen muutoksen johdosta. Kun ”kiinnittymisen kohta” liikkuu eteenpäin, vetää se pyörrevirtaa mukanaan (kuva 12). (Green & Unruh 2006)



Kuva 12. Pyörrevirran liike, (mukaiillen Green & Unruh 2006)

Vääntöliikkeen suunnan muuttuessa alipaineinen alue poistuu ja pyörrevirta jatkaa liikettä eteenpäin tuulen avulla. Pyörrevirran liikkeen nopeus riippuu sen paikasta ja voimakkuudesta sekä vääntökulman suuruudesta (kuva 13). Kannen alapuolella virtaukset vaikuttavat samalla lailla. (Green & Unruh 2006)



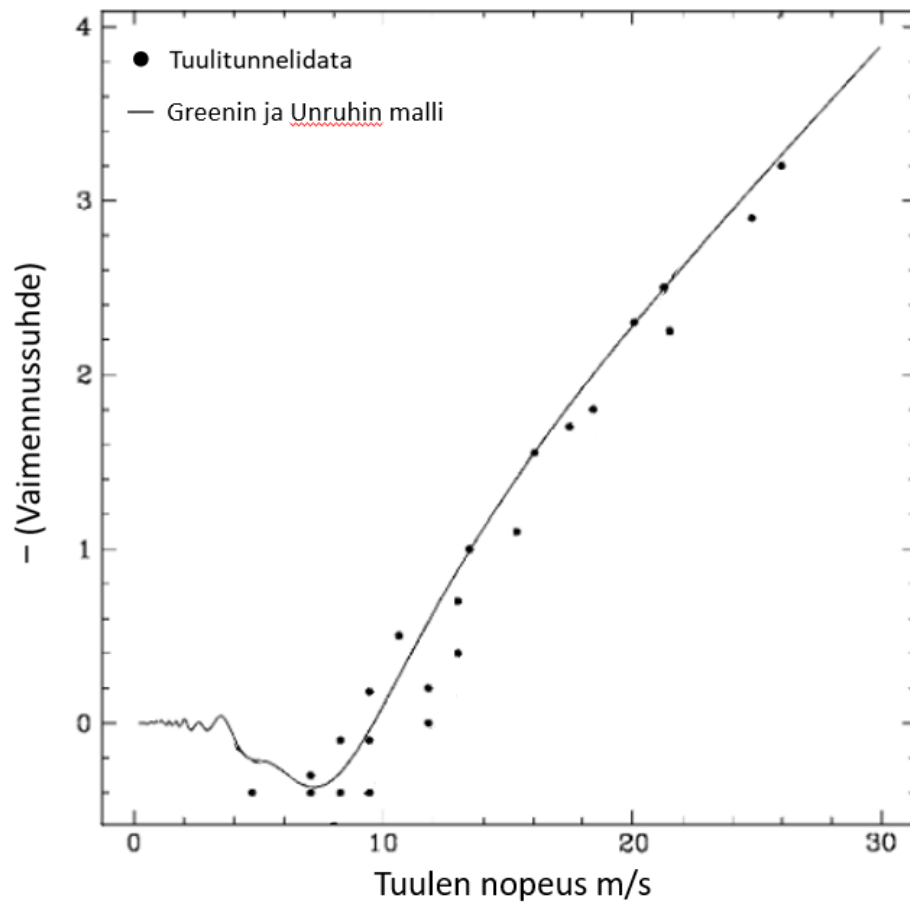
Kuva 13. Vääntöliikkeen suunnan muutos, (mukaiillen Green & Unruh 2006)

Pyörrevirran liikkeen nopeus ei siis ole vakio niin kuin Larsenin mallissa oletettiin, mutta tässäkin mallissa liikkeen nopeus oletetaan vakioksi ($U/4$, simulaatioiden perusteella) yksinkertaistamisen vuoksi. Periodin ensimmäisen neljänneksen aikana pyörrevirta kasvaa virtauksen kiinnityskohtaan siirtymisen seurauksena, jonka aikana vääntökulma saavuttaa maksimin. Pyörrevirran liikkeelle lähtemisen seurauksena kanteen vaikuttava vääntömomentti siis vähenee. (Green & Unruh 2006)

