

Tampereen ammattikorkeakoulu
Rakennustekniikan koulutusohjelma
Talorakennustekniikka
Eetu Partala

Opinnäytetyö

Eurokoodien vaikutukset teräsbetonisillan kansirakenteen mitoitukseen

Työn ohjaaja
Työn teettäjä

Lehtori Jorma Kylliäinen
Ramboll Finland Oy, valvoja Ilkka Vilonen

Tampere 4/2010
Tampereen ammattikorkeakoulu
Rakennustekniikan koulutusohjelma, Talonrakennustekniikka

Tekijä	Eetu Partala
Työn nimi	Eurokoodien vaikutukset teräsbetonisillan kansirakenteen mitoittamiseen
Sivumäärä	49 sivua + 6 sivua liitteitä
Valmistumisaika	4/2010
Työnohjaaja	Dipl. ins. Jorma Kylliäinen
Työn teettäjä	Ramboll Finland Oy, valvojana Tekn. lis. Ilkka Vilonen

Tiivistelmä

Opinnäytetyössä tutkittiin eurooppalaisten suunnittelustandardien, eli eurokoodien voimaantumisen vaikutuksia betonisillan mitoituksessa. Kohteessa mitoitettiin betonisillan rakenteet eurokoodin sekä Suomen rakennusmääräyskokoelman mukaisten mitoitusperusteiden mukaan tavoitteena kehittää kansallisia sovellusohjeita ja tuottaa tietoa uusista normeista.

Vertailulaskelmiin pohjautuvassa työssä keskitytään ohjelmamuutoksen tuomiin keskeisiin muutoksiin sillan pääkannakkeessa kuormitusten, suunnittelumenetelmien ja lopullisten teräsmäärien suhteen. Tutkimuksen vertailut ovat osa Liikenneviraston hallinnoimaa hanketta, jonka tuloksena julkaistaan eurokoodien sovellusohje sillansuunnittelussa.

Esimerkkikohde on valtatie 4:lle vuonna 2010 valmistuva 80 metriä pitkä neliaukkoinen jatkuva betonipalkkisilta. Tutkimuksessa keskityttiin sillan pääkannakkeen mitoittamiseen, jossa muodostettiin eurokoodin mukaan vaadittavat kuormaryhmät sekä laskettiin niiden aiheuttamat rasitukset, joita verrattiin vanhojen ohjeiden mukaisiin tuloksiin.

Tulokset kertovat mitoitusmenetelmien keskeisistä muutoksista, niiden vaikutuksista suunnitteluun ja rakenteen lopullisista teräsmääristä. Merkittävimmät eroavaisuudet eurokoodilla ovat kuormien yhdistely ryhmittäin ja ristikkoanalogian käyttäminen leikkausmitoituksessa, jolloin betonin leikkauslujuus jätetään huomioimatta ja kaikki voimat otetaan vastaan teräksillä.

Halkeamaleveyden laskenta on myös kokenut muutoksia, jolloin käyttörajatilan mitoittavuus saattaa joissakin tapauksissa laskea. Tarkastelut toivat molemmilla normeille hyvin samansuuruisia tuloksia eurokoodin vaatiessa hieman kevyempää raudoitusta kuin edeltäjänsä betoninormi.

Uudistuneet suunnitteluperusteet antavat paljon mahdollisuuksia, mutta tuovat myös mukanaan haasteita. Menetelmiä tutkimalla ja ohjeita kehittämällä saadaan aikaan toimivat työkalut sillansuunnitteluun myös eurokoodien aikakaudella.

Avainsanat: eurokoodi, sillat, sillansuunnittelu

Writer	Eetu Partala
Thesis	Eurocodes effect on concrete bridge engineering
Pages	49 pages + 6 appendices
Graduation time	4/2010
Thesis supervisor	Jorma Kylliäinen
Co-operating company	Ramboll Finland Oy, Supervisor Ilkka Vilonen

Abstract

This thesis researched how the enactment of European standards will effect on bridge engineering. As an example, a reinforced concrete bridge was designed in accordance with eurocode and Finnish national standards in order to develop engineering instructions and to gain knowledge about these new provisions.

The study focused on the focal changes of loads, structural guidelines and the amounts of reinforcing used on the main beam of the bridge. The comparison was a part of Finnish traffic bureau's project developing a national bridge engineering guide.

The example bridge is 80 meters long, four span concrete beam bridge, which is built to one of Finland's most vital highways in the beginning of year 2010. The main beam was divided into several points for the analysis. The thesis focused on how the material properties and engineering instructions will effect on the structure and what are the main changes compared to the previous regulations.

Results of this study will give a general view of new regulations and their impact on the structure and the amounts of concrete reinforcing. The most remarkable changes are in shear force and crack analysis, which was also an essential part of the research. On the main beam, both of the regulations came out with very alike outcome, although eurocode required slightly less concrete reinforcing than Finnish national standards.

New guidelines in bridge engineering come with challenges, but it also makes it possible to create structures that are technically more developed. By researching and improving these regulations the tools for bridge engineering can be developed for the eurocode era.

Alkusanat

Eurokoodit ja niiden vauhdilla lähestyvä voimaantulo on asettanut monelle suunnittelu-toimistolle paineita perehtyä uudistuviin ohjeisiin. Työn aihetta pohtiessamme tuli esille se, että sillansuunnittelussa kaivattiin asian tiimoilta tietämystä ja kehitystä. Halu kehittää ja tutkia teki aiheen valinnan varsin helpoksi.

Eurokoodien mukainen suunnittelu on tullut hiljalleen tutuksi opintojeni aikana, joten tutkimuksen aiheen omaksuminen oli luontevaa. Jatkossa kaikki mitoitus tulee noudattamaan eurokoodin mukaisia perusteita, joten kehitystyö aiheen parissa oli todella kiinnostavaa ja innoittavaa.

Haluan kiittää Rambollin Ilkka Vilosta projektin mahdollistamisesta ja saamastani vastuusta. Suuri kiitos kuuluu myös työn ohjaajalle Jorma Kylliäiselle suunnan näyttämisestä. Projektin mittasuhteiden karatessa horisonttiin ohjaajien hyvät neuvot ja ideat auttoivat rajaamaan tutkimuksen yksien kansien väliin.

Tampereella huhtikuussa 2010

Eetu Partala

1	JOHDANTO.....	7
1.1	TAUSTA	7
1.2	TAVOITTEET	7
1.3	TOTEUTUS	8
2	KOHDETTA KOSKEVAT TIEDOT	9
2.1	SILTAHANKE JA SILTAPAIKKA.....	9
2.2	SILLAN RAKENNE.....	10
2.3	LASKENTAMENETELMÄT	12
2.4	RAKENNEMALLI	13
3	MATERIAALIOMINAISUUDET	14
3.1	BETONI	14
3.2	TERÄS.....	16
4	KUORMAT.....	18
4.1	PYSYVÄT KUORMAT	18
4.1.1	<i>Omapaino</i>	18
4.1.2	<i>Kutistuma ja viruma</i>	18
4.1.3	<i>Tukien painuminen</i>	19
4.2	MUUTTUVAT KUORMAT.....	20
4.2.1	<i>Siltojen liikennekuormat</i>	20
4.2.1.1	Kuormakaaviot	20
4.2.1.2	Kuormaryhmät.....	21
4.2.1.3	Jarrukuormat	23
4.2.2	<i>Tuulikuormat</i>	23
4.2.3	<i>Lämpötilakuormat</i>	23
4.2.3.1	Lämpötilan muutos	24
4.2.3.2	Lämpötilaero.....	24
4.2.4	<i>Onnettomuuskuormat</i>	25
5	MURTORAJATILAMITOITUS	26
5.1	TAIVUTUS	26
5.2	LEIKKAUS JA VÄÄNTÖ	27
6	KÄYTTÖRAJATILAMITOITUS	29
6.1	HALKEAMALEVEYDEN MÄÄRITTÄMINEN.....	29
6.2	SALLITUT HALKEAMALEVEYDET	30

7	TULOSTEN VERTAILU	32
7.1	VOIMASUUREET.....	32
7.1.1	<i>Taivutusmomentti</i>	33
7.1.2	<i>Leikkausvoima</i>	37
7.1.3	<i>Vääntömomentti</i>	38
7.2	MITOITUS MURTORAJATILASSA	39
7.2.1	<i>Taivutus</i>	39
7.2.2	<i>Leikkaus ja vääntö</i>	40
7.3	MITOITUS KÄYTTÖRAJATILASSA.....	42
7.3.1	<i>Halkeamaleveys</i>	42
7.4	MUIDEN VERTAILULASKELMIEN TULOKSET.....	45
8	YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	46
	LÄHDELUETTELO.....	48
	LIITTEET.....	49

1 Johdanto

1.1 Tausta

Euroopan yhdistymisen myötä muuttuvat myös rakentamista ja rakennustuotteita koskevat normit, standardit ja ohjeistukset. Nämä eurokoodina tunnetut ohjeet ovat kantavien rakenteiden suunnittelua koskevia eurooppalaisia standardeja, joiden soveltaminen eri maissa vaatii kansallisten liitteiden laatimista. Standardit kattavat rakenteiden suunnitteluperusteet ja erilaiset kuormat.

Eurokoodit korvaavat niihin rinnastettavat rakenteiden kantavuutta koskevat tekniset ohjeet, jotka nyt sisältyvät Suomen rakentamismääräyskokoelman B-osaan. Niiden käyttöönotto kantavien rakenteiden suunnittelussa on merkittävin suunnitteluohjeita koskeva muutos kautta aikojen ja aiheuttaa tarvetta lisätutkimuksiin sekä vertailuihin eri säännösten välillä.

Eurokoodin vahvistamiseksi julkaistava kansallinen standardi sisältää varsinaisen eurokoodin tekstin sekä kansalliset liitteet. Sillansuunnittelussa tullaan käyttämään sovel-
lusohjetta, johon on kerätty kaikki olennainen tieto rakenteelle koituvista rasituksista ja niiden käsittelystä mitoituksessa.

Sillansuunnittelun osalta sovellusohjeiden kehittämisestä Suomessa vastaa Liikennevirasto. Tämän vertailulaskelmahankkeen tarkoituksena on hyödyntää nykyistä sillansuunnitteluohjeiston tietoutta niiltä osin, kuin se eurokoodin täydentämisen osalta on mahdollista. Tutkimukset tuottavat uutta tietoa varmempien, tehokkaampien ja taloudellisempien suunnitteluratkaisujen löytämiseksi.

1.2 Tavoitteet

Tutkimuksen tavoitteena oli tutustua eurokoodin mukaiseen betonisiltojen kuormien käsittelyyn, rakenteen mitoittamiseen sekä näiden tuomiin yhteisvaikutuksiin. Vertailulaskelmissa selvitetään, missä osissa muutokset olivat merkittävimpiä nykyohjeistukseen verrattuna ja miten kuormista ja mitoitusmenettelyistä aiheutuneet muutokset vaikuttavat rakenteen teräsmääriin.

Tutkimuksessa saatuja tuloksia voidaan käyttää taustatietona eurokoodin kansallisiin liitteisiin perustuvien siltasuunnittelun sovellusohjeiden kehittämisessä. Eurokoodeihin siirtyminen asettaa uusia haasteita alan suunnittelijoille, joten sen parissa tehtyä tutkimusta voidaan hyödyntää myös henkilöstön kouluttamisessa ja perehdyttämisessä uusiin normeihin.

1.3 Toteutus

Tämän tutkimuksen vertailulaskelmat toteutettiin Liikenneviraston toimeksiantona Ramboll Finlandin Tampereen siltayksikössä. Työssä verrattiin esimerkkinä käytetylle siltarakenteelle kohdistuvia rasituksia ja sen vaatimia rauditusmääriä niin Suomen rakennusmääräyskokoelman kuin uusien eurokoodin mukaisten mitoitusperusteiden mukaan.

Vertailulaskelmahankkeeseen kutsuttiin mukaan kaikki halukkaat konsulttitoimistot, jotka osallistuivat tutkimukseen omien vertailukohteidensa kanssa tuottaen sen vaatimaa tietoa normimuutoksesta. Jokainen hankkeeseen osallistunut sai tehtäväkseen tutkia muutoksen alla olevia suunnitteluperusteita ja raportoida tuloksistaan niin, että yhteenvedon perusteella saadaan selkeä kuva ohjemuutoksen tuomista vaikutuksista.

Tutkimuksessa käytettiin pohjatietona sillansuunnittelun koulutusseminaarissa saatuja eurokoodiohjeita, varsinaisia standardeja, sekä niiden kansallisia liitteitä. Käytetyistä suunnitteluohjeista osa vahvistetaan vasta tämän hankkeen tulosten perusteella, joten vertailut tehtiin osittain luonnosversioiden perusteella.

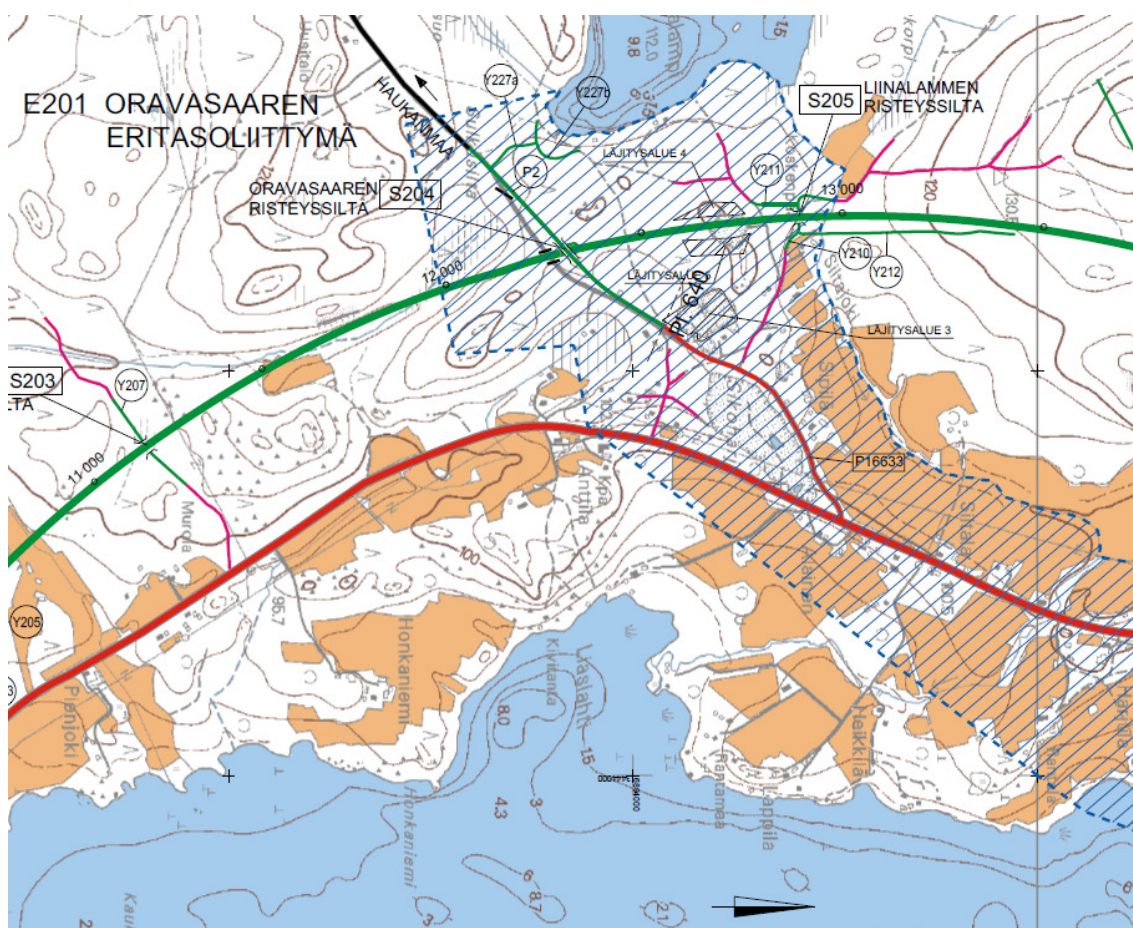
Vertailulaskelmat tehtiin vuoden 2010 alussa valtatie 4:lle rakennettavasta neliaukkoisesta teräsbetonipalkkisillasta, jonka voimasuureita ja rauditusmääriä laskettiin valituissa tarkastelupisteissä. Tutkittavia osa-alueita olivat pääpalkin ja pilarien mitoitus murtorajatilassa, sekä käyttörajatilatarkastelut mukaan lukien väsytytkuormitukset. Tässä työssä on keskitytty pääpalkin mitoitukseen ja tarkasteltu yksityiskohtaisemmin sen mitoitusta.

2 Kohdetta koskevat tiedot

2.1 Siltahanke ja siltapaikka

Oravasaaren risteys sillan suunnittelu oli osa suurta valtatie 4:n parantamishanketta välillä Viisarimäki – Oravasaari. Jyväskylän eteläpuolelle rakennettava 22 kilometrin pituinen, 21 erilaista siltaa käsittävä väyläosuus suunniteltiin uuteen maastokäyrään nykyisen valtatie 4:n länsipuolelle.

Kuvassa 1 esitettyssä yleiskartassa on valtatie 4:n uusi linjaus esitetty vihreällä värillä ja nykyinen tie punaisella. Sinisellä katkoviivalla on rajattu Oravasaaren pohjavesialue. Vertailukohteena oleva silta ylittää valtatie 4:n kuvaan merkityssä risteyspaikassa.



