



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

**SUOMEN JA RUOTSIN EUROKOODIEN
SOVELTAMISOHJEIDEN VERTAILU SILLAN
MITOITUKSESSA**

Jasper Tikkanen

Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka

Kandidaatintyö

Kesäkuu 2023

TIIVISTELMÄ

Tässä kandidaatintyössä vertaillaan Suomen ja Ruotsin eurokoodien soveltamisohjeita kuormien yhdistely- ja suurennuskertoimien osalta sekä tutkitaan, onko materiaalien osavarmuusluvuissa eroavaisuuksia. Työssä paneudutaan lisäksi kevyen liikenteen siltoihin vaikuttaviin kuormiin ja tutkitaan, onko maiden soveltamisohjeiden välillä eroja niiden laskentatavoissa.

Suomen ja Ruotsin ollessa hyvin samanlaisia valtioita ilmastoltaan, on mielenkiintoista selvittää maiden tapoja eurokoodien soveltamiseen siltojen suunnittelussa. Lisäksi on mielenkiintoista selvittää, vaikuttavatko Ruotsin hieman vuoristoisemmat maastot tai eteläisempi sijainti soveltamisohjeissa esitettyihin kertoimiin tai laskentatapoihin.

Tutkimusmenetelminä toimivat kirjallisuuskatsaus ja vertailu. Kirjallisuuskatsauksessa käydään läpi soveltamisohjeiden mukaisia kertoimia sekä laskentamenetelmiä. Vertailussa käsitellään maiden välisiä eroja ja samankaltaisuuksia edellä mainittujen asioiden osalta ja pohditaan, mistä ne voivat johtua.

Vertailussa käy ilmi, että soveltamisohjeiden välillä esiintyy eniten eroavaisuuksia kuormien suurennuskertoimien osalta. Näiden osalta Ruotsissa on käytössä turvallisuusluokat, jotka määräytyvät sillan sortuessa aiheutuvien seuraamusten perusteella. Suomessa noudatetaan eurokoodin mukaisia seuraamusluokkia.

Lopuksi lasketaan I-profiiliselle teräspalkille taivutusmomentin käyttöasteet, jolla havainnollistetaan soveltamisohjeiden välisiä eroja ja samankaltaisuuksia. Laskentaesimerkissä käy ilmi, että normaalissa seuraamus- ja turvallisuusluokassa eroa ei synny juuri lainkaan. Korkeimmissa luokissa laskettuna eroa alkaa syntyä.

Näitä tutkimustuloksia voidaan hyödyntää esimerkiksi Suomen ja Ruotsin välisessä yhteistyössä tai yhteisissä projekteissa. On myös hyvä kartoittaa sitä, miten Suomen soveltamisohjeet toimivat suunnittelussa suhteessa muiden maiden ohjeisiin.

Jatkotutkimuskohteena voisi olla soveltamisohjeiden vertailu muidenkin, kuin pelkästään kevyen liikenteen siltojen näkökulmasta. Esimerkiksi aihetta voisi laajentaa talonrakennuksen puolelle. Lisäksi soveltamisohjeita voisi vertailla muidenkin pohjoismaiden kanssa, jotta asiaan saataisiin lisänäkökulmaa.

Asiasanat: silta, kuorma, suunnitteluohjeet, laskentamenetelmät

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

SISÄLLYSLUETTELO

MERKINNÄT JA LYHENTEET

1 Johdanto	6
2 Eurokoodin soveltamisohjeet	7
2.1 Eurokoodit	7
2.2 Soveltamisohjeet Suomessa.....	7
2.2.1 Kuormien yhdistelykertoimet	9
2.2.2 Betoni	12
2.2.3 Teräs	14
2.2.4 Puu.....	15
2.3 Soveltamisohjeet Ruotsissa	16
2.3.1 Kuormien yhdistelykertoimet	17
2.3.2 Betoni	19
2.3.3 Teräs	20
2.3.4 Puu.....	21
3 Vertailu.....	22
3.1 Kuormien yhdistelykertoimien erot	22
3.2 Kuormien mitoitusarvojen kertoimien erot	22
3.3 Materiaalien osavarmuuskertoimien erot	23
4 Kevyen liikenteen sillan kuormat	25
4.1 Pysyvät kuormat.....	25
4.2 Muuttuvat kuormat.....	25
4.2.1 Liikennekuormat Suomessa.....	25
4.2.2 Liikennekuormat Ruotsissa	27
4.3 Seuraamus- ja turvallisuusluokat	28
5 Laskentaesimerkki	29
6 Yhteenveto.....	30

LÄHDELUETTELO

LIITE:

Liite 1. Palkin taivutusmomentin käyttöasteiden laskenta.

MERKINNÄT JA LYHENTEET

BF	Laakerikitka
b_f	Laipan leveys
F_{wk}	Tuulikuorma
G	Omapaino
$G_{kj,inf}$	Edullinen pysyvä kuorma
$G_{kj,sup}$	Epäedullinen pysyvä kuorma
h	Poikkileikkauksen korkeus
h_f	Laipan korkeus
h_w	Uuman korkeus
IL	Jääkuorma
L	Palkin pituus
P	Esijännityskuorma
Q	Muuttuva kuorma
Q_c	Toteuttamisesta aiheutuvat kuormat
q_{fk}	Tasaisesti jakautunut kuorma
Q_{fwk}	Muuttuva pistekuorma
Q_{serv}	Huoltoajoneuvon aiheuttama kuorma
$Q_{sn,k}$	Lumikuorma toteuttamisen aikana
s_k	Lumikuorman ominaisarvo
T_k	Lämpötilakuorma
TLEP	Liikennekuorman maanpaine
t_w	Uuman leveys
ψ_0	Muiden muuttuvien kuormien yhdistelykertoimen yhdistelyarvo
ψ_1	Muiden muuttuvien kuormien yhdistelykertoimen tavallinen arvo
ψ_2	Muiden muuttuvien kuormien yhdistelykertoimen pitkäaikaisarvo
γ_d	Turvallisuuskerroin
$\gamma_{M,i}$	Materiaalin osavarmuusluku

1 JOHDANTO

Tutkielman aihe sisältää paljon yleistä tietoa siltojen mitoituksesta sekä eurokoodien soveltamisohjeista ja niiden käyttämisestä. On mielenkiintoista tutustua myös muiden maiden kansallisiin ohjeisiin. Etenkin Ruotsin ja muiden pohjoismaiden suunnitteluperusteita on mielenkiintoista verrata Suomen ohjeisiin.

Työssä verrataan Suomen ja Ruotsin mitoitusperusteita siltojen suunnittelussa. Aiheesta tekee mielenkiintoisen Suomen ja Ruotsin samankaltaiset olosuhteet. Tavoitteena on löytää eroavaisuuksia ja samankaltaisuuksia sekä pohtia niiden merkitystä.

Tässä työssä keskitytään kevyen liikenteen siltojen kuormiin ja Suomen ja Ruotsin osavarmuuskertoimien ja kuormien yhdistelykertoimien väliseen vertailuun.

Aihe on tarkoitus rajata siltojen suunnitteluohjeissa oleviin mitoitusperusteisiin. Niitä on tarkoitus avata kattavasti ja kertoa eri materiaalien käyttämisestä siltarakentamisessa. Työssä on myös tarkoitus kertoa kuormista, jotka siltojen suunnittelussa on otettava huomioon. Lopuksi tehdään laskentaesimerkki, jossa vertaillaan Suomen ja Ruotsin yhdistelykertoimilla laskettuja tuloksia.

Tutkimus suoritetaan kirjallisuuskatsauksen ja vertailun avulla. Kirjallisuuskatsauksessa esitellään Suomen ja Ruotsin eurokoodien soveltamisohjeita sekä kerrotaan eurokoodeista. Vertailussa käydään läpi yhdistelykertoimien sekä osavarmuuslukujen eroja sekä pohditaan, mistä ne voivat johtua.

Tutkimuksessa pääasiallisina lähteinä on käytetty eurokoodeja sekä Suomen ja Ruotsin eurokoodien soveltamisohjeita.