Green ja Unruh päivittivät edellä mainittua kaavaa (4) havaintojensa perusteella askelfunktiolla, jossa huomioon otetaan kanteen pyörrevirrasta aiheutuva voima ja paineen vaihtelut. Vakiopainejakauma liikkuu kannella nopeudella $U/2$:lla pyörrevirran etureunalla samalla kun sen keskikohta liikkuu nopeudella $U/4$. (Green & Unruh 2006)

$$\int_0^{t_d} (M\dot{\alpha}) dt = A \left[u^2 \int_0^{2B/u} \left[B^2 - \left(\frac{tu}{2} - B \right)^2 \right] \dot{\alpha} dt + 10u \int_0^{4B/u} \left(B - \frac{tu}{4} \right) \dot{\alpha} dt \right] \quad (5)$$

Kuvassa 14 verrataan tuulitunnelidataa ja Greenin ja Unruhin kaavasta (5) perusteella piirrettyä funktiota. Päivitetty kaava seuraa tuulitunnelidatan arvoja tarkemmin myös yli kriittisellä tuulennopeudella. (Green & Unruh 2006)



Kuva 14. Greenin ja Unruhin malli ja tuulitunnelidata, (mukaiillen Green & Unruh 2006)

5 SORTUMISESTA OPITTUA

5.1 Sortumisen jälkeen

Ennen Tacoma Narrows -sillan sortumista amerikkalaiset olivat keventäneet riippusiltojen rakenteita. Suurien riippusiltojen rakentaminen oli sortumisen jälkeen tauolla 10 vuotta ennen kuin niitä rakennettiin uudestaan Yhdysvaltoihin. Sortuneen Tacoma Narrows -sillan tilalle rakennettiin toinen silta, joka avattiin liikenteelle lokakuussa 1950. Toinen silta rakennettiin edellisen pilareille, joten jänneväli säilyi samana ja sillan rakennetta jäykistettiin edelliseen verrattuna sekä lisättiin kaksi kaistaa lisää. Lisääntyneen liikenteen takia toisen sillan viereen rakennettiin vielä kolmas silta, joka valmistui 2007. (Virola 2002)

Onnettomuuden jälkeen siltojen suunnittelussa alettiin kiinnittämään enemmän huomiota tuulen vaikutukseen ja seuraavat sillat olivatkin enemmän jäykistettyjä. Siltojen suunnittelussa sillan hoikkuutta pidetään kuitenkin tärkeänä visuaalisuuden tunnusmerkkinä, joka on kansirakenteen pituuden suhde sen korkeuteen. (Chen & Duan 2014, s. 364; Pulkkinen 2018, s. 127)

5.2 Tuulianalyysit

Tuulianalyysi on asiantuntijan tekemä selvitys tuulen vaikutuksesta siltaan. Erityisesti pitkäjänteisissä siltatyypeissä, kuten riippu- ja vinoköysisilloissa, tuulen vaikutukset ovat laajan tutkinnan alla. Tacoma Narrows -sillan sortuman jälkeen siltojen tuulitunnelikokeet otettiin käyttöön ja värähtelyille kehitettiin teoriapohja, joka oli peräisin lentotekniikasta. Nykyisin tuulen vaikutuksien laskentamallit ovat kansainvälisesti käytössä pitkän jännevälän siltojen suunnittelussa. (Pulkkinen 2018, s. 266)

6 YHTEENVETO

Kandidaatintyössä oli tarkoituksena tutustuttaa lukija siltaan, jonka historia jäi lyhyeksi siltana, mutta on ollut pitkän ajan tutkijoiden mielenkiinnonkohteena sortumisen ainutlaatuisuuden vuoksi. Tässä työssä esitetyt kaksi eri teoriaa sortumisesta, Larsenin sekä Greenin ja Unruhin teorit, ovat verrattain vanhoja, mutta ne ovat kuitenkin toimineet alustana pidemmälle vietyihin tutkimuksiin, joita nykyaikaisilla ohjelmilla saadaan tehtyä. Tapauksesta esitetään vielä nykyäänkin uusia, entistä tarkempia selityksiä.