Kuva 1: Yleiskartta Oravasaaren alueesta

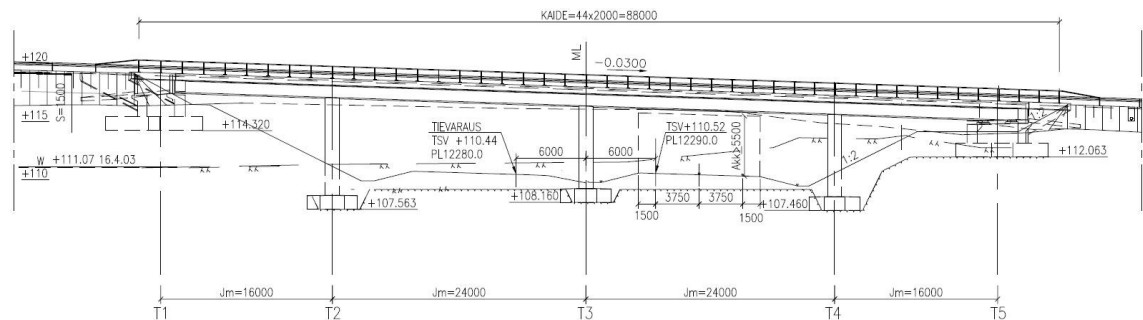
2.2 Sillan rakenne

Silta on tyypiltään betoninen jatkuva palkkisilta. Maatuki T1 perustetaan maanvaraisesti ja muut tuet perustetaan kallion varaan. Poikkileikkaus on yksipalkkinen laattapalkki, jonka pääpalkin korkeus on 1,3 m ja leveys 3,5 m.

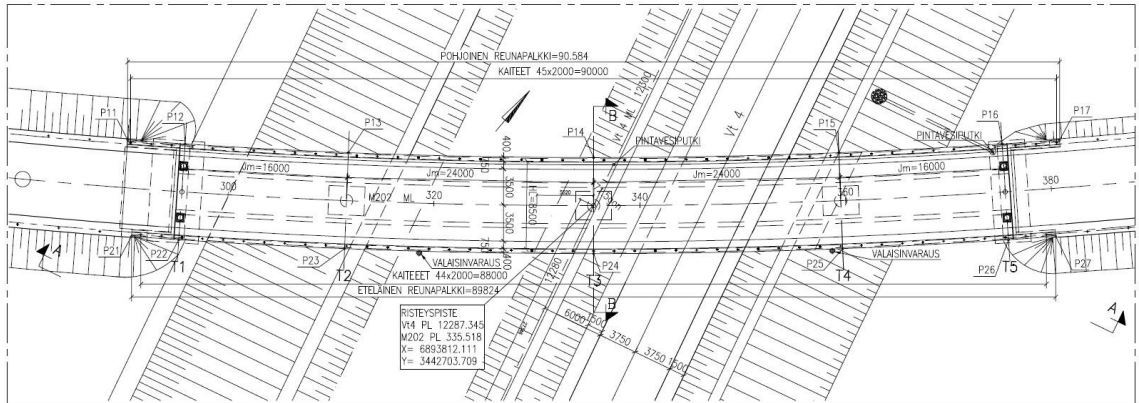
Sillan rakenne on symmetrinen niin pituus- kuin poikkisuunnassa, joten tarkastelupisteet on valittu väliltä T1–T3, jolloin myös tukipainuman vaikutus voidaan huomioida. Sillansuunnittelussa on varauduttu moottoritien vaiheittain rakentamiseen, joten aukossa T2–T3 on varaus uudelle tielinjalle. Sillan tuet T1 ja T5 ovat varustettu kumipesälaakereilla sekä liikuntasaumalaitteilla. Välituet liittyvät kansirakenteeseen jäykästi.

Sillan päämitat:	Jännemitat	16,0 + 24,0 + 24,0 + 16,0 m
	Hyödyllinen leveys	8,5 m
	Kokonaispituus	80 m
	Vinous	0 gon

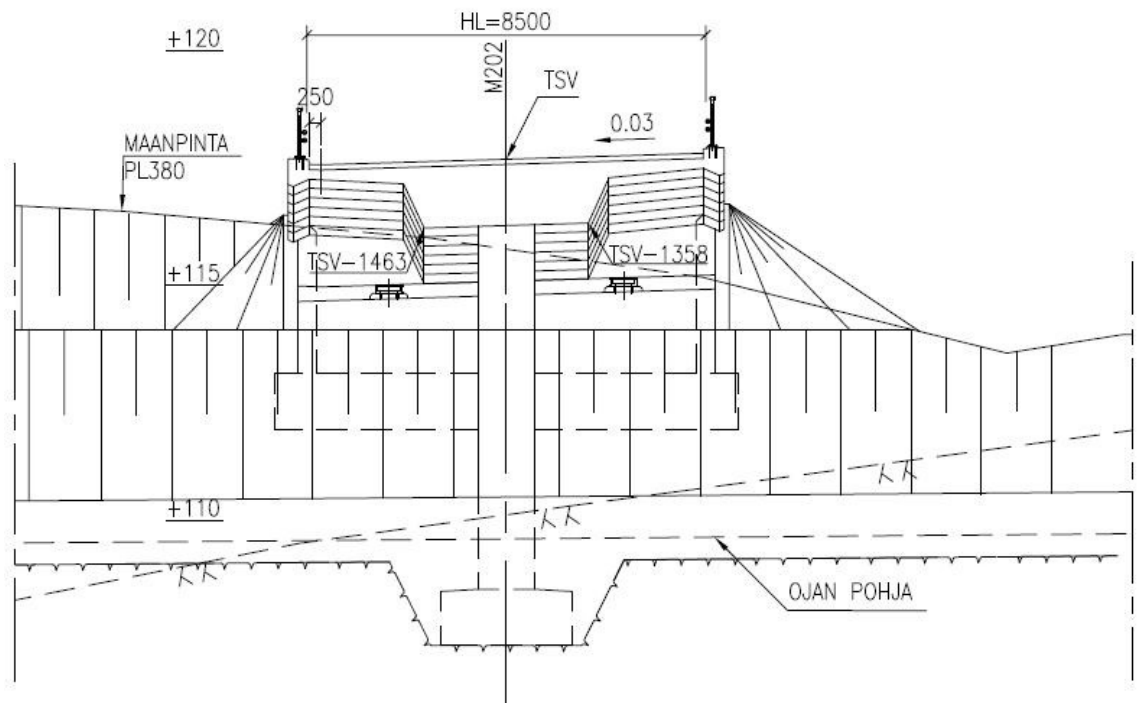
Sillan pituus- ja poikkileikkaukset sekä tasopiirustus näkyvät kuvissa 2–4.



Kuva 2: Sillan pituusleikkaus



Kuva 3: Sillan tasokuva



Kuva 4: Sillan poikkileikkaus

2.3 Laskentamenetelmät

Laskenta on tehty käyttäen Tassu -ohjelmiston kehä- ja arinasovelluksia, joiden tuloksina saadaan eri kuormitustapausten voimasuureet ja kuormitusyhdistelmien ääriarvot.

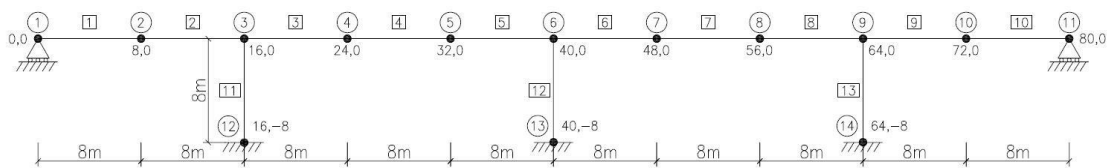
Ohjelma ratkaisee annetun kehä- tai arinarakenteen voimasuureet siirtymämenetelmällä, jolloin kullekin solmupisteelle muodostuu kolme tasapainoyhtälöä siirtymien ja voimasuureiden välille. Kehä -sovelluksesta saadaan pysty- ja vaakasiirtymät sekä solmupisteen kiertymä, kun arinassa siirtyminä ovat solmupisteen kiertymät x- ja y-akselin ympäri sekä pystysiirtymä.

Mikäli ohjelmalle on annettu myös kuormitusyhdistelyn lähtötiedot, saadaan tuloksena kuormitusyhdistelmien ääriarvot. Kussakin sauvan jakovälipisteessä tulostetaan siirtymän lisäksi neljä ääriarvoa kustakin voimasuureesta. Ensimmäisessä ryhmässä tulostetaan voimasuureet käyttörajatilassa ja toisessa ryhmässä tulostetaan voimasuureet murtorajatilassa. Voimasuureet ovat normaalivoima, leikkausvoima, taivutusmomentti sekä Arinassa vääntömomentti, joiden tulokseksi saadaan kunkin yksittäisen suureen ääriarvot.

Kuormien yhdistelyä käytettiin vain yksittäisten kuormien ääriarvojen saamiseksi ja rajatilayhdistelyt tehtiin manuaalisesti Excel-taulukkolaskentaa apuna käyttäen. Tarkastelupisteitä oli yhteensä yhdeksän kappaletta välillä T1–T3; Aukoissa maksimimomentin kohdalla, tuilla, sekä tukien vieressä mitoittavan leikkausvoiman kohdalla. Taivutus-, leikkaus- ja vääntömitoitus tehtiin vain niissä tarkastelupisteissä joissa voimasuure saavuttaa ääriarvonsa.

2.4 Rakennemalli

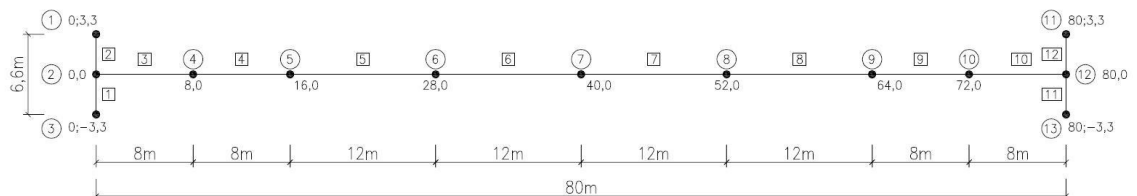
Rakennetta käsiteltiin ensin Tassu-ohjelmiston kehäsovelluksen avulla. Tassu-kehäsovelluksessa mallinnettiin siltarakenne pituussuunnassa huomioiden tukipisteiden vapausasteet ja pilareiden tuennat. Silta on vaakasuorassa kaareva, mutta loivuuden johdosta voidaan rakenne olettaa suoraksi. Kehämallin hyödyntämiseksi mitoituksessa kahden kuormakaistan kuormitukset yhdistettiin yhdeksi kuormalinjaksi. Tassu-ohjelmiston kehämalli on esitetty kuvassa 5.



Kuva 5: Tassu-kehämalli

Pääkannattimelle aiheutuvat vääntörasitukset laskettiin kuvassa 6 esitetyn Tassu-arinasovelluksen avulla. Arinarakenne muodostettiin sillan tasokuvan avulla asettaen tukipisteiksi laakerointikohdat ja välitukina olevat pilarit. Pilarien jäykkyys kiertymää vastaan mallinnettiin kehäajon pohjalta saatujen jousivakioiden avulla.

Liikennekuorman aiheuttama vääntömomentti ajettiin kansirakenteen läpi, jolloin tuloksiksi määräävät vääntörasitukset kussakin tarkastelupisteessä. Yksipalkkisen ja symmetrisen poikkileikkauksen ansiosta vääntörasitukset aiheutuivat vain epäkeskisestä liikennekuormasta. Kuvassa 6 on esitetty arinamalli vaakatasossa sekä liikennekuorman aiheuttama vääntörasitus.



Kuva 6: Tassu-arinamalli

3 Materiaaliominaisuudet

3.1 Betoni

Betonin lujuusominaisuuksia kuvataan puristuslujuudella, joka voidaan määrittää kuutiolujuuden tai lieriölujuuden avulla.

f_{ck} = Betonin ominaislierölujuus

$f_{ck,cube}$ = Betonin ominaiskuutiolujuus

Betoninormeista tuttu tunnus K ja kuutiolujuuden mukainen luokittelu muuttuvat eurokoodin myötä lieriölujuuden määrittelyyn ja symboliin C. Taulukossa 1 on esitetty betonin puristuslujuus vanhojen kansallisten ohjeiden sekä vastaava Eurokoodin mukainen merkintä, jossa esitetään sekä kuutio- että, lieriölujuuden ominaisarvo jakoviivalla erotettuna. (By 60, 2008)

Taulukko 1: Betonin puristuslujuuden merkintä

RakMk		Eurocode
$K_{ck,cube}$	→	$f_{fc}/f_{fc,cube}$
K30-1		C25/30-1

Lujuusluokkien merkinnän muuttuessa poistuvat myös käytöstä usein sillanrakentamisessa käytetyt lujuusluokat K35 ja K40. Täysin samaa betonin puristuslujuuden ominaisarvoa on siis mahdoton saavuttaa molemmilla ohjeilla betoniluokkien ja puristuslujuuden määrittämisen muututtua.

Kuutio- ja lieriölujuuksien erisuuruuteen on olemassa useita syitä; Ensimmäkin lieriöt kuormitetaan valusuunnassa, mutta kuutiot valusuuntaa vastaan. Koekappaleen muoto vaikuttaa myös olennaisesti, sillä kuutiota kuormitettaessa tasolevyjen kitka ja laajenemista estävät vaikutukset ulottuvat koko kappaleen korkeudelle, kun taas lieriötä kuormitettaessa nämä vaikutukset eivät yllä kappaleen keskikorkeudelle, jossa murtuminen tapahtuu. Lujuuksien suhde ei ole vakio, vaan suurenee lujuusluokan kasvaessa.

Betonin valmistuksessa käytettävä kiviaines saattaa vaihdella eri maissa, joten ominaisuuksien laskennassa on tarpeellista huomioida kiviaineiden laatu jotta voidaan määrittää tarkat betonin lujuusominaisuudet. Eurokoodissa esitetyt taulukkoarvot on esitetty kvartsiittipitoiselle kiviainekselle, joten kalkki- tai hiekkakivipitoisesta kiviaineksesta valmistetulle betonille on arvoja korjattava pienennyskertoimin.

Betonin kimmoiset muodonmuutosominaisuudet riippuvat koostumuksesta ja sen eri ainesosien kimmokertoimista. Standardin arvot ovat keskimääräisiä yleisarvoja, joita voidaan tarpeen tullen määrittää muilla tavoin jos poikkeamat vaikuttavat olennaisesti rakenteen toimintaan. Tällä tavoin betonin ominaisuuksissa voidaan huomioida erilaiset betonin runkoaineet. (SFS-EN 1991-1-1, 2002)

Taulukko 2: Betonin lujuus- ja muodonmuutosominaisuudet (SFS-EN 1991-1-1, 2002)

Merkintä	Kuvaus	Ominaisuudet							
		16	20	25	30	35	40	45	50
f_{ck} (MPa)	Lieriölujuuden ominaisarvo	16	20	25	30	35	40	45	50
$f_{ck, cube}$ (MPa)	Kuutiolujuuden ominaisarvo	20	25	30	37	45	50	55	60
f_{ctm} (MPa)	Keskimääräinen vetolujuus	1,9	2,2	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8	4,1
$f_{ctk,0,05}$ (MPa)	Vetolujuuden ominaisarvo	1,3	1,5	1,8	2,0	2,2	2,5	2,7	2,9
E_{cm}^a (GPa)	Sekanttimoduuli	29	30	31	33	34	35	36	37
Merkinnät ^a Keskimääräinen sekanttimoduuli 28 d betonille, jonka runkoaine on kvartsiittia.									

Betonin osalta varmuusluvut pysyvät ennallaan ja vanhat rakentamismääräyskokoelmasta tutut rakenneluokat 1 ja 2 säilyvät edelleen käytössä. Eri rakenneluokkien osavarmuusluvut on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3: Betonin osavarmuusluvut

Betonin osavarmuusluvut γ_c	
Rakenneluokka 1	1,35
Rakenneluokka 2	1,5
Onnettomuus	1,2

Betonin puristuslujuuden arvo saadaan ominaislieriölujuuden ja osavarmuusluvun korjatulla suhteella. Vetolujuutta määritettäessä käytetään kuitenkin betonin vetolujuuden 5 %:n fraktiilin mukaista arvoa.

Kaavoissa esiintyvän α_{cc} -kertoimen avulla otetaan huomioon puristuslujuuteen vaikuttavat pitkäaikaisvaikutukset ja kuorman vaikutustavasta johtuvat epäedulliset vaikutukset. Suomessa kertoimen arvoksi on määritetty 0,85 ja vetolujuuden vastaavaksi α_{ct} -kertoimeksi 1,0. Eurokoodi sallii kansallisissa ohjeissa korjauskertoimien vaihteluväliksi 0,85...1,0.

Betonin puristuslujuus (f_{cd}) on:

$$f_{cd} = \alpha_{cc} \cdot f_{ck} / \gamma_c \quad (1)$$

Betonin vetolujuus (f_{ctd}) on:

$$f_{ctd} = \alpha_{ct} \cdot f_{ctk,0,05} / \gamma_c \quad (2)$$

Raudoittamattomalle betonille käytetään samaa varmuuskerrointa kuin raudoitetulle betonille, mutta lujuusarvoja pienennetään.