2 EUROKOODIN SOVELTAMISOHJEET

2.1 Eurokoodit

Eurokoodit ovat Euroopan unionissa yhteisesti sovittuja suunnitteluohjeita. Eurokoodit saivat alkunsa, kun EU:n komissio päätti toimenpideohjelmasta vuonna 1975, jolla teknisiä määräyksiä yhdenmukaistetaan. Aluksi tavoitteena ohjeista oli tehdä vaihtoehtoiset suunnitteluohjeet EU:n jäsenmaille ja myöhemmin kokonaan korvata jäsenmaiden omat ohjeet. Ensimmäisen sukupolven eurokoodit julkaistiin vuonna 1984 (Eurocodes.fi, 2023).

Eurocodes.fi-sivuston mukaan EU:n komissio ja jäsenmaat päättivät siirtää vastuun eurokoodien julkaisemisesta eurooppalaiselle standardisoinnin keskusjärjestölle CEN:lle. Samalla tapahtui linkitys julkisten hankintojen direktiiviin ja rakennustuotedirektiiviin.

Vuosina 1992–1998 CEN julkaisi 62 kappaletta eurokoodeja niin sanottuina esistandardeina (ENV), joihin se jätti arvoille ja kertoimille avoimia kohtia. Jäsenmaat saivat itse valita nämä arvot omien kansallisten olosuhteidensa ja kansallisen soveltamisasiakirjan mukaan (Eurocodes.fi, 2023). Ympäristöministeriö julkaisi useille eurokoodien osille kansalliset soveltamisasiakirjat 1990-luvulla. Siltojen osille ei kuitenkaan tällaisia julkaistu.

Aiempien ENV-standardien muuttaminen nykyistä vastaaviksi EN-standardeiksi alkoi vuonna 1998. Nämä versiot julkaistiin vuosina 2002–2007 ja CEN määräsi, että samaa asiaa käsittelevät kansalliset ohjeet tuli kumota. Eurokoodeissa annetaan eri kertoimille suositusarvoja, jotka voidaan määritellä tarkemmin jäsenmaan kansallisessa liitteessä. (Eurocodes.fi, 2023).

2.2 Soveltamisohjeet Suomessa

Eurokoodien soveltamisohjeet ovat eurokoodien rinnalla toimivia suunnitteluohjeita. Ne sisältävät kansallisen valinnan mukaisia kertoimia sekä muita laskentaan vaikuttavia asioita, joilla eurokoodeista saadaan tiettyyn maahan soveltuvammat.

Suomessa eurokoodin soveltamisohjeena infrarakenteille toimii Väyläviraston (ent. Liikennevirasto) julkaisemat ohjeet. Väylävirasto on Suomen valtion virasto, jonka tehtävänä on väyläverkon suunnittelu, väylien kehittäminen ja niiden palvelutason ylläpito, osallistuminen liikenteen ja maankäytön yhteensovittamiseen sekä talvimerenkulun ja liikenteenohjauksen järjestäminen (Väylä.fi, 2023). Väylävirasto, lyhyemmin Väylä tarjoaa lisäksi paljon erilaisia ohjeita infrarakenteiden suunnitteluun ja rakentamiseen. Näihin ohjeisiin lukeutuvat eurokoodien soveltamisohjeet. Osa soveltamisohjeista on laadittu entisen Liikenneviraston toimesta. Siltoja ja niiden kuormia koskeva soveltamisohje on NCCI 1. Muita siltojen suunnitteluun tarvittavia soveltamisohjeita ovat lisäksi betonirakenteiden suunnittelua koskeva ohje NCCI 2, teräs- ja liittorakenteita koskeva ohje NCCI 4 ja puurakenteiden suunnittelua koskeva ohje NCCI 5.

NCCI-sarjan ohjeet on laadittu virallisten, liikenne- ja viestintäministeriön julkaisemien kansallisten liitteiden pohjalta. NCCI-sarjan ohjeissa on sama informaatio, mutta selkeämmässä ja tiiviimmässä muodossa.

Soveltamisohjeiden tarkoituksena on helpottaa ja selkiyttää eurokoodien käyttöä muun muassa siltojen suunnittelussa ja kerätä yhteen eurokoodin mukaisen mitoituksen perusteet. Lisäksi niiden tarkoituksena on esittää yksinkertaiset ohjeet eurokoodin soveltamiseen pienempien siltojen suunnitteluun. Siihen on koottu myös muita suunnitteluperiaatteita sekä rakenteellisia vaatimuksia, joita eurokoodeissa ei ole mainittu (Pulkinen, 2018).

Murtorajatilalaskennassa käytetään eurokoodin kaavoja 6.10a ja 6.10b. Kaavojen kuormien osavarmuus- ja yhdistelykertoimia on vapaus muuttaa kansallisen valinnan mukaan.

Käydään seuraavaksi läpi Suomen soveltamisohjeissa esitetyjä kuormien yhdistelykertoimia ja osavarmuuslukuja murto- ja käyttörajatilassa. Lisäksi käydään läpi materiaalien osavarmuuskertoimia kevyen liikenteen silloissa käytettävien materiaalien kohdalla.

2.2.1 Kuormien yhdistelykertoimet

Rajatilalaskennassa käytettävät kevyen liikenteen sillan kuormien yhdistelykertoimet ovat esitetty taulukossa 1. Taulukossa on esitetty NCCI 1:n mukaiset kertoimet, joihin on tehty lisäyksiä eurokoodin EN 1990 liitteen A2 taulukkoon A2.2 verrattuna. Yhdistelykertoimia käytetään murtoraja- sekä käyttörajatilalaskennassa muiden muuttuvien kuormien määrittämiseen.

Taulukko 1. Kevyen liikenteen siltojen yhdistelykertoimet NCCI 1 taulukon G.2 mukaan (Liikennevirasto, 2017).

		Yhdistelyarvo	Tavallinen arvo	Pitkäaikaisarvo
Kuorma		ψ_0	ψ_1	ψ_2
Liikennekuormat (gr1, gr2)	Tasainen kuorma	0,4	0,40	-
	Pistekuorma	-	-	-
	Huoltoajoneuvo	-	-	-
Tuulikuormat	F_{wk}	0,3	0,2	-
Lämpötilakuormat	T_k	0,6	0,6	0,5
Laakerikitka	BF	0,6	0,5	0,4
Jääkuormat	IL	0,7	0,5	0,2
Liikennekuorman maanpaine	TLEP	0,4	0,4	-
Lumikuorma (toteuttamisen aikana)	$Q_{sn,k}$	0,8	-	-
Toteuttamisesta aiheutuvat kuormat	Q_c	1,0	-	1,0

Verrattuna eurokoodin ohjeistukseen, Väyläviraston ohjeissa on enemmän yhdistelykertoimia. Näitä ovat laakerikitkan kertoimet, jääkuorman kertoimet sekä liikennekuorman maanpaineen kertoimet.

Murtorajatilalaskennassa käytettävät kuormien mitoitusarvot saadaan seuraavien taulukoiden avulla. Siltojen staattisen tasapainon tarkastamiseen käytetään taulukkoa 2. Rakenneseosten kestävyysliittymien kuormien mitoitusarvot lasketaan taulukon 3 avulla. Luiskien vakavuuteen liittyvät kuormat lasketaan taulukossa 4 olevien kertoimien avulla (Liikennevirasto, 2017).

Taulukko 2. EQU staattinen tasapaino NCCI 1 taulukkoa G.4 mukailen (Liikennevirasto, 2017).

	Pysyvät kuormat	Esijännitys	Määräävä muuttuva kuorma	Muut samanaikaiset muuttuvat kuormat
Yhtälö 6.10	1,15/0,9*G	1,1/0,9*P	1,35*tieliikennekuorma 1,35*kevyen liikenteen kuorma 1,35*raideliikenteen kuorma	1,50* $\psi_{0,i}$ *muut muuttuvat kuormat
	tai			
	1,15/0,9*G	1,1/0,9*P	1,50*muu määräävä muuttuva kuorma	1,35* $\psi_{0,i}$ *tieliikennekuorma 1,35* $\psi_{0,i}$ *kevyen liikenteen kuorma 1,45* $\psi_{0,i}$ *raideliikennekuorma +1,50* $\psi_{0,i}$ *muut muuttuvat kuormat

Taulukko 3. STR/GEO rakenneosien kestävyys ja geotekninen kantavuus NCCI 1 taulukkoa G.5 mukaillen (Liikennevirasto, 2017).