Tacoma Narrows -sillan sortumisen lähtökohtana oli liian heiveröinen kansi suhteessa sen pituuteen. Myös kannen poikkileikkauksen kantikas muoto altisti sen tuulelle ja siitä syntyville pyörrevirtauksille. 7. päivä marraskuuta 1940 koitui sillan kohtaloksi. Sortumispäivänä silta alkoi värähtelemään pystysuunnassaan 1,2–1,5 metrin tuulen nopeuden ollessa noin 19 m/s. Sillan kannelle muodostuneista pyörrevirtauksista aiheutuneet voimat muuttivat pystysuuntaisen värähtelyn voimakkaaksi vääntövärihdysliikkeeksi, joka lopulta romahdutti sillan.

LÄHTEET

- Adekanye, O. & Washington, T., 2018. Nonstandard finite difference scheme for a Tacoma Narrows Bridge model. *Applied Mathematical Modelling* [online], 62, 223–236. Available from: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0307904X18302373?token=598AB3E9BD4944F397E288B38E97FD8FE552E650823AC305989B20CB255297C74E92DF784920E84CF6EA60C841585D79&originRegion=eu-west-1&originCreation=20211208090238> [Accessed 8 Dec 2021].
- Arioli, G. & Gazzola, F., 2015. A new mathematical explanation of what triggered the catastrophic torsional mode of the Tacoma Narrows Bridge. *Applied Mathematical Modelling*, 39 (2), 901–912.
- Chen, W.-F. & Duan, L., 2014. *Bridge Engineering Handbook / Substructure design*. 2nd ed. CRC Press.
- Green, D. & Unruh, W. G., 2006. Rival Theories in Aerodynamics, 1909-1930. *Am. J. Phys*, 74, 1202.
- Kiviluoma, R., 1997. *Pitkän jännevälin sillan aeroelastinen stabiilius, I: Tuulitunnelikokeet* [online]. Rakenteiden Mekaniikka Vol. 30. Available from: http://rmseura.tkk.fi/rmllehti/1997/nro3-4/RakMek_30_3-4_1997_1.pdf [Accessed 3 Dec 2021].
- McKenna, P. J., 2014. Oscillations in suspension bridges, vertical and torsional. *Discrete and Continuous Dynamical Systems - Series S* [online], 7 (4), 785–791. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84897770019&doi=10.3934%2fdcdss.2014.7.785&partnerID=40&md5=ac0438050ce1f7879457e350bff7dafc>.
- Olson, D., Wolf, S. & Hook, J., 2015. *The Tacoma Narrows Bridge collapse* [online]. Physics Today. Available from: <https://www-scopus-com.pc124152 oulu.fi:9443/record/display.uri?eid=2-s2.0-84946134132&origin=resultslist&sort=cp->

f&src=s&mltEid=&mltAl=t&sid=29db656da544416cd33949e05f5d672c&sot=comb&sdt=comb&sI=80&s=%28TITLE-ABS-KEY%28tacoma+w%2f2+narrows%29%29+AND+%28TITLE%28collapse+AND+tacoma+AND+narrows%29%29&relpos=0&citeCnt=7&searchTerm= [Accessed 22 Dec 2021].

Petroski, H., 2018. *Success through Failure : The Paradox of Design*. New paper edition. Princeton, NJ: Princeton University Press.

Pulkkinen, P., 2018. *Sillat : suunnittelu, toteutus ja ylläpito*. [Päivitetty versio]. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.

Virola, J., 2002. Kolme Tacoman siltaa. *Tierakennusmestari*, nro 2.

Wikimedia Commons, 2014. *Jilu Bridge* [online]. Wikimedia Commons. Available from: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Jilu_Bridge.jpg [Accessed 1 Dec 2021].

Wikimedia Commons, 2017. *San Francisco Bay Bridge Western Span at night* [online]. Wikimedia Commons. Available from: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:San_Francisco_Bay_Bridge_Western_Span_at_night.jpg [Accessed 1 Dec 2021].