3.2 Teräs

Betoniterästen merkinnät muuttuvat, kun vanhat teräsluokat ja standardit poistuvat kokonaan uusien eurokoodien myötä. CE-merkintä tulee korvaamaan kansalliset standardit, ja Suomessa käytettäville teräslaaduille tullaan hakemaan EN-standardit. Eurokoodia EN 1992-1-1 voidaan yleensä käyttää, kun raudoituksen ominaislujuus on välillä 400...600 MPa. Suomessa käyttöaluetta on laajennettu lujuuteen 700 MPa asti. Betoniterästen kimmokerroin säilyttää edelleen arvon 200 GPa.

Betoniterästen nimeäminen muuttuu siten, että valmistusmenetelmän mukainen jaottelu korvataan sitkeysluokasta kertovalla merkinnällä. Teräslaaduille on määritely kolme sitkeysluokkaa, A, B ja C, jotka kuvaavat raudoituksen myötämiskykyä tasattaessa paikallisia momenteja murtorajatilassa. Alhaisimmassa sitkeysluokassa A on momenttien uudelleen jakautumista rajoitettu eniten.

Teräksen sitkeysluokka määritetään murto- ja myötölujuuden suhteen sekä venymän perusteella. Vanhojen teräsluokkien kylmämuokattu betoniteräs on sitkeysluokkaa A ja kuumavalssattu betoniteräs yleensä sitkeysluokkaa B tai C.

Eurokoodien mukaisessa suunnittelussa käytettyjen teräslaatuojen tulee täyttää standardissa asetetut vaatimukset ja niistä tulee käyttää uutta merkintää vaikka teräs materiaalina pysyisi ennallaan. Betoninormien mukaan A500HW:llä suunniteltu rakenne voidaan toteuttaa B500B:llä ilman mitään lisätoimenpiteitä.

Taulukko 4: Betoniterästen nimeäminen EC2:n mukaan:

RakMk		Eurocode
A500HW	→	B500B
B	=	Betoniteräs
500	=	f_{yk} , eli teräksen myötölujuus (N/mm ²)
B	=	Sitkeysluokka (A/B/C)

Taulukossa 5 esitettyihin materiaaliosavarmuuslukuihin ei ole tullut suuria muutoksia, mutta teräksen varmuuskerroin on kuitenkin hieman pienentynyt arvoon $\gamma_s=1,15$. Osan EN 1992-1-1 liitteessä A on esitetty, miten varmuuskertoimia voidaan pienentää, kun sallitut mittapoikkeamat ovat pienempiä ja laadunvalvonta on riittävää. Tällöin päästään rakenneluokan 1 mukaisiin varmuuskertoimiin. Betoninormeista tuttua rakenneluokkaa 3 vastaavaa menettelyä ei enää ole.

Taulukko 5: Betoniterästen osavarmuusluvut

Betoniterästen osavarmuusluvut γ_s	
Rakenneluokka 1	1,10
Rakenneluokka 2	1,15
Onnettomuus	1,0
Palotilanne	1,0

4 Kuormat

4.1 Pysyvät kuormat

Pysyviksi kuormiksi katsotaan rakenneosien paino ja muu rakenteeseen vaikuttava muuttumaton kuorma kuten täytteet ja päällysteet, maanpaine sekä kuorma joka aiheutuu alivedenkorkeudella olevasta vedestä. (Tiehallinto, 2009)

Materiaalien tilavuuspainoja voidaan käyttää standardin EN 1991-1-1 liitteen A mukaisia arvoja, ellei toisin ole määrätty. Samassa standardissa on myös asetettu erityisesti sillansuunnittelussa käytettäviä lisäsääntöjä.

4.1.1 Omapaino

Omapaino on laskettu standardin "Eurocode 1: Rakenteiden kuormat. Osa 1-1: Yleiset kuormat, tilavuuspainot, oma paino ja rakennusten hyötykuormat." – mukaisesti. Eurokoodi ottaa yleisesti tarkemmin kantaa eri materiaalien ominaisuuksiin, mutta sillansuunnittelussa ominaisuuksien eroilla ei ole käytännön merkitystä mitoituksen kannalta, eikä niiden käyttö ole sallittua muulloin kuin hankkeissa, joissa arvojen käyttö on erikseen määrätty. Näissä laskelmissa kansirakenteeseen kiinteästi liittyvät päällyskerrokset ovat laskettu mukaan rakenteen omaan painoon.

4.1.2 Kutistuma ja viruma

Betonin viruminen ja kutistuminen riippuvat ympäristön kosteudesta, rakenneosan mitoista sekä betonin koostumuksesta. Virumiseen vaikuttaa myös betonin kovettumisaste kuormituksen alkaessa, sekä rakenteelle aiheutuvan rasituksen suuruus ja kesto. (SFS-EN 1991-1-1, 2002)

Kutistumisen ja virumisen vaikutus huomioidaan vain silloin, kun niiden vaikutus on merkittävä rakenteen kestävyydelle. Eurokoodin mukaan vaikutuksia ei tarvitse ottaa huomioon murtorajatiloiissa, mikäli rakenneosien sitkeys ja kiertymiskyky ovat riittäviä. Näiden ominaisuuksien määrittelyn tulkinnanvaraisuuden vuoksi on kutistuma ja viruma huomioitu pysyvissä kuormissa loppuarvolla.

Kokonaiskutistuminen koostuu eurokoodin mukaan kahdesta osasta; kuivumiskutistumasta ja sisäisestä kutistumasta. Kuivumiskutistuma kehittyy hitaasti, koska se aiheutuu veden siirtymisestä kovettuneen betonin läpi. Sisäinen kutistuma syntyy betonin kovettuessa, jolloin merkittävä osa tapahtuu betonivalua seuraavina ensimmäisinä päivinä. Sisäinen kutistuma on suoraan verrannollinen betonin lujuuteen ja sen merkitys on suurimmillaan tapauksissa, jolloin tuoretta betonia valetaan kovettunutta betonia vasten. (SFS-EN 1992-2, 2006)

Kun viruminen otetaan huomioon, sen vaikutukset määritetään mitoituksen yhteydessä sisällyttämällä se kuormien pitkäaikaisyhdistelmään riippumatta tarkasteltavasta mitoitustilanteesta, eli siitä, onko kyseessä normaalisti vallitseva, tilapäinen vai onnettomuusmitoitustilanne. Nämä vaikutukset ovat huomioitu kuormayhdistelyssä molemmilla normeilla samalla menetelmällä.

4.1.3 Tukien painuminen

Eurokoodissa tukien painuminen on jäänyt soveltamisalan ulkopuolelle, mutta se huomioidaan laskelmissa pysyvänä kuormana vanhojen kansallisten ohjeiden mukaan.

Jos pääty- tai välituilla on odotettavissa painumia, arvioidaan tukien väliset painumaerot geoteknisten laskelmien perusteella ja vaakasiirtymät huomioidaan laakerien liikevaaroissa. Kalliolle perustetut tuet oletetaan painumattomiksi ja vaakasuuntaiset liikkeet nollaksi. (Tiehallinto, 2009)

4.2 Muuttuvat kuormat

4.2.1 Siltojen liikennekuormat

Tiesilloille aiheutuvat kuormat koostuvat erilaisista ajoneuvoista ja jalankulkijoista. Ajoneuvoliikenteen rakenne, määrä ja olosuhteet muuttuvat, joten nämä vaihtelut huomioidaan käyttämällä erilaisia ajoneuvoja kuvaavia kuormakaavioita.

Sillan kansi jaetaan pituussuuntaisiin pintoihin, kuormakaistoihin siten, että saavutetaan rakenteen mitoituksen kannalta määräävä vaikutus. Kuormakaistojen lukumäärä saadaan jakamalla liikennöity alue kolmen metrin leveysiin kaistoihin. Siltojen liikennekuormat on määritelty standardin osassa EN 1991-1 sekä sen kansallisessa liitteessä. (SFS-EN 1991-2)

4.2.1.1 Kuormakaaviot

Eurokoodissa on esitetty käytettäväksi neljää erilaista kuormakaaviota, joita yhdistellään muihin kuormiin käytettävän kuormaryhmän määräämällä tavalla. Kuormakaavioiden muodostamisperiaatteet esitetään seuraavaksi.

Kuormakaavio LM1

Kuormakaavio LM1 koostuu kuormakaistoille sijoitettavista tasaisesti jakautuneista kuormista sekä kahden akselikuorman muodostamista telikuormista. Telikuormien akseliväli on 1,2 m, ja ne sijoitetaan sillalle siten, että saadaan mahdollisimman epäedullinen vaikutus. Taulukossa 6 esitetyn akselikuorman suuruus määräytyy kuormakaistan numeron mukaan.

Taulukko 6: Liikennekuormakaavion 1 mukaiset kuormat

Sijainti	Telikuorma	Tasan jakautunut kuorma
	Akselikuormat Q_{ik} (kN)	q_{ik} (tai q_{rk}) (kN/m ²)
Kuormakaista nro 1	300	9
Kuormakaista nro 2	200	2,5
Kuormakaista nro 3	100	2,5
Muut kuormakaistat	0	2,5
Kuormakaistojen ulkopuolinen alue (q_k)	0	2,5

Kuormakaavio LM2

Kuormakaavio LM2 koostuu kuormakaistoille sijoitettavasta 400 kN:n suuruisesta akselikuormasta. Rakennetta voidaan kuormittaa vain akselin toisella pyöräkuormalla, jos koko akseli ei mahdu kyseessä olevaan rakenteen kohtaan.

Kuormakaavio LM3

Kuormakaaviota LM3 käytetään, jos silta sijaitsee suurten kuljetusten reitillä tai asianomainen viranomainen on määrännyt sen käytöstä hankekohtaisesti. Kuormakaaviolla mitoitetaan rakenteet murtorajatilassa sekä alusrakenteiden kantavuus. Kaavio koostuu kahdesta koko kuormakaistan leveydelle jakaantuvasta 45kN:n pintakuormasta.

Kuormakaavio LM4

Kuormakaavio LM4 edustaa tungoskuormaa ja sen käytöstä määrätään hankekohtaisesti. Kuormakaaviossa kuormana on tasaisesti jakautunut kuorma 5 kN/m^2 , joka jaetaan sillalle niin, että siitä syntyy määräävä vaikutus. Kuorma voidaan sijoittaa tarvittaessa myös keskialueelle.

4.2.1.2 Kuormaryhmät

Eurokoodissa liikennekuormia ei yhdistellä sellaisenaan muihin kuormiin, vaan niistä muodostetaan kuormaryhmiä, joita käsitellään yksittäisinä kuormina kuormitusyhdistelyissä. Kuormaryhmät eivät voi esiintyä keskenään samanaikaisesti. Kuvassa 7 esitetyt ryhmät on yhteensä kuusi kappaletta, mutta kaikkia ei tarvitse aina muodostaa, sillä ne mitoittavat eri rakenneosia.

AJORATA PIENTAREINEEN								Keyven liikenteen väylä
Pystykuormat					Vaakakuormat		Vain Pystykuorma	
LM1		LM2	LM3	LM4	Jarru- ja kiihdytyskuormat	Keskipakokuorma ja sivukuorma		Yhdistelyarvo
Teli	UDL	Yksittäinen akseli	Erikoiskuorma	Ruuhkakuormitus	[EN 1991 2.4.4.1]	[EN 1991 2.4.4.2]	[EN 1991 2.5.3.2.1]	
[EN 1991 2.4.3.2]		[EN 1991 2.4.3.3]	[EN 1991 2.4.3.4]	[EN 1991 2.4.3.5]				
gr1a	Ominaisarvo 1 1						3 kN/m ²	
gr1b			Ominaisarvo 1					
gr2	Tavallinen arvo (ψ_1) 0,75 0,4					Ominaisarvo 1	Ominaisarvo 1	
gr3							Ominaisarvo 5 kN/m ²	
gr4				Ominaisarvo 1			Ominaisarvo 5 kN/m ²	
gr5			Ominaisarvo 1					

Kuva 7: Liikennekuormaryhmien määrittäminen (Tiehallinto, 2009)

Tiehallinnon sovellusohjeessa on kuormaryhmien koostumus ja käyttökohde jaoteltu seuraavasti:

gr1a:

- Pystysuora liikennekuorma LM1 ominaisarvollaan
- Mahdollisen kevyen liikenteen kaistan kuorma 3 kN/m^2
- Mitoittaa usein pääkannattimet ja kansilaatan poikittain
- Yleensä aina mitoittava, aina laskettava

gr1b:

- Pystysuoran liikennekuorma LM2 ominaisarvollaan
- Mitoittaa mahdollisesti ortotrooppikannen, ulokkeen yms.
- Yleensä ei mitoittava, yleensä kuitenkin laskettava

gr2:

- Pystysuora liikennekuorma LM1 tavallisella arvolla (Telikuormat kerrottuna arvolla 0,75 ja tasaiset kuormat arvolla 0,40)
- Liikenteestä aiheutuvat vaakakuormat ominaisarvollaan
- Usein mitoittava, aina laskettava (mitoittaa usein alusrakenteet)

gr3:

- Harvoin mitoittava, ei yleensä tarvitse tarkastella
- Pelkästään kevyen liikenteen kaistat kuormitettuna pintakuormalla 5 kN/m^2
- Harvoin mitoittava, ei yleensä tarvitse tarkastella

gr4:

- Kevyen liikenteen kaistat kuormitettuna pintakuormalla 5 kN/m^2
- Muut kaistat kuormitettuna ruuhkakuormalla 5 kN/m^2
- Harvoin mitoittava, ei yleensä tarvitse tarkastella

4.2.1.3 Jarrukuormat

Ajoneuvon jarrutuksen ja kiihdytyksen aiheuttama vaakasuora jarrukuorma vaikuttaa pituussuuntaisesti ajoradan pinnan tasolla. Kuorman voidaan olettaa jakautuvan tasaisesti koko ajoradan leveydelle. Määriteltäessä jarrukuormaa käytetään siltakannen todellista pituutta, eli sitä etäisyyttä, joka sijaitsee kahden sellaisen ylimenolaitteen välillä, jotka eivät siirrä vaakakuormia. Standardissa määritetty jarrukuorman yläraja on korvattu aiemmissa ohjeissakin käytetyllä maksimiarvolla. (Tiehallinto, 2009)

4.2.2 Tuulikuormat

Sillalle kohdistuu sekä poikittaisia -että pitkittäisiä tuulikuormia, joiden vaikutusta tarkastellaan tyhjällä sekä liikennöidyllä siltakannella. Sillalle kohdistuvaan tuulenpaineeseen vaikuttaa alueen maastoluokka, kannen korkeus ja siltakannen painopisteen etäisyys maanpinnasta. Tuulenpaine kohdistuu tyhjällä sillalla kansirakenteen sekä kaiteen ja liikennöidyllä sillalla kannen sekä liikenteen muodostamaan projektiopinta-alaan.

Siltakannella olevan tieliikenteen korkeudeksi oletetaan 2,0 metriä, joka lasketaan mukaan sillan kannen kokonaiskorkeuteen. Kaiteen vaikutus kokonaiskorkeuteen riippuu sen avoimesta osuudesta. Tuulenpaineen väliarvot voidaan interpoloida taulukosta, ja ellei viranomaisen ole hankekohtaisesti toisin määrittänyt, voidaan käyttää maastoluokan II mukaisia arvoja. (SFS-EN 1991-1-4)

4.2.3 Lämpötilakuormat

Lämpötilakuormiin kuuluu sekä rakenteen keskilämpötilan muutos -että rakenteen vastakkaisten pintojen välinen lämpötilaero. Nämä kuormat yhdistetään niin, että saadaan aikaan määräävin vaikutus.

4.2.3.1 Lämpötilan muutos

Keskilämpötilan muutos riippuu sillan minimi- ja maksimilämpötilasta, jotka määritetään maantieteellisen sijainnin sekä päällysrakenteen tyyppin mukaan.. Tämä keskilämpötilaero aiheuttaa rakenneosan pituuden muutoksen, ellei rakenne estä muodonmuutoksen syntymistä. Sillan matalin ja korkein keskilämpötila pakkovoimien kannalta tulee määrittää varjossa mitatun ilman minimilämpötilan ja maksimilämpötilan perusteella ja alkulämpötilaksi voidaan olettaa $+10^{\circ}\text{C}$, ellei tarkempaa lämpötilaa ole ennakoitavissa.

Päällysrakenteen tyyppi vaikuttaa olennaisesti kuormien suuruuteen, joten ne ovat jaoteltu kolmeen ryhmään seuraavasti:

- Tyyppi 1: Teräspäällysrakenne
- Tyyppi 2: Liittopäällysrakenne
- Tyyppi 3: Betonipäällysrakenne.

Betonisilloilla mitoittavat lämpötilat ovat 2°C lämpimämmät kuin varjossa mitatut ilman maksimilämpötilat ja 8°C korkeammat kuin ilman minimilämpötilat. (Tiehallinto, 2009)

4.2.3.2 Lämpötilaero

Rakenteessa eri pintojen välillä vallitseva lämpötilaero tulee huomioida vain pystysuunnassa, ja sen määrittämiseksi on näissä laskelmissa käytetty lineaarista menetelmää, jonka mukaan lämpötila muuttuu tasaisesti koko poikkileikkauksen matkalla. Eurokoodi esittää myös epälineaarisen menetelmän lämpötilaeron määrittämiseksi, mutta sen käyttö betonisilloissa on perusteltua vain liittopalkki- tai kotelopoikkileikkauksia tarkasteltaessa.