	Pysyvät kuormat	Esijännitys	Määrävä muuttuva kuorma	Muut samanaikaiset muuttuvat kuormat
6.10a	1,35/0,9* G	1,1/0,9*P	-	-
6.10 b	1,25/0,9* G	1,1/0,9*P	1,35*tieliikennekuorma 1,35*kevyen liikenteen kuorma 1,45/1,20*raide liikenteen kuorma	1,50* $\psi_{0,i}$ *muut muuttuvat kuormat
			tai	

Taulukko 4. STR/GEO NCCI 1 taulukkoa G.6 mukailten (Liikennevirasto, 2017).

	Pysyvät kuormat	Esijännitys	Määrävä muuttuva kuorma	Muut samanaikaiset muuttuvat kuormat
Yhtälö 6.10	1,0*G	1,0*P	1,15*tieliikennekuorma 1,15*kevyen liikenteen kuorma 1,25*raideliikenteen kuorma	1,30* $\psi_{0,i}$ *muut muuttuvat kuormat
	tai			
	1,0*G	1,0*P	1,30*muu määrävä muuttuva kuorma	1,15* $\psi_{0,i}$ *tieliikennekuorma 1,15* $\psi_{0,i}$ *kevyen liikenteen kuorma 1,25* $\psi_{0,i}$ *raideliikennekuorma +1,30* $\psi_{0,i}$ *muut muuttuvat kuormat

2.2.2 Betoni

Taulukko 5. Betonirakenteiden murtorajatilatarkastelussa käytettäviä osavarmuuskertoimia NCCI 2 taulukkoa 3.6 mukailten (Väylävirasto, 2022).

Osavarmuusluvut	Betoni	Betoniteräs	Jänneteräs
Normaalit	1,5	1,15	1,15
Pienennetyt	1,35	1,1	1,1
Onnettomuus- ja palotilanne	1,0	1,0	1,0
Väsymismitoitus	1,5	1,15	1,15

Betonirakenteisten siltojen päälly- ja alusrakenteiden laskennassa voidaan käyttää pienennettyjä osavarmuuskertoimia, koska ne kuuluvat toteutusluokkaan 3 (Väylävirasto, 2022). Toteutusluokalla tarkoitetaan rakenteen vaativuutta sen työmaalla toteuttamisen haasteellisuuden ja sen seuraamusluokan mukaan. Toteutusluokat jaetaan numeroittain 1-3, joista 3 on vaativin (Betonitieto.fi, 2023).

Betonin puristus- ja vetolujuuden mitoitusarvojen laskennassa käytetään kertoimia α_{cc} ja α_{ct} . Kertoimella α_{cc} otetaan huomioon betonin puristuslujuuteen vaikuttavat pitkäaikaiset tekijät ja kuorman tyypistä johtuvat epäedulliset tekijät (Suomen standardoimisliitto, 2015). Suomessa kertoimen α_{cc} arvona käytetään lukua 1,0 liittopalkkisiltojen liittopoikkileikkauksessa olevalle betonille ja muille rakenteille arvoa 0,85 (Liikennevirasto, 2016). Vastaavasti kertoimella α_{ct} otetaan huomioon betonin vetolujuuteen vaikuttavat pitkäaikaiset tekijät ja kuorman tyypistä johtuvat epäedulliset tekijät. Kertoimelle α_{ct} Suomen kansallinen liite esittää arvon 1 (Väylävirasto, 2022).

Valtaosa Suomen silloista on teräsbetonisiltoja, sekä suurin osa niistä on laattasiltoja (Väyläviraston tilastoja, 2019). Betonilla on hyvä puristuslujuus, joten sen materiaaliominaisuudet sopivat hyvin puristuslujuutta vaativiin siltatyyppeihin.

Teräsbetonisillat valmistetaan useimmiten paikalla valamalla. Joitain elementtiratkaisuja on Suomessa käytetty, joskin vain pieni osa sillasta on elementtirakenteinen. Siltojen osat ovat suuria ja raskaita, joten niiden liikutteleminen ei ole helppoa (Pulkinen, 2018).

2.2.3 Teräs

Taulukko 6. Teräsrakenteiden liitosten kestävyys rajatilatarkastelussa käytettäviä osavarmuuskertoimia NCCI 4 taulukkoa 3.3 mukailten (Liikennevirasto, 2016).

a) Rakennesosan ja poikkileikkauksen kestävyys	
Poikkileikkauksen kestävyys liiallisen myötäämisen suhteen mukaan lukien paikallinen lommahdus	$\gamma_{M0}=1,0$
Sauvojen kestävyys stabiiliuden suhteen, kun laskelmat tehdään sauvan tarkastuksena	$\gamma_{M1}=1,1$
Poikkileikkauksen kestävyys vetomurtumisen suhteen	$\gamma_{M2}=1,25$
b) Liitosten kestävyys	
-Ruuvien kestävyys -Niittien kestävyys -Niveltappien kestävyys -Hitsien kestävyys -Levyjen kestävyys reunapuristukselle	$\gamma_{M2}=1,25$
Liukumiskestävyys -Murtorajatilassa (luokka C) -Käyttöraajatilassa (luokka B)	$\gamma_{M3}=1,25$ $\gamma_{M3,ser}=1,1$
Injektioruuvien reunapuristuskestävyys	$\gamma_{M4}=1,1$
Rakenneputkien liitosten kestävyys ristikoissa	$\gamma_{M5}=1,1$
Niveltappien kestävyys käyttöraajatilassa	$\gamma_{M6,ser}=1,0$
Korkealujuuksisten ruuvien esijännitys	$\gamma_{M7}=1,1$

Terästä käytetään pelkästään teräksestä rakennetuissa silloissa sekä liittorakenteisissa silloissa. Pelkästään teräksestä rakennetuissa silloissa rakenteena on yleensä palkkirakenne. Teräksestä rakennetaan paljon myös erikoisrakenteisia siltoja, esimerkiksi Langer-palkkisiltoja, riippusiltoja, sekä vinoköysisiltoja (Tielaitos, 2000).

Teräksisten siltojen osuus Suomessa kaikista silloista on noin 6 %. Terässiltoja käytetään hieman enemmän ratasiltoina niiden hyvän jäykkyyden vuoksi, niiden osuus ratasilloista noin 14 % (Väyläviraston sillat, 2019).

2.2.4 Puu

Taulukko 7. Osavarmuuslukujen suosittelevat puurakenteille NCCI 5:n taulukkoa 1 mukailten (Liikennevirasto, 2013).

Rakenne ja materiaali	γ_M	Huom
1. Puu- ja puutuotteet <ul style="list-style-type: none"> • normaalimitoitus <ul style="list-style-type: none"> -sahatavara -havusahatavara $\geq C35$ -liimapuu, LVL, vaneri -syitä vastaan kohtisuora puristusjännitys • Väsymismitointus 	 1,4 1,25 1,2 1,0 1,0	 lujuusluokkaehto ***) ehto $\gamma_{M,fat}$
2. Liitokset <ul style="list-style-type: none"> • normaalimitoitus • väsymismitointus 	*) 1,0	γ_M $\gamma_{M,fat}$
3. Liittorakenteissa käytettävä <ul style="list-style-type: none"> • teräs • betoni • leikkausliittimet puun ja betonin välillä <ul style="list-style-type: none"> - normaalimitoitus - väsymismitointus 	**) **) 1,25 1,0	$\gamma_{M,s} \rightarrow$ SFS-EN 1993 $\gamma_{M,c} \rightarrow$ SFS-EN 1992 $\gamma_{M,v}$ $\gamma_{M,v,fat}$

4. Esijännitysteräket	1,15	$\gamma_{M,s}$
5. Onnettomuusyhdistelmillä	1,0	

*) Liitoskestävyydet lasketaan liittyvän tuotteen materiaaliosavarmuuslukua γ_M käyttäen.

***) Liittorakenteissa teräs- ja betoniosien mitoituslujuudet lasketaan standardien SFS-EN 1993 ja SFS-EN 1992 kansallisten liitteiden materiaaliosavarmuusluvuilla.

****) Syitä vastaan kohtisuoran puristuksen mitoituslujuuden laskenta osavarmuuslukua γ_M käyttäen edellyttää riittävän tasaista jännitys jakaumaa tuki- ja kuormitus pinnalla. Mitoittavana jännityksenä käytetään tällöin tukipinnan keskimääräistä jännitystä.