Laskelmissa käytetty pystysuuntainen lämpötilaero saadaan kansirakenteesta riippuvan taulukkoarvon ja päällysteen paksuudesta riippuvan korjauskertoimen avulla. (SFS-EN 1991-1-5, 2004)

4.2.4 Onnettomuuskuormat

Standardissa EN 1990: rakenteet on jaettu kolmeen seuraamusluokkaan CC1, CC2 ja CC3. Seuraamusluokkiin on edelleen liitetty kolme luotettavuusluokkaa RC1, RC2 sekä RC3, jotka ohjaavat käytettävää luotettavuusindeksiä β . (SFS-EN 1991-1-7)

Yksinkertaistettu tapa on käyttää kuormakerrointa K_{FI} , joka CC2 luokan rakenteilla on 1,0. Sillat kuuluvat pääsääntöisesti luokkaan CC2, joten kansalliseen liitteeseen ei ole otettu lainkaan mukaan kerrointa K_{FI} . Viranomaisen niin määrittäessä, voidaan silta sijoittaa myös johonkin muuhun seuraamusluokkaan, jolloin käytetään taulukon 7 mukaisia K_{FI} – kertoimia.

Taulukko 7: Luotettavuusluokkien kuormakertoimet

Kuormakerroin K_{FI}	Luotettavuusluokka		
	RC1	RC2	RC3
K_{FI}	0,9	1,0	1,1

Silloissa otetaan yleensä huomioon ainoastaan kantaviin rakenteisiin kohdistuvat törmäykset. Muihin rakenteisiin kohdistuvat törmäykset otetaan huomioon ainoastaan, jos niistä on vaaraa sillan kantavuudelle tai sillan käyttäjille. Törmäyksen aiheuttamat mitoituskuormat saadaan liikenneluokan perusteella taulukosta, ellei toisin ole määrätty. (Tiehallinto, 2009)

5 Murtorajatilamitoitus

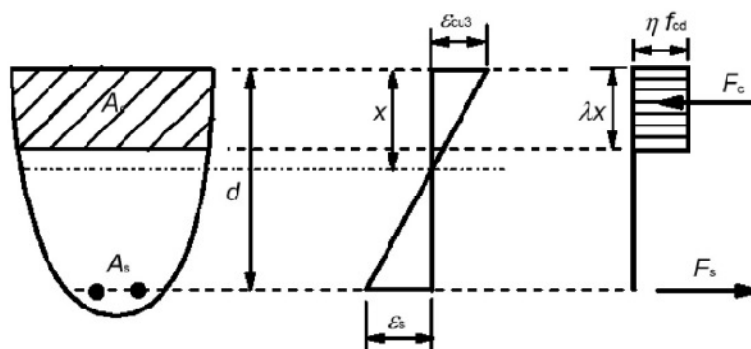
5.1 Taivutus

Rakenteen mitoitus taivutukselle noudattaa Eurokoodin mukaan samoja periaatteita kuin aiemminkin. Teräsmäärän laskentaperiaate pysyy ennallaan, mutta Eurokoodi mahdollistaa myös betoniteräksen myötölujittuvan jännitys-venymä-yhteyden. Venymäraajaksi asetetun 1 %:n suuruisen myötölujittuman hyöty on minimaalinen, eikä sitä ole huomioitu laskelmissa.

Toisin kuin RakMk:n nykyisten ohjeiden mukaan, nivelenä toimivalla tuella voidaan teoreettista tukimomenttia pienentää tukireaktion ja tuen leveyden suhteessa. Menetelmää voidaan soveltaa käytetystä laskentamenetelmästä riippumatta. Lisäksi lineaarisen kimmoteorian mukaan lasketut taivutusmomentit voidaan jakaa tasapainoehtojen puitteissa uudelleen, jos rakenteella on tarpeeksi kiertymiskykyä.

Eurokoodi ei sisällä ohjeita yliraudoituksen välttämiseksi, mutta poikkileikkaus pyritään mitoittamaan vetomurtumiselle, jolloin vältetään rakenteen hauras murtuma. Hauras murtuminen tapahtuu, kun betonin puristuslujuus ylittyy ennen kuin vetoraudoitus saavuttaa ominaismyötöraajansa.

Kuvassa 8 on esitetty vetoraudoitetun teräsbetonipalkin muodonmuutos- sekä jännityskuviot murtorajatilassa. Merkinnät kuvaavat puristuspuolella betonille ja vetopuolella teräkselle kohdistuvia rasituksia, sekä niiden suhteellisia muodonmuutoksia.



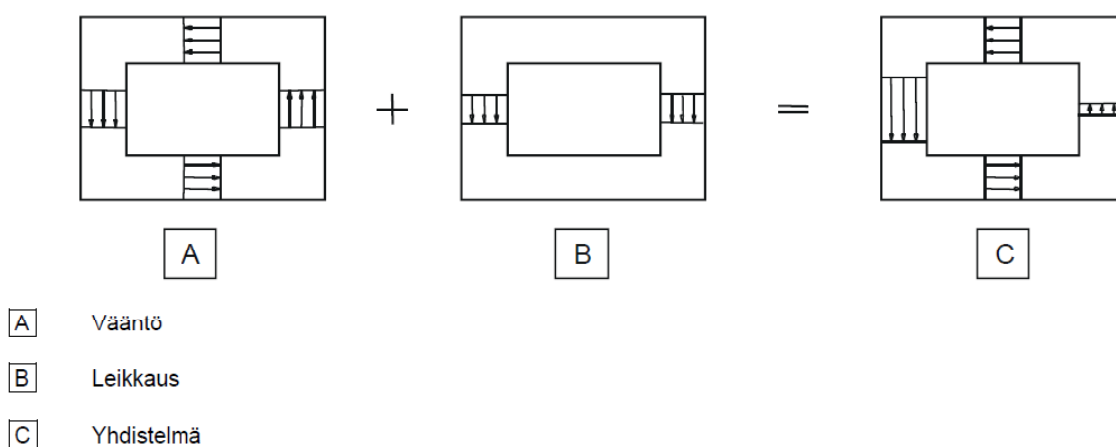
Kuva 8: Muodonmuutoksen ja jännityksen jakaumat murtorajatilassa (SFS-EN 1991-1-1, 2002)

5.2 Leikkaus ja vääntö

Leikkausraudoitetuissa rakenteissa suurin muutos on puristusdiagonaalien kulman vaihtelualue. Eurokoodissa leikkausmitoitukset perustuvat puhtaasti ristikkoanalogialle, joten betonin leikkauslujuutta ei myöskään ole huomioitu leikkaus- ja vääntöraudoitetuissa rakenteissa.

Vääntökestävyyttä laskettaessa käytetään myös ristikkoanalogiaa, jolloin kannen poikkileikkaus ajatellaan ohutseinämäiseksi kotelorakenteeksi, jonka kehälle sijoitetaan saatu vääntöraudoitus. Ainoastaan oletetussa kotelossa sijaitseva rauditus vaikuttaa rakenteen vääntökestävyyteen, joten sillä, onko rakenne umpinainen vai kotelo, ei ole merkitystä. Kuvassa 9 on esitetty vääntö- ja leikkausrasitusten yhteisvaikutusta kotelopoikkileikkauksessa.

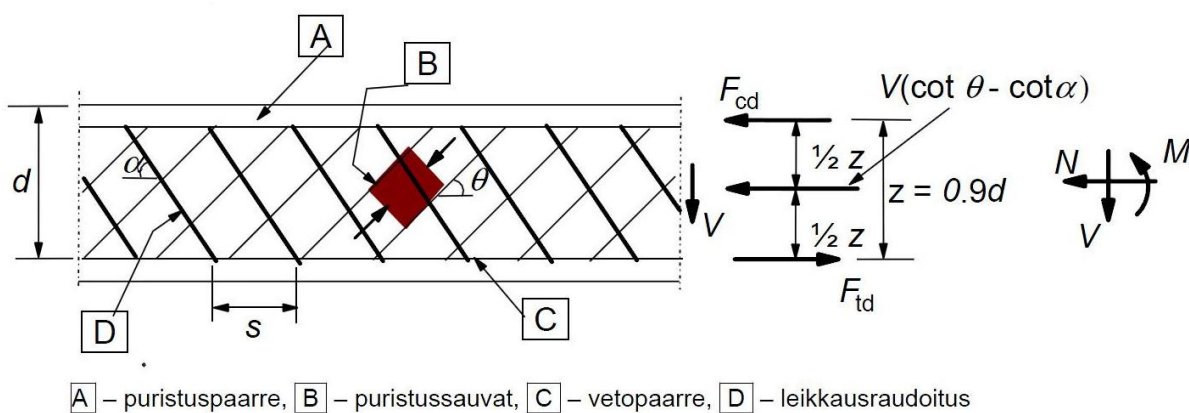
Puhtaassa väännössä muodostuu kotelopoikkileikkaukseen vinohalkeilua, joka kiertää spiraalimaisesti poikkileikkauksen sivuja pitkin. Halkeamien väliin syntyvät betonikaisat muodostavat puristusdiagonaalit pituussuuntaisten terästen toimiessa ristikon pariteina. Haat toimivat vedettyinä vertikaaleina.



Kuva 9: Sisäisten leikkausvoiden yhdistelmä kotelopoikkileikkauksen eri seinämissä (SFS-EN 1992-2, 2006, s. 27)

Puhdasta vääntöä esiintyy todella harvoin, ja tavallisimmin sitä esiintyy taivutuksen tai leikkauksen rinnalla. Väännön ja leikkausvoiman vaatimaa raudoitusta määritettäessä voidaan puristusdiagonaalien kulmaa muuttamalla optimoida rakenteen raudoitemäärää. Diagonaalien kulmaksi voidaan aiemmin käytetyn 45° :en sijasta valita mikä tahansa kulma $21,8^\circ$:en ja 45° :en väliltä, jolloin kuormituksia saadaan jaettua haka- ja pitkittäisraudoituksen kesken. Rakenteen vääntökestävyyden yläraja voi olla Eurokoodissa moninkertainen nykyiseen ylärajaan verrattuna. Ristikkomalli ja sen osat on eritelty kuvassa 10.

Leikkaus ja vääntöraudoitukselle käytetään samaa puristusdiagonaalien kulmaa. Pientä kulmaa käyttämällä pitkittäisraudoitteiden määrä kasvaa, hakojen määrä pienenee ja puristusdiagonaalissa vallitseva puristus suurenee. Suurta kulmaa käytettäessä hakojen määrä kasvaa, vaadittavien pitkittäisrautojen tarve vähenee ja puristusdiagonaalien rasitus pienenee. Todellisuudessa optimaalinen kulma sijaitsee näiden ääriarvojen välillä, jolloin vähennetään haurasmurtuman riskiä ja parannetaan hakojen kestävyttä. (Betonsiltojen rajatilamitoitus, 2009)



Kuva 10: Leikkausraudoitettujen rakenneosien ristikkomalli (By 60, 2008)

Eurokoodissa taivutusmomenttia ei huomioida vääntö- ja leikkausvoimien yhteisvaikutusta tarkasteltaessa. Vaikka rakenteen murtumismalli on riippuvainen näiden kolmen voiman keskinäisistä suhteista, ne kuitenkin esiintyvät harvoin samanaikaisesti.

6 Käyttörajatilamitoitus

Käyttörajatilamitoitus käsittää kaikki ne tarkastelut, joita edellytetään rakenteen käyttökelpoisuuden toteamiseen. Näihin kuuluvat jännityksen, taipuman ja halkeilun rajoittaminen, joista vain viimeistä on tarkasteltu tässä työssä.

Mitoituksessa rakenteita kuormitetaan ominaiskuormilla ja rakenteen oletetaan toimivan kimmoteorian mukaisesti. Betonin puristusjännityksen tulee pysyä sille asetetun rajan ($0,6 f_{ck}$) alapuolella, jotta edellä mainittu oletamus olisi voimassa. Kuormituksen kasvaessa rakenteen jäykkyys ei pysy vakiona, sillä lisääntyvä momentti aiheuttaa halkeilua ja sen myötä pienentää jäykkyyttä.

Teräsbetonirakenteen pitkäaikaiskestävyyden kannalta on halkeamaleveyden rajoittaminen keskeistä varsinkin silloissa, joissa rakenne joutuu alttiiksi voimakkaille ympäristön rasituksille ja joilla kuormitus vaihtelee jatkuvasti.

6.1 Halkeamaleveyden määrittäminen

Rakenteeseen syntyy halkeamia maksimimomentin kohdalle kun vedetyn pinnan jännitys ylittää betonin vetolujuuden. Muodonmuutoksien yhtäsuuruus ei ole enää voimassa, sillä halkeaman kohdalla betonissa ei ole vetojännityksiä ja teräs saavuttaa suurimman venymäarvonsa. Seuraava halkeama syntyy etäisyydelle, jolla teräksen tartunta pystyy välittämään vetojännitystä betonin vetolujuutta vastaavan määrän.

Halkeamaleveys on raudoituksen keskimääräinen venymä kerrottuna halkeamavälillä. Maksimihalkeamaleveys on kuitenkin laskennallinen, eikä todellisia halkeamaleveyksiä voi halkeilun satunnaisuuden vuoksi ennustaa.

6.2 Sallitut halkeamaleveydet

Betonirakenteiden suunnitteluohjeissa asetetaan halkeilua rajoittavia ehtoja, jotka riippuvat rakenteen tyypistä, rasitusluokasta ja ympäristöolosuhteista. Halkeamaleveydet kasvavat ajan myötä muuttuvien kuormien vaikutuksesta, joten tarkastelussa käytetään pitkäaikaista kuormitusyhdistelmää. Toistuvat kuormavaihtelut suurentavat rakenneosan halkeamaleveyttä voimakkaammin kuin vakiona pysyvä pitkäaikaiskuormitus. Taulukossa 8 on esitetty laskennalliset halkeamaleveysrajan suositusarvot 100 vuoden käyttöiälle suunnitellulle rakenteelle.

Taulukko 8: Halkeamaleveysrajat 100 vuoden käyttöiälle

Rasitusluokka ^a	Raudoitetut ja tartunnattomilla jänteillä jännitetyt rakenneosat	Tartunnallisilla jänteillä ^b jännitetyt rakenneosat
	Pitkäaikaisyhdistelmä	Tavallinen kuormayhdistelmä
X0, XC1	0,3 ^c	0,2
XD1 ^d , XC2, XC3, XC4, XS1 ^d	0,15 (varmistuu myöhemmin)	0,1 ^{e,f}
XD2, XD3, XS2, XS3 ^d	0,1	Vetojännityksetön tila ^{f,g}

a) Rasitusluokat rakenneosittain ovat määritetty liikenneviraston sovellusohjeessa "Betonisillat".

b) Jälkijännittämällä suojaputkeen injektoiduilla jänteillä varustetut rakenteet kuuluvat tähän luokkaan. Tällöin kaavan (7.10) $\gamma_1 = 0$ halkeamaleveystarkasteluja tehtäessä.

c) Rasitusluokissa X0 ja XC1 halkeamaleveydellä ei ole vaikutusta säilyvyyteen ja tämä raja on asetettu hyväksyttävän ulkonäön takaamiseksi. Kun ulkonäköehtoja ei aseteta, tästä rajasta voidaan poiketa.

d) Kloridirasitukset eivät aseta vaatimuksia rakenteen halkeilun suhteen, mikäli kloridirasitetut pinnat on suojattu liikenneviraston sovellusohjeen mukaisesti.

e) Näissä rasitusluokissa tarkistetaan lisäksi vetojännityksetön tila kuormien vaikuttaessa pitkäaikaisyhdistelmänä.

f) Raudoitukselle jossa jänneteräksiä ei ole vetovyöhykkeessä käytetään vasemmassa sarakkeessa olevan tavanomaisen raudoituksen halkeamaleveysvaatimuksia. Rakenne oletetaan haljenneeksi vetovyöhykkeessä, vaikka sen laskennallinen halkeilukestävyys ei ylittyisikään.

g) Vetojännityksetön tila edellyttää, että tartunnallisten jänteiden ja niiden suojaputkien ympärillä tietyllä rajaetäisyydellä oleva

h) betoni pysyy puristettuna määritellyn kuormituksen vaikuttaessa. Rajaetäisyytenä käytetään mitta 100 mm.

Jos rakenteessa on vaadittua suurempi suojabetonipaksuus, voidaan eurokoodin suosituksesta poiketen taulukon arvoja kasvattaa kaavan 3 mukaisella betonipeitteen todellisen, ja rasiusluokkien vaatiman leveyden avulla saatavalla kertoimella. Menettelyllä vältytään "rankaisemasta" rakenteita, joissa on vaadittua suurempi betonipeite.

Sallittu laskelmissa käytettävä halkeamaleveysraja saadaan kaavasta:

$$w_{k,sall} \geq w_k \cdot \min \left(k_c, \frac{c}{c_{min,dur}} \right) \quad (3)$$

Jossa

$w_{k,sall}$	= Sallittu halkeamaleveys
w_k	= Käyttörajan mukainen maksimihalkeamaleveys
k_c	= Vakioitu kerroin
c	= Halkeamaleveyden laskennassa käytettävä betonipeite
$c_{min,dur}$	= Ympäristöolosuhteiden vaatima betonipeite

Kertoimen avulla muutetaan ympäristöluokan vaatiman betonipeitteen kohdalla esiintyvä halkeamaleveys rakenteen todellisen betonipeitteen halkeamaleveyteen. Perusarvon kasvattamista rajoitetaan k_c -kertoimella, jonka vaikutuksia on tarkasteltu tulosten yhteydessä. Varsinaisessa halkeamaleveysmitoituksessa käytettäviä kertoimia ei kuitenkaan ole eurokoodin suosituksessa, mutta nykyisen tapainen käytäntö halutaan säilyttää.

Laskelmissa on sallitun halkeamaleveyden rajoittavana k_c -kertoimen arvona ollut 1,4. Vertailun perusteella on tarkoitus määrittää kertoimen Suomessa käytettävä arvo, joten tuloksissa on tarkasteltu myös muiden arvojen tuottamia tuloksia.

7 Tulosten vertailu

Rakenteiden poikkileikkausarvot, voimasuureet ja raudoitemäärät koottiin taulukkopohjaan, joka oli annettu jokaiselle vertailulaskijalle. Taulukkoon eroteltiin eri kuormien osuudet ja kirjattiin, mikä kuormaryhmä antoi kyseisessä tapauksessa määrävän vaikutuksen.

Kuormaryhmien pilkkominen osiin mahdollisti yksittäisten kuormien vaikutusten vertailun ja antoi paremman kuvan mitoitussuureiden koostumisesta. Vertailulaskelmahankkeen kannalta oli olennaista selvittää mistä määrävät arvot koostuivat ja samalla tutustua uudistuneeseen kuormien yhdistelyyn.

Rakenne mitoitettiin saaduille voimasuureille eri tarkastelupisteissä käyttäen apuna numeerisiin ja symbolisiin laskutoimituksiin kehitettyä MathCad -matematiikkaohjelmistoa. Ohjelmalla tehtiin laskentapohjat jokaista mitoitustapausta varten.

7.1 Voimasuureet

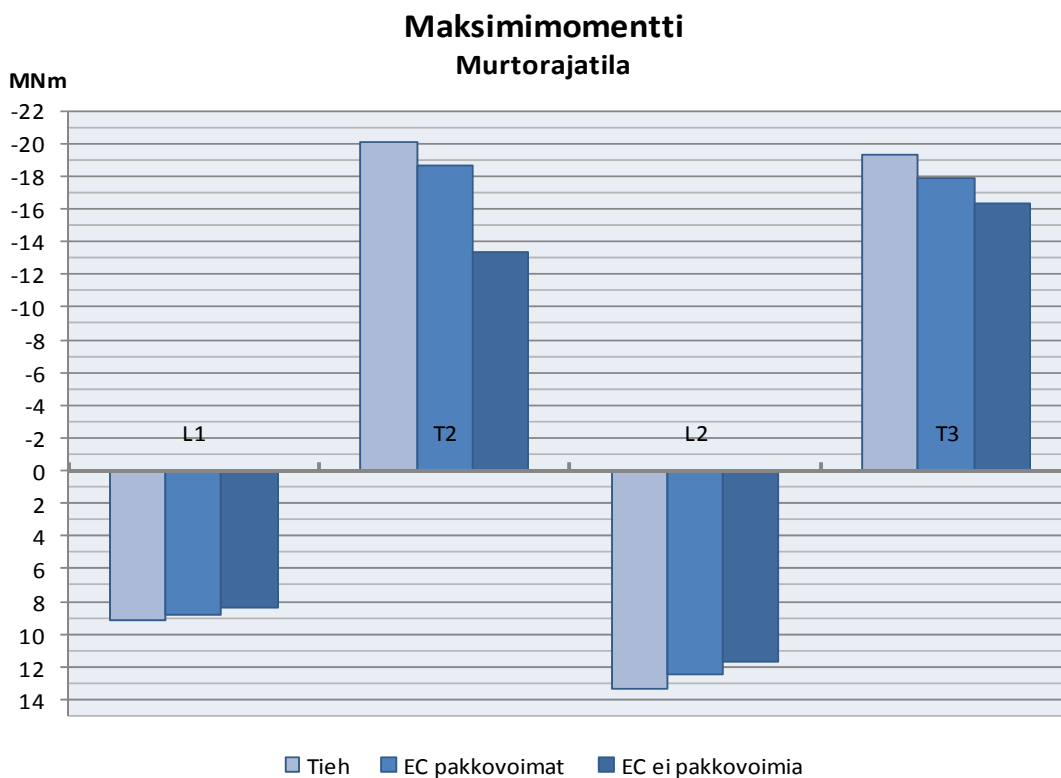
Kehä- ja Arinaohjelmasta saatujen voimasuureiden ryhmittelyt ja yhdistelyt on tehty taulukkolaskentaa apuna käyttäen. Voimasuureet on yhdistelty vain määrävissä pisteissä, eli taivutuksen osalta tuilla ja kentässä maksimimomentin kohdalla, sekä leikkausta tarkastellessa tuen molemmilta puolilta. Mitoittava leikkausvoima määritettiin rakenteen hyödyllisen korkeuden etäisyydellä tuelta.

Käytettävien kuormaryhmien määrästä huolimatta löytyivät mitoittavat tapaukset hyvin nopeasti, eikä kaikkia ryhmiä täytynyt käyttää mitoituksessa alun tarkastelujen jälkeen. Kuormaryhmiä karsimalla saatiin jokaiselle tarkastelupisteelle määritettyä mitoittavat voimasuureet varsinaisia rakenteen mitoituslaskelmia varten.

7.1.1 Taivutusmomentti

Taivutusmomentin mitoittavat arvot saatiin eurokoodin mukaan kuormaryhmällä gr1a, jossa liikennekuorman osuus koostuu teli- ja pintakuormasta.

Murto-rajatilan maksimimomentti noudattaa eurokoodin kuormilla samaa linjaa kuin Tiehallinnon Siltojen kuormat –ohjeen mukainen tarkastelu joka on tehty pakkovoimat huomioiden. Eurokoodin mukaisessa mitoituksessa on taivutusmomentin arvoja tarkasteltu sekä ilman -että pakkovoimat huomioiden. Kuvan 11 kaaviossa on esitetty murto-rajatilan mukaiset momentin arvot kentissä L1 ja L2, sekä tuilla T2 ja T3.

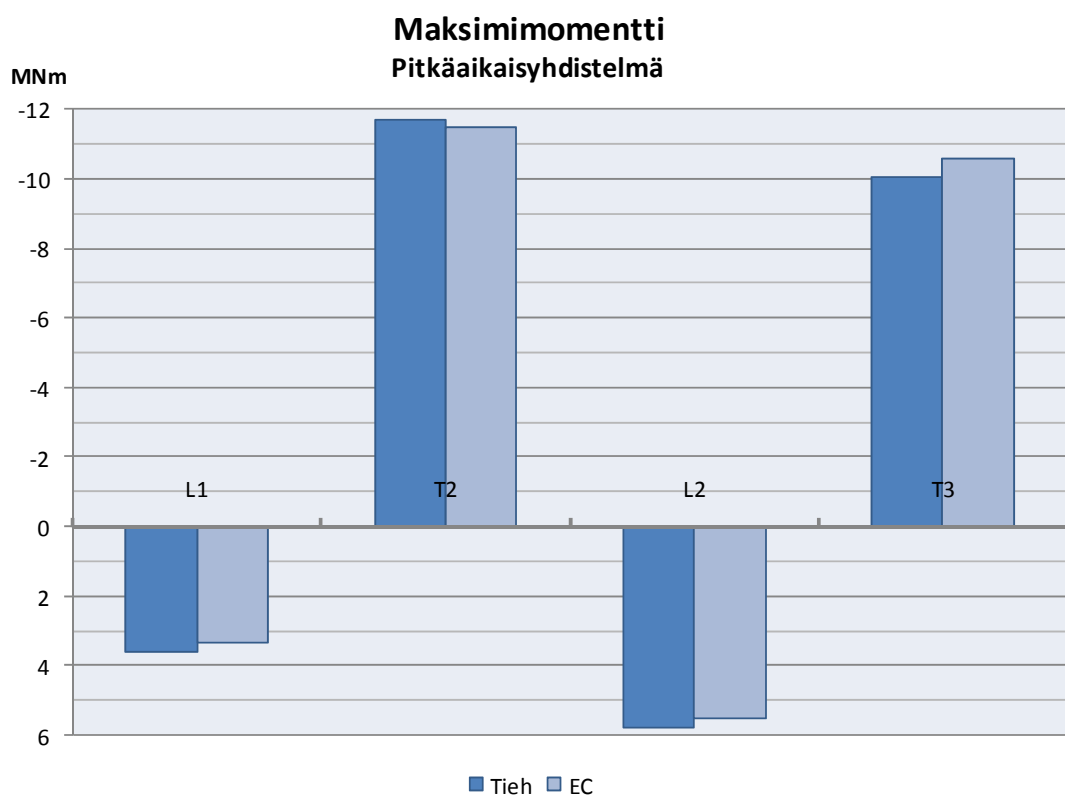


Kuva 11: Murto-rajatilan maksimimomentit

Kuormista voidaan pakkovoimiin lukea kutistuman, tukipainuman, pintalämpötilaeron tuomat rasitukset, joiden merkitys on huomattava. Varsinkin tukipainumalla on suuri osuus tuen T2 momenttia tarkastellessa. Murto-rajatilan ollessa mitoittava, on pakkovoimien osuus ja niiden huomioiminen tärkeä seikka rakenneanalyysin kannalta.

Näiden pakkovoimien esiintyminen rakenteen eri osissa vaihtelee, joten olisi ensisijaisen tärkeä saada yhtenäinen linjaus voimien käsittelystä ja niiden osittaisesta, tai täydellisestä vapauttamisesta tietyissä tarkasteluissa.

Pitkäaikaisyhdistelmä tuottaa molemmilla menetelmillä samansuuntaisia tuloksia. Liikennekuorman osuus pitkäaikaisessa kuormitusyhdistelyssä on vähäisempi, joten murtorajatilassa havaittuihin eroihin verrattuna ovat ohjeiden väliset erot selvästi pienempiä. Pitkäaikaisyhdistelmän arvot on esitetty kuvassa 12.

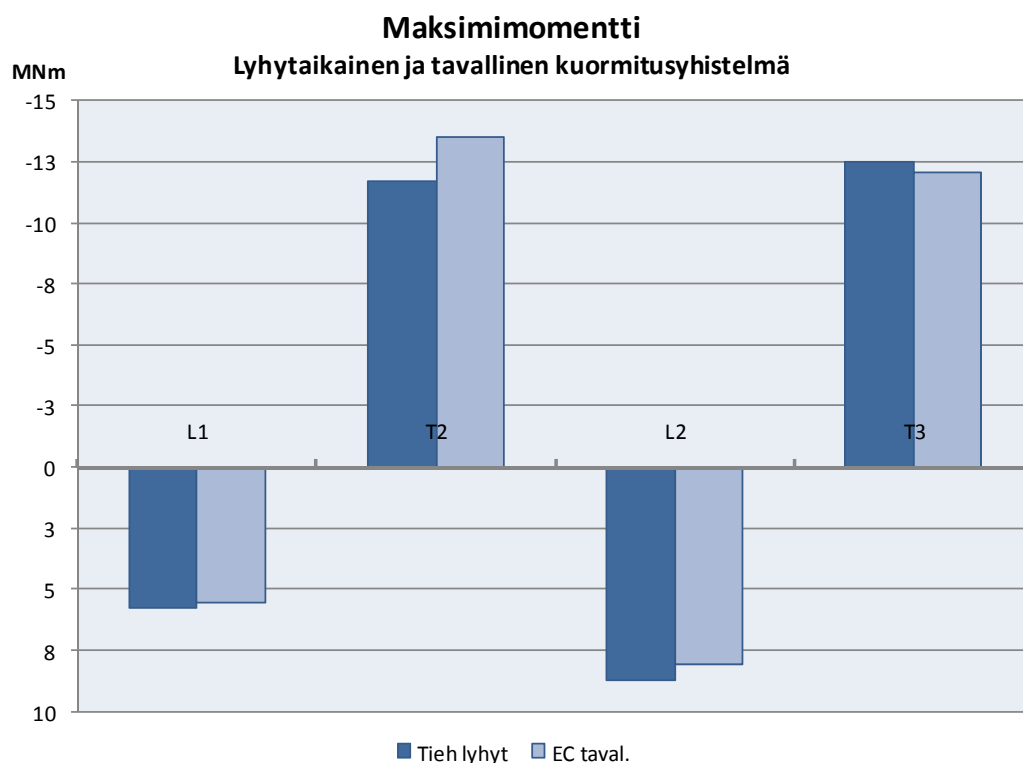


Kuva 12: Pitkäaikaisyhdistelmän maksimimomentit

Molempien suunnitteluohjeiden perusteella saadaan pitkäaikaisyhdistelmän taivutusmomentin loppuarvoksi lähes sama tulos, vaikka kuormien yhdistely ja varsinaiset kuormakaaviot muodostetaan täysin eri tavoin.

Tulosten samansuuruus ei kuitenkaan suoranaisesti vaikuta pääkannakkeen osalta raudoitemääriin, sillä halkeamamitoituksessa asetetut raja-arvot määrittävät rakenteen kelpoisuuden pitkäaikaisvaikutuksia vastaan.

Rakenteen käyttörajatilatarkastelua ei tehdä teräsbetonirakenteella eurokoodin mukaan lainkaan tavallisella kuormitusyhdistelmällä, mutta sen antamat arvot on tässä vertailussa rinnastettu Tiehallinnon ohjeen lyhytaikaiseen yhdistelmään. Rakennetyypin ollessa jännitetty, tulee tavallisen kuormitusyhdistelmän mukainen mitoitus ottaa myös huomioon. Käyttörajatilan tarkasteluissa on pakkovoimien vaikutus otettu mukaan voimasuureisiin. Kuormitusyhdistelmien maksimimomentit on esitetty kuvassa 13.



Kuva 13: Lyhytaikaisen ja tavallisen kuormitusyhdistelmän maksimimomentit

Kuormitusyhdistelmät tuovat samansuuntaisia arvoja myös lyhytaikaisia tarkasteluja tehdessä. Vaikka tavallinen yhdistelmä ei ole tässä tapauksessa mukana mitoittavana tekijänä, voidaan tuloksista kuitenkin tulkita niiden edustavan samaa linjaa kuin betonormin lyhytaikainen yhdistelmä.

Vaikka teräsmäärät lasketaan vertailun ohjeilla eri tavoin, on taivutusmomenttien vertaaminen tärkeää, jotta voidaan määrittää millä tekijöillä on merkittävimmät vaikutukset lopputuloksiin.

Alla olevaan taulukkoon on kerätty murtorajatilan mukaiset taivutusmomentit, joiden muutosta on kuvattu prosenttiluvulla. Vertailukohtana on käytetty vanhan kansallisen suunnitteluohjeen mukaisia rasiuksia, jolloin tuloksena on esitetty suunnittelunormin vaihtumisen aiheuttama muutosprosentti.

Taulukko 9: Maksimimomenttien erotus

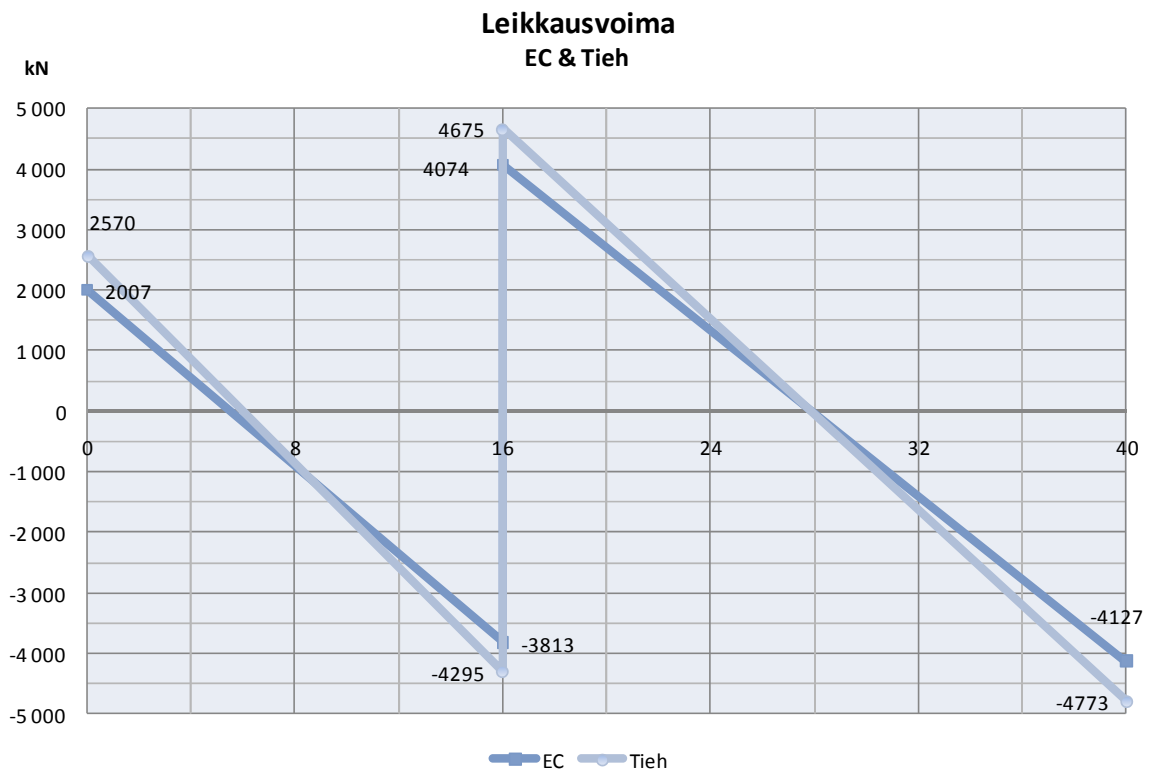
EC/BN	L1	T2	L2	T3
$M_{d,EC} / M_{d,Tieh}$	-8,2 %	-33,3 %	-12,5 %	-15,4 %
$M_{d,EC} / M_{d,Tieh, pakkovoimat}$	-3,5 %	-7,5 %	-6,7 %	-7,5 %
$M_{k, tavallinen, EC} / M_{k, lyhyt, Tieh}$	-3,8 %	15,3 %	-7,3 %	-3,0 %
$M_{k,pitkä,EC} / M_{k,pitkä,Tieh}$	-6,7 %	-1,9 %	-4,2 %	5,3 %

Taivutusmomenttien muutoksesta voidaan selkeästi huomata kuinka eurokoodin mukaisen arvot ovat tasaisesti asteen pienempiä kuin nykyisen kansallisen ohjeen mukaan. Suurimmat erot ovat havaittavissa tukipisteillä tapauksessa, jossa pakkovoimien, kuten tukien painuman ja lämpötilakuormien vaikutusta ei ole huomioitu. Pysyvien kuormien suuruus on molemmilla ohjeilla likimain yhtä suuri, jolloin muutokset kertovat liikennekuorman pienemmästä osuudesta.