Puusta valmistettuja siltoja nähdään tavallisimmin yksityisteillä. Puupalkkisiltojen suurin jänneväli voi olla noin 30 m (Väylävirasto, 2018). Siltojen suhteellinen määrä kaikista silloista on noin 4 % (Väyläviraston tilastoja, 2019). Puun heikkojen lujuusominaisuuksien vuoksi sitä ei voida käyttää pitkiä jännevälejä vaativissa silloissa. Siitä rakennetaan pienempiä siltoja useimmiten kevyen liikenteen käyttöön, esimerkiksi luontopoluilla nähtävät riippusillat ovat tehty usein puusta. Puusta rakennetaan lisäksi liittorakenteisia siltoja, usein betonin kanssa yhdistettynä.

2.3 Soveltamisohjeet Ruotsissa

Ruotsin liikennevirasto julkaisee eurokoodien soveltamisohjeet omassa ohjekokoelmassaan (Transportstyrelsen, 2023). Liikennevirasto on Ruotsin valtiollinen virasto, joka antaa ohjeita liittyen meriliikenteeseen, ilmailuun sekä ajoneuvoliikenteeseen. Lisäksi se antaa ohjeita infrarakenteiden rakentamiseen ja suunnitteluun, esimerkiksi eurokoodien soveltamisohjeet. Viimeisin versio ohjeesta TSFS 2018:57 on ilmestynyt vuonna 2018.

2.3.1 Kuormien yhdistelykertoimet

Ruotsin kansallisen liitteen mukaan muille, kuin tuuli- ja lumikuormalle käytetään eurokoodissa suositeltuja yhdistelykertoimien arvoja. Taulukossa 8 on esitetty yhdistelykertoimet tuuli- ja lumikuormille.

Taulukko 8. Yhdistelykertoimet tuuli- ja lumikuormalle TSFS 2018:57 taulukkoa 4.1 mukaillen (Transportstyrelsen, 2018).

Kuorma	Symboli	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Tuulikuorma	F_{wk}	0,3	0,2	0
	F^*_{wk}	1,0	-	-
	F^{**}_{wk}	1,0	-	-
Lumikuorma	$s_k \geq 3 \text{ kN/m}^2$	0,8	0,6	0,2
	$2,0 \leq s_k < 3,0 \text{ kN/m}^2$	0,7	0,4	0,2
	$1,0 \leq s_k < 2,0 \text{ kN/m}^2$	0,6	0,3	0,1

Taulukko 9. Kuormien mitoitusarvojen EQU (sarja A) laskenta TSFS 2018:57 taulukkoa 4.3 mukaillen (Transportstyrelsen, 2018).

Muuttuvat ja pysyvät mitoitusilanteet	Yhtälö 6.10	
Pysyvät kuormat	Epäedulliset	$\gamma_d * 1,1 * G_{kj,sup}$
	Edulliset	$\gamma_d * 0,9 * G_{kj,inf}$
Määrävä muuttuva kuorma	$\gamma_d * 1,5 * Q_{k,1}$	
Muut muuttuvat kuormat	Suurin kuorma	
	Muut kuormat	$\gamma_d * 1,5 * \psi_{0,i} * Q_{k,1}$

Taulukossa 9 esiintyvä turvallisuuskerroin γ_d määritellään Ruotsin kansallisen liitteen kappaleessa 2 seuraavasti:

Turvallisuusluokka 1: $\gamma_d=0,83$

Turvallisuusluokka 2: $\gamma_d=0,91$

Turvallisuusluokka 3: $\gamma_d=1,0$

Turvallisuusluokka 4: $\gamma_d=1,1$

Ruotsin kansallisen liitteen mukaan rakenteet jaotellaan turvallisuusluokkiin. Turvallisuusluokka riippuu sen seuraamusluokasta. Esimerkiksi turvallisuusluokassa 1 on vähäiset seuraamukset ja vähäinen ihmisten loukkaantumisen riski, kun taas luokassa 4 on suuret riskit loukkaantumiselle ja taloudelle.

Taulukko 10. Kuormien mitoitusarvojen STR/GEO (sarja B) laskenta TSFS 2018:57 taulukkoa 4.4 mukailten (Transportstyrelsen, 2018).

Muuttuvat ja pysyvät mitoitustilanteet		Yhtälö 6.10a	Yhtälö 6.10b
Pysyvät kuormat	Epäedulliset	$\gamma_d * 1,35 * G_{kj,sup}$ $\gamma_d * 1,35 * P_k$	$\gamma_d * 0,89 * 1,35 * G_{kj,sup}$ $\gamma_d * 1,35 * P_k$
	Edulliset	$1,00 * G_{kj,inf}$ $1,00 * P_k$	$1,00 * G_{kj,inf}$ $1,00 * P_k$
Määräävä muuttuva kuorma			$\gamma_d * 1,5 * Q_{k,1}$
Muut muuttuvat kuormat	Suurin kuorma	$\gamma_d * 1,5 * \psi_{0,i} * Q_{k,1}$	
	Muut kuormat	$\gamma_d * 1,5 * \psi_{0,i} * Q_{k,1}$	$\gamma_d * 1,5 * \psi_{0,i} * Q_{k,1}$

Taulukko 11. Kuormien mitoitusarvojen STR/GEO (sarja C) laskenta TSFS 2018:57 taulukkoa 4.5 mukailten (Transportstyrelsen, 2018).

Muuttuvat ja pysyvät mitoitusilanteet		Yhtälö 6.10
Pysyvät kuormat	Epäedulliset	$\gamma_d * 1,1 * G_{kj,sup}$
	Edulliset	$1,00 * G_{kj,inf}$
Määräävä muuttuva kuorma		$\gamma_d * 1,4 * Q_{k,1}$
Muut muuttuvat kuormat	Suurin kuorma	
	Muut kuormat	$\gamma_d * 1,4 * \psi_{0,i} * Q_{k,1}$

2.3.2 Betoni

Ruotsin kansallisessa liitteessä ei ole määritetty betonille erityisiä osavarmuuslukuja. Ainoastaan γ_c määritellään samaksi, kuin standardissa EN 1992-1-1. Standardissa se määritellään taulukon 12 mukaan.

Taulukko 12. Betonirakenteiden murtorajatilatarkastelussa käytettäviä osavarmuuskertoimia EN 1992-1-1 taulukkoa 2.1N mukailten (Suomen standardoimisliitto, 2015).

Osavarmuusluvut	Betoni	Betoniteräs	Jänneteräs
Normaalit	1,5	1,15	1,15
Onnettomuustilanne	1,2	1,0	1,0

Ruotsin kansallisen liitteen mukaan parametrien α_{cc} ja α_{ct} arvoiksi tulee asettaa 1,0. Kuten edellä on mainittu, kertoimella α_{cc} otetaan huomioon betonin puristuslujuuteen vaikuttavat pitkäaikaiset tekijät ja kuorman tyypistä johtuvat epäedulliset tekijät. Kertoimella α_{ct} otetaan huomioon betonin vetolujuuteen vaikuttavat pitkäaikaiset tekijät ja kuorman tyypistä johtuvat epäedulliset tekijät.

2.3.3 Teräs

Taulukko 13. Teräsrakenteiden liitosten kestävyys rajatilatarkastelussa käytettäviä osavarmuuskertoimia Ruotsin kansallisessa liitteessä (Transportstyrelsen, 2018).

a) Rakenneosan ja poikkileikkauksen kestävyys	
Poikkileikkauksen kestävyys liiallisen myötämisen suhteen mukaan lukien paikallinen lommahdus	$\gamma_{M0}=1,0$
Sauvojen kestävyys stabiiliuden suhteen, kun laskelmat tehdään sauvan tarkastuksena	$\gamma_{M1}=1,0$
Poikkileikkauksen kestävyys vetomurtumisen suhteen	$\gamma_{M2}=0,9 \cdot f_u/f_y$, kuitenkin enintään 1,1 nettopoikkileikkauksen kantokyvyille. Siteille $\gamma_{M2}=1,2$
b) Liitosten kestävyys	
-Ruuvien kestävyys -Niittien kestävyys -Niveltappien kestävyys -Hitsien kestävyys -Levyjen kestävyys reunapuristukselle	$\gamma_{M2}=1,25$
Liukumiskestävyys -Murtorajatilassa (luokka C) -Käyttöraajatilassa (luokka B)	$\gamma_{M3}=1,25$ $\gamma_{M3,ser}=1,1$
Injektioruuvien reunapuristuskestävyys	$\gamma_{M4}=1,1$

Rakenneputkien liitosten kestävyys ristikoissa	$\gamma_{M5}=1,1$
Niveltappien kestävyys käyttörajatilassa	$\gamma_{M6,ser}=1,0$
Korkealujuuksisten ruuvien esijännitys	$\gamma_{M7}=1,1$

Rakenneosien ja poikkileikkausten kantokyvyn osavarmuuskertoimien osalta Ruotsin kansallisessa liitteessä on määritetty, että Ruotsi käyttää samoja kertoimia eurokoodien kanssa. Nämä arvot ovat $\gamma_{M0}=1,0$, $\gamma_{M1}=1,0$ ja $\gamma_{M2}=1,25$. Tämä eroaa Suomen kansallisesta liitteestä, jossa on määritetty kertoimelle γ_{M1} arvo 1,1.