Taivutusmitoituksen analysoinnissa on ensisijaisen tärkeää määrittää kuinka suurta osaa nämä voimasuureet edustavat lopullisen teräsmäärän muutoksessa. Edellä esitetystä taulukosta voidaan muodostaa selkeä kuva millä tavoin taivutusmomenttien arvot muuttuvat suunnitteluohjeiden vaihtuessa. Täydelliset tulokset on luettavissa liitteestä 1: Tiehallinnon vertailulaskelmien tulokset.

7.1.2 Leikkausvoima

Pysyvien kuormien suuruuden ollessa molemmilla ohjeilla sama, muodostuu leikkausvoimien ero ainoastaan liikennekuormien perusteella. Taivutusmomentin tapaan, mitoittava leikkausvoima saatiin kuormaryhmällä gr I a. Leikkausvoimien arvoja on verrattu betoninormiin kuvassa 14.



Kuva 14: Mitoittavat leikkausvoimat

7.1.3 Vääntömomentti

Vääntökuormitus koostui rakenteen symmetrisen poikkileikkauksen vuoksi ainoastaan liikennekuorman vaikutuksesta. Arinan avulla pystyttiin huomioimaan pilareiden kiertymistä estävät vaikutukset ja siten saatiin tarkkoja vääntörasituksen arvoja. Eri tarkastelupisteissä saadut väännön arvot sekä normimuutoksen aiheuttama muutosprosentti on esitetty taulukossa 10.

Taulukko 10: Kansirakenteen vääntörasitukset

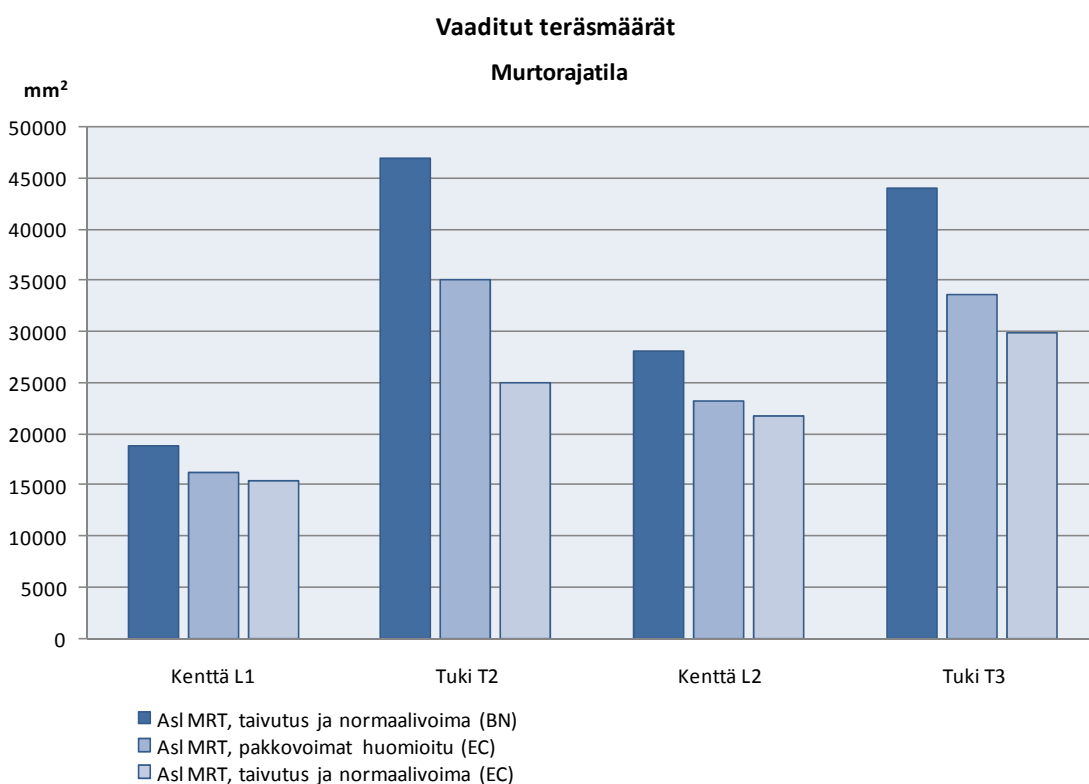
T_d [kNm]	T1	T2v	T2o	T3
EC	1981	-2104	-2254	2253
Tieh	1673	-2129	-2129	2129
$T_{d,EC} / T_{d,BN}$	18,4 %	-1,2 %	5,8 %	5,9 %

Kuormaryhmää gr1a käytettäessä kaistojen sijoittaminen tulee tehdä niin, että ensimmäinen kaista ja suurin teli- sekä pintakuorma sijoitetaan rakenteen reunaan. Tällöin telikuorman suuruus on sama kuin betoninormien yhteydessäkin ja vääntörasitukset saavat lähestulkoon saman arvon kummillakin menetelmällä. Eri normeilla käytetyt kuormakaaviot poikkeavat telien etäisyyden osalta toisistaan, joten tästäkin syystä saadaan vääntörasitukseen pieniä eroavaisuuksia.

7.2 Mitoitus murtorajatilassa

7.2.1 Taivutus

Eurokoodi sallii pakkovoimien vapauttamisen murtorajatilassa jos rakenteella on tarpeeksi muodonmuutoskykyä, mutta vertailulaskelmissa on kansirakenne mitoitettu sekä ilman, että pakkovoimat mukaan lukien. Vertailukohteen alkuperäinen mitoitus tehtiin Tiehallinnon Siltojen kuormat -ohjeen mukaisesti pakkovoimat huomioiden. Taivutuksen vaatimat teräsmäärät on esitetty kuvassa 15.



Kuva 15: Taivutusmitoituksen vaatimat teräsmäärät

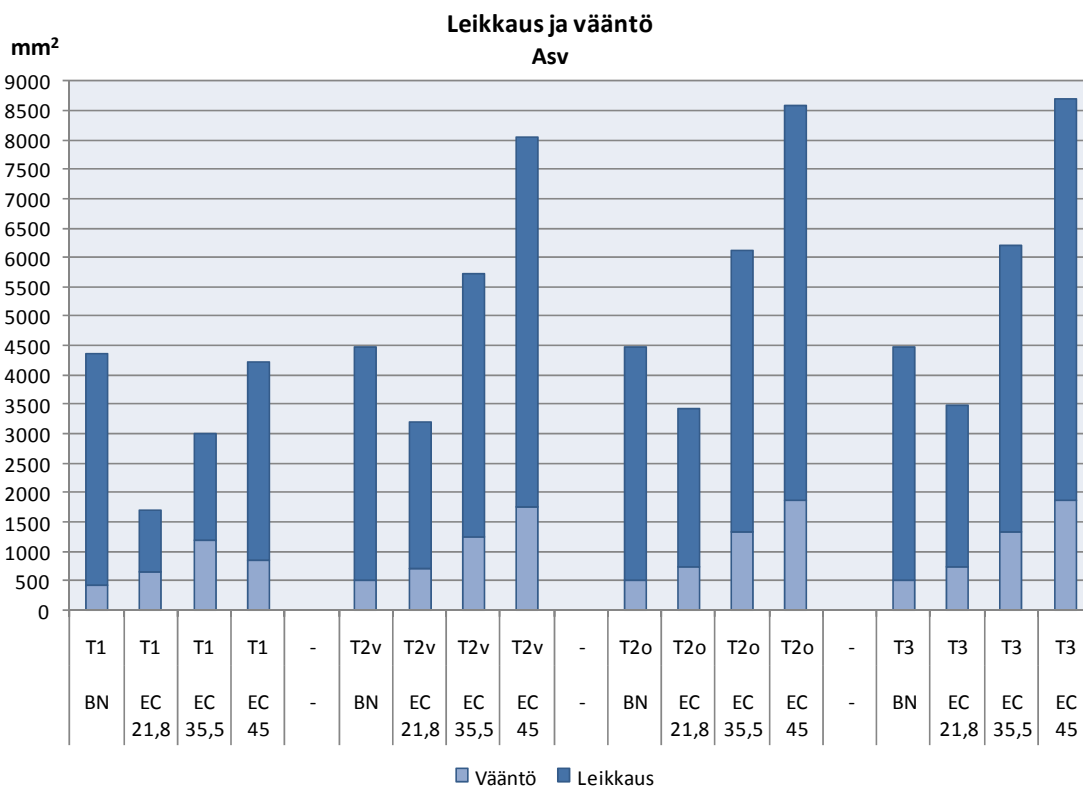
Taivutusmitoituksessa on havaittavissa, kuinka menetelmien välinen erotus on tukien kohdalla paljon suurempi kuin kentässä. Tämä johtuu osakseen siitä, että eurokoodi määrittelee laippapalkkirakenteen hyödyllisen leveyden eri tavoin kuin betoninormi, jolloin kentässä laipan hyödyllinen leveys on merkittävästi suurempi. Betoninormien teräsmäärissä on lisäksi havaittavissa selkeästi suurempaa vaihtelua kenttä- ja tukipisteiden välillä.

Pakkovoimien osuus tuloksissa on merkittävä, mutta tässä tapauksessa käyttörajatilan ollessa mitoittava, ei niillä ole vaikutusta vetoterästen lopulliseen määrään. Kuormamennettelyn muutos vaikuttaa suoranaisesti vaadittuihin teräsmääriin vain murtorajatilan taivutuksen osalta, jossa laskumenetelmä on vastaava molemmilla suunnitteluohjeilla.

7.2.2 Leikkaus ja vääntö

Mitoituksessa väännölle ja leikkaukselle on käytetty puristusdiagonaalien kulmia $21,8^\circ$, $35,5^\circ$ ja 45° , joilla on laskettu vaaditun hakaraidoituksen määrä sekä yhteisvaikutuksen käyttöaste puristumurtoon nähden. Tarvittavasta raudoituksesta on eritelty leikkauksen ja väännön osuudet, sekä ilmoitettu vaadittava lisä pääraudoitukseen.

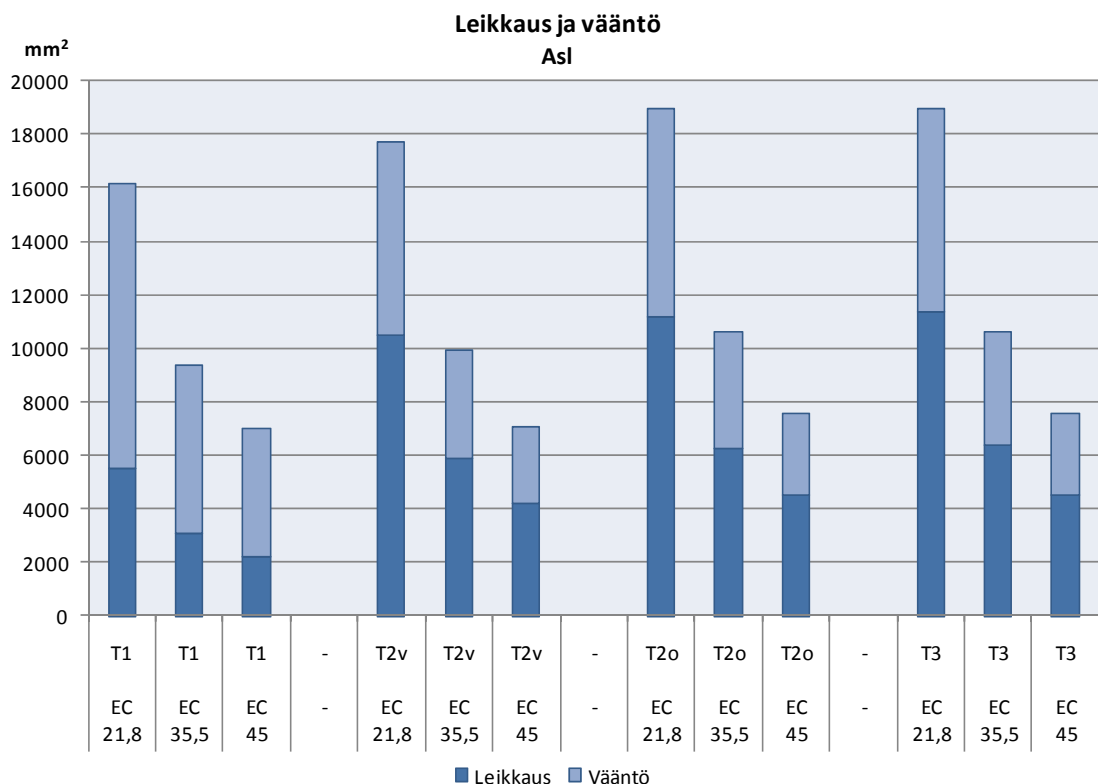
Kuvassa 16 on esitetty leikkaus- ja vääntövoimien vaatimat hakaterästen määrät eri tarkastelupisteissä. Tuloksissa tulee huomioida, että betoninormien mukaan minimiraidoitus oli riittävä ottamaan vastaan leikkaurasitukset, kun eurokoodin mukaan rakenteen kapasiteetti perustuu pelkästään raudoitukseen. Kuvassa on esitetty vaaka-akselilla tarkastelupiste, käytetty ohjeistus sekä Eurokoodin yhteydessä käytetty puristusdiagonaalien kulma.



Kuva 16: Leikkauksen ja väännön vaatima hakaraidoitus

Esimerkkitapauksessa kokonaisteräsmäärän kannalta optimaalinen puristusdiagonaalin kulma on ollut 45 astetta kaikissa tarkastelupisteissä. Tätä huomiota tukee vääntö-
rasitusten merkittävä osuus leikkausvoimaan verrattuna pitkittäisteräsmäärää laskettaessa.

Vaadittujen pitkittäisterästen määrän ollessa suuri, saadaan pienin kokonaismäärä viemällä kuormituksia mahdollisimman paljon leikkaushaioille. Kuvassa 17 on esitetty leikkauksen ja väännön vaatimat lisät pääraudoitukseen.



Kuva 17: Leikkauksen ja väännön vaatima lisä pääraudoitukseen

Leikkausraudoitusten vaatimat teräsmäärät eivät ole täysin vertailukelpoiset, sillä RakMK -mukainen betonin leikkauslujuus oli itsessään riittävä ottamaan vastaan rakenteelle kohdistuvat leikkausvoimat. Betoninormin mukaan suunnitelluilla rakenteilla on käytetty minimiraudoitusta.

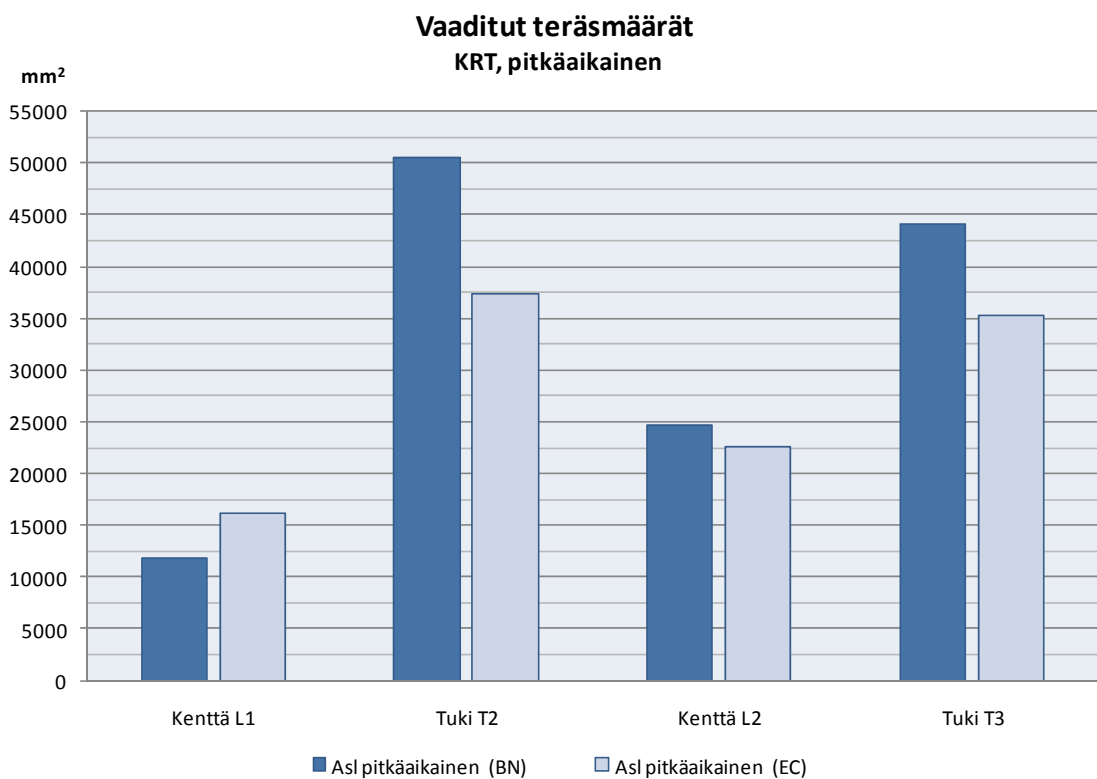
Eurokoodin mukainen minimiraudoitus on merkittävästi pienempi betoninormeihin verrattuna, joten vaikka rakenne ei hyödynnä leikkausmitoituksessa betoni lujuutta lain-

kaan, on vaadittava hakarautoisuus vähäisempi. Puristusdiagonaalin muutoksella voidaan helposti optimoida erisuuntaisten terästen määrää, mutta vaikka minimirautoisuusvaatimus on pienempi, ei kokonaisteräsmäärällä ole suurta muutosta.

7.3 Mitoitus käyttörajatilassa

7.3.1 Halkeamaleveys

Halkeamaleveydet laskettiin molemmilla ohjeilla ja tuloksiksi saatiin tarvittavat raudoitukset eri halkeamarajatioista. Pitkäaikaisyhdistelmä on kokonaisteräsmäärän suhteen mitoittava jokaisessa tarkastelupisteessä, sillä eurokoodissa vaadittua teräsbetonirakenteen raudoittemäärää laskiessa ei huomioida tavallista kuormitusyhdistelmää. Molempien käyttörajatilojen vaikutukset on kuitenkin tutkittu, jotta tavallisen kuormitusyhdistelmän soveltuvuutta mitoitukseen voidaan tarkastella. Lopulliseen tarkasteltuun kerätty vaadittu teräsmäärä on muodostunut pitkäaikaisyhdistelmän perusteella.



Kuva 18: Pitkäaikaisen kuormitusyhdistelmän vaatimat teräsmäärät

Halkeamaleveys on molemmilla ohjeilla mitoittava tekijä pääterästen osalta. Eurokoodissa käytettävä pitkäaikainen kuormitusyhdistelmä toi jokaisessa tarkastelupisteessä määräävän teräsmäärän.

Tavallisen kuormitusyhdistelmän tehtävä eurokoodissa on tutkia jännitetyjen rakenteiden kelpoisuutta halkeilua vastaan, eli se ei sovellu sellaisenaan teräsbetonirakenteiden mitoitukseen. Tavallisen kuormitusyhdistelmän käyttöönotto vaatisi siis oman määrittelynsä rakenteen halkeamaleveyden rajoittamiselle jotta se voitaisiin ottaa huomioon myös jännittämättömissä rakenteissa.

Kappaleessa aiemmin esitetyt vetoterästen määrät ovat suoraan riippuvaisia halkeamaleveyskaavassa käytettävästä betonipeitteen paksuudesta, jota ohjaa kerroin k_{c1} . Vaikutusten määrittämiseksi halkeamalevydet on laskettu eurokoodin mukaan käyttäen betoninormin vaadittua raudoitetta, jolloin kertoimelle k_{c1} on käytetty arvoja 1,0; 1,25; 1,5 ja ∞ .

Taulukkoon 11 on eritelty sallitut halkeamalevydet kun ympäristöolosuhteiden vaatima suojabetonipaksuus on 35mm ja todellinen betonipeite päällysrakenteessa 60mm.

Taulukko 11: Sallitut halkeamalevydet

Sallittu halkeamaleveys, w_k		
k_{c1}	Pitkäaikaisyhdistelmä	Tavallinen kuormitusyhdistelmä
1,0	0,15 mm	0,100 mm
1,25	0,188 mm	0,125 mm
1,4	0,210 mm	0,140 mm
1,5	0,225 mm	0,150 mm
∞	0,257 mm	0,171 mm

Pitkäaikaisella kuormitusyhdistelmällä vastaava sallittu eurokoodin mukainen halkeamaleveyden perusarvo on 0,15mm, jota on kasvatettu korotuskertoimella arvoon 0,21 mm. Kuvassa 19 on esitetty k_{c1} -arvojen vaikutukset halkeamaleveyteen käyttäen pitkäaikaisyhdistelmän kuormituksia.



Kuva 19: Halkeamalevydet, pitkäaikainen

Tuloksista voi päätellä, kuinka eurokoodin halkeamaleveyskaava antaa betoninormien mukaisella raudoituksella merkittävästi pienempiä arvoja. Eurokoodin mukaan mitoitettun rakenteen halkeilulle asetetut vaatimukset täyttyvät siis helpommin.

Kertoimen k_{c1} vaikutus halkeamalevyden laskennassa käytettävään betonipeitteen paksuuteen on siis merkittävä. Raja-arvoja tarkastellessa tulee huomioida, kumpaan käyttörajatilaan vertailuja tehdään. Pitkäaikaisen kuormitusyhdistelmän arvot ovat selkeämmin linjassa murtorajatilan sekä betoninormin vastaavien tulosten kanssa, mutta kuitenkin vaativat paljon pienempiä teräsmääriä kuin aiempi mitoitusmenettely.

Eurokoodi edellyttää mitoittamaan teräsbetonirakenteet pitkäaikaisyhdistelmälle, mutta tutkimuksen alla on myös tavallisen kuormitusyhdistelmän huomioiminen halkeamaleveysmitoituksessa.

Rakenteiden analysointi ei ole halkeamaleveydenkään osalta täysin selkeää eikä vertailukelpoista, sillä eurokoodista löytyy kolme erilaista määrittelyä vedetyn rakenneosan toimivan leveyden laskentaan. Poikkileikkauksista on esitetty esimerkiksi palkki sekä laatta, muttei näiden kahden yhdistelmää. Laattapoikkileikkauksen toimivan leveyden määrittämiseksi oli perusteltua käyttää palkin laskentakaavaa, sillä laipan osuus esimerkkikohteessa oli kohtuullisen pieni.

7.4 Muiden vertailulaskelmien tulokset

Vertailulaskelmahankkeessa on mukana yhteensä 12 eri suunnittelutoimistoa, jotka mitoittivat kukin 1-2 kohdetta nykyohjeiden sekä eurokoodin mukaan. Hankkeen betonisiltojen jännemitat vaihtelivat välillä 13–100 metriä ja hyödyllinen leveys välillä 3-20 metriä.

Vertailukohteet olivat teräsbetonisia tai jälkijännitettyjä betonisiltoja laatta-, tai laattapalkkirakenteella. Siltojen laajasta kirjosta on vaikea antaa yksiselitteisiä tuloksia, mutta kohteissa havaittiin seuraavanlaisia huomioita:

- Laattapalkkirakenteen palkkiosiin saattaa seurata leikkausmitoituksen johdosta paksumistomenpiteitä nykyohjeisiin verrattuna.
- Käyttörajan pitkäaikaisyhdistelmää käytettäessä halkeamamitoituksen merkitys saattaa laskea merkittävästi tai jopa hävitä kokonaan esimerkiksi uloketta tai laattapalkin laatan mitoituksessa. Halkeamarajan mitoitavuus on monissa tapauksissa alhainen.
- Murtorajan rasitukset ovat pääkannattimilla samaa suuruusluokkaa kuin nykyohjeillakin laskettaessa.

8 Yhteenveto ja johtopäätökset

Eurokoodin yksityiskohtaisemmat mitoitusmenettelyt tuovat suunnittelijalle varsinkin alkuvaiheessa lisätyötä, mutta samalla mahdollistavat teknisesti tasokkaampien rakenteiden kehittämisen. Yleisesti suunnittelijalle jää enemmän mahdollisuuksia jakaa kuormituksia rakenteen eri osille ja sen avulla optimoida teräsbetonirakenteen raudoitteita parhaaksi katsomallaan tavalla. Näitä valintoja tehdessä tulee kuitenkin muistaa, että ohjeet ovat vasta kehitysvaiheessa eivätkä ole täysin aukottomia.

Ohjeiden uudistuessa muuttui myös tieliikenteen sillan kuormamenettely täysin. Kuormitusten määrittäminen olisi pelkkien standardien avulla todella työlästä, joten varsinainen siltojen kuormien sovellusohje tulee olemaan ensisijainen työkalu jokaiselle siltasuunnittelijalle. Monipuolisen, mutta silti selkeän sovellusohjeen avulla ei itse mitoitusprosessin tarvitse muuttua olennaisesti.

Murtorajatilamitoitus ei ole kokenut merkittäviä muutoksia. Molemmilla menetelmillä saavutettiin samaa suuruusluokkaa olevat tulokset, joten niiltä osin voidaan todeta ohjeiden noudattavan yhtenäistä linjaa. Kuitenkaan yhdessäkään tarkastelupisteessä ei murtorajatilalla ollut mitoittavaa vaikutusta.

Halkeamarajatilan mitoittavuuden laskiessa murtorajatilan merkitys kasvaa vanhoihin ohjeisiin verrattuna, joten pakkovoimien käsittelyyn tulisi tehdä selkeä linjaus. On vielä epäselvää, voiko kutistuman, tukipainuman, pintalämpötilaeron ja jännevoiman pakkovoimat jättää huomioimatta jos rakenteen kiertymäkyky riittää, vai pelkästään osan näistä voimista. Näillä valinnoilla on todella suuri vaikutus, joten vastuuta niiden huomioimisesta ei tulisi jättää pelkästään suunnittelijan vastuulle. Vertailulaskelmahankkeen yhtenä päätarkoituksena oli kuitenkin tuoda näitä havaintoja esiin, jotta ne voidaan huomioida julkaistavissa ohjeissa.

Leikkaus ja – vääntömitoitus on kokenut merkittävän muutoksen pelkästään ristikko-analogiaan nojautuvan mitoitusmenetelmän ansiosta. Puristusdiagonaalin kulmaa muuttamalla voidaan vaikuttaa olennaisesti kokonaisteräsmäärään, mutta kulman ääriarvoja käytettäessä voidaan päätyä liian lähelle rakenteen, tai sen osien kestävyuden ylärajaa. Leikkaus ja -vääntövoimien suhteella on suuri merkitys siinä, mikä on optimaalinen puristusdiagonaalin kulma kyseisessä rakenneosassa.

Euroopan yhteisten normien mukaan suunniteltaessa tulee muistaa, että ohjeet asettavat vain minimivaatimuksen jonka mukaan suunnitteleminen ei aina ole järkevää. Vanhojen ohjeiden mukana tullut kokemus ja perusteet mitoituksessa tulee pitää mielessä uusien normien mukaan suunniteltaessa, sillä nekin eivät ole aukottomia.

Suunnittelijan kannalta olennaisinta on, millaiset työkalut hänellä on käytössään; hyvillä tiivistetyillä mitoitushjeilla ja selkeillä laskentapohjilla ei eurokoodin mukaisen mitoituksen tarvitse olla sen työläämpää kuin tähänkään mennessä.

Lähdeluettelo

- Betonisiltojen rajatilamitoitus . (2009). *A-Insinöörit, luentomoniste*. Helsinki.
- By 60. (2008). *Suunnitteluohje EC2 osat 1-1 ja 1-2*. Helsinki: Betoniyhdistys Ry.
- SFS-EN 1991-1-1. (2002). *Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat, Osa 1-1: Rakenteen oma paino ja rakennusten hyötykuormat*. Suomen Standardoimisliitto SFS.
- SFS-EN 1991-1-4. (2005). *Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat, Osa 1-4: Tuulikuormat*. Suomen Standardoimisliitto SFS.
- SFS-EN 1991-1-5. (2004). *Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat, Osa 1-5: Lämpötilakuormat*. Suomen Standardisoimisliitto SFS.
- SFS-EN 1991-1-7. *Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat, Osa 1-7: Onnettomuuskuormat*. Suomen Standardisoimisliitto SFS.
- SFS-EN 1991-2. (2006). *Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat, Osa 2: Siltojen kuormat*. Suomen Standardisoimisliitto SFS.
- SFS-EN 1992-1-1. *Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu, Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt*. Suomen Standardisoimisliitto SFS.
- SFS-EN 1992-2. (2006). *Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu, Osa 2: Betonisillat*. Suomen Standardisoimisliitto SFS.
- SFS-EN 1992-2 NA. (2009). *Suomen kansallinen liite: Betonirakenteiden suunnittelu: Betonisillat - mitoittaminen ja yksityiskohtien suunnittelu*. Tiehallinto.
- Tiehallinto. (2009). *Siltojen kuormat ja suunnitteluperusteet, luonnos 6*.

Liitteet

Tiehallinnon vertailulaskelmien Excel -raportti

Tiehallinnon vertailulaskelmien tulokset. Versio 24.7.2009

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
		Orvasaaren Rs PP1	Orvasaaren Rs PP2	Orvasaaren Rs PP1	Orvasaaren Rs PP2	Orvasaaren Rs PP1	Orvasaaren Rs PP1	Orvasaaren Rs PP1	Orvasaaren RS PP1	Orvasaaren Rs PP1	
		Päätytuki T1	Päätytuki T1+d	Kenttä L1	Välituki T2-d	Välituki T2	Välituki T2+d	Kenttä L2	Välituki T3-d	Välituki T3	
Vertailupiste ID											
Silta											
Rakenneossa											
Sijainti											
Lisätiedot											
Poikkileikkaus	Yksiköt										
Pääraudoitteen halkaisija	mm	25		25		25		25		25	
Hakaraudoitteen halkaisija	mm	16		16		16		16		16	
f_{yk}	MPa	500		500		500		500		500	
Betonin lujuus	C	28,6		28,6		28,6		28,6		28,6	vastaa lujuutta K35
Rakenneluokka		1		1		1		1		1	
b	mm	3500		3500		3500		3500		3500	
h	mm	1300		1300		1300		1300		1300	
<i>Tarvittaessa poikkileikkausesta on esitettävä kuva!</i>											
Betonipeite											
$C_{nom,dur}$	mm	40		40		40		40		40	
ΔC_{dev}	mm	5		5		5		5		5	
C_{true}	mm	60		60		60		60		60	
Halkeamaleveyksien perusarvot											
W_k , lyhyt,BN	mm	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	
W_k , pitkä,BN	mm	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	
W_k , tavallinen,EC	mm	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	
W_k , pitkäaikainen,EC	mm	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	
Voimasuureet, BN											
M_d	kNm	0	-	9129	-	-20106	-	13344	-	-19305	
$N_{d,vast}$	kNm	0	-	0	-	-241	-	980	-	1167	
$T_{d,vast}$	kNm	1673	-	-555	-	-2129	-	969	-	2129	
$M_{k,lyhyt}$	kNm	0	-	5774	-	-13012	-	8757	-	-12480	
$N_{k,lyhyt,vast}$	kN	0	-	0	-	973	-	886	-	886	
$M_{k,pitkä}$	kNm	0	-	3584	-	-11688	-	5782	-	-10063	
$N_{k,pitkä,vast}$	kN	0	-	0	-	236	-	-2	-	793	
$V_d \max$	kN	-	2570	0	4295	-	4675	0	4773	-	
$T_{d,vast}$	kNm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
$T_d \max$	kNm	1673	-	-555	-	-2129	-	969	-	2129	
$V_{d,vast}$	kN	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Voimasuureet,EC											
M_d	kNm	0		8376		-13402		11673		-16325	ilman pakkovoimia
	kNm	0		8809		-18597		12452		-17856	Md,max pakkovoimat mukana
		<i>gr1a</i>	<i>gr1a</i>	<i>gr1a</i>	<i>gr1a</i>	<i>gr1a</i>	<i>gr1a</i>	<i>gr1a</i>	<i>gr1a</i>	<i>gr1a</i>	
Liikennekuormat	1,35	0	-	5149,6	-	-5293	-	6331,0	-	-5565,2	
Pysyvät kuormat	1,15	0	-	3187,3	-	-7979,3	-	5338,0	-	-10639,5	
F^*wk / Fwk	1	0	-	39	-	-130	-	4	-	-120	
TK	1,5	0	-	433	-	-2180	-	779	-	-1531	
BF	0,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
S	1,2	0	-	-1653,1	-	-3014,9	-	-960,4	-	391,0	
TLEP	0,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
EP	1,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
$N_{d,vast}$	kN	21		41		81		36		103	