2.3.4 Puu

Ruotsin kansallinen liite ei anna erityisiä materiaaliosavarmuuslukuja puulle. Kansallisessa liitteessä annetaan yleisiä neuvoja ja tarkentavia ohjeita standardiin.

3 VERTAILU

3.1 Kuormien yhdistelykertoimien erot

Suomen eurokoodien soveltamisohjeessa NCCI 1 esitetään taulukon 1 mukaiset yhdistelykertoimet. Ne ovat samat, kuin eurokoodin SFS-EN 1990 taulukossa A2.2, mutta Suomen soveltamisohjeessa kuormitustapauksia on enemmän. Nämä kuormitukset ovat laakerikitka ja jääkuorma sekä liikennekuorman lepopaine.

Ruotsin kansallisessa liitteessä esitetään taulukossa 8 olevat kertoimet. Se ei siis esitä eurokoodista eriäviä kertoimia muille kuormituksille, kuin tuuli- ja lumikuormalle. Tämä voi johtua Ruotsin tuulisista ja lumisista olosuhteista eri alueilla. Ruotsin länsiosissa, joissa maasto on vuoristoista, on käytettävä tuuli- ja lumikuormitusten yhdistelykertoimille suurempia arvoja rakenteen riittävän kestävyuden saavuttamiseksi.

Kuten huomataan taulukosta 1, Suomen soveltamisohje ei esitä tavalliselle- tai pitkäaikaisarvolle yhdistelykerrointa, joka taas Ruotsin kansallisessa liitteessä esitetään. Lisäksi Ruotsin kansallisessa liitteessä yhdistelykertoimet on skaalattu erilaisille lumikuorman ominaisarvoille s_k .

Tuulikuorman F^*_{wk} tai F^{**}_{wk} yhdistelykerrointa käytettäessä ei huomioida samanaikaisesti liikennekuormaa. Tällöin tuulikuorman vaikutus otetaan huomioon suurempana.

3.2 Kuormien mitoitusarvojen kertoimien erot

Suomen soveltamisohjeessa murtorajatilan EQU (sarja A) laskentaan esitetään taulukon 2 mukaiset arvot. Suomen soveltamisohjeessa tähän rajatilaan on luettu mukaan myös esijännityksestä aiheutuva kuormitus, jota Ruotsin kansallisessa liitteessä ei esitetä.

Taulukossa 9 on esitetty Ruotsin kansallisen valinnan mukaiset arvot rajatilalle. Suurimpana erona Suomen soveltamisohjeeseen on, että siinä on käytetty jo edelläkin

käsiteltyä turvallisuusluokkaan liittyvää kerrointa γ_d . Lisäksi epäedullisen pysyvän, sekä muuttuvan kuorman suurennuskerroin lasketaan eri tavalla.

Murtorajatilan STR/GEO (sarja B) laskentaan käytettävät kuormien suurennuskertoimet ovat Suomessa taulukon 3 mukaiset. Yhtälölle 6.10a ei ole määritetty muuttuvien kuormien mitoitusarvoja ollenkaan. Tämä poikkeaa Ruotsin kansallisen liitteen ohjeesta, taulukosta 10 huomataan, että Ruotsin ohje esittää yhtälössä 6.10a myös muuttuvan kuorman mitoitusarvot. Tämä voi johtua Ruotsin luonnonoloista, joihin kuuluvat kovat tuulet ja suuret lumikuormat. Lisäksi mitoitusarvojen kertoimissa on eroja. Ruotsin kansallinen liite käyttää tässäkin tapauksessa turvallisuuskerrointa γ_d ja edullisten pysyvien kuormien kerroin on 1,0, kun Suomessa sama kerroin on 0,9.

Yhtälön 6.10b osalta Ruotsin kansallisessa liitteessä käytetään epäedulliselle pysyvälle kuormalle G kerrointa 1,35 sekä lisäkerrointa 0,89. Esijännityksen mitoitusarvojen laskentaan käytettävät arvot ovat Ruotsissa epäedulliselle 1,35 ja edulliselle 1,00. Suomessa vastaavat ovat 1,1 ja 0,9. Suomen soveltamisohje erittelee tieliikennekuorman, kevyen liikenteen kuorman ja raideliikennekuorman erikseen ja esittää niille omat mitoitusarvokertoimet.

Murtorajatilan STR/GEO (sarja C) kertoimet Suomen soveltamisohjeen mukaan ovat taulukon 4 mukaiset. Ruotsin kansallisen liitteen valinnat poikkeavat Suomen arvoista. Ruotsin kansallinen liite esittää taulukon 11 mukaiset arvot kuormien mitoitusarvoille. Siinä ei eritellä liikennekuormia, vaan käytetään kaikille samaa kerrointa 1,4 turvallisuuskertoimen lisäksi. Ruotsin kansallinen ohje ei esitä kertoimia esijännityskuormalle P.

3.3 Materiaalien osavarmuuskertoimien erot

Betonin osalta Suomen soveltamisohjeessa esitetään taulukon 5 mukaiset osavarmuusluvut. Siinä esitetään normaalin- ja onnettomuustilanteiden lisäksi pienennetyt- ja väsymismitoitustilanteet. Ruotsi noudattaa tässä tapauksessa eurokoodin ohjeistusta, joka on esitetty taulukossa 12.

Teräksen osavarmuusluvut ovat Suomen ja Ruotsin kansallisten valintojen mukaan pitkälti samat. Pieniä eroja löytyy rakenneosien ja poikkileikkausten kestävyyyteen liittyvissä luvuissa. Suurin ero on poikkileikkauksen kestävyudessa vetomurtumisen suhteen kertoimessa γ_{M2} . Suomessa sen arvo on suurempi ja Ruotsissa se määritetään taulukossa 13 esitettyjen ehtojen avulla.

Ruotsin kansallisessa liitteessä ei esitetä puulle erityisiä osavarmuuslukuja. Ruotsissa noudatetaan siis eurokoodissa esitettyjä kertoimia. Suomen osavarmuusluvut on esitetty taulukossa 7.

4 KEVYEN LIIKENTEEN SILLAN KUORMAT

Murtorajatilán kuormitusyhdistelmissä 6.10a ja 6.10b muuttuvia kuormia vuorotellaan määräävänä kuormana ja etsitään mahdollisimman epäedullista kuormitusta. Muuttuvien kuormien suurennuskertoimena käytetään liikennekuormaan tai muuhun muuttuvaan kuormaan liittyvää kerrointa, joita on esitelty taulukoissa 2–5 (Suomen standardoimisliitto, 2015). Ei-määräville kuormille käytetään suurennuskertoimen lisäksi taulukossa 1 esitettyjä yhdistelykertoimia.

4.1 Pysyvät kuormat

Sillan pysyvä kuorma tarkoittaa käytännössä sillan omapainoa G (Liikennevirasto, 2017). Murtorajatilán kuormitusyhdistelyssä otetaan rakenteen omanpainon epäedullinen vaikutus huomioon suuremmalla kertoimella ja edullinen vaikutus pienemmällä kertoimella riippuen siitä, aiheuttaako se rakenteeseen kyseisessä tilanteessa lisää rasiitusta vai vähentääkö se sitä.