Liikennekuormat	1,35	0,0	-	0,0	-	-192,0	-	-257,6	-	-170,8
Pysyvät kuormat	1,15	0,0	-	0,0	-	57,4	-	57,4	-	57,4
F*wk / Fwk	1	20,6	-	41,2	-	7,1	-	27,7	-	7,6
Tk (ei huomioida murtorajatilatarkasteluissa)	1,5	0,0	-	433,1	-	1145,0	-	1145,0	-	1145,0
BF	0,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
S	1,2	0,0	-	0,0	-	208,6	-	208,6	-	208,6
TLEP	0,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
EP	1,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
V_d vast	kN	-	2007,4	-	-3812,7	-	4074,5	-	-4127,4	-
T_d vast	kNm	1981		1110		-2254		1003		2253
Liikennekuormat	1,35	1981,125	-	1109,7	-	-2253,96	-	1003,05	-	2253,285
Pysyvät kuormat	1,15	-	-	-	-	-	-	-	-	-
F*wk / Fwk	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Tk (ei huomioida murtorajatilatarkasteluissa)	1,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BF	0,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
S	1,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TLEP	0,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
EP	1,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Tarkistus		1981		1110		-2254		1003		2253
V_d max	kN	0	2007	-	-3813	0	4074	-	-4127	0
<i>mikä group? (gr1a / gr2 / gr5 jne.)</i>		<i>gr1a</i>	<i>gr1a</i>	<i>gr1a</i>	<i>gr1a</i>	<i>gr1a</i>	<i>gr1a</i>	<i>gr1a</i>	<i>gr1a</i>	<i>gr1a</i>
Liikennekuormat	1,35	-	1351,6	-	-1603,5	-	1765,8	-	-1736,2	-
Pysyvät kuormat	1,15	-	924,8	-	-1923,3	-	2127,0	-	-2552,0	-
F*wk / Fwk	1	-	6,5	-	-10,4	-	10,4	-	-10,4	-
Tk (ei huomioida murtorajatilatarkasteluissa)	1,5	-	72,2	-	-72,2	-	135,9	-	-192,5	-
BF	0,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
S	1,2	-	-275,5	-	-275,5	-	171,2	-	171,2	-
TLEP	0,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
EP	1,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Tarkistus		0		0		0		0		0
M_d vast	kNm	0	6723	-	-16417	0	10713	-	-15934	0
Liikennekuormat	1,35	0	-	5149,6	-	-5293	-	6331,0	-	-5565,2
Pysyvät kuormat	1,15	0	-	3187,3	-	-7979,3	-	5338,0	-	-10639,5
F*wk / Fwk	1	0	-	39	-	-130	-	4	-	-120
Tk (ei huomioida murtorajatilatarkasteluissa)	1,5	0	-	433	-	-2180	-	779	-	1531
BF	0,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
S	1,2	0	-	-1653,1	-	-3014,9	-	-960,4	-	391,0
TLEP	0,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
EP	1,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
T_d vast	kNm	0	1981,125	0	-2103,705	0	-2253,96	0	2253,285	0
Liikennekuormat	1,35	-	1981,125	-	-2103,705	-	-2253,96	-	2253,285	-
Pysyvät kuormat	1,15	-	-	-	-	-	-	-	-	-
F*wk / Fwk	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Tk (ei huomioida murtorajatilatarkasteluissa)	1,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BF	0,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
S	1,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TLEP	0,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
EP (sisältyy jo pysyviin kuormiin)	1,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
LM3 vääntötilä, jos 500 mm päässä HL:n reunasta	kNm	-	-	-	-	-	-	-	-	-
T_d max	kNm	0	1981	-	-2104	0	-2254	0	2253	0
<i>mikä group? (gr1a / gr2 / gr5 jne.)</i>		<i>gr1a</i>	<i>gr1a</i>	<i>gr1a</i>	<i>gr1a</i>	<i>gr1a</i>	<i>gr1a</i>	<i>gr1a</i>	<i>gr1a</i>	<i>gr1a</i>
Liikennekuormat	1,35	-	1981,125	-	-2103,705	-	-2253,96	-	2253,285	-

Pysyvät kuormat	1,15	-	-	-	-	-	-	-	-	-
F*wk / Fwk	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Tk (ei huomioida murtorajatilatarkasteluissa)	1,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BF	0,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
S (sisältyy jo pysyviin kuormiin)	1,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TLEP	0,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
EP (sisältyy jo pysyviin kuormiin)	1,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
LM3 vääntölisä, jos 500 mm päässä HL:n reunasta	kNm	0,0		0,0		-1570,0		0,0		-2090,0
V_d vast	kNm		1352		-1604		1766		-1736	
Liikennekuormat	1,35	-	1352	-	-1604	-	1766	-	-1736	-
Pysyvät kuormat	1,15	-	-	-	-	-	-	-	-	-
F*wk / Fwk	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Tk (ei huomioida murtorajatilatarkasteluissa)	1,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BF	0,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
S (sisältyy jo pysyviin kuormiin)	1,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TLEP	0,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
EP (sisältyy jo pysyviin kuormiin)	1,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Tarkistus		0		0		0		0		0
M_d vast	kNm	0		8337		-13272		11669		-16205
Liikennekuormat	1,35	0	-	5150	-	-5293	-	6331	-	-5565
Pysyvät kuormat	1,15	0	-	3187,3	-	-7979,3	-	5338,0	-	-10639,5
F*wk / Fwk	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Tk (ei huomioida murtorajatilatarkasteluissa)	1,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BF	0,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
S (sisältyy jo pysyviin kuormiin)	1,2	0	-	-1653,1	-	-3014,9	-	-960,4	-	391,0
TLEP	0,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
EP (sisältyy jo pysyviin kuormiin)	1,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Tarkistus		0		8337		-13272		11669		-16205
M_k tavallinen	kNm	0		5553		-13482		8115		-12101
<i>mikä group? (gr1a / gr2 / gr5 jne.)</i>		<i>gr1a</i>	<i>gr1a</i>	<i>gr1a</i>	<i>gr1a</i>	<i>gr1a</i>	<i>gr1a</i>	<i>gr1a</i>	<i>gr1a</i>	<i>gr1a</i>
Liikennekuormat (0,75/0,4/0,4)	1	0,0	-	2565,2	-	-2438,4	-	3084,3	-	-2474,4
Pysyvät kuormat	1	0,0	-	2771,6	-	-6938,5	-	4641,7	-	-9251,7
F*wk / Fwk	0	0,0	-	0,0	-	0,0	-	0,0	-	0,0
Tk	0,5	0,0	-	216,5	-	-1090,1	-	389,4	-	-765,5
BF	0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
S (pysyvä kuorma)	1	0,0	-	-1653,1	-	-3014,9	-	-960,4	-	391,0
TLEP	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
EP	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Tarkistus		0		5553		-10467		8115		-12492
N_k tavallinen vast	kN	21		330		895		896		907
Liikennekuormat	1	0,0	-	0,0	-	-99,5	-	-119,0	-	-87,7
Pysyvät kuormat	1	0,0	-	0,0	-	49,9	-	49,9	-	49,9
F*wk	0	20,6	-	41,2	-	7,1	-	27,7	-	7,6
Tk	0,5	0,0	-	288,7	-	763,3	-	763,3	-	763,3
BF	0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
S (pysyvä kuorma)	1	0,0	-	0,0	-	173,8	-	173,8	-	173,8
TLEP	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
EP	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Tarkistus		21		330		721		722		733
M_k pitkäaikainen	kNm	0		3344		-11464		5536		-10596
<i>mikä group? (gr1a / gr2 / gr5 jne.)</i>		<i>gr1a</i>	<i>gr1a</i>	<i>gr1a</i>	<i>gr1a</i>	<i>gr1a</i>	<i>gr1a</i>	<i>gr1a</i>	<i>gr1a</i>	<i>gr1a</i>
Liikennekuormat	0,3	0,0	-	245,2	-	-430,4	-	371,1	-	-529,2
Pysyvät kuormat	1	0,0	-	2771,6	-	-6938,5	-	4641,7	-	-9251,7
F*wk / Fwk	0	0,0	-	39,0	-	-129,5	-	4,3	-	-120,4
Tk	0,5	0,0	-	288,7	-	-1453,4	-	519,2	-	-1020,6
BF	0,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Muita ei ole tarkasteltu

Muita ei ole tarkasteltu

$$V_d / V_{u,max}$$

$$T_d / T_{u,max}$$

Halkeamalevydet käyttäen $A_{sl,vaad,BN}$

W_k , lyhyt, tarvittava raudoitus

W_k , pitkä, tarvittava raudoitus

Mitoitus, EC

A_{sl} vaad

A_{sl} MRT, pakkovoimat huomioitu

A_{sl} MRT, taivutus ja normaalivoima

A_{sl} tavallinen

A_{sl} pitkäaikainen

A_{sl} , vähimmäismäärä

Hakojen mitoitus, θ_{min}

$A_{sv, vaad}$

$\theta_{min} =$

t_{ef}

A_{sv} , leikkaus max $\theta = \min$

A_{sv} , vääntö vast $\theta = \min$

A_{sl} lisä, leikkaus max $\theta = \min$

A_{sl} lisä, vääntö vast $\theta = \min$

$V_{Ed} / V_{Rd,max}$

$T_{Ed} / T_{Rd,max}$

$\theta_{min} =$

t_{ef}

A_{sv} , vääntö max $\theta = \min$

A_{sv} , leikkaus vast $\theta = \min$

A_{sl} lisä, vääntö max $\theta = \min$

A_{sl} lisä, leikkaus vast $\theta = \min$

$V_{Ed} / V_{Rd,max}$

$T_{Ed} / T_{Rd,max}$

Hakojen mitoitus, $\theta = 35.5$

$A_{sv, vaad}$

t_{ef}

A_{sv} , leikkaus max $\theta = 35.5$

A_{sv} , vääntö vast $\theta = 35.5$

A_{sl} lisä, leikkaus max $\theta = 35.5$

A_{sl} lisä, vääntö vast $\theta = 35.5$

$V_{Ed} / V_{Rd,max}$

$T_{Ed} / T_{Rd,max}$

t_{ef}

A_{sv} , vääntö max $\theta = 35.5$

A_{sv} , leikkaus vast $\theta = 35.5$

A_{sl} lisä, vääntö max $\theta = 35.5$

A_{sl} lisä, leikkaus vast $\theta = 35.5$

$V_{Ed} / V_{Rd,max}$

$T_{Ed} / T_{Rd,max}$

			0,247		0,314		0,314		0,314	
	c	mm	40	40	40	40	40	40	40	40
		mm	-	-	0,289	-	0,223	-	0,300	-
		mm	-	-	0,100	-	0,210	-	0,169	-
		mm ²	-	-	16199	-	37306	-	22580	-
		mm ²	-	-	16255	-	35087	-	23157	-
		mm ²	-	-	15441	-	24969	-	21690	-
		mm ²	-	-	29452	-	57432	-	38779	-
		mm ²	-	-	16199	-	37306	-	22580	-
		mm ² /m	3657	-	3657	-	3657	-	3657	-
		mm ² /m		1693		3216		3436		3481
		DEG	21,80							21,80
		mm	-	481,0	-	481,0	-	481,0	-	481,0
		mm ² /m	-	1693	-	3216	-	3436	-	3481
		mm ² /m	-	-	-	-	-	-	-	-
		mm ² /m	-	5520	-	10486	-	11204	-	11350
		mm ² /m	-	-	-	-	-	-	-	-
		-	-	0,113	-	0,215	-	0,230	-	0,223
		-	-	-	-	-	-	-	-	-
		DEG	21,8				21,8		21,8	
		mm	-	481,0	-	481,0	-	481,0	-	481,0
		mm ² /m	-	661	-	702	-	752	-	752
		mm ² /m	-	-	-	-	-	-	-	-
		mm ² /m	-	16189	-	17726	-	18989	-	18989
		mm ² /m	-	-	-	-	-	-	-	-
		-	-	-	-	-	-	-	-	-
		-	-	0,17	-	0,18	-	0,193	-	0,193
		mm ² /m		3019		5735		6127		6207
		mm	-	481,0	-	481,0	-	481,0	-	481,0
		mm ² /m	-	3019	-	5735	-	6127	-	6207
		mm ² /m	-	-	-	-	-	-	-	-
		mm ² /m	-	3095	-	5880	-	6283	-	6364
		mm ² /m	-	-	-	-	-	-	-	-
		-	-	0,082	-	0,157	-	0,167	-	0,170
		-	-	-	-	-	-	-	-	-
		mm	-	481,0	-	481,0	-	481,0	-	481,0
		mm ² /m	-	1180	-	1252	-	1342	-	1342
		mm ² /m	-	-	-	-	-	-	-	-
		mm ² /m	-	9358	-	9939	-	10648	-	10648
		mm ² /m	-	-	-	-	-	-	-	-
		-	-	-	-	-	-	-	-	-
		-	-	0,124	-	0,132	-	0,141	-	0,141

ILMAN PAKKOVOIMIA!

Hakojen mitoitus, $\theta = 45$									
$A_{sv, vaad}$	mm^2/m		4232		8040		8590		8702
t_{ef}	mm	-	481,0	-	481,0	-	481,0	-	481,0
A_{sv} , leikkaus max $\theta = 45$	mm^2/m	-	4232	-	8040	-	8590	-	8702
A_{sv} , vääntö vast $\theta = 45$	mm^2/m	-	-	-	-	-	-	-	-
A_{sl} lisä, leikkaus max $\theta = 45$	mm^2/m	-	2208	-	4194	-	4481	-	4540
A_{sl} lisä, vääntö vast $\theta = 45$	mm^2/m	-	-	-	-	-	-	-	-
$V_{Ed} / V_{Rd,max}$		-	0,078	-	0,148	-	0,158	-	0,160
$T_{Ed} / T_{Rd,max}$		-	-	-	-	-	-	-	-
t_{ef}	mm	-	481,0	-	481,0	-	481,0	-	481,0
A_{sv} , vääntö max $\theta = 45$	mm^2/m	-	864	-	1756	-	1880	-	1880
A_{sv} , leikkaus vast $\theta = 45$	mm^2/m	-	-	-	-	-	-	-	-
A_{sl} lisä, vääntö max $\theta = 45$	mm^2/m	-	6979	-	7090	-	7595	-	7595
A_{sl} lisä, leikkaus vast $\theta = 45$	mm^2/m	-	-	-	-	-	-	-	-
$V_{Ed} / V_{Rd,max}$		-	-	-	-	-	-	-	-
$T_{Ed} / T_{Rd,max}$		-	0,117	-	0,124	-	0,133	-	0,133
Halkeamaleveydet käyttäen rauditus $A_{sl,vaad,EN}$									
c	mm	40		40		40		40	
W_k tavall. $k_{c1}=1$	mm	-	-	0,205	-	0,127	-	0,162	-
W_k tavall. $k_{c1}=1.25$	mm	-	-	0,241	-	0,153	-	0,193	-
W_k tavall. $k_{c1}=1.5$	mm	-	-	0,278	-	0,181	-	0,224	-
W_k tavall. $k_{c1}=\infty$	mm	-	-	0,309	-	0,204	-	0,252	-
W_k pitk. $k_{c1}=1$	mm	-	-	0,123	-	0,107	-	0,110	-
W_k pitk. $k_{c1}=1.25$	mm	-	-	0,144	-	0,129	-	0,131	-
W_k pitk. $k_{c1}=1.5$	mm	-	-	0,166	-	0,152	-	0,152	-
W_k pitk. $k_{c1}=\infty$	mm	-	-	0,185	-	0,172	-	0,171	-
Väsytysojennitysten tarkistus, EC									
σ_c kuormien ominaisyhdistelyllä (FLM1)	$/f_{ck}$	0,000	-	0,027	-	0,046	-	0,030	-
σ_c pitkäaikaisella kuormitusyhdistelmällä EC-2 kaavan (6.77) käyttöaste	$/f_{ck}$	0,000	-	0,136	-	0,530	-	0,234	-
σ_s kuormien ominaisyhdistelyllä (FLM1)	MPa	0	-	209	-	273	-	274	-
$\Delta\sigma_s$ (Q_{lat} + perusyhdistelmä) FLM3	MPa	0	-	297	-	217	-	169	-
YHTEENVETO									
A_{sl} vaad,BN	mm^2	9367	-	18733	-	50560	-	28962	-
A_{sl} vaad,EC	mm^2	8100	-	16199	-	37306	-	22580	-
A_{sl} vaad,EC (PAKKOVOIMAT MUK.)	mm^2	8128	-	16255	-	35087	-	23157	-
A_{sv} vaad,BN	mm^2/m	-	4372	-	4484	-	4484	-	4484
A_{sv} vaad,EC θ min	mm^2/m	-	1693	-	3216	-	3436	-	3481
$A_{s,vaad,EC} / A_{s,min}$, BN		-	0,43	-	0,81	-	0,87	-	0,88
Md,EC/ Md,BN		-	-	-8,2 %	-	-33,3 %	-	-12,5 %	-
Md,EC/ Md,BN, pakkovoimat		-	-	-3,5 %	-	-7,5 %	-	-6,7 %	-
Mk,EC / Md,BN		-	-	-28,7 %	-	12,0 %	-	-13,8 %	-
Mk, tavallinen, EC / Mk, lyhyt, BN		-	-	-3,8 %	-	3,6 %	-	-7,3 %	-
Mk,pitkä,EC / Mk,pitkä,BN		-	-	-6,7 %	-	-1,9 %	-	-4,2 %	-