4.2 Muuttuvat kuormat

4.2.1 Liikennekuormat Suomessa

Keveyen liikenteen sillán mitoituksessa otetaan huomioon pystysuorassa ja pituus- sekä sivusuunnassa olevat staattiset kuormat sekä muuttuvat kuormat. Suunnittelussa otetaan huomioon kolme eriaikaisesti vaikuttavaa pystysuuntaista kuormakaaviota, jotka ovat tasaisesti jakautunut kuorma q_{fk} , pistekuorma Q_{fwk} ja huoltoajoneuvo Q_{serv} (Liikennevirasto, 2017).

Tasaisesti jakautuneen kuorman arvoksi esitetään eurokoodissa SFS-EN 1991-2 5 kN/m^2 . Suomessa Liikenneviraston ohje NCCI 1 esittää kuormituksen määritelmäksi

$$q_{fk}=2,0+120/(L+30), 2,5 \leq q_{fk} \leq 5,0 \text{ [kN/m}^2\text{]}. \quad (1)$$

Pistekuorman $Q_{f_{wk}}$ ominaisarvona käytetään arvoa 20 kN (Liikennevirasto, 2017). Sen vaikutuspinta-alana käytetään $0,2 \times 0,2 \text{ m}^2$. Pistekuormaa käytetään silloin, kun huoltoajoneuvolla ei ole mahdollisuutta päästä sillalle.

Yleensä sillan mitoittava kuormitus on kuitenkin huoltoajoneuvo, jos sen pääsy sillalle ei ole estetty esimerkiksi portailla tai muilla esteillä. Huoltoajoneuvo on raskas ajoneuvo, jota käytetään sillan ja väylien kunnossapitoon. Lainaus Väyläviraston ohjeesta NCCI 1: ”Huoltoajoneuvon kuormakaaviona käytetään standardin SFS-EN 1991-2 kuvan 5.2 mukaista onnettomuuskuormakaaviota. Kuormakaaviossa on kaksi akselia (akseliväli 3,0 m) kokonaispainoltaan 100 kN + 60kN. Akselin rengaskuormien kosketuspinta-ala on $0,2 \times 0,2 \text{ m}^2$ ja rengasväli 1,30 m. Suomen kansallisessa liitteessä on määritetty ajoneuvon leveydeksi 2,0 m.”

Vaakasuuntaisille liikennekuormille pituussuunnassa käytetään yleisesti arvoa $Q_{fik}=96 \text{ kN}$, kun huoltoajoneuvon on mahdollista päästä sillalle. Jos huoltoajoneuvolla ei ole mahdollisuutta päästä ajamaan sillalle, käytetään pituussuuntaiselle kuormalle arvoa 20 kN. Sivusuuntaisen kuorman suuruus on 25 % edellä mainitusta pitkittäiskuormasta (Liikennevirasto, 2017).

Yllä mainituista kuormista muodostetaan kuormaryhmiä. Kuormaryhmiä käsitellään omina yksittäisinä kuorminaan kuormitusyhdistelyissä (Liikennevirasto, 2017). Kevyen liikenteen silloille kuormaryhmiä on kaksi, gr1 ja gr2. Suomen soveltamisohjeen NCCI 1 taulukossa B.5 on esitettyä kuormaryhmien määrittäminen.

Suomen soveltamisohjeessa NCCI 1 on määritelty kevyen liikenteen silloille mukavuuskriteerit värähtelyyn liittyen. Värähtely ei itsessään vaurioita siltaa, mutta voi aiheuttaa epämukavan kokemuksen sillan käyttäjälle. Värähtelyyn liittyvät asiat sovitaan viimekädessä tapauskohtaisesti ja suunnittelijalla sekä tilaajalla on vapaus sopia asiasta erikseen (Liikennevirasto, 2017).

Sillat on jaettu neljään eri mukavuusluokkaan, jotta voidaan valita oikea käytetty heräte, laskentamenetelmä ja kiihtyvyyssrajat. Luokkaan 1 kuuluvat erittäin vilkkaasti liikennöidyt kevyen liikenteen sillat ja luokkaan 4 vähäisesti liikennöidyt sillat. Eri mukavuusluokille käytetään erilaisia herätteitä.

Värähtely on tarkistettava kevyen liikenteen silloissa, jos jokin sen ominaistajuuksista pystysuunnassa on 5 Hz tai vaakasuunnassa 2,5 Hz. Myös vääntövärähtely on tarkistettava ja sen ominaistajuus on sama 2,5 Hz. Pystysuuntainen värähtelyheräte on kävelyheräte, kun tarkasteltava ominaistajuus on alle 2,3 Hz. Muuten käytetään juoksuherätettä. Poikkisuuntainen heräte on aina kävelyheräte.

Lisäksi siltoihin kohdistuu tuulikuormaa, onnettomuuskuormia, lämpötilakuormaa, työnaikaisia kuormia sekä dynaamisia kuormia, jotka on otettava suunnittelussa huomioon. Pääasiassa kuitenkin mitoittavana kuormituksena toimii liikennekuormat.

4.2.2 Liikennekuormat Ruotsissa

Ruotsin kansallisessa liitteessä ei ole määritelty kansallisen valinnan mukaisia arvoja pistekuormalle, huoltoajoneuville tai vaakasuuntaisille kuormille. Eurokoodin esittämät arvot näille poikkeaa kuitenkin hieman Suomen soveltamisohjeesta.

Pistekuormalle Q_{fwk} eurokoodi esittää ominaisarvoksi 10 kN ja vaikutuspinta-alaksi $0,10 \times 0,10 \text{ m}^2$. Eurokoodin käyttämä arvo on siis puolet suurempi, kuin Suomen soveltamisohjeessa.

Huoltoajoneuvon osalta eurokoodi esittää kuormakaavion, jossa on 80 kN ja 40 kN akselit 3 metrin etäisyydellä toisistaan ja raideleveys on 1,3 metriä. Pyörien kosketuspinnan ala on $0,2 \times 0,2 \text{ m}^2$ (Suomen standardoimisliitto, 2004).

Eurokoodi ei esitä vaakasuuntaisille kuormille suoria numeerisia arvoja, kuten Suomen soveltamisohjeessa. Eurokoodissa EN 1991-2 mainitaan asiasta seuraavasti: ”Vaakasuuntaisen kuorman ominaisarvoksi valitaan suurempi seuraavista: 10 prosenttia sillalla olevasta tasan jakautuneesta kokonaiskuormasta tai 60 prosenttia huoltoajoneuvon kokonaispainosta, jos huoltoajoneuvo käyttää kevyen liikenteen väylää.”

Ruotsin kansallisessa liitteessä ei ole erillistä mainintaa siltojen värähtelystä tai niihin liittyvistä herätteistä.

4.3 Seuraamus- ja turvallisuusluokat

Eurokoodin mukaan rakenteet on jaoteltava eri seuraamusluokkiin siten, että luokassa CC1 ovat vähäisimmät seuraukset ja luokassa CC3 on suuret seuraukset. Luokkaan CC2 kuuluvat rakennukset ja rakennelmat, joilla on keskisuuret seuraukset. Seuraukset tarkoittavat rakennuksen tai rakenteen vaurioitumista siten, että siitä aiheutuu vaaraa ihmishengille tai siitä koituu taloudellisia, sosiaalisia tai ympäristöön vaikuttavia seurauksia (Suomen standardoimisliitto, 2006a).

Sillat kuuluvat useimmiten seuraamusluokkaan CC2. Joissain tapauksissa käytetään seuraamusluokkaa CC3 (Liikennevirasto, 2012).

Seuraamusluokan mukaan määräytyy kolme luotettavuusluokkaa RC1, RC2 ja RC3, joiden mukaan määritetään kuormakerroin K_{FI} . Luotettavuusluokalle RC1 kuormakerroin on 0,9, luokalle RC2 1,0 ja luokalle RC3 1,1. Kuormakertoimella käytännössä kerrotaan mitoitusyhtälössä olevia osavarmuuslukuja.

Turvallisuusluokat ovat edellä käsitellyjä Ruotsin eurokoodin soveltamisohjeessa esitettyjä luokkia. Niiden toimintaperiaate on sama kuin seuraamusluokissa. Turvallisuusluokkiin liittyy turvallisuuskerroin γ_d . Turvallisuuskerrointa käytetään lähes kaikissa murtorajatilan kuormitusyhdistelmien yhtälöissä. Niissä käytetään myös lisäkerrointa, joiden kanssa turvallisuuskerroin muodostaa yhdessä kuorman suurennuskertoimen.

Turvallisuusluokkia on yksi enemmän, kuin seuraamusluokkia. Muuten turvallisuus- ja seuraamusluokkien kertoimet vastaavat suuruudeltaan toisiaan. Esimerkiksi seuraamusluokan CC2 ja turvallisuusluokan 3 kerroin on sama 1,0. Jos ollaan alhaisessa tai korkeimmassa seuraamusluokassa, voi laskennan tuloksessa esiintyä eroavaisuutta.

5 LASKENTAESIMERKKI

Liitteenä esitetyssä laskentaesimerkissä käydään läpi Suomen ja Ruotsin soveltamisohjeiden mukaan lasketun teräspalkin taivutusmomentin käyttöasteet normaalissa sekä korkeimmassa seuraamus- ja turvallisuusluokassa. Valitsin esimerkkiin tavallisen I-profiilisen teräspalkin ja materiaaliksi rakenneteräksen S235.

Taivutusmomentin käyttöasteen laskennassa tulee esille materiaaliosavarmuusluvun sekä kuormien määrittämisen erot ja samankaltaisuudet, joten se toimii tämän työn aiheeseen liittyen hyvänä esimerkkinä.

Kuormituksena käytettiin kevyen liikenteen siltojen mitoituksessa käytettävää tungoskuormaa, joka on Suomen soveltamisohjeessa 5 kN/m^2 . Ruotsin soveltamisohjeessa ei ole erikseen määritetty tungoskuormalle ominaisarvoa, joten tässä tapauksessa käytettiin eurokoodin EN 1991-2 esittämää kuormaa 5 kN/m^2 .

Kuten liitteen 1 kuvista 2 ja 3 huomataan, käyttöasteen ero seuraamus- ja turvallisuusluokassa 2 on hyvin minimaalinen, vaikka mitoituskuorman määrittäminen maiden ohjeiden välillä poikkeaa toisistaan. Mitoituskuormaksi saadaan hyvinkin toisiaan vastaavaa suuruusluokkaa olevat kuormat. Materiaaliosavarmuusluku on tässä tapauksessa sama, joten se ei aiheuta eroavaisuuksia tuloksiin.

Liitteen kuvissa 4 ja 5 on esitetty sama laskenta Suomen ohjeen mukaan seuraamusluokassa CC3 ja Ruotsin ohjeen mukaan turvallisuusluokassa 4. Nämä ovat suurimmat luokat, joiden mukaan rakenteen vaurioitumisella on erittäin suuret seuraukset. Tässä tapauksessa käyttöaste poikkeaa jokseenkin toisistaan. Korkeampiin seuraamus- ja turvallisuusluokkiin mentäessä Ruotsin soveltamisohjeen mukaan mitoituskuorma on suurempi. Saadaan siis suurempi käyttöaste, kuin Suomen soveltamisohjeen mukaan.

6 YHTEENVETO

Työn alussa esiteltiin Suomen sekä Ruotsin kuormien yhdistelykertoimia, suurennuskertoimia ja materiaalien osavarmuuslukuja kirjallisuuskatsauksen muodossa. Niitä vertailtiin ja pieniä eroja löydettiin etenkin kuormien suurennuskertoimien laskentatavoista. Materiaalien osavarmuusluvut noudattavat hyvinkin samaa linjaa maiden välillä.

Ruotsin eurokoodien soveltamisohjeessa ei ole otettu asioihin niin kattavasti kantaa, kuin Suomen vastaavassa. Lisäksi Suomen soveltamisohjeet on jaoteltu eri eurokoodin osille selkeämmin.

Lisäksi käsiteltiin kevyen liikenteen siltoihin kohdistuvia kuormia Suomen ja Ruotsin soveltamisohjeiden näkökulmasta. Tässäkin tapauksessa esiintyi sama ilmiö, eli Suomen soveltamisohjeen laajempi kattavuus.

Lopuksi tehtiin laskentaesimerkki, jossa laskettiin teräspalkin taivutusmomentille käyttöasteet molempien maiden soveltamisohjeella. Käyttöaste laskettiin normaalissa seuraamus- ja turvallisuusluokassa 2 sekä korkeimmissa luokissa. Normaalissa luokassa 2 eroa ei esiinny, mutta korkeampiin luokkiin siirryttäessä käyttöasteen eroa syntyy.

LÄHDELUETTELO

- Betonitieto. 2023. Toteutusluokka. Haettu 30.4.2023. <https://www.betonitieto.fi/kirjasto-ja-sanasto/betonisanasto/toteutusluokka.html>
- Eurokoodi Help Desk. 2023. Haettu 20.2.2023. <https://www.eurocodes.fi/historiaa/>.
- Liikennevirasto. 2012. Siltojen rakennelaskelmat. Haettu 6.6.2023. https://ava.vaylapilvi.fi/ava/Julkaisut/Liikennevirasto/lo_2012-12_siltojen_rakennelaskelmat_web.pdf
- Liikennevirasto. 2013. Eurokoodin soveltamisohje, Puurakenteiden suunnittelu - NCCI 5. Haettu 11.3.2023. https://ava.vaylapilvi.fi/ava/Julkaisut/Liikennevirasto/lo_2013-25_ncci5_web.pdf
- Liikennevirasto. 2016. Eurokoodin soveltamisohje, Teräs- ja liittorakenteiden suunnittelu - NCCI 4. Haettu 11.3.2023. https://ava.vaylapilvi.fi/ava/Julkaisut/Liikennevirasto/lo_2016-27_ncci4_web.pdf
- Liikennevirasto. 2017. Eurokoodin soveltamisohje, Siltojen kuormat ja suunnitteluperusteet - NCCI 1. Haettu 10.3.2023. https://ava.vaylapilvi.fi/ava/Julkaisut/Liikennevirasto/lo_2017-24_ncci1_web.pdf
- Ruotsin liikennevirasto. 2018. Ruotsin liikenneviraston määräykset ja yleiset neuvot eurokoodien soveltamisesta. Haettu 13.1.2023. [Transportstyrelsens föreskrifter och allmänna råd \(TSFS 2018:57\) om tillämpning av eurokoder \(konsoliderad elektronisk utgåva\)](#)
- Suomen standardoimisliitto. (2004). *Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat. Siltojen liikennekuormat* (SFS-EN 1991-2).

Suomen standardoimisliitto. (2006a). *Eurokoodi. Rakenteiden suunnitteluperusteet* (SFS-EN 1990).

Suomen standardoimisliitto. (2006b). *Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu. Betonisillat. Mitoittaminen ja yksityiskohtien suunnittelu* (SFS-EN 1992-2).

Suomen standardoimisliitto. (2015). *Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt* (SFS-EN 1992-1-1).

Tielaitos. 2000. Siltojen suunnitelmat. Haettu 20.6.2023.
<https://ava.vaylapilvi.fi/ava/Julkaisut/Taitorakenteet/julkaisut/silsuu00.pdf>

Väylävirasto. 2018. Siltojen korjaus (SILKO), Puurakenteet. Haettu 20.6.2023.
https://ava.vaylapilvi.fi/ava/Julkaisut/Taitorakenteet/silko/kansio1/s1401_web.pdf

Väylävirasto. 2019. Väyläviraston sillat 1.1.2019. Haettu 14.2.2023.
https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/172523/vti_2019-01_978-952-317-720-8.pdf?sequence=5&isAllowed=y

Väylävirasto. 2022. Eurokoodin soveltamisohje, Betonirakenteiden suunnittelu - NCCI 2. Haettu 11.3.2023.
https://ava.vaylapilvi.fi/ava/Julkaisut/Vaylavirasto/vo_2022-5_NCCI_2_web.pdf

LIITE 1 (1). Palkin taivutusmomentin käyttöasteiden laskenta.

Poikkileikkauksen mitat

$$b_f := 225 \text{ mm} \quad h_f := 10 \text{ mm}$$
$$t_w := 6.2 \text{ mm} \quad h_w := 200 \text{ mm} - 2 \cdot h_f$$
$$h := 200 \text{ mm} \quad L := 8 \text{ m}$$

Materiaali S235 $f_y := 235 \text{ MPa}$
 $\varepsilon := 1.0$

Poikkileikkausluokka:

Uuma, taivutuksessa:

$$c_1 := h_w$$
$$\frac{c_1}{t_w} \leq 72 \cdot \varepsilon = 1$$

Uuman poikkileikkausluokka on 1.

Laipat, puristuksessa:

$$c_2 := \frac{b_f}{2} - \frac{t_w}{2} = 109.4 \text{ mm}$$
$$\frac{c_2}{h_f} \leq 14 \cdot \varepsilon = 1$$

Palkin poikkileikkausluokka on 3.

Kuva 1. Palkin poikkileikkausluokan määrittäminen.

Suomessa	
Seuraamusluokka CC2:	$K_{FI} := 1.0$
Materiaaliosavarmuus:	$\gamma_{M0} := 1.0$
Tungoskuorma Suomen soveltamisohjeen mukaan:	$q_{fk} := 5 \frac{kN}{m^2} \cdot 1 m = 5 \frac{kN}{m}$
Palkin omapaino metrille:	$g_k := 7800 \frac{kg}{m^3} \cdot (b_f \cdot h_f \cdot 2 + t_w \cdot h_w) \cdot 9.81 \frac{m}{s^2} = 0.43 \frac{kN}{m}$
Mitoituskuorma murtorajatilassa STR Suomen soveltamisohjeiden mukaan:	$p_d := K_{FI} \cdot 1.25 \cdot g_k + K_{FI} \cdot 1.35 \cdot q_{fk} = 7.287 \frac{kN}{m}$
Mitoitusmomentti	$M_{Ed} := \frac{p_d \cdot L^2}{8} = 58.297 kN \cdot m$
Poikkileikkaus on symmetrinen ->	$y_c := \frac{h}{2} = 100 mm$
Neliömomentti:	$I_z := \left(\frac{b_f \cdot h_f^3}{12} + b_f \cdot h_f \cdot \left(y_c - \frac{h_f}{2} \right)^2 \right) \cdot 2 + \frac{t_w \cdot h_w^3}{12}$ $I_z = (4.366 \cdot 10^7) mm^4$
Kimmainen taivutusvastus:	$W_{el} := \frac{I_z}{y_c} = (4.366 \cdot 10^5) mm^3$
Taivutusmomenttikestävyys:	
Käytetään taivutusmomenttikestävyden laskentaan kaavaa:	$M_{c,Rd} := \frac{W_{el} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 102.609 kN \cdot m$
Taivutusmomentin käyttöaste:	$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \cdot 100 = 56.815 \%$

Kuva 2. Taivutusmomentin käyttöaste laskettuna Suomen soveltamisohjeen mukaisesti seuraamusluokassa CC2.

Ruotsissa	
Materiaaliosavarmuus:	$\gamma_{M0} := 1.0$
Turvallisuusluokka 2:	$\gamma_d := 0.91$
Tungoskuorma standardin EN 1991-2 mukaan:	$q_{fk} := 5 \frac{kN}{m^2} \cdot 1 m = 5 \frac{kN}{m}$
Mitoituskuorma murtorajatilassa STR Ruotsin soveltamisohjeiden mukaan:	$p_d := \gamma_d \cdot 0.89 \cdot 1.35 \cdot g_k + \gamma_d \cdot 1.5 \cdot q_{fk} = 7.295 \frac{kN}{m}$
Mitoitusmomentti	$M_{Ed} := \frac{p_d \cdot L^2}{8} = 58.359 kN \cdot m$
Poikkileikkaus on symmetrinen ->	$y_c := \frac{h}{2} = 100 mm$
Neliömomentti:	$I_z := \left(\frac{b_f \cdot h_f^3}{12} + b_f \cdot h_f \cdot \left(y_c - \frac{h_f}{2} \right)^2 \right) \cdot 2 + \frac{t_w \cdot h_w^3}{12}$ $I_z = (4.366 \cdot 10^7) mm^4$
Kimmainen taivutusvastus:	$W_{el} := \frac{I_z}{y_c} = (4.366 \cdot 10^5) mm^3$
Taivutusmomenttikestävyys:	
Käytetään taivutusmomenttikestävyden laskentaan kaavaa:	$M_{c.Rd} := \frac{W_{el} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 102.609 kN \cdot m$
Taivutusmomentin käyttöaste:	$\frac{M_{Ed}}{M_{c.Rd}} \cdot 100 = 56.875 \%$

Kuva 3. Taivutusmomentin käyttöaste laskettuna Ruotsin soveltamisohjeen mukaisesti turvallisuusluokassa 2.

Suomessa	
Seuraamusluokka CC3:	$K_{FI} := 1.1$
Materiaaliosavarmuus:	$\gamma_{M0} := 1.0$
Tungoskuorma Suomen soveltamisohjeen mukaan:	$q_{fk} := 5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot 1 \text{ m} = 5 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$
Palkin omapaino metrille:	$g_k := 7800 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot (b_f \cdot h_f \cdot 2 + t_w \cdot h_w) \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 0.43 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$
Mitoituskuorma murtorajatilassa STR Suomen soveltamisohjeiden mukaan:	$p_d := K_{FI} \cdot 1.25 \cdot g_k + K_{FI} \cdot 1.35 \cdot q_{fk} = 8.016 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$
Mitoitusmomentti	$M_{Ed} := \frac{p_d \cdot L^2}{8} = 64.127 \text{ kN} \cdot \text{m}$
Poikkileikkaus on symmetrinen ->	$y_c := \frac{h}{2} = 100 \text{ mm}$
Neliömomentti:	$I_z := \left(\frac{b_f \cdot h_f^3}{12} + b_f \cdot h_f \cdot \left(\left(y_c - \frac{h_f}{2} \right) \right)^2 \right) \cdot 2 + \frac{t_w \cdot h_w^3}{12}$ $I_z = (4.366 \cdot 10^7) \text{ mm}^4$
Kimmainen taivutusvastus:	$W_{el} := \frac{I_z}{y_c} = (4.366 \cdot 10^5) \text{ mm}^3$
Taivutusmomenttikestävyys:	
Käytetään taivutusmomenttikestävyden laskentaan kaavaa:	$M_{c,Rd} := \frac{W_{el} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 102.609 \text{ kN} \cdot \text{m}$
Taivutusmomentin käyttöaste:	$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \cdot 100 = 62.497 \%$

Kuva 4. Taivutusmomentin käyttöaste laskettuna Suomen soveltamisohjeen mukaisesti seuraamusluokassa CC3.

Ruotsissa	
Materiaaliosavarmuus:	$\gamma_{M0} := 1.0$
Turvallisuusluokka 4:	$\gamma_d := 1.1$
Tungoskuorma standardin EN 1991-2 mukaan:	$q_{fk} := 5 \frac{kN}{m^2} \cdot 1 m = 5 \frac{kN}{m}$
Mitoituskuorma murtorajatilassa STR Ruotsin soveltamisohjeiden mukaan:	$p_d := \gamma_d \cdot 0.89 \cdot 1.35 \cdot g_k + \gamma_d \cdot 1.5 \cdot q_{fk} = 8.818 \frac{kN}{m}$
Mitoitusmomentti	$M_{Ed} := \frac{p_d \cdot L^2}{8} = 70.544 kN \cdot m$
Poikkileikkaus on symmetrinen ->	$y_c := \frac{h}{2} = 100 mm$
Neliömomentti:	$I_z := \left(\frac{b_f \cdot h_f^3}{12} + b_f \cdot h_f \cdot \left(y_c - \frac{h_f}{2} \right)^2 \right) \cdot 2 + \frac{t_w \cdot h_w^3}{12}$ $I_z = (4.366 \cdot 10^7) mm^4$
Kimmainen taivutusvastus:	$W_{el} := \frac{I_z}{y_c} = (4.366 \cdot 10^5) mm^3$
Taivutusmomenttikestävyys:	
Käytetään taivutusmomenttikestävyden laskentaan kaavaa:	$M_{c.Rd} := \frac{W_{el} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 102.609 kN \cdot m$
Taivutusmomentin käyttöaste:	$\frac{M_{Ed}}{M_{c.Rd}} \cdot 100 = 68.75 \%$

Kuva 5. Taivutusmomentin käyttöaste laskettuna Ruotsin soveltamisohjeen mukaisesti turvallisuusluokassa 